



HAL
open science

**Vers une organisation éco-concevante :
Opérationnalisation de l'Analyse de Cycle de Vie en
conception par une simplification basée sur une
typologie en familles de produits,**

Héry Tsihoarana Andriankaja

► **To cite this version:**

Héry Tsihoarana Andriankaja. Vers une organisation éco-concevante: Opérationnalisation de l'Analyse de Cycle de Vie en conception par une simplification basée sur une typologie en familles de produits,. Autre. Ecole Centrale Paris, 2011. Français. NNT : 2011ECAP0054 . tel-00677429

HAL Id: tel-00677429

<https://theses.hal.science/tel-00677429>

Submitted on 9 Mar 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Ecole doctorale n° : 287

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur

de

L'Ecole Centrale de Paris

Spécialité : Génie Industriel

Présentée et soutenue publiquement

Par

Hery ANDRIANKAJA

Le 5 décembre 2011

VERS UNE ORGANISATION ECO-CONCEVANTE:

OPERATIONNALISATION DE L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE EN
CONCEPTION PAR UNE SIMPLIFICATION BASEE SUR UNE
TYPOLOGIE EN FAMILLES DE PRODUITS

Directeur de thèse : Dominique MILLET

Co-Directrice de thèse : Gwenola BERTOLUCI

Jury :

Améziane AOUSSAT, Professeur, Arts et Métiers Paris Tech

Benoît EYNARD, Professeur, Université de Technologie de Compiègne

Patrick ROUSSEAUX, Professeur, Université de Poitiers

Claudiù VASILESCU, Research Senior Manager, Faurecia ISBG

Dominique MILLET, Professeur, SUPMECA de Toulon

Gwenola BERTOLUCI, Maître de Conférences, AgroParisTech

Président

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Directeur de thèse

Co-Directrice de thèse

Laboratoire Ingénierie des Systèmes Mécaniques et Matériaux – EA 2336

SUPMECA

REMERCIEMENTS

Tout d'abord un grand merci à toi Dina. Tu as su me soutenir et me supporter, me divertir et parfois m'enquiquiner aussi, tout au long de mes travaux de thèse. Merci également à toute ma famille, à mes parents, à leur soutien inestimable depuis mon départ d'Antananarivo en 2004 afin de poursuivre mes études en France.

Merci infiniment Dominique et Gwenola pour cette coopération, de votre soutien et de m'avoir donné l'opportunité de réaliser ces travaux. Vous avez su me supporter, et vous avez été à la fois très rigoureux et très compréhensifs, non seulement dans le cadre de l'encadrement scientifique de mon travail mais également du côté personnel sur l'excentricité de mes caprices, à savoir : l'organisation dans mon travail, les retards, les livrables mal présentés, les diverses digressions

Je n'oublie pas de remercier vivement Loïc Jacqueson et Jean-Baptiste Molet, qui ont commencé ce projet avec nous mais le destin et les circonstances n'ont pas voulu qu'on finisse ensemble le projet. C'est à vous que je dois mon arrivée au sein de Faurecia pour pouvoir réaliser la partie pratique de ma thèse.

Un grand merci également aux membres du jury: Améziane Aoussat, Benoît Eynard, Patrick Rousseaux, Claudiu Vasilescu. Merci d'avoir accepté de juger mes travaux.

Un grand merci à l'équipe R&D de Faurecia Méru, notamment les départements de la Recherche et l'équipe du PoC Ecodesign. Merci de m'avoir intégré et soutenu tout au long de ce projet de thèse. Merci à Pierre, Sébastien et Arnaud qui m'ont aidé à concrétiser ma démarche, et c'est ainsi qu'un applicatif de EcoT a pu voir le jour...

Je remercie également l'ensemble du laboratoire Génie Industriel de Centrale Paris pour leur accueil, l'organisation de divers séminaires des doctorants pour se faire connaître et pour présenter les travaux de recherche; les bons moments partagés ensemble, notamment pendant les séminaires du labo...

Merci à Tous !!!

RESUME

Bien que l'évaluation environnementale soit pratiquée depuis plus de dix ans déjà dans le secteur automobile, sa mise en œuvre « systématique » a été jusqu'à présent limitée à la vérification par des experts « environnement » de la conformité des nouveaux produits aux contraintes imposées par la législation. Or, les évolutions des enjeux environnementaux et de la réglementation Européenne impliquent que la conception de produit s'appuie sur des évaluations environnementales des solutions de natures « systémiques ».

L'ACV est la seule approche véritablement reconnue pour mesurer la performance environnementale des systèmes sur l'ensemble de leur cycle de vie et identifier les étapes et les activités les plus impactantes du cycle de vie. Les résultats d'ACV permettent donc de prendre des mesures ou d'établir des stratégies de réduction des impacts environnementaux dès la phase de conception, en fournissant un retour d'expérience sur les solutions techniques évaluées. Pour ce faire, l'ACV doit être réellement intégrée et exploitée en temps réel dans le processus de conception. Cette condition est le seul moyen de « garantir » une « réelle et efficace » prise en compte de la performance environnementale des nouveaux produits dans les prises de décisions de conception. En effet, puisque une part importante de ces décisions revient aux concepteurs, l'implication de ces derniers dans l'évaluation environnementale est incontournable pour disposer d'un maximum d'espace d'éco-conception innovante.

L'ACV dans sa forme normalisée s'avère cependant trop complexe pour être directement intégrée dans le processus de conception. Par ailleurs, les résultats d'ACV ne sont pas uniquement « multicritères » mais s'expriment sous forme d'indicateurs décrivant les pressions exercées sur l'environnement dans un vocabulaire peu compréhensible aux concepteurs. Ces deux caractéristiques rendent la méthode peu exploitable pour les concepteurs. Des outils et méthodes d'ACV simplifiés ont été développés mais l'analyse bibliographique conduite a montré leur faible diffusion en secteur industriel. L'analyse de ces méthodes montre par ailleurs qu'elles ne répondent pas « totalement » aux difficultés d'appropriation de ces outils par les concepteurs et d'intégration dans le processus de conception des produits automobiles.

Pour résoudre ces problèmes, nous avons développé dans cette thèse une nouvelle méthodologie d'opérationnalisation de l'ACV en conception dont le modèle se structure selon trois principes. Le premier principe est basé sur une standardisation des hypothèses et du périmètre de la modélisation ACV pour un système produit dans une même entreprise. Le second principe consiste en la simplification de l'évaluation des impacts du cycle de vie par le passage aux « fonctions d'impacts », en vertu du premier principe. Le troisième principe vise à la simplification de l'interprétation des résultats d'ACV par les concepteurs, en

Opérationnalisation de l'analyse de cycle de vie en conception

réduisant le nombre de critères à prendre en compte et en facilitant leur compréhension grâce à la création d'un référentiel par familles de produits.

Ces trois principes ont été matérialisés dans un outil simplifié d'évaluation environnementale, nommé «EcoT». Son exploitation par les concepteurs conduit à l'obtention d'une analyse comparative d'éloignement et de proximité du profil d'un nouveau produit par rapport à sa «classe environnementale» sur quatre indicateurs identifiés comme cruciaux pour cette famille de produits.

Les classes environnementales ont été créées à partir de l'identification et le regroupement des produits selon leurs types et importances d'impacts. Ces paramètres ont été au préalable identifiés au moyen d'ACV réalisées sur un échantillon représentatif de produits déjà développés par l'entreprise. Ces classes sont «propres» à chaque famille de produits (tableaux de bord, panneaux de portes...).

Le modèle que nous avons construit a été expérimenté sur deux familles de produits : les tableaux de bord et les panneaux de portes. Nous avons développé un prototype informatique d'outil qui a été testé en entreprise, tout d'abord en bêta test puis dans le cadre d'un projet. Ces expérimentations ont permis de montrer la pertinence de l'approche (acceptation de l'outil et exploitabilité). Elles ont également mis en exergue la difficulté (à dominante économique) de faire prendre en compte les critères environnementaux au regard des nombreux critères des cahiers des charges des constructeurs et équipementiers automobiles.

ABSTRACT

Although the environmental assessment is performed for more than ten years in the automotive sector, its "systematic" implementation has been so far limited to checking the compliance of new products to the legislation constraints by the mean of "environment" experts. However, the growths in environmental issues and in the European regulations require that the environmental assessment of the solutions in the design is based on a "systemic" approach.

The LCA is the only well known approach for effectively measuring the environmental performance of systems throughout their life cycle and identifying the hot spots of the life cycle and the most polluting activities. The LCA results are then very helpful to develop strategies earlier in the design phase, for reducing the environmental impacts of new products by providing feedback of the evaluated technical solutions. To achieve this goal, the LCA must be integrated and real-time operated in the design process. This condition is the only way to "guarantee" a "real and effective" environmental performance consideration of new products in the design decision-making. Indeed, since a great part of decisions are up to

the designers, their involvement in the environmental assessment is essential to have a maximum space of eco-innovative design.

The LCA in its standard form appears too complex to be directly integrated into the design process. Moreover, the LCA results are not only "multicriteria" but expressed in the form of indicators describing "environment pressures". They are uncommon vocabularies for the designers. These two characteristics of LCA make it not usable for the designers. More simplified LCA methods and tools have been therefore developed but the literature review has shown first a lack of their diffusion in the industry. The analysis of these existing methods shows also that they do not fully meet the challenges related to the methods appropriation by the design team and the integration into the design process in automotive.

To solve these problems, we have developed in this thesis a new methodology to operationnalize the LCA in the design process. This new model for integrating LCA is structured according to three principles. The first principle is based on standardizing the assumptions, the goal and the scope definition of the LCA for the products systems from one company. The second principle exploits under the first principle the simplification of the life cycle impact assessment by the mean of "impact approximation functions". The third principle is to simplify the interpretation of LCA results by the designers, by reducing the number of criteria to consider and facilitating their understanding through the creation of environmental references for each product family.

These three principles have been embodied in a streamlined environmental assessment tool, called "EcoT." The tool usage leads to obtain a comparative analysis of the distance of a new product environmental profile from its "environmental class" on a few numbers of indicators identified as crucial for the product family.

The environmental classes were created from the identification and the clustering of products according to the types and magnitudes of the impacts. These elements were previously identified by conducting LCA on a representative sample of products already developed by the company. These classes are "inherent" for each product family (dashboard, door panels ...).

The created model was tested on two product families: the dashboard and the door panels. We have developed a computer prototype of the EcoT tool and it was tested in a company. A beta-test was first conducted, and then a real test was realized with a new dashboard project. These experiments have shown the relevance of the approach (the tool acceptance and usability). They also highlighted the difficulty (especially economic) to consider the environmental criteria under the other criteria or specifications from car makers and suppliers.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	17
PREMIERE PARTIE : CONTEXTE.....	21
Chapitre 1. Contexte du travail de recherche.....	22
I. L'évolution des besoins en matière d'évaluation environnementale des produits en contexte automobile.....	23
I.1. Le cadre des contraintes et des actions du secteur automobile dans la prise en compte de l'environnement en conception.....	23
I.1.1. Les textes réglementaires.....	23
I.1.1.1. Directive n°2008/33/CE sur les véhicules hors d'usage (VHU/ELV) :.....	24
I.1.1.2. Directive n° 1753/2000/CE :.....	25
I.1.1.3. Directive ROHS 2002/95/CE :.....	27
I.1.1.4. Directive REACH 2006/121/CE:.....	29
I.1.1.5. Conclusion	30
I.1.2. Les actions conduites par les constructeurs pour réduire les impacts environnementaux de leurs véhicules.....	32
I.1.2.1. L'allègement du véhicule.....	32
I.1.2.2. Les innovations matières et fonctions	32
I.1.2.3. Le contrôle et la réduction des émissions dans les habitacles de véhicules.....	33
I.1.2.4. L'optimisation du recyclage et de la valorisation du produit	33
I.1.2.5. La réduction des émissions de particules en motorisation Diesel	33
I.1.2.6. L'usage de motorisations de moins en moins polluantes	34
I.1.2.7. La technologie alternative aux énergies fossiles	34
I.1.2.8. Conclusion	34
I.1.3. Typologie des «indicateurs environnementaux».....	35
I.1.3.1. Catégories d'indicateurs environnementaux	35
I.1.3.2. Analyse et interprétation :	40
I.2. L'évolution des besoins en indicateurs pour mesurer la performance environnementale des produits automobiles.....	41
I.2.1. La perception des changements en cours qui induit cette évolution	41
I.2.2. L'ACV en contexte de l'industrie automobile.....	42
II. Le contexte de l'évaluation environnementale des produits chez Faurecia	44
II.1. L'équipementier Faurecia.....	44
II.2. La prise en compte des aspects environnementaux des produits chez Faurecia	45
II.2.1. Le processus d'innovation et de conception chez Faurecia - présentation des métiers... ..	45
II.2.2. Analyse de l'existant et définition du besoin dans le cadre de l'analyse environnementale	49
II.2.3. Une nécessité d'amélioration de la pratique de l'éco conception chez Faurecia:	51
DEUXIEME PARTIE : PROBLEMATIQUE.....	54

Chapitre 2. Problématique de recherche	55
I. Positionnement scientifique du travail de recherche	55
I.1. Les différentes approches d'intégration de l'environnement en entreprise	56
I.1.1. Historique	56
I.1.1.1. Les approches centrées sur une (des) étape(s) spécifique(s) du cycle de vie d'un produit	57
I.1.1.2. Les approches orientées « cycle de vie » d'un produit:.....	58
I.1.1.3. Les approches systémiques	59
I.1.2. Les niveaux d'intégration de l'environnement en entreprise	60
I.1.2.1. L'environnement comme une nouvelle contrainte	60
I.1.2.2. L'environnement comme un nouveau critère.....	61
I.1.2.3. L'environnement comme une nouvelle valeur	61
I.1.2.4. Synthèse	62
I.1.3. Les niveaux d'intégration de l'environnement en industrie automobile	62
I.1.4. La nécessité de l'orientation vers une approche environnementale intégrée au processus de	64
conception des produits.....	64
II. Problématique	66
II.1. L'évolution des outils et méthodes d'éco-conception	67
II.1.1. L'évolution de la classification des outils et méthodes d'aide à l'éco-conception.....	67
II.2. Notions sur l'intégration des outils et méthodes d'éco-conception dans le processus de	73
conception.....	73
II.2.1. La notion de cohérence entre les outils d'éco-conception et le processus de conception	73
II.2.2. Le triplet : outils, processus et acteurs	75
II.3. Problématique de l'intégration de l'ACV dans le processus de conception des produits	75
automobiles.....	75
II.3.1. Formulation du premier axe problématique lié à la qualité et la quantité des données...	78
II.3.2. Formulation du deuxième axe problématique lié à l'appropriation de l'évaluation	79
quantitative par l'équipe de conception	79
II.3.3. Formulation du troisième axe problématique lié à la simplification de l'ACV exhaustive	80
80	
II.4. Synthèse de la problématique et question de recherche.....	85
TROISIEME PARTIE : HYPOTHESES ET PROTOCOLE EXPERIMENTAL	87
Chapitre 3. Hypothèses et critères de validation.....	88
I. Les hypothèses du nouveau modèle d'intégration de l'ACV.....	89
I.1. Première hypothèse	89
I.2. Deuxième hypothèse	89
I.3. Troisième hypothèse.....	90
II. Etablissement de critères de validation des hypothèses	90
Chapitre 4. Protocole expérimental.....	94

Opérationnalisation de l'analyse de cycle de vie en conception

I. La phase de création et de développement de l'outil simplifié d'évaluation environnementale « EcoT » et de son système d'informations	94
II. La phase de validation de l'outil EcoT et de son système d'informations:.....	95
III. La phase d'intégration de EcoT dans le processus de conception :	96
IV. Synthèse du protocole expérimental	96

QUATRIEME PARTIE : EXPERIMENTATION ET RESULTATS..... 98

Chapitre 5. Conception de l'architecture d'EcoT et de son système d'informations 99

I. Les points d'ancrage des paramètres environnementaux dans le processus de conception de Faurecia	99
II. Identification d'une stratégie d'intégration de EcoT.....	102
II.1. Brève historique	102
II.2. Proposition de stratégies d'intégration de EcoT.....	104
II.3. Choix de l'architecture du système d'outils :	107

Chapitre 6. Développement de l'architecture d'EcoT et de son système d'informations. 109

I. Construction de la base initiale : base de données d'ACV relatives aux activités de « Faurecia Interior system »	109
I.1. Finalités	109
I.2. Modélisation du cycle de vie d'un produit « Faurecia Interior System » : cas de la famille « planche de bord ».....	110
I.2.1. Description du produit	110
I.2.2. Périmètre de l'étude et hypothèses de la modélisation	112
I.2.2.1. Système produit.....	112
I.2.2.2. Hypothèses de la modélisation - Règles d'inclusion et d'exclusion – règles des allocations	112
I.2.3. Evaluation des impacts du cycle de vie	122
I.2.4. Inventaire et sources des données modélisées	125
II. Modélisation de EcoT et de son système d'information	125
II.1. Protocole.....	125
II.2. Création des fonctionnalités de EcoT.....	127
II.2.1. Les fonctions d'impacts : la base de données d'EcoT.....	127
II.2.1.1. Principe.....	127
II.2.1.2. Application.....	128
II.2.1.3. Raisonnements sous-jacents.....	130
II.2.2. La typologie environnementale par famille de produits.....	131
II.2.2.1. Le contexte de la création de classes environnementales des produits	131
II.2.2.2. La nouvelle approche basée sur une « typologie environnementale par familles de produits »	132
II.2.2.3. Création d'une typologie environnementale pour la famille de produits « planche de bord »	136

Opérationnalisation de l'analyse de cycle de vie en conception

II.2.2.4. Reproduction de la méthode en vue de la création d'une typologie environnementale de la famille des panneaux de portes.....	145
II.3. La maquette de l'outil EcoT sur la famille « planches de bord »	147
II.4. Le prototype de l'outil EcoT « planche de bord » et de son système d'information	149
II.4.1. Composantes de EcoT et de son système d'information.....	149
II.4.2. Prototype fonctionnel.....	150
Chapitre 7. Expérimentation et intégration de l'outil EcoT	153
I. Tests de validation initiale	154
I.1. Protocole des tests	154
I.2. Convergence des fonctions d'impacts	155
I.3. Cohérence des profils environnementaux.....	156
I.4. Résultats de la validation initiale.....	156
II. Test de prise en main	159
II.1. Protocole du test	159
II.2. Déroulement du test.....	160
II.3. Compte rendu du test de prise en main et perception des participants	162
III. Test d'intégration	164
III.1. Protocole du test	164
III.2. Déroulement du test.....	165
III.3. Résultats du test d'intégration de EcoT	167
IV. Vers l'intégration d'EcoT dans le processus de conception des produits automobiles	173
IV.1. Le « plan de validation » en phase de pré transfert de EcoT dans le processus de conception de Faurecia 173	
IV.2. La validité des hypothèses posées sur la pertinence de l'approche EcoT à opérationnaliser l'ACV en conception	175
IV.3. Apports et limites du travail de recherche	178
IV.3.1. Contribution méthodologique de l'usage des ACV chez Faurecia	178
IV.3.2. Perspectives d'évolution vers une organisation interne éco-concevante.....	179
IV.3.3. Limites des résultats du travail de recherche	180
CONCLUSION GENERALE	182
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	185
DOCUMENTS ANNEXES.....	198

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	<i>Evolution des normes d'émissions pour les véhicules à moteurs diesel.</i>	23
Tableau 2.	<i>Evolution des normes d'émissions pour les véhicules à moteurs essence et GPL.</i>	24
Tableau 3.	<i>la typologie des indicateurs environnementaux : une analyse croisée des sources d'information pour observer les tendances actuelles sur la nature des indicateurs les plus utilisées par les industriels automobiles.</i>	39
Tableau 4.	<i>Processus d'innovation et acteurs impliqués</i>	48
Tableau 5.	<i>Processus de conception et acteurs impliqués</i>	49
Tableau 6.	<i>Synthèse des besoins environnementaux exprimés, en termes d'outils et pratiques.</i>	51
Tableau 7.	<i>Classification des outils spécifiques à l'éco-conception montrant leur finalité dans le processus de conception et leur périmètre de couverture des différentes étapes du cycle de vie d'un produit.</i>	72
Tableau 8.	<i>Synthèse des principales approches de simplification de l'évaluation environnementale.</i>	84
Tableau 9.	<i>Tableau d'analyse des hypothèses du système d'outils et les critères de validation.</i>	93
Tableau 10.	<i>Descriptif des stratégies d'intégration et analyse de faisabilité afin de proposer de solutions implicites pour EcoT et son système d'informations (source cahier des charges de EcoT)</i>	106
Tableau 11.	<i>Vue sommaire de la diversité des matériaux et procédés entrant dans la fabrication des planches de bord.</i>	111
Tableau 12.	<i>Les facteurs d'émissions de la phase d'utilisation (source NEDC, NREL)</i>	119
Tableau 13.	<i>Installations actuellement existantes pour le traitement des pièces plastiques démontées ou issues d'un tri post-broyage des RBA. Nous remarquons le traitement des déchets plastiques en provenance d'autres filières que l'automobile (source ADEME – BioIntelligence service 2008).</i>	120
Tableau 14.	<i>Les matières considérées recyclables dans notre cas de la modélisation de la fin de vie des produits « Faurecia Interior System »</i>	122
Tableau 15.	<i>Méthode utilisée pour l'évaluation des impacts environnementaux du cycle de vie des produits Faurecia.</i>	123
Tableau 16.	<i>Les unités d'œuvre des procédés sur le cycle de vie des produits Faurecia.</i>	127
Tableau 17.	<i>Le principe de la linéarité et de la non linéarité des fonctions d'impacts selon les raisonnements derrière l'ACV et les jeux de paramétrage des activités/procédés.</i>	130
Tableau 18.	<i>Facteurs physico-chimiques préliminairement retenus pour créer un espace produit initial.</i>	137
Tableau 19.	<i>Espace produit initial obtenu avec un échantillon de 11 ACV de produits existants avec leurs masses respectives, indiqués par les cases noircies.</i>	138
Tableau 20.	<i>facteurs de différenciation émergent du premier niveau d'investigation, permettant l'élaboration d'un plan factoriel composé de $4 * 6 = 24$ variables pour construire la typologie environnementale de la famille de produit « planches de bord »</i>	139
Tableau 21.	<i>Les 24 objets du plan factoriel, servant à construire la typologie environnementale de la famille des planches de bord</i>	141
Tableau 22.	<i>Les variances du partitionnement en 4 classes.</i>	142
Tableau 23.	<i>Les barycentres des classes et leurs coordonnées en impacts environnementaux exprimés en quantité d'impacts (contient une zone classée confidentielle)</i>	143
Tableau 24.	<i>Descripteurs qualitatifs des différentes classes environnementales des planches de bord pour guider les concepteurs dans le choix de la classe pour évaluer un nouveau produit sur EcoT</i>	143

Opérationnalisation de l'analyse de cycle de vie en conception

Tableau 25. Descripteurs quantitatifs des différentes classes environnementales des planches de bord. __	144
Tableau 26. Les référentiels environnementaux (cette partie contient une zone confidentielle) pour chaque classe de la typologie des planches de bord. Dans EcoT, les catégories d'impacts indiqués en niveau 1 seront ceux affichés systématiquement et les impacts à niveau zéro seront masqués. _____	145
Tableau 27. Facteurs de différenciation pour l'élaboration d'un plan factoriel composé de $(5*7) + (2*5) + (2*5) = 55$ variables pour construire la typologie environnementale de la famille de produits « panneaux de portes »	146
Tableau 28. Extrait des résultats des tests de cohérence des profils environnementaux de EcoT vs. GaBi dans le cadre du premier test de cohérence des résultats (les résultats d'évaluation affichés sont normalisés CML 2001-dec 07, world) _____	158
Tableau 29. Comparaison des profils environnementaux fournis par EcoT vs. GaBi dans le cadre du second test de cohérence des résultats _____	159
Tableau 30. Récapitulatif des temps nécessaires pour la réalisation de l'évaluation environnementale du projet suivant les deux méthodes ACV/GaBi et ACV simplifié/EcoT _____	167
Tableau 31. Extrait du contenu d'une fiche de validation de produit pour EcoT. _____	174
Tableau 32. Extrait du contenu d'une fiche de validation de procédure pour EcoT _____	174
Tableau 33. Statut de la validité des hypothèses mesurées pour démontrer la performance de la solution EcoT et de son système d'informations pour intégrer l'ACV en conception chez Faurecia _____	177
Tableau 34. Evolution de l'organisation de Faurecia induite par l'implantation d'EcoT dans le processus de conception.	180

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Émissions moyennes de CO2 des véhicules neufs entre 1995 et 2004 [CCE 2007].	27
Figure 2.	La cartographie des processus d'innovation et de conception chez Faurecia.	47
Figure 3.	Echelle environnementale et temporelle des différentes approches visant à réduire les impacts environnementaux [Janin 2000].	57
Figure 4.	la typologie des différentes démarches environnementales entreprises en milieux industriels [Jacqueson 2002], de [Millet et al. 2001].	60
Figure 5.	Intégration des aspects environnementaux dans le processus de conception de produit, d'après la norme [ISO/TR14062].	73
Figure 6.	Agencement des outils environnementaux dans le processus d'éco-conception, (d'après [Janin 2000]).	74
Figure 7.	Synthèse de la problématique de recherche.	86
Figure 8.	Synthèse du protocole Expérimental	97
Figure 9.	La cartographie de la cohérence entre le processus de conception de Faurecia et le modèle générique de Millet et al, montrant l'agencement de nos outils environnementaux à construire et à intégrer dans le processus de conception.	101
Figure 10.	Proposition d'une stratégie d'implantation de l'activité ACV (d'après R. Le Borgne)	103
Figure 11.	Les quatre stratégies esquissant l'architecture des outils dérivés de la simplification de l'ACV en vue de leur intégration au sein de l'équipe de conception (extraits du cahier des charges fonctionnel du système d'outils)	105
Figure 12.	Silhouette de l'architecture d'EcoT et de son système d'informations	108
Figure 13.	Vue éclatée d'une planche de bord montrant la hiérarchisation de ses composants essentiels (Exemple de la planche de bord d'une Peugeot 308, source : Faurecia R&D Méru)	115
Figure 14.	La répartition moyenne de la fraction plastique dans un véhicule léger moderne (source ADEME – Bio Intelligence service 2008).	120
Figure 15.	Les cinq scenarii pris en compte pour modéliser la phase de fin de vie d'une planche de bord.	124
Figure 16.	Synthèse du protocole de développement d'EcoT (par G. Bertoluci)	126
Figure 17.	Extraction de fonctions d'impacts à partir de la modélisation d'une activité / procédé dans un logiciel d'ACV: illustration du principe.	129
Figure 18.	La génération de l'espace produit paramétré	134
Figure 19.	La génération de l'espace des impacts environnementaux	134
Figure 20.	La génération de l'espace de la typologie environnementale dans une famille de produits.	135
Figure 21.	Extrait de l'exploitation conduite sur la première CAH	139
Figure 22.	Les résultats de la CAH des résultats d'ACV des 24 objets en termes de dissimilarités sur leurs impacts environnementaux – utilisation sur des véhicules à moteur essence sur 150000 km	141
Figure 23.	Les résultats de la CAH des résultats d'ACV des 24 objets en termes de dissimilarités sur leurs impacts environnementaux – utilisation sur des véhicules à moteur diesel sur 200000 km.	142
Figure 24.	synthèse du protocole de la création d'une typologie environnementale pour la famille panneaux de portes.	147
Figure 25.	Un écran de la maquette de EcoT montrant une feuille de saisie des données d'entrées	148
Figure 26.	Un écran de la maquette de EcoT montrant une feuille de présentation des résultats	149

Opérationnalisation de l'analyse de cycle de vie en conception

Figure 27.	Les composantes du prototype de l'outil EcoT et le processus de traitement de données. Les flèches en ligne continue indiquent les flux de données et les flèches en ligne interrompue représentent les flux d'information. BOM (Bill of Material), MDI (entrée manuelle des données), ADI (entrée automatique des données)	150
Figure 28.	Un extrait de la configuration d'un prototype fonctionnel d'EcoT: les interfaces de captage des données (MDI et ADI)	151
Figure 29.	Un extrait de la configuration d'un prototype Fonctionnel de l'outil EcoT : la base, le descripteur produits et les interfaces de présentation de résultats.	152
Figure 30.	La phase expérimentale de EcoT est conduite sous trois niveaux de tests	154
Figure 31.	Protocole du test de validation initiale d'EcoT	155
Figure 32.	Procédure de contrôle de la convergence et calage des modèles paramétrés	156
Figure 33.	Protocole du test de pris en main	160
Figure 34.	Les participants de l'atelier sur le test de prise en main de l'outil EcoT.	161
Figure 35.	La synthèse des recommandations d'amélioration d'EcoT émanant des participants en prévision de son intégration dans le processus de conception	163
Figure 36.	Protocole du test d'intégration de EcoT dans le processus de conception de Faurecia	164
Figure 37.	La conceptrice (au milieu) en train de réaliser une ACV simplifiée de son projet sur EcoT	165
Figure 38.	Profils environnementaux fournis par les ACV (GaBi) des 4 nouveaux concepts de la planche de bord du nouveau véhicule au regard de celui de la planche de bord du véhicule de référence. Ces ACV ont été réalisés par les experts ecodesign.	168
Figure 39.	Profils environnementaux obtenus par l'EcoT des 4 nouveaux concepts, réalisées par le concepteur. Ici, on voit apparaître une affectation deux à deux des concepts dans la classe 1 et 2 de la famille des planches de bord.	169
Figure 40.	Lecture détaillé des résultats d'EcoT (exemple du concept 3) et mesure de l'ampleur des impacts environnementaux par le principe éloignement/proximité ($\Delta i\%$) d'un produit par rapport aux références environnementales par classe (barycentres environnementaux)	172

LISTE DES ACRONYMES

ABS : Acrylonitrile butadiene styrene

ACV : Analyse du cycle de vie (LCA : Life cycle assessment)

ADI : Automatic data input

ADP : Abiotic depletion potential (mesure l'épuisement des ressources non renouvelables)

AP : Acidification potential (mesure l'acidification de l'atmosphère terrestre. Le phénomène de pluie acide)

BOM: Bill of materials (nomenclature produit)

BOP : Bought out parts (pièces sous-traitées)

C : configuration

CAH : Classification ascendante hiérarchique

CCE : Commission de la Communauté Européenne

CE : Communauté Européenne

CML : Centrum voor Milieuwetenschappen Leiden (Institut des Sciences de l'environnement)

COV: Composés organiques volatiles (anglais VOC)

Dir. : Directives européennes

DFE : Design for environment

DFX: Design for X (Environment, Recycling, Remanufacturing, Dismantling, Reuse...)

DP : Door Panels (jargon et anglais de la famille des panneaux de portes)

EcoT : Eco-assessment per environmental Typology

EICV : Evaluation des impacts du cycle de vie

EP : Eutrophication potential (mesure le potentiel d'eutrophisation de l'eau - l'apparition des algues vertes en surface dans un milieu aquatique)

EPDM : caoutchouc

FRC: Fuel reduction coefficient

GaBi© : Ganzheitliche Bilanzierung (Ingénierie du cycle de vie)

GF : Glass fibre (fibres de verre)

GWP : Global warming potential (mesure le potentiel de réchauffement climatique, résultat de l'effet de serre dû à l'activité humaine)

HF : Hemp fibre (fibres de chanvre)

ICV : Inventaire du cycle de vie

Opérationnalisation de l'analyse de cycle de vie en conception

IKP : Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde (Institute for polymer testing and polymer science, Stuttgart university)

IP : Instrument Panels (jargon de la famille des « planche de bord », anglais : dashboards)

M : Famille de matières

MD ; TD : charge minérale à base de talc

MP : Matières premières

MDI : Manual data input

MDS : Multidimensional scaling

OCDE: Organisation de Coopération et de Développement Economique

ODP : Ozone depletion potential (mesure le potentiel de destruction de la couche d'ozone, trou de la couche d'ozone)

P/E : Polypropylene/ Ethylene (copolymer)

PC : Polycarbonate

PE : Polyethylene

PET : Polyethylene terephthalate

PF : Procédé de fabrication, de mise en forme

PoC : Pôles de compétences

POCP : Photochemical ozone creation potential (mesure le potentiel de formation d'ozone basse altitude. C'est le phénomène de smog d'été)

PP : Polypropylene

PS : Polystyrène

PU : Polyuréthane

PUR : Polyuréthane flexible foam (mousse polyuréthane à base de polyol/isocyanate)

PVC : Polyvinyle chloride

RBA: Résidus de broyage automobile (anglais ASR: Automotive shredding residues)

RFQ : Request for quotation (jargon signifiant « appel d'offre »)

s : surfaces

S : technologie de surface

SAE: Society of Automotive Engineers

SUV: Sport utility vehicle

TPO: Thermoplastic olefin

UE (ou EU): Union Européenne (European Union)

Opérationnalisation de l'analyse de cycle de vie en conception

VHU: Véhicule hors d'usage (anglais ELV: end of life vehicle)

INTRODUCTION GENERALE

Opérationnalisation de l'analyse de cycle de vie en conception

Les préoccupations croissantes pour préserver l'environnement ont émergé de la prise de conscience par la société d'un monde fini face aux besoins en ressources et aux pollutions liées aux activités humaines. L'évolution des législations environnementales sur la production des biens et services fait aujourd'hui de l'économie des ressources, le traitement des déchets et la dépollution des enjeux sociétaux majeurs.

Il y a plus de trente ans, les actions environnementales étaient focalisées sur des mesures curatives. Ces approches qualifiées « end of pipe » ont vite montré leurs limites. L'approche environnementale jugée efficace et durable passe aujourd'hui par la voie d'une intégration systématique des aspects environnementaux dès la conception des biens et services, afin de pouvoir prévenir et réduire les impacts environnementaux sur tout le cycle de vie des produits, avant leur mise sur le marché.

Les critères environnementaux, qui doivent être pris en compte au même titre que les critères habituellement gérés en conception (le coût, la performance, la faisabilité technique, la satisfaction des attentes client...), sont à l'origine du terme « éco-conception », dans sa signification authentique. Ainsi l'éco-conception vise à développer les systèmes de biens et services dans le respect des principes du développement durable. Pour ce faire différents outils et méthodes ont été proposés aux concepteurs, mais la base de la démarche repose irréfutablement sur la réalisation d'une « Analyse de Cycle de Vie (ACV) »

Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre de l'amélioration de la pratique de l'évaluation environnementale et vise à apporter une contribution significative dans le secteur de l'industrie automobile. Bien que cette évaluation environnementale soit pratiquée depuis plus de dix ans déjà dans ce secteur, sa mise en œuvre systématique a été jusqu'à présent limitée à la vérification par des experts « environnement » de la conformité des nouveaux produits aux contraintes de la législation. Or, l'évolution des demandes des constructeurs automobiles, ainsi que l'évolution du contexte scientifique actuel dans le domaine de l'éco-conception, implique la nécessité d'une pratique systématique de l'évaluation environnementale par l'ACV. Pour ce faire, elle doit être intégrée dans le processus de conception. Cette condition est le seul moyen de « garantir » une « réelle et efficace » prise en compte de la performance environnementale des nouveaux produits dans les prises de décisions de conception. En effet, puisque une part importante de ces décisions revient aux concepteurs, l'implication de ces derniers dans l'évaluation environnementale est incontournable pour disposer d'un maximum d'espace d'éco-conception innovante.

L'ACV est la seule approche véritablement reconnue à l'heure actuelle pour mesurer la performance environnementale des systèmes sur l'ensemble de leur cycle de vie, du berceau jusqu'à la tombe, et identifier les étapes les plus impactantes du cycle de vie et

Opérationnalisation de l'analyse de cycle de vie en conception

des activités (usage de tels matériaux, procédés, traitement...) les plus polluantes. Ces résultats permettent donc de prendre des mesures ou d'établir des stratégies de réduction des impacts environnementaux en fournissant un retour d'expérience sur les solutions techniques évaluées.

L'appel à un expert environnement, pour mener cette évaluation, réduit nécessairement l'espace des solutions puisqu'il intervient en « post conception ». L'ACV dans sa forme normalisée s'avère en effet trop complexe pour être directement intégrée et utilisée par les concepteurs d'une même entreprise suivant des règles communes (du fait de l'ensemble important des décisions que la méthodologie ISO 14040 laisse la latitude de formuler au modélisateur). Plusieurs approches ont été proposées dans la littérature pour simplifier le concept de l'ACV, afin de faciliter son utilisation dans les phases amont du développement des produits. Un état de l'art sur ces approches existantes montre qu'elles sont généralement difficilement appropriables par les concepteurs et qu'elles génèrent des difficultés dues :

- aux temps et efforts de collecte des données requis pour permettre de modéliser le produit,
- à l'effort de la modélisation du cycle de vie du produit, au niveau des choix du périmètre et les limites du système à modéliser,
- à l'interprétation des résultats d'ACV, due au gap culturel entre le langage utilisé en conception et le langage spécifique de l'ACV (signification et échelle des indicateurs d'impacts).

Pour y remédier, nous proposons dans cette thèse une nouvelle méthode d'intégration de l'ACV dans le processus de conception des produits automobiles. Le champ expérimental offert par l'entreprise « Faurecia Interior System Business Group » nous a permis de :

- Développer un nouvel outil d'évaluation dénommé « EcoT » pour simplifier le concept de l'ACV et l'adapter aux produits de l'entreprise.
- Valider l'opérationnalité d'EcoT pour les concepteurs en vue de l'acceptation de son intégration dans le processus de l'entreprise.

Pour ce faire, le présent document se compose de quatre parties. Le premier chapitre a pour objet de décrire le contexte de l'évaluation environnementale en industrie automobile, afin de dégager les besoins d'évolutions de cette pratique en termes d'indicateurs et d'organisations.

La deuxième partie permet de positionner notre travail de recherche et de choisir les axes de la problématique liés aux difficultés majeures empêchant techniquement et méthodologiquement l'intégration de l'ACV dans le processus de conception des produits

Opérationnalisation de l'analyse de cycle de vie en conception

automobiles. La synthèse de la problématique et la formulation de la question de recherche concluront cette partie.

Les troisième et quatrième chapitres constituent la troisième partie de ce document, dans laquelle nous décrivons respectivement les hypothèses de la recherche et le protocole expérimental que nous avons élaboré.

La quatrième partie, qui contient les chapitres 5 à 7, nous permettra de détailler successivement la démarche de recherche de solution, les résultats obtenus et les expérimentations menées chez Faurecia pour évaluer la pertinence de notre solution. Ainsi, en chapitre 5, la démarche de conception de la solution EcoT est exposée. Le chapitre 6 porte sur le développement de l'outil EcoT, à savoir :

- *La création de deux éléments clés à la base du fonctionnement de EcoT : les « fonctions d'approximation des impacts », pour évaluer les produits sans avoir recours à la modélisation comme dans les ACV classiques ; et la « typologie environnementale en famille de produits », pour simplifier aux concepteurs l'interprétation des résultats d'ACV.*
- *Le maquettage et le prototypage d'un applicatif de l'outil EcoT, pour la famille des produits « planches de bord ».*

La robustesse de la méthodologie est initiée sur une autre famille de produits d'intérieur automobile, et nous illustrons également dans ce chapitre 6 le principe de la typologie environnementale en familles des panneaux de portes.

Dans le chapitre 7, nous présentons les expérimentations réalisées chez Faurecia pour tester la pertinence de l'outil EcoT au regard de la problématique et des hypothèses posées, son aptitude à rendre l'ACV opérationnelle pour les concepteurs, tout en fournissant des résultats de qualité comparable à ceux de l'ACV dans un délai plus réaliste dans l'univers de la conception.

Enfin une discussion sur les apports du travail de recherche, ses limites potentielles et les perspectives ouvertes par notre recherche concluront le document.

PREMIERE PARTIE : CONTEXTE

CHAPITRE 1. CONTEXTE DU TRAVAIL DE RECHERCHE

La prise en compte des contraintes environnementales imposées par la législation a amené les industriels de l'automobile à intégrer des experts chargés de la faire appliquer dans leurs activités. Par conséquent, les spécifications environnementales des constructeurs automobiles envers leurs équipementiers, ainsi que les demandes sociales se voient généralisées et induisent de plus en plus vers la recherche de matériaux et produits à faibles impacts sur l'environnement.

Il est important pour l'industrie automobile de pouvoir évaluer systématiquement les paramètres des nouveaux produits et composants permettant de répondre précisément aux exigences réglementaires. Pour autant ces paramètres ne sont plus suffisants dès lorsqu'on se réfère à la recherche d'une réelle qualité environnementale du produit. En effet, les indicateurs qu'impose la législation ne permettent pas de se former une représentation claire et systémique de la nature et l'ampleur des impacts du produit sur l'environnement, permettant de confirmer qu'une solution choisie a vraiment de faibles impacts.

Par ailleurs, comme l'éco-conception consiste à intégrer les contraintes environnementales dans les choix de solutions en conception, les acteurs du processus de conception, en tant que preneurs de décision, doivent intervenir dans cette évaluation de la performance environnementale du produit.

Ainsi, il serait pertinent de redéfinir quels indicateurs environnementaux renseigner, et quelle évolution de la structure organisationnelle doit être conduite pour créer une pratique véritable et cohérente de l'éco-conception dans l'industrie automobile. Dans ce premier chapitre, nous préciserons cette question en analysant tout d'abord le cadre des contraintes environnementales et des actions conduites actuellement au sein de l'industrie automobile. Cela nous permettra de définir le besoin en informations plus pertinentes pour renseigner les impacts environnementaux des produits automobiles, et d'en déduire les compléments à apporter en termes d'indicateurs environnementaux. Par la suite, nous présenterons un état des lieux de la pratique de l'éco-conception au sein de l'équipementier « Faurecia Interior System », en décrivant le cadre actuel de l'évaluation environnementale des produits au sein de l'entreprise, et en détaillant les résultats d'une analyse des besoins de l'équipe de conception sur la prise en compte de l'environnement dans leurs activités. Enfin, nous concluons le chapitre par l'énoncé du besoin d'intégrer une approche environnementale globale dans le processus de conception et de procéder à un changement organisationnel dans la pratique des industriels du secteur automobile, afin de leur permettre une véritable pratique de l'éco-conception.

I. L'évolution des besoins en matière d'évaluation environnementale des produits en contexte automobile

Dans cette section, nous exposerons en premier lieu les directives européennes, qui ont poussés le secteur automobile à prendre en compte les aspects environnementaux dans leurs activités. Plusieurs stratégies à caractères environnementales ont été ainsi mises en place par les constructeurs, et qu'ils imposent également à leurs équipementiers, pour s'efforcer de répondre systématiquement aux exigences réglementaires qui sont de plus en plus strictes. Ensuite, nous allons orienter le contexte dans une analyse concrète, concernant la pratique de l'évaluation environnementale au sein de l'équipementier Faurecia, qui nous ont offert le champ expérimental dans ce travail de recherche-action. En dernier lieu, nous formulerons le besoin industriel d'ajustement de cette pratique de l'évaluation environnementale, afin de pouvoir répondre systématiquement et correctement aux évolutions des exigences réglementaires et des demandes sociales.

I.1. Le cadre des contraintes et des actions du secteur automobile dans la prise en compte de l'environnement en conception

I.1.1. Les textes réglementaires

Les activités dans le secteur automobile (constructeurs et équipementiers) subissent aujourd'hui des demandes de plus en plus strictes en termes de réduction des émissions de gaz toxiques et de particules des véhicules de tourisme et des véhicules utilitaires légers [EC 715/2007] du 20 juin 2007, avec l'entrée en vigueur de la directive sur les normes Euro5 et Euro6 (Tableau 1 et Tableau 2).

Norme	Unité	Euro 1 (1993)	Euro 2 (1996)	Euro 3 (2000)	Euro 4 (2005)	Euro 5 (2011)	Euro 6 (2014)
Oxydes d'azote (NO _x)	mg/km	-	-	500	250	180	80
Monoxydes de carbone (CO)	mg/km	2720	1000	640	500	500	500
Hydrocarbures (HC)	mg/km	-	-	-	-	-	-
HC + NO _x	mg/km	970	900	560	300	230	170
Particules (PM)	mg/km	140	100	50	25	5	5

Tableau 1. Evolution des normes d'émissions pour les véhicules à moteurs diesel.

Norme	Unité	Euro 1 (1993)	Euro 2 (1996)	Euro 3 (2000)	Euro 4 (2005)	Euro 5 (2011)	Euro 6 (2014)
Oxydes d'azote (NO _x)	mg/km	-	-	150	80	60	60

Chapitre 1.

Monoxydes de carbone (CO)	mg/km	2720	2200	2200	1000	1000	1000
Hydrocarbures (HC)	mg/km	-	-	200	100	100	100
Particules (PM)	mg/km	-	-	-	-	5	5
Hydrocarbures non méthaniques (HCNM)	mg/km	-	-	-	-	68	68

Tableau 2. Evolution des normes d'émissions pour les véhicules à moteurs essence et GPL.

D'une manière générale, outre l'intensification des normes d'émission des véhicules, les directives européennes prenant en compte les aspects environnementaux des produits et impliquant fortement l'industrie automobile se sont multipliées depuis le début des années 2000 comme le montrent les paragraphes suivants.

I.1.1.1. Directive n°2008/33/CE sur les véhicules hors d'usage (VHU/ELV) :

Votée au Parlement de Bruxelles sous la dénomination [EC 53/2000] elle a eu comme conséquence directe l'apparition du thème « *environnement et recyclage* » dans les cahiers des charges des constructeurs. Cette directive impose, à compter du 1^{er} janvier 2006, que la conception des nouveaux véhicules permette 80% (en masse) de recyclage et réutilisation, 85% de valorisation totale. Une seconde phase d'évolution est programmée au 1^{er} janvier 2015 avec pour objectifs : 85% de recyclage/réutilisation et 95% de valorisation totale.

A compter de janvier 2006 la conception de véhicules de tourisme doit également respecter les interdictions de matériaux énoncés dans la ROHS. Il convient de noter que la nouvelle dénomination 2008/33/CE est issue d'un amendement de la directive n° 2000/53/EC du 11 mars 2008.

Le rapport de la commission des communautés européennes [CCE 2009] , en ce qui concerne le bilan de l'application effective de la directive (durant la période de 2005 à 2008), a indiqué que vingt-deux des États membres ont fourni à la Commission, des informations concernant les dispositions juridiques, réglementaires et administratives qu'ils ont adoptées. Tous les répondants ont déclaré avoir adopté des mesures encourageant les constructeurs automobiles, en liaison avec les fabricants de matériaux et d'équipements, à limiter l'utilisation de substances dangereuses dans les véhicules, à faciliter le démontage, la réutilisation et la valorisation et à intégrer une quantité croissante de matériaux recyclés dans les véhicules. En termes d'interdiction des matériaux énoncés dans la ROHS, la législation nationale restreint l'utilisation du plomb, du mercure, du cadmium et du chrome hexavalent pour les matériaux et composants des véhicules mis sur le marché après le 1^{er} juillet 2003.

Chapitre 1.

Dans tous les pays membres, des mesures ont été prises afin de garantir que tous les véhicules hors d'usage sont transférés vers des installations de traitement autorisées.

En 2006, concernant les taux de réutilisation/recyclage et réutilisation/valorisation, dix-neuf États membres ont atteint l'objectif de réutilisation/recyclage de 80% (la République tchèque et la France étaient très proches de l'objectif fixé). L'objectif de réutilisation/valorisation de 85% a été atteint par treize États membres (l'Espagne était sur le point d'atteindre l'objectif). Un état de la réalisation des objectifs fixés par la directive ELV par les États membres ayant fourni des informations à la CCE est consultable en annexe A de ce document.

En conclusion, plusieurs États membres, dont la France, n'ont pas encore atteint en 2009 les objectifs de réutilisation/recyclage/valorisation fixés par la directive ELV en 2006 et par conséquent la mise en oeuvre de la directive doit elle-même être poursuivie. Par ailleurs, le rapport CCE a conclu que les contrôles de conformité en cours (en ce qui concerne la modalité de transposition de la directive en droit national) et les réunions entre les États membres se poursuivront afin de remédier aux insuffisances observées dans la mise en oeuvre de cette législation communautaire.

Bien que ce rapport montre un succès mitigé, on peut considérer que la majorité des États membres a atteint, ou est proche d'atteindre, des taux de recyclage des véhicules de 75-80% de leur masse. Toutefois, ce ratio correspond quasiment aux masses métalliques d'une voiture et aux fluides extraits dans la dépollution. Or depuis une quarantaine d'années, le remplacement des alliages métalliques par les plastiques n'a cessé de croître. L'utilisation des matières plastiques est passée d'une moyenne de 2% de la masse totale du véhicule en 1965 à 12% vers 2005, et jusqu'à 18% de la masse totale d'un véhicule aujourd'hui. Ce changement oblige à ce que pour atteindre les objectifs de 85% de recyclage, et de 95% de valorisation des VHU en 2015, dictés par la directive 2008/33/CE, de réels aménagements des filières de valorisation et de recyclage des plastiques automobiles soient conduits [Maudet-Charbuillet 2009] .

I.1.1.2. Directive n° 1753/2000/CE :

Elle établit un programme de surveillance de la moyenne des émissions spécifiques de dioxyde de carbone dues aux véhicules particuliers neufs. Dans ce contexte, l'Union Européenne (UE par la suite dans le texte) a mis en place une stratégie de réduction des émissions de CO₂ des véhicules particuliers neufs fixant à 120g/km l'objectif à atteindre d'ici 2012.

Il est irréfutable que la voiture joue un rôle important dans la vie de tous les jours d'un grand nombre d'Européens, et l'industrie automobile est une source importante d'emplois dans de nombreux pays de l'Union Européenne. L'utilisation de la voiture influe cependant

Chapitre 1.

beaucoup sur le changement climatique, puisque environ 12 % des émissions globales de dioxyde de carbone (principal gaz à effet de serre) de l'UE proviennent du carburant consommé par les voitures particulières [1753/2000/CE] .

La technologie des moteurs d'automobiles a considérablement progressé en matière d'efficacité énergétique ce qui, par véhicule, se traduit par une réduction des émissions de CO₂. En contrepartie, l'augmentation du trafic (nombre de véhicules par foyer) est telle qu'au bilan la part des émissions liées à la circulation automobile ne cesse de croître. Ainsi, si l'UE dans son ensemble est parvenue à réduire ses émissions de gaz à effet de serre (GES) de près de 5 % entre 1990 et 2004, dans le même temps la part des émissions de CO₂ dues au secteur des transports a augmenté de 26 %.

Les progrès réalisés en termes de réduction des émissions de CO₂ jusqu'à présent ont été enregistrés suivant 3 axes :

- *La conclusion d'accords volontaires avec l'industrie automobile : plutôt que d'imposer aux constructeurs des normes d'émissions de CO₂ contraignantes, l'UE a choisi une stratégie par la voie des engagements volontaires entre les constructeurs automobiles européens (ACEA), japonais (JAMA) et coréens (KAMA) pour atteindre un objectif de réduction à 140 g CO₂/km en 2008-2009 (Figure 1);*
- *L'information au consommateur par le biais de l'étiquetage relatif à la consommation de carburant et aux émissions CO₂ sur toutes les voitures neuves ;*
- *Le recours à la fiscalité (taxes d'émission CO₂), pour promouvoir l'achat de voitures qui rejettent moins de CO₂. Toutefois, l'influence de cette mesure sur les émissions moyennes des voitures neuves, tant sur les fabricants que sur les consommateurs dans l'UE n'a pas encore été démontrée¹*

¹ En réalité, cette proposition de la Commission Européenne (5 Septembre 2005) a obtenu le soutien du Parlement européen, le 5 Septembre 2006. Le texte, adopté par 35 voix contre 21 par la très influente commission parlementaire à l'Industrie et à l'énergie, affaiblit considérablement les propositions de la Commission européenne, qui obligeait les constructeurs à réduire les émissions moyennes de CO₂ de leurs véhicules de 160 g/km environ à 120 g/km d'ici à 2012.... (<http://www.euractiv.com/fr/transport/co2-eurodputs-constructeurs-automobiles/article-175033>).

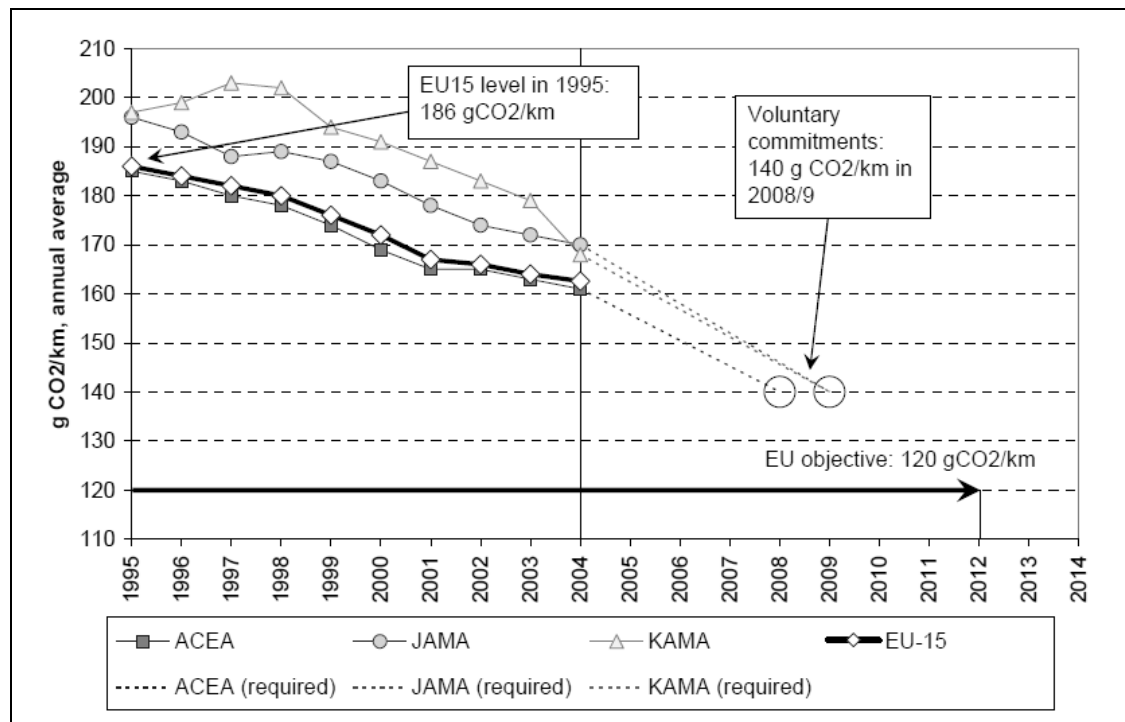


Figure 1. Émissions moyennes de CO2 des véhicules neufs entre 1995 et 2004[CCE 2007] .

La Commission des communautés européennes [CCE 2007] a toutefois constaté que, malgré les progrès réalisés pour se rapprocher de l'objectif volontaire de 140 g de CO₂/km d'ici à 2008-2009, l'objectif de 120 g de CO₂ /km que s'est fixé l'UE ne sera pas atteint à l'horizon 2012 en l'absence de mesures supplémentaires. Pour l'atteindre, la Commission prévoit de rendre obligatoire la réduction des émissions de CO₂ jusqu'à un niveau de 130 g de CO₂/km par le biais d'améliorations technologiques des moteurs (obligation pesant sur les constructeurs) et de réduire encore ces émissions de 10 g de CO₂/km grâce à d'autres améliorations technologiques (surveillance de la pression des pneus, systèmes de climatisation plus efficaces, etc.) et à un usage accru des biocarburants (un objectif de 20% d'énergie d'origine renouvelable d'ici 2020). Par ailleurs, la Commission prévoit également d'encourager l'achat de voitures moins consommatrices en carburant, notamment grâce à une amélioration de leur étiquetage et à des dispositions visant à ce que les taxes automobiles prélevées par les États membres tiennent compte des émissions de CO₂.

I.1.1.3. Directive ROHS 2002/95/CE :

Son entrée en vigueur en juillet 2006 a impliqué la limitation d'usage des substances dangereuses (Restriction of Hazardous Substances) comme du plomb, mercure, cadmium, chrome VI et des retardateurs de flammes bromés à une limite cumulée de 0,1% en masse (avec une restriction supplémentaire pour le cadmium qui est limité à 0,01% en masse) dans les appareils électriques et électroniques. Ainsi, l'application de la directive ROHS [2002/95/CE] dans l'automobile se traduit par la restriction, voire l'élimination des substances

Chapitre 1.

dangereuses que contiennent les équipements électromécaniques, électroniques et d'éventuels traitements de surfaces lors de la fabrication d'un nouveau véhicule.

En conséquence, dans le contexte automobile, la directive ROHS rejoint la directive VHU [Gutschling et Winter 2009] dans la mesure où cette dernière vise au final à «limiter l'utilisation des substances dangereuses dans la fabrication des composants des véhicules neufs et à «promouvoir la recyclabilité de ces véhicules lorsqu'ils arrivent en fin de vie».

Pour notamment, permettre la mise en œuvre de cette directive dans le secteur automobile, une base de données appelée « International Material Data System (IMDS) » a été d'abord créée par l'association de huit constructeurs² (Européens et Américains) en octobre 1999. IMDS est un système informatisé de données matériaux et composants conçu pour permettre à chaque sous traitant et constructeur de le consulter et de le renseigner. Il permet d'assurer la traçabilité des flux des matériaux utilisés dans les pièces et accessoires automobiles. IMDS exige que tous les fournisseurs du secteur automobile listent la composition chimique de toutes leurs pièces et leurs composants dans les assemblages et sous-ensembles des applications automobiles. Cela leur permet de détecter et d'éliminer les substances dangereuses à la source et de suivre les flux de matières de toutes les substances entrant dans le flux des déchets.

Pour réussir cette application, les huit constructeurs créateurs de la base, qui, avant la création d'IMDS, avaient leurs propres listes matériaux, les ont harmonisées en une liste commune appelée GADSL (Global Automotive Declarable Substances List). Cette dernière constitue donc l'ossature du système IMDS car elle permet d'identifier la présence de matières ou substances interdites. L'applicatif fournit également les valeurs seuils d'acceptation pour ces matières.

En termes de réussite, les grands constructeurs européens à l'origine d'IMDS ont progressivement adopté (au fur et à mesure de leur entrée dans le système au cours de la dernière décennie) l'usage du référentiel GADSL. En revanche, Renault continue à utiliser sa propre liste de substances BGO (Black, Grey, Orange), bien que ce constructeur français ait fait son entrée dans le système IMDS en 2006. Le constructeur français PSA Peugeot Citroën est absent du système IMDS (recensement en 2010). PSA Peugeot Citroën a utilisé depuis début 2004 son propre système d'information et de collecte « MACSI » (Material Composition Information System) pour recenser toutes les données relatives à la composition « masses et matières » des pièces de ses fournisseurs. Ce système lui permet également d'identifier la part matière recyclable et valorisable des pièces entrant dans la

² [Audi](#), [BMW](#), Daimler AG (ex [Daimler Chrysler](#)), [Ford](#), [General Motors](#), [Porsche](#), [Volkswagen](#) et [Volvo](#)

Chapitre 1.

composition de ses véhicules. Le système MACSI répond, par ailleurs, à l'exigence de conformité vis-à-vis des métaux lourds de la directive ROHS.

I.1.1.4. Directive REACH 2006/121/CE:

La directive REACH [2006/121/EC] vise à protéger la santé et l'environnement et à fournir des informations de meilleure qualité et d'une plus grande transparence sur les produits chimiques employés tant dans les activités industrielles que dans les produits mis à disposition du public. En fonction de la production annuelle ou des volumes d'importations effectués par chaque entreprise, les produits chimiques doivent donc être enregistrés et, dans certains cas, leurs impacts doivent être évalués. Les «substances particulièrement alarmantes» sont soumises à une procédure d'approbation réglementaire. La mise en œuvre de la directive REACH a débuté mi-2007 et son application complète doit être effective pour 2018. Cette mise en œuvre complète implique :

- *l'obligation pour les utilisateurs de substances (avec un volume de production annuelle de plus d'une tonne par fabricant ou importateur) d'évaluer les impacts environnementaux et sanitaires des substances employées dans leurs conditions d'usage;*
- *La mise en œuvre d'une suppression d'usage ou une protection contre les impacts des substances dangereuses.*

L'application de la directive REACH dans le contexte de l'automobile soulève de nombreux problèmes car elle génère:

- *des problèmes de gestion des priorités : sans produits chimiques, les véhicules ne peuvent être fabriqués, étant donné que tous les composants automobiles sont constitués de matières et de substances. Dans la réalité de l'industrie automobile, des produits fabriqués en dehors de l'Europe sont parfois importés dans l'UE, car des producteurs d'articles dans l'UE, notamment les constructeurs et les équipementiers (ex, moteurs, carrosserie, pare-chocs, planches de bord, etc.), importent des articles et substances de provenance hors UE (ex, vis en provenance de la Chine, magnésium de l'Australie, etc.), voire d'autres articles qui ne sont pas destinés à des véhicules mais qui sont également soumis aux exigences du règlement REACH (ex, des accessoires de machines-outils, des emballages). Or, la principale recommandation du « guide de déploiement de la REACH »³ [FIEV 2008] aux fournisseurs non européens de produits à des clients de l'UE est de désigner un « représentant exclusif » établi au sein de l'UE (autrement dit, que les exportateurs*

³ Guide de déploiement de l'industrie automobile relative au règlement REACH (traduite par la FIEV à partir de la AIG : Automotive Industry Guideline for REACH)

Chapitre 1.

s'acquittent des obligations des importateurs). Malheureusement, cette première priorité ne peut pas toujours être adoptée. Si les fournisseurs optent pour ne pas (ou ne sont pas en mesure de) désigner un « représentant exclusif » au sein de l'UE, d'autres options doivent être envisagées et privilégiées, dont l'ordre des priorités varie selon les stratégies et les politiques spécifiques à chaque entreprise, comme le changement de fournisseurs, l'emploi d'un produit de substitution, l'engagement de s'enregistrer en tant qu'importateur, en utilisant les données techniques requises fournies par le fournisseur non européen ou demander à un prestataire de services d'effectuer la procédure au nom de l'entreprise.

- *Les inquiétudes concernant les innovations et la compétitivité* : la composition de certains produits chimiques et des matériaux pourrait changer dans l'avenir et offrir des spécifications différentes. D'autres produits chimiques pourraient disparaître. Dans le cadre strict de la REACH, l'industrie automobile doit donc s'efforcer de maintenir la gamme des substances disponibles et de leurs applications. Dans le cas contraire, certaines innovations pourraient être mises en cause, lorsqu'elles sont liées au développement de nouveaux produits chimiques issus de la combinaison de substances existantes. Ainsi, en termes de compétitivité, une entreprise qui a investi depuis des années dans la recherche et le développement de tels produits ne va pas se focaliser sur les éventuelles propriétés dangereuses des produits dont elle tire profit, et friser l'illégalité quand cela lui permet d'augmenter ses bénéfices.

I.1.1.5. Conclusion

Les paragraphes qui précèdent montrent combien les obligations environnementales dans la conception des automobiles et de leurs composants sont croissantes pour les constructeurs.

Les directives rapportées dans les paragraphes précédents ont été identifiées comme un moteur fort à l'évolution des comportements des industriels automobiles pour la prise en compte de l'environnement au sein de leurs activités. Il en résulte une intensification des spécifications environnementales que les constructeurs transmettent à leurs équipementiers. Une solution intégrée, qui lie aujourd'hui les constructeurs et équipementiers est « la déclaration des substances » (utilisée dans GADSL ou des systèmes plus spécifiques développés par certains constructeurs), afin de faciliter la mise en conformité des produits aux trois autres directives (ELV, ROHS et REACH). Les impacts de la fin de vie des véhicules sur la conception ne sont pas dictés uniquement par la directive ELV [Konz 2009] . La directive sur la restriction d'utilisation de certaines substances dangereuses (ROHS) censure les matériaux comme le plomb, le mercure et le cadmium dans la production d'équipements électriques et électroniques. En outre, le règlement REACH impose les conditions de manipulation et d'élimination de certaines substances chimiques. Ces

Chapitre 1.

différents textes impactent donc la conception des composants automobiles. Ainsi, pour faciliter les efforts de recyclage et de valorisation (que vise la directive ELV) les constructeurs automobiles et équipementiers utilisent un standard sur les normes de codification et de listing des matériaux, qui permet justement l'identification des différents matériaux intégrés dans les produits automobiles lors du démontage.

En conséquence, comme l'indiquent [Gerrard et Kandlikar 2007], la mise en œuvre des textes réglementaires devrait entraîner des modifications sensibles des activités de conception des équipementiers et constructeurs. Parmi ces modifications, Gerrard cite :

- « *La conception des nouveaux véhicules, impliquant le changement de la composition des matières en : favorisant l'utilisation des matières recyclables et recyclés, en supprimant les substances interdites et en promouvant la conception orientée désassemblage, réutilisation, remanufacturing* » ;
- « *L'extension de la valorisation des VHU : réutilisation et remanufacturing des composants, recyclage des matières* » ;
- « *L'amélioration de la communication des informations concernant les véhicules sur : la codification des matières et substances déclarables, le désassemblage et les voies d'élimination des différents composants, la performance environnementale du traitement de fin de vie* ».

Outre l'évolution de la réglementation, la demande sociale [ADEME 2010] (colloque sur les produits verts et affichages environnementales), et la proposition croissante de produits présentant des performances environnementales améliorées sur le marché, amènent l'industrie automobile à devoir prendre de plus en plus en compte l'impact environnemental de la conception, fabrication, usage et fin de vie des véhicules qu'elle introduit sur le marché. En termes de reconnaissance sociale sur les préoccupations environnementales, l'observation par secteurs géographiques de [Sutherland et al.2004] a montré que les constructeurs européens sont leaders sur ce sujet, suivi de près par les constructeurs japonais, et les américains en troisième position.

Au bilan on constate que l'intégration de la réglementation est toujours d'actualité même si les résultats industriels s'améliorent sur ce point. Cette pression réglementaire se complète d'une demande croissante des consommateurs soutenue tant par une recherche de moindre coût d'achat et d'usage des produits que par l'émergence d'une conscience sociale et environnementale chez certains d'entre eux. En conséquence, les constructeurs doivent poursuivre leurs efforts afin d'être en mesure d'atteindre les performances requises, notamment en 2015 pour la directive ELV, par les réglementations au fur et à mesure que celles-ci se font plus exigeantes [Van Hemel 1998], [Jarratt et al.2003]. L'évaluation des impacts environnementaux des composants automobiles constitue de ce fait un sujet auquel

se confrontent les entreprises automobiles depuis une quinzaine d'années [Coppens et Le Coq 2002] , [Tonnelier 2002] , [Jacqueson et al. 2003] , [Schmidt et Taylor 2006] , [Kim et al. 2008] . En effet, en éco conception, les métriques tels que les taux de recyclés ou teneurs en certains matériaux ne peuvent constituer qu'une première marche de l'amélioration du profil environnemental des produits. Pour poursuivre l'amélioration et mettre en œuvre des solutions de conception radicalement différentes il devient rapidement indispensable de disposer de variables de décisions plus systémiques.

I.1.2. Les actions conduites par les constructeurs pour réduire les impacts environnementaux de leurs véhicules

Bien que les axes d'amélioration environnementale de l'industrie automobile diffèrent pour partie selon les pays⁴, les stratégies environnementales mises en œuvre et déclinées en termes de politique d'éco-conception des véhicules se recoupent sur les principaux leviers d'actions, comme :

I.1.2.1. L'allègement du véhicule

C'est un axe stratégique très apprécié par les industriels automobiles pour réduire les émissions à l'échappement. Les constructeurs ont recherché dans un premier temps des solutions type « *end of pipe* » permettant de traiter les gaz d'échappement, comme le pot catalytique. Ensuite, sont venus d'autres axes d'amélioration interdépendants comme la réduction de la masse et l'amélioration de l'aérodynamisme. La réduction de la masse et la diminution de la résistance de l'air agissent au final sur la consommation en carburant et donc sur les émissions de CO₂ et d'autres rejets polluants. Elles agissent également sur la consommation de carburant, qui est un critère apprécié des acheteurs.

I.1.2.2. Les innovations matières et fonctions

Un axe d'amélioration environnementale également exploré est la réduction à la base. Elle se traduit par l'usage préférentiel de matériaux renouvelables dont les biosourcés, et l'intégration de fonctions en vue de la minimisation de la quantité de matières employées, de

⁴ Selon Sutherland et al. [Sutherland et al.2004] , les constructeurs japonais ont concentré leurs efforts environnementaux sur la réduction des déchets solides et la consommation d'énergie/émissions CO₂ en phase d'utilisation des véhicules. En Europe, l'attention s'est portée sur la réduction des déchets solides, les émissions en phase d'usage et l'obtention de la certification ISO 14000 des sites de production. Aux Etats-Unis, ils sont dirigés vers la conformité aux réglementations gouvernementales (Environmental Protection Agency, <http://www.epa.gov/regulations/>) et la promotion de la sécurité des travailleurs.

la réduction du nombre de composants et de procédés associés. Ces stratégies d'innovation ont un objectif double : l'accroissement de la rentabilité économique-environnementale et l'allègement de la masse embarquée dans un véhicule.

I.1.2.3. Le contrôle et la réduction des émissions dans les habitacles de véhicules

L'intérieur de l'habitacle d'un véhicule contient une quantité importante de plastiques, du bois, du cuir, du textile, et nombre d'entre eux ont été installés avec des colles et vernis. Les produits d'intérieurs des voitures peuvent donc être une source importante de pollution intérieure. Des niveaux élevés d'émissions de COV (Composés Organiques Volatiles) émanant de l'intérieur des voitures neuves sont attestés par l'odeur caractéristique du « neuf » de l'habitacle. La prise de conscience de l'importance de la qualité de l'air dans l'habitacle a amené les constructeurs automobiles à développer des méthodes d'analyses des émissions COV & odeurs des matériaux et pièces d'habitacle. Des seuils d'acceptation concernant les émissions COV et odeurs des produits d'intérieur véhicule sont transmis aux équipementiers, dans les cahiers des charges⁵.

I.1.2.4. L'optimisation du recyclage et de la valorisation du produit

Améliorer l'aptitude au démontage versus la compatibilité des matériaux est un axe en cours d'exploration dans le secteur automobile pour optimiser le recyclage et la valorisation du produit en fin de vie. La conception d'un produit en vue de la simplification de son démontage peut présenter comme avantages :

- *De faciliter la réutilisation des pièces et composants, récupérant ainsi des matières en réduisant les coûts ;*
- *De favoriser le recyclage des matières, évitant ainsi à la source la manutention et l'élimination d'un grand volume de déchets ;*
- *De faciliter l'entretien et la réparation, réduisant ainsi les coûts de la maintenance.*

I.1.2.5. La réduction des émissions de particules en motorisation Diesel

La réduction de ces émissions polluantes est travaillée au travers des natures de filtres employés et des procédés de post combustion de ces particules. Le filtre à particules

⁵ La directive [2004-42/CE] du 21 avril 2004 est généralisée à la réduction des émissions de composés organiques volatils dues à l'utilisation de solvants organiques dans certains vernis et peintures, et dans les produits de retouche de véhicules. Les normes d'émissions concernant les pièces d'habitacle n'existent pas dans ce texte, mais font partie des demandes spécifiques des constructeurs aux équipementiers.

qui élimine les particules solides des gaz d'échappement, vient renforcer les améliorations technologiques de la motorisation. Chez PSA Peugeot Citroën par exemple, la nouvelle génération de filtres à particules lancée pour Euro 5 [EC 715/2007] vise en plus à réduire les émissions de dioxyde d'azote (gaz irritant pour les voies respiratoires).

I.1.2.6. L'usage de motorisations de moins en moins polluantes

Au tournant du troisième millénaire, les nouveaux moteurs à combustion interne des véhicules circulant dans les pays de l'OCDE émettent environ 95% de moins de polluants de l'air que leurs homologues le faisaient en 1975 [Graedel et Allenby 1998] . L'explication d'une telle évolution est l'application des normes d'émissions aux constructeurs automobiles [Orsato et Wells 2007] .

I.1.2.7. La technologie alternative aux énergies fossiles

A la lumière des réglementations de plus en plus strictes sur les émissions des véhicules et de la perspective de l'épuisement du pétrole, les constructeurs ont construit des programmes de recherche sur des technologies alternatives aux motorisations à carburants fossiles. L'objectif est d'orienter le marché automobile vers des solutions de rupture telles que les véhicules à piles combustibles, la motorisation électrique, etc....

I.1.2.8. Conclusion

Différents axes de travail sont ainsi explorés par les constructeurs et cela en cohérence avec les textes réglementaires qui ont été exposés précédemment.

En réalité, les premiers résultats qui ont eu des effets discernables sont essentiellement de natures « *end of pipe* ». Leur prise en compte dès la conception (conception pour la fin de vie par exemple) n'est encore que partielle [Bhander et al.2003] , [Ölundh 2006] , [Gerrard et Kandlikar 2007] . L'exposé conduit dans ce chapitre montre, par ailleurs, que les axes de travail et d'amélioration sont éparés. En conséquence, il ne se dégage pas de ces pratiques une évaluation cohérente et efficace des profils environnementaux des composants, sous-ensembles et véhicules qui seraient conduite chez les constructeurs et/ou équipementiers. Certes, des indicateurs sont renseignés et rapportent sur des aspects ponctuels importants (taux de recyclage, taux de recyclés, taux d'émission CO₂...), en conformité avec les réglementations. Néanmoins, ils ne permettent pas de couvrir la globalité du cycle de vie du produit et d'en mesurer ainsi la véritable influence sur l'environnement. En, effet ces indicateurs ciblent des sujets et des phases spécifiques du cycles de vies sans offrir une image globale des performances des produits. La question de cette mesure de la performance environnementale des solutions de conception demeure alors posée : quels indicateurs doivent être finalement pris en compte dans le secteur automobile pour évaluer les impacts du véhicule sur l'environnement ? Ces

indicateurs constituent ils une véritable aide à la prise de décision en conception de produit en vue de réduire la pression sur l'environnement de l'activité automobile ?

I.1.3. Typologie des « indicateurs environnementaux »

Pour répondre à la question précédente, nous allons montrer dans ce paragraphe un état de l'art sur la nature des indicateurs environnementaux, et analyser quels sont ceux actuellement pris en compte par le secteur automobile, systématiquement ou occasionnellement. Par ailleurs, rapportons également sur l'analyse du besoin industriel conduite chez Faurecia, comme étude de cas. Enfin, nous identifierons et généraliserons quel ajustement faut-il réaliser pour améliorer la pratique actuelle de l'évaluation environnementale en industrie automobile, afin de mieux répondre aux évolutions de la demande environnementale du marché.

I.1.3.1. Catégories d'indicateurs environnementaux

Le choix des indicateurs appropriés pour mesurer la performance environnementale est un défi important car ces indicateurs peuvent facilement être mal choisis, mal exprimés et mal utilisés ou tout simplement mal interprétés [Olsthoorn et al. 2000] , [Tam 2002] . Les niveaux de compréhension de chacun sont très variables et les définitions de vocabulaires souvent incertaines. Pour illustrer ces propos, la mesure du « taux d'intégration de matériaux verts » pourrait signifier « taux d'intégration des matériaux recyclés », ou « taux d'intégration de matériaux biosourcés », ou les deux, suivant l'entreprise ou même le service qui emploie cette expression. La focalisation uniquement sur le « taux d'émission CO₂ », pour rapporter à l'émission de gaz à effet de serre (GES) est également trompeuse car le méthane est, par exemple, un GES 23 fois plus puissant que le CO₂ (ne prendre en compte que le CO₂ peut donc être un raccourci très dangereux dans la prise de décision en conception).

Par ailleurs, les choix de critères d'évaluation environnementale doivent être conduits avec l'idée de l'évolution des volumes de ventes des véhicules. Alors qu'en 2000 le volume du marché de l'OCDE était de 580 millions de véhicules les prévisions pour le même marché s'élèvent à 850 millions de véhicules pour 2030 [OECD 2000] . Compte tenu de cette énorme augmentation attendue, la réduction des impacts environnementaux devient une priorité.

Définir des indicateurs permettant d'évaluer le profil environnemental d'un produit ou d'un composant est un exercice délicat. En l'occurrence, la question qui nous interroge est bien celle de l'impact environnemental et non celui de la durabilité (la question de l'évaluation sociale des produits n'est pas posée par exemple). Dans ce chapitre nous effectuons un bilan des critères environnementaux recommandés par la littérature pour

Chapitre 1.

permettre l'éco-conception de produits et ceux effectivement employés par les constructeurs automobiles.

Dans ce contexte, nous nous intéressons à la proposition de Tam [Tam 2002] sur les caractéristiques d'indicateurs préférables et la notion d'éco efficacité dans le contexte du secteur automobile. Tam distingue les indicateurs environnementaux selon leur usage dans le secteur automobile, comme:

- *Les indicateurs utilisés dans les rapports environnementaux : le potentiel de réchauffement global, la consommation d'énergie primaire totale, la consommation d'eau sur le cycle de vie d'un véhicule... délivrés par les professionnels de l'environnement d'une entreprise dans un rapport public. Les parties prenantes telles que les investisseurs institutionnels, actionnaires, régulateurs et les organisations non gouvernementales portent un intérêt croissant à ces rapports.*
- *Les indicateurs utilisés dans le contexte de la « durabilité » : [Sullivan et al.1998] ont présenté une liste d'indicateurs qui concernent les aspects environnementaux dans le secteur automobile (Tableau 3). Ainsi, des indicateurs comme la minimisation de matières ; la réduction de la consommation d'énergie ; la réduction des substances toxiques ; l'amélioration de la recyclabilité ; la maximisation de l'intégration des ressources renouvelables... pourraient être utilisés dans les processus de décisions en conception.*
- *Les indicateurs fonctionnels : qui ne se mesurent pas par unité de produit, mais plutôt par la fonction que ce produit remplit, par exemple la consommation de carburant pour 100 km parcourus, la quantité de CO₂ émis en gramme par kilomètre parcouru qui peut en être facilement dérivée, par le biais des facteurs d'émission définis par les organismes comme l'ADEME et le NEDC⁶.*

Dans cette hiérarchie proposée par Tam, on constate que la première catégorie est émergente et ne peut répondre aux besoins spécifiques de la réglementation sur la différenciation d'une solution donnée de conception. Elle est destinée à l'agrégation de données issues d'une évaluation systémique pour fournir des résultats plus globaux. La seconde et la troisième s'avèrent finalement assez proche de la situation actuelle des constructeurs automobiles Européens, ou en tous les cas des contraintes réglementaires qu'ils doivent satisfaire (comme l'a montré le chapitre 1.1.2). Par la suite, nous allons

⁵ NEDC : Le **New European Driving Cycle** aussi appelé le **Motor Vehicle Emissions Group (MVEG)**, est un cycle de conduite (20 mn) automobile conçu pour imiter de façon reproductible les conditions rencontrées sur les routes européennes. Il est principalement utilisé pour la mesure de la consommation et des émissions polluantes des véhicules.

Chapitre 1.

analyser comment l'industrie automobile traite véritablement de ces types d'indicateurs, en montrant à quel niveau d'information sont renseignées actuellement les contraintes imposées par la législation et comment sont évaluées les diverses stratégies d'amélioration environnementale (que nous avons cité tout au long du paragraphe précédent) mises en œuvre par l'industrie automobile.

Pour ce faire, nous avons réalisé une analyse croisée des exemples d'indicateurs illustrant la typologie de Tam, sur la base :

- *des spécifications les plus demandées par les constructeurs à leurs équipementiers (CM_i), sur la base de l'analyse des demandes environnementales adressées par cinq constructeurs à Faurecia,*
- *des interviews⁷ sur la base de la perception des acteurs métiers chez Faurecia, en ce qui concerne les besoins en indicateurs environnementaux. Ces besoins exprimés sont totalement couverts par les demandes des constructeurs,*
- *d'autres publications scientifiques référant les indicateurs d'impacts environnementaux,*

afin d'en déduire la nature des indicateurs les plus employés actuellement par les constructeurs et les équipementiers pour évaluer la performance environnementale des produits automobiles (Tableau 3).

⁷ Voir également au paragraphe II.2.1

Chapitre 1.

Thèmes		Indicateurs	Types [Tam 2002]	Références											
				Cinq « Car Manufacturers » dans les pays membres de l'OCDE					Publications scientifiques sur les indicateurs environnementaux						
				CM1	CM2	CM3	CM4	CM5	[Masui et Miyazaki 2000]	[Schmidt et Taylor 2006]	[Sullivan et al.1998]	ReCiPe (ex-EI99) [Goedkoop et al.2009]	CML2001 [Guinée et al.2001]	[Lim et Park 2009]	EPI [Dewulf et Duflou 2003]
Utilisation des matières		Gain en masse (kg/véhicule) ; (% kg pièce)	durabilité	X	X	X	X	X	X	X	X				X
		Substances dangereuses (Rohs)	durabilité	X	X	X	X	X	X	X					
		Intégration de recyclés (% pièces)	durabilité		X	X	X	X	X	X	X				
		Intégration de matières renouvelables (% pièces)	durabilité	X	X	X	X	X	X	X	X				
Bruit		Puissance sonore dans l'habitacle (dB)	durabilité						X	X					
Pollution	air	Emission CO ₂ (g/km)	fonctionnelle	X	X	X	X	X	X	X	X				X
		Autres polluants: NO _x , SO _x , Particules (g/km)	fonctionnelle	X	X	X	X	X	X	X	X				
		COV & odeurs habitacle (µg/g) ; (µg/m ³)	durabilité		X	X	X	X							
		Potentiel de formation d'ozone photochimique (kg ethene eq)	Rapports environnementaux										X	X	X
	eau	Potentiel d'eutrophisation	Rapports										X	X	

Chapitre 1.

		(Kg PO ₄ eq.)	environnementaux												
		Ecotoxicité de l'eau douce (kg DCB-eq)	Rapports environnementaux										X	X	
	sol	Toxicité des matériaux (REACH)	durabilité	X	X	X	X	X	X						
Utilisation des ressources fossiles		Minimisation de matière première (Kg/masse du système)	durabilité								X				
		Potentiel d'épuisement des ressources abiotiques (kg Sb eq)	Rapports environnementaux										X	X	X
Changement climatique		Potentiel de réchauffement global (kg CO ₂ eq)	Rapports environnementaux							X	X	X	X	X	
Qualité de l'écosystème		Ecotoxicité	Rapports environnementaux								X				
		Acidification et eutrophisation	Rapports environnementaux								X				
		Utilisation et transformation du sol	Rapports environnementaux								X				
Indices de recyclage		Taux de recyclabilité matière	durabilité			X					X			X	
		Facilité de démontage	durabilité			X									
		Temps de démontage	durabilité			X									
		Rendement économique	durabilité			X									
		Compatibilité des matériaux	durabilité			X									

Tableau 3. la typologie des indicateurs environnementaux : une analyse croisée des sources d'information pour observer les tendances actuelles sur la nature des indicateurs les plus utilisées par les industriels automobiles.

I.1.3.2. Analyse et interprétation :

En synthèse du tableau 3, et, selon la catégorisation de Tam, il ressort que les principales demandes des constructeurs couvrent systématiquement les exigences réglementaires et que les évaluations actuelles de la performance environnementale des produits automobiles sont plutôt orientées vers l'utilisation courante des indicateurs dans le contexte de la durabilité (ex, taux de recyclés) et des indicateurs fonctionnels (ex, CO₂ (g/km)). Par ailleurs, on peut remarquer qu'il n'y a ni une tendance ni un consensus sur le choix des indicateurs. Les indicateurs environnementaux peuvent en outre couvrir des demandes sociales, répondre à des attentes spécifiques de parties prenantes, ou être requis pour la réalisation d'une ACV d'un système d'ordre supérieur (le véhicule complet par exemple). Certes, certains aspects comme l'importance de la réduction de la masse (light weight concepts) pour limiter les émissions CO₂ pendant la phase d'utilisation du véhicule sont récurrents. Mais l'aspect systématique n'apparaît pas dans le cas de l'intégration des matières recyclées ou des matières issues de la biomasse, par exemple. Globalement l'image de l'évaluation environnementale conduite par les industriels de l'automobile qui s'exprime au travers de ce tableau est une marque d'incomplétude. Des critères très spécifiques sont employés, en fonction des besoins spécifiques d'une demande. Aucun constructeur n'affiche encore de démarche systématique, ni de sélection des critères d'évaluations environnementales qui permettent une approche globale d'évaluation, seule démarche permettant d'éviter les transferts d'impacts. A titre exceptionnel, des approches globales sont conduites avec des ACV et dans ce cas leur exploitation reste délicate notamment parce qu'étant exceptionnelles elles sont exploitables uniquement par des experts « environnement » et que ces derniers manquent d'historiques pour positionner leur résultats. Cependant, nous reviendrons sur ces cas de figures dans le chapitre suivant.

Ainsi, pour déterminer quels indicateurs supplémentaires les industriels automobiles devraient intégrer dans leurs pratiques il faut analyser la nature des indicateurs en fonction du type de décision qu'on peut en tirer, et de la méthode permettant de les renseigner. Nous proposons dans ce qui suit une nouvelle catégorisation de ces indicateurs, et nous introduisons les notions de:

- Métriques environnementaux d'ingénierie (environmental engineering metrics) : pour désigner les indicateurs renseignant directement des flux relatifs aux aspects techniques ou physico-chimiques d'un produit, dont les variations sont jugées a priori modificatrices des impacts environnementaux de ce produit (ex : consommation d'énergie (MJ), réduction de la masse (kg), taux d'intégration de recyclés (%), quantité d'émission COV et odeurs ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), émission CO₂ par km parcourue, etc...). Leurs méthodes d'évaluation sont souvent basées, soit sur un calcul direct via des

Chapitre 1.

bases de données moyennes (ADEME par exemple), soit sur des mesures sur sites par exemple.

- Indicateurs d'ACV : Comme leur nom l'indique, ces indicateurs peuvent être renseignés uniquement par la réalisation d'une « Analyse de Cycle de Vie » du produit. Selon les méthodes et approches d'évaluation disponibles (orientées problèmes ou dommages sur l'environnement), ces indicateurs donnent une vision globale du profil environnemental d'un produit en livrant des informations sur ses impacts environnementaux à chaque étape de son cycle de vie (ex : l'eutrophisation (kg PO₄ eq), le réchauffement climatique (kg CO₂ eq.), l'épuisement des ressources abiotiques (kg Sb eq.), l'écotoxicité (DALY), etc.).

I.2. L'évolution des besoins en indicateurs pour mesurer la performance environnementale des produits automobiles

I.2.1. La perception des changements en cours qui induit cette évolution

Nous avons montré dans le paragraphe précédent que les indicateurs environnementaux employés par les constructeurs et équipementiers sont variables et que leur agrégation n'assure pas la complétude de l'évaluation. Par ailleurs, cette forme d'évaluation, rendue possible par les systèmes d'informations en place dans les entreprises) est un bilan qui s'applique à la situation technologique existante c'est à dire dans le contexte des motorisations actuellement employées et des matériaux couramment exploités. Or comme nous l'avons vu précédemment la réglementation actuelle et les pressions géopolitiques associées à la disponibilité des ressources, poussent à ce que dans les années à venir de fortes innovations technologiques émergent tant en terme de motorisation (moteur électrique) que d'origines des matériaux employés (biosourcés). Dans ce futur contexte, il sera alors nécessaire d'intégrer de nouveaux aspects de contrôles des profils environnementaux des composants. En effet, les problématiques environnementales drainées par ces nouvelles technologies varieront de celles actuellement en œuvre. Ainsi, les impacts environnementaux majeurs comme l'épuisement des ressources, le réchauffement climatique, l'eutrophisation, l'occupation du sol, etc. ne sont pas mesurables aujourd'hui avec les systèmes d'informations qui parcourent la Supply Chain automobile actuellement. Par ailleurs, d'éventuels transferts de pollution peuvent se produire lors de changements de technologies ou d'origine des matériaux. Une nouvelle fois, le danger de l'évaluation par des métriques est qu'ils ne mesurent que ce que l'on pense à surveiller.

En conclusion, une évaluation environnementale jugée correcte et préventive des éventuels transferts d'impacts au regard des produits s'inscrivant dans tous les contextes décrits précédemment, nécessite, en complément de l'utilisation des métriques d'ingénierie,

Chapitre 1.

l'adjonction d'autres indicateurs qui ne sont pas évalués systématiquement aujourd'hui dans le secteur automobile. En particulier, dès lors que l'on s'intéresse à l'utilisation des matières à faibles émissions, des matières recyclées, des matières moins denses ou des matériaux issus de la biomasse il est indispensable de disposer d'outils d'évaluation environnementale globale et multicritère. Une question similaire de la globalité de la mesure se pose lorsque l'on est dans le cas d'une rupture technologique forte comme pour le passage des moteurs thermiques aux moteurs électriques. Nous pouvons donc énoncer que les indicateurs d'ingénierie doivent exister et constituent une part importante des déterminants du profil environnemental des produits pour répondre aux exigences la législation. En revanche, ils ne peuvent être employés seuls par les équipementiers et les constructeurs pour permettre une réelle éco-conception des équipements automobiles.

Les compléments d'informations seront donc à rechercher dans les indicateurs d'ACV, car l'ACV est le seul outil permettant une analyse environnementale à la fois systémique et quantitative. Il nous reste à identifier quelle liste d'indicateurs d'ACV doit être prise en compte et comment cette liste variera selon les impacts liés aux diversités de matières, à la diversité des technologies et de gammes de produits..

I.2.2. L'ACV en contexte de l'industrie automobile

Depuis une quinzaine d'années, les constructeurs automobiles [Le Borgne et Feuillard 1997] , [Eberle 2000] , [Schmidt et al. 2004] et les équipementiers [Muñoz et al.2006] , [Puri et al.2009] ont conduits des ACV et ont réfléchi sur comment mieux les prendre en compte dans le développement des produits automobiles. En réalité, l'influence des pressions politiques de différents niveaux (institutions européennes, lobby...), a été tout d'abord la principale raison qui a poussé les constructeurs à s'engager dans la conduite des ACV [Chanaron 2009] . En contexte de l'usage des ACV, si nous considérons les constructeurs précurseurs comme VW AG, BMW, Daimler Chrysler, Ford, Volvo, ils disposent dans leurs organisations une équipe de DFE formé d'un expert ACV et d'autres experts en provenance d'autres métiers (matières, process, design, manufacturing...). Cette équipe d'experts fonctionne en ingénierie collaborative pour mieux communiquer des impacts environnementaux des produits (en interne) et mieux exploiter les résultats des ACV, afin de faire évoluer son usage vers :

- l'évaluation des stratégies de réduction de masse et de la promotion du recyclage en fin de vie,
 - la recherche des alternatives de solutions matières, technologies et assemblages plus respectueux de l'environnement,
- afin de mieux répondre aux évolutions de la réglementation.

Chapitre 1.

Un exemple concret s'agit de l'usage de l'ACV comparative entre le procédé de recyclage mécanique par la voie de démontage, et de la technologie de recyclage VW Sicon process [Krinke et al.2006] , pour promouvoir le recyclage en fin de vie. VW Sicon est une technologie de recyclage qui a été développée conjointement par Volkswagen AG et Sicon GmbH. Le processus de VW-Sicon est basé sur le principe de générer des flux de matières à partir des véhicules en fin de vie par un traitement spécifique et le raffinement des résidus de broyage. Les matières acquises peuvent être ainsi utilisées comme matières premières secondaires substituant les matières premières vierges. Le processus de VW-Sicon est une approche axée sur le marché et prend en compte les potentialités du marché et les exigences des clients pour les matières produites. Des usines VW-Sicon sont actuellement en usage en Belgique, en Autriche et au Pays-Bas.

Les équipes DFE utilisent, par le biais des experts ACV, des logiciels commercialisés (comme GaBi, Simapro et Umberto, mais c'est le logiciel GaBi qui est utilisé par la majorité de ces constructeurs) pour évaluer les impacts environnementaux des produits, matières ou technologies. Des interfaces entre les outils d'ACV et les outils de gestion de données sont également développées chez certains constructeurs (on peut citer notamment les approches SlimLCI de VW [Koffler et Krinke 2008] et l'EPS model (SPINE database) de Volvo [Louis et Wendel 2001]), afin de faciliter le transfert des données techniques nécessaires pour conduire des ACV.

Une évaluation environnementale conduisant à un choix de solutions véritablement moins polluantes exige toutefois que la réalisation des ACV, ainsi que l'exploitation de ses résultats, doivent avoir lieu tout au long du processus de conception [Schiffleitner et al.2008] et impliquent « fortement » les concepteurs dans l'évaluation de la performance environnementale des solutions proposées, ainsi que la prise de décision qui en découlera [Kaïla et Hyvarinen 1996] . L'industrie automobile rencontre cependant plusieurs difficultés pour intégrer l'ACV dans le processus de conception du produit [Koffler et Krinke 2008] . La collecte de toutes les données requises pour la réalisation des ACV au plus tôt dans la phase de conception est difficile en raison du manque de données en quantité et en qualité [Chanaron 2009] . En outre, le manque d'expériences en ACV au sein des acteurs de la conception pour la modélisation du cycle de vie du produit et pour l'interprétation des résultats [Dewulf et Duflou 2003] , est une véritable barrière pour la mise en œuvre de l'ACV dans le processus de conception.

L'intégration effective des aspects environnementaux dans le processus de conception représente donc un défi complexe pour les concepteurs, les ingénieurs des procédés et les experts environnement au sein de l'industrie automobile [Keoleian et Kar 2003] .

Chapitre 1.

Ainsi, pour pouvoir évaluer systématiquement et améliorer réellement les performances environnementales des produits, il devient impératif que l'industrie automobile déploie systématiquement une approche globale d'évaluation, qui doit être « totalement intégrée » dans les pratiques de l'équipe de conception. Une telle évaluation doit être basée sur du « quantitatif », et « opérationnel » pour les concepteurs, tout en leur permettant de repérer sur le cycle de vie du produit :

- Les « x » *impacts potentiels (hot spots)*,
- L' (es) « y » *étape(s) la (es) plus critique(s)*,

afin de pouvoir les réduire et garantir à cet effet une conception de produit « réellement » respectueuse de l'environnement.

II. Le contexte de l'évaluation environnementale des produits chez Faurecia

Dans cette section, nous présenterons succinctement le groupe FAURECIA et plus particulièrement la division ISBG « Interior System Business Group », au sein de laquelle se sont déroulés nos travaux de recherche. Nous décrirons par la suite le contexte actuel de la pratique de l'évaluation environnementale au sein de l'entreprise.

II.1. L'équipementier Faurecia

La « mondialisation » de la production et de la vente des véhicules automobiles a renforcé le caractère concurrentiel de ce secteur et amené les constructeurs à se recentrer sur leurs métiers de base : la carrosserie et la motorisation. En conséquence, la fourniture de nombreux modules complexes de véhicules a été externalisée. Les équipementiers sont ainsi devenus totalement responsables de leurs produits, depuis la conception via la fabrication jusqu'à la livraison aux constructeurs.

FAURECIA est un équipementier automobile de taille mondiale, qui conçoit et fabrique pour différents constructeurs des modules intérieurs et extérieurs de véhicules : sièges, planches de bord, panneaux de portes, composants acoustiques, ainsi que des systèmes d'échappement. Les activités du groupe sont réparties sur 190 sites et implantées au sein de 29 pays, pour un effectif total de 60 000 employés.

L'activité « systèmes d'intérieurs » est présente dans 21 pays au niveau mondial dont 7 centres de recherche et développement. Au niveau européen, Faurecia ISBG conçoit et développe des produits Intérieurs véhicules (notamment les projets planches de bord et panneaux de portes) dans deux centres R&D : Méru (France) et Hagenbach (Allemagne).

La force d'un équipementier comme Faurecia repose aujourd'hui en grande partie sur sa capacité à innover, concevoir et à développer de nouvelles solutions permettant de

Chapitre 1.

remplir des fonctions de plus en plus complexes avec des coûts toujours plus optimisés et plus respectueux de l'environnement. Ces capacités d'innovation et de conception sont d'autant plus fondamentales, qu'en plus des évolutions fonctionnelles et technologiques des produits, les équipementiers doivent développer leur capacité à intégrer l'environnement dans leurs processus de conception de nouveaux produits.

II.2. La prise en compte des aspects environnementaux des produits chez Faurecia

II.2.1. Le processus d'innovation et de conception chez Faurecia - présentation des métiers

La procédure d'innovation, de création et de développement des produits au sein de Faurecia est basée sur un standard appelé « Program Management System (PMS) », une structure commune aux différentes divisions du groupe. Globalement, les programmes se déroulent en six phases, comprenant :

- *La phase de pré développement d'un projet : principalement matérialisée par la proposition de concepts en réponse à l'appel d'offre d'un constructeur ; le transfert d'une innovation aboutie, la création de la nomenclature du produit (BOM : bill of materials) ; le choix de concept du produit, le choix des procédés de fabrication et la proposition de l'architecture du produit;*
- *La phase de développement d'un projet : matérialisée par le développement de l'architecture définie du produit, des outillages et des procédés de fabrication associés;*
- *La phase de définition complète du produit, de sa validation et celle des procédés de fabrication associées;*
- *La phase de mise en place du système de production et outillages;*
- *La phase de lancement de la production;*
- *La phase de production en série.*

Dans ce qui suit, nous nous intéressons à la phase de « pré-développement d'un projet », qui correspond au processus de conception du produit chez Faurecia. Nous allons définir dans un premier temps les principaux acteurs métiers (R&D engineering) impliqués dans ce processus d'innovation et de conception au sein de Faurecia, dans le cas de l'entreprise « Faurecia Interior system ».

- *Le département du Design Industriel : a pour activités principales l'identification des nouvelles tendances du marché, l'étude des préférences des utilisateurs et la recherche du meilleur compromis entre l'aspect technique et esthétique du produit. Il*

Chapitre 1.

intervient comme support dans le processus d'innovation et de conception en valorisant et en illustrant les alternatives de concepts.

- *Le département de l'Innovation*: est composé d'ingénieurs de recherche ayant pour activité principale de générer les idées d'amélioration des produits et procédés de fabrication, de développer les idées nouvelles en concepts innovants pour être vendus aux constructeurs et intégrés dans des nouveaux projets de conception.
- *Le département des Pôles de compétences* : est assimilable à un bureau d'études, composé d'ingénieurs de spécialités différentes (ecodesign, matières, procédés de fabrication, technologies et traitements de surfaces, mécanismes, assemblages et parachèvements), ayant la mission principale d'expertise et d'assistance dans le processus d'innovation, de conception et de développement d'un produit, en supportant les problèmes de choix technologiques sur les matières, outillages, procédés de fabrication et en assurant la conformité des choix de matières/technologies et outillages aux standards définis.
- *Le département du Concept Engineering* : est composé des ingénieurs de concept. Ce sont les architectes du processus de conception, ayant pour missions principales :
 - La signature d'un programme en tant que membre du comité d'acquisition d'un nouveau projet (avec les autres départements de l'entreprise comme les achats, marketing, commercial, costing, manufacturing...),
 - La création des concepts et de la nomenclature d'un nouveau produit
 - La proposition de l'architecture du nouveau produit.

Le contenu détaillé du PMS est très complexe et est classée confidentielle par l'entreprise (y compris pour le processus d'innovation).

Nous avons « réduit » cette complexité tout en respectant la clause de confidentialité, en proposant par la suite dans la Figure 2 une cartographie des différentes étapes ainsi que la liaison entre les deux processus d'innovation et de conception.

Chapitre 1.

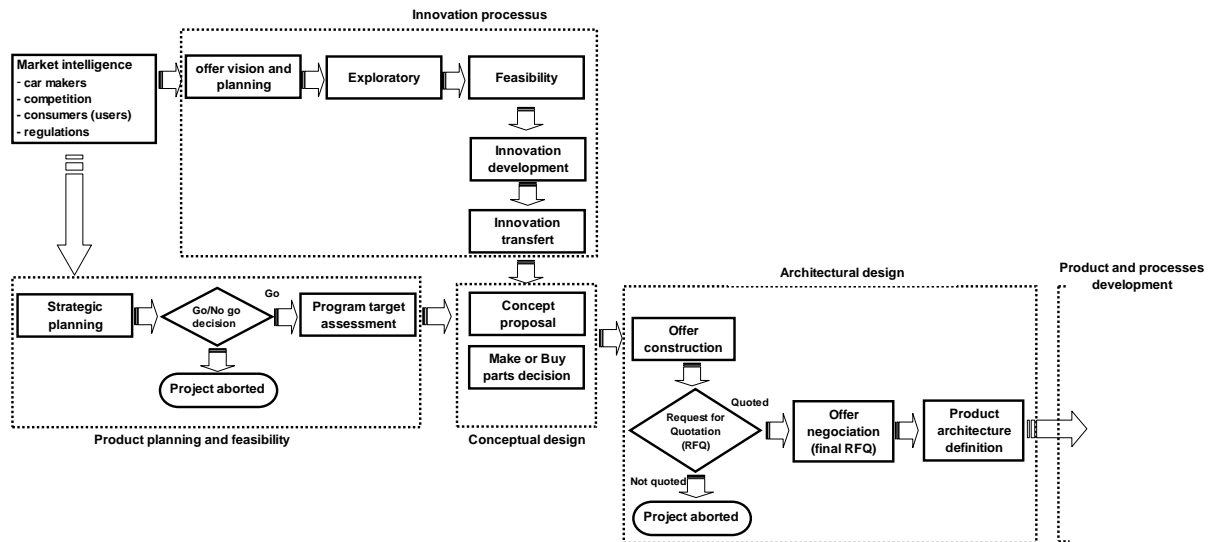


Figure 2. La cartographie des processus d'innovation et de conception chez Faurecia.

Les acteurs et leur participation dans les principales activités des processus d'innovation et de conception sont indiqués respectivement dans le Tableau 4 et dans le Tableau 5, qui démontrent, en d'autres termes, la transversalité de ces deux processus.

Processus d'innovation		Principaux métiers	Principaux livrables	Principaux acteurs métiers (R&D engineering)
Phase de génération et d'avancement d'un projet d'innovation	Vision de l'offre et plan produit	Identification de la tendance du marché ; Identification du segment de véhicule cible ; Identification des axes potentiels d'innovations ; Génération d'idées innovantes suivant les axes d'innovation.	Proposition d'idées d'innovation produit/process	Innovation, Design Industriel et benchmarking (acteurs principaux) Pôles de compétence et Concept engineering (assistance)
	Exploratoire	Exploration des risques et opportunités du projet ; Elaboration des propositions de concepts innovants.	Etat de l'art du projet (propriété industrielle, concurrent, analyse préliminaire de risques) et liste de propositions de concepts innovants	Innovation, Design industriel et benchmarking (acteurs principaux); Pôles de compétence; Concept engineering (assistance)
	Faisabilité	AMDEC produit/process ; Choix de concept.	Sketches et/ ou maquette du projet	Innovation, Concept Engineering (acteurs principaux) ; Pôles de compétence et Design industriel (assistance)
	Développement de l'innovation	Développement du concept innovant retenu, procédés de fabrication et	Description du produit et prototype (démonstrateur)	Innovation, pôles de compétences (acteurs principaux) ; Concept engineering

Chapitre 1.

		prototypage		(assistance)
	Transfert de l'innovation	Définition complète du concept innovant (produit et procédés de fabrication).	Plan de transfert produit/ procédés (du processus d'innovation vers le processus de conception)	Innovation, Concept engineering (acteurs principaux) ; Pôles de compétences (assistance)

Tableau 4. Processus d'innovation et acteurs impliqués

Processus de conception		Principaux métiers	Principaux livrables	principaux acteurs impliqués (R&D engineering)
Plan produit et faisabilité (acquisition et réception d'un appel d'offre d'un constructeur)	Planification	<p>Identification de la tendance du marché</p> <p>Identification du segment de véhicule cible</p> <p>Identification des priorités du client (constructeur)</p> <p>Exploration des risques et opportunités du projet</p>	Initial Program Business Plan (IPP)	Comité d'acquisition (représentant les services R&D engineering et d'autres services : achats, costing, commercial, qualité, manufacturing)
	Définition des objectifs (program targets definition)	<p>Transcription des priorités du client en objectifs ;</p> <p>Evaluation du prix/coût par ligne de produits</p>	<p>Customer Master Schedule (CMS)</p> <p>Budget total (développement, prototype, relation client/ fournisseurs)</p>	Comité d'acquisition ; Pôles de compétences et costing
Phase de conception conceptuelle	Proposition de concepts ; Make or Buy decision	<p>Propositions techniques (analyse fonctionnelle et caractéristiques clés du produit) ;</p> <p>Intégration d'une innovation aboutie (transfert)</p> <p>AMDEC (produit/process ; coût, qualité, performances...)</p> <p>Création des concepts et nomenclature produit (Bill of Materials) ;</p> <p>Nomination des fournisseurs experts pour les pièces à sous-traiter (bought parts).</p>	Cahier des charges du projet (CE book)	Concept engineering ; Pôles de compétences ; Innovation (cas de transfert d'une innovation) ; Design industriel (assistance)
Phase de conception architecturale	Construction de l'offre	Proposition d'architecture du nouveau produit	Maquette Virtuelle Numérique (NVM)	Concept engineering
	Définition de l'architecture du nouveau produit	Validation de l'architecture finale intégrant les éventuelles mises à	Design validation plan (DVP)	Concept Engineering

		jour des spécifications du constructeur.		
--	--	--	--	--

Tableau 5. Processus de conception et acteurs impliqués

II.2.2. Analyse de l'existant et définition du besoin dans le cadre de l'analyse environnementale

Afin de clarifier la vision que les concepteurs de Faurecia ont véritablement de la problématique environnementale en conception de produits nous avons conduit des interviews⁸ auprès des différents acteurs métiers impliqués dans ce processus de conception : les ingénieurs de concept, les ingénieurs de recherche, les designers industriels et ingénieurs des pôles de compétences. Ces interviews ont permis d'identifier les outils et pratiques existants. Ainsi, il apparaît que dans le cadre de la conduite de l'évaluation environnementale chez Faurecia, les indicateurs environnementaux qui sont pris en compte peuvent l'être de façon systématique ou non (cf. §I.1.3) :

- *Sont systématiquement renseignés ceux transmis par les constructeurs à l'équipementier, (par une déclinaison des exigences réglementaires de réduction des émissions en contraintes massiques des composants).*
- *Sont parfois renseignés (selon les constructeurs et les projets): les demandes de présence ou non d'un matériau, contrôles des taux de COV & des odeurs à l'intérieur des véhicules, taux d'intégration de matières recyclés, taux d'intégration de matériaux renouvelables.*

Les critères environnementaux évoqués ci-dessus sont renseignés par les experts environnement de Faurecia qui recueillent auprès des concepteurs les données techniques nécessaires à leur évaluation. Par ailleurs ces interviews nous ont également permis de percevoir les attentes effectives des acteurs métiers de Faurecia (Tableau 6).

⁸ Huit séries d'interviews de 45 minutes auprès de 2 représentants (le responsable et un opérationnel) de chacun des 4 principaux départements.

Chapitre 1.

Départements interrogés	Pratiques existantes au sein de l'organisation	Perception du problème de l'intégration de l'éco conception et du besoin d'évolution en termes de pratiques
Pôles de compétences	<p>Les pôles de compétences traitent du critère environnement en phase d'innovation et en phase de planification produit. Ceci étant dans l'objectif de répondre aux contraintes de la réglementation (cf. tableau 3), mais il n'existe que rarement des modifications dans les projets de conception en vue de d'améliorer un profil environnemental de produit sur des critères autres que ceux exigés par la réglementation et les normes. Les coûts induits par de telles évolutions constituent, par ailleurs, un frein majeur.</p> <p>L'équipe Ecodesign fait partie du département des pôles de compétences et est totalement à la charge de l'évaluation des aspects environnementaux des produits. Ils assurent systématiquement aujourd'hui la vérification de la conformité des produits à la réglementation (IMDS, Reach, aptitude au recyclage). Par ailleurs, des critères rapportant aux émissions odeurs et COV des pièces à l'intérieur d'un véhicule sont également mesurés, sur demandes spécifiques des constructeurs, à savoir : COV totaux ($\mu\text{g/g}$ material) et ($\mu\text{g}/\text{m}^3$.part), Formaldéhyde (idem), VOC nC6-nC16 (idem), Intensité globale d'odeurs (qualitative), descripteurs réducteurs (qualitative), Hédonisme (qualitative).</p>	<p>Perception du problème :</p> <p>Dans l'état actuel des connaissances et des moyens une intervention sur la conception du produit pour améliorer son profil environnemental ne peut être qu'intuitive.</p> <p>Comment intégrer une contrainte supplémentaire par rapport à toutes celles qui établissent déjà le cahier des charges des produits ? Cette question se pose tant en termes techniques qu'en termes de disponibilités des personnes pour traiter de cet aspect.</p> <p>Besoins exprimés :</p> <p>Nécessité d'un nouvel outil d'évaluation environnemental fournissant des informations pertinentes en un bref délai sur des alternatives de solutions, des arguments décisifs concernant les choix technologiques : informations sur les impacts sur l'environnement du choix technologique.</p>
Ingénierie des concepts (Concept engineering)	<p>Le département du Concept Engineering traite de la problématique environnementale dès la phase d'acquisition d'un projet, par la réception des contraintes environnementales des constructeurs, puis l'étude avec le pôle Eco design sur la quantité de matériaux, des substances utilisées, la masse... pour respecter les contraintes environnementales des constructeurs. Cependant le plus fort challenge reste toujours sur les prix et les coûts.</p>	<p>Perception du problème :</p> <p>Comment aligner l'environnement avec les autres stratégies de l'entreprise, pour qu'il y ait une intervention environnementale plus efficace en conception ? Pour atteindre une telle perspective la contrainte budgétaire devrait être moins prégnante.</p> <p>Besoins exprimés :</p> <p>Outil de report d'informations environnementales sur l'allègement du poids et l'intégration des matériaux recyclés.</p> <p>Un outil à indicateurs d'impacts évolutif (sur la nature des impacts pris en compte), en fonction de des évolutions technologique set des innovations conduites sur les produits Faurecia.</p>
Design Industriel	<p>Le critère « environnement » apparaît souvent dans le cahier des charges, mais la perception de l'importance du sujet au sein du design n'est que récente. La prise en compte de l'environnement en conception n'est pas encore systématique.</p>	<p>Perception du problème :</p> <p>Comment mener des actions environnementales ayant une sensibilité considérable pour l'entreprise, pour un réel changement?</p> <p>Besoins exprimés :</p> <p>Evaluation quantitative difficile à ce stade trop en amont. Un retour de connaissances à l'issue de l'évaluation environnementale conduite sur des projets en phase ultérieure permettrait en revanche de découvrir les liens entre les impacts environnementaux et les propositions initiales de design.</p>

Recherche et Innovation	<p>La prise en compte du critère « environnement » n'est pas encore une préoccupation volontaire du service innovation.</p> <p>La prise en compte de cet aspect est considérée comme à la charge du pôle Eco design qui a pour rôle de guider et promouvoir des innovations plus respectueuses de l'environnement.</p>	<p>Perception du problème :</p> <p>Comment mesurer en innovation des actions effectives pour aller vers une tendance de plus en plus respectueuse de l'environnement, sans compromettre les autres critères de conception ?</p> <p>Besoins exprimés :</p> <p>Un outil guide pratique sur ce qu'est l'éco-conception et les moyens et outils à déployer pour eco-innover.</p> <p>Accroître les liens avec l'équipe ecodesign permettre le transfert de connaissances.</p> <p>Un outil d'interface entre les impacts environnementaux et des axes majeurs de conception des pièces :</p> <p>allègements ; intégration de fonctions</p> <p>aspect désassemblage en fin de vie</p> <p>taux de réutilisation/recyclage des composants</p> <p>Quelle voie de destination des matières en fins de vies ?...</p>
-------------------------	--	--

Tableau 6. Synthèse des besoins environnementaux exprimés, en termes d'outils et pratiques.

II.2.3. Une nécessité d'amélioration de la pratique de l'éco conception chez Faurecia:

L'analyse du contexte industriel présentée dans cette première partie fait apparaître différents points essentiels pour l'orientation de nos travaux et la définition de la problématique de recherche. D'une part, la prise en compte de l'environnement est déjà tout à fait effective dans les pratiques de travail de l'entreprise. Toutefois, les niveaux d'appréhension des problèmes liés à l'intégration de l'éco conception varient selon les départements. Il semble que l'évaluation des aspects environnementaux soit entièrement dévolue aux experts « environnement » du pôle Eco design. Ainsi, les « métriques d'ingénierie », se rapportant aux spécifications des constructeurs sont renseignés par eux au moyen de données qui leurs sont transmises parfois systématiquement (par rapport à un stade d'avancement du projet) mais également sur demandes express de ces mêmes experts (il n'existe donc pas de processus formalisés et sécurisé informatiquement comme l'existence d'un jalon projet interdisant sa poursuite en cas d'absence de données). Par ailleurs, comme il a été déjà démontré dans le contexte (§ I.1 et I.2), ne sont encore traités, ni les véritables impacts des matières fossiles sur l'environnement comme le potentiel de réchauffement global et l'épuisement des ressources abiotiques, ni les aspects (comme les impacts sur l'eutrophisation de l'eau, l'occupation des sols ou les pertes de disponibilité de nourriture...) liés à l'usage industriel des agro produits.

Chapitre 1.

Une projection des tendances actuelles semblent indiquer que les constructeurs vont demander de plus en plus d'indicateurs qui relèvent plus de résultats systémiques requérant une ACV. Cependant, au sein de l'équipementier Faurecia, l'ACV n'est utilisée que dans de rares cas liés à une demande explicite d'un constructeur. Dans ces situations seuls les experts Eco Design sont impliqués et s'occupent de la transmission des informations recueillies vers le client : l'ACV n'est pas intégrée aux processus. Les acteurs métiers, qui ne connaissent pas l'ACV, expriment des besoins :

- *d'outils de quantification de ces impacts environnementaux et d'outils permettant de prendre en compte les évolutions technologiques à venir,*
- *d'apports de connaissances sur l'interprétation des résultats obtenus et des moyens de les exploiter,*
- *la nécessité de ne pas accroître lourdement la charge de travail dans un contexte cognitif déjà chargé pour les concepteurs*
- *de respect des temps de développement des phases projet qui interdisent la conduite d'études de longues durées.*

Les entretiens menés montrent également une volonté d'intégrer des pratiques de l'éco-conception, et ce, malgré l'importance des changements à opérer.

De ce fait, il devient impératif de développer des formes dynamiques d'évaluations environnementales qui puissent s'intégrer directement et totalement aux processus de conception de l'entreprise afin de répondre systématiquement aux nouveaux niveaux d'informations requis.

En effet, les concepteurs, étant à la fois les créateurs du produit et les décideurs, sont les plus qualifiés pour prendre des décisions favorables à l'environnement, quand ils disposent des supports et informations nécessaires [Kaïla et Hyvarinen 1996] . Il est donc impératif d'impliquer ces acteurs de conception dans la prise en compte de l'environnement de façon routinière. Pour l'équipementier Faurecia, cette situation est une source de complexité car il doit être capable d'intégrer à la fois l'évolution de la réglementation, ses propres objectifs de progrès et la pluralité des positions de ses clients dans un domaine en évolution permanente, celui de l'environnement. Si ce contexte est déjà une routine pour les critères de conception quotidiennement gérés par l'entreprise (coût, délai, qualité, masse...), elle est nouvelle en matière de la prise en compte effective de l'environnement en conception des produits, dans le cadre du développement durable [Jacqueson 2002] .

Pour conclure ce premier chapitre, nous validons le besoin pour une organisation industrielle automobile de passer du stade où l'évaluation environnementale des produits est uniquement réalisée avec des métriques d'ingénierie et conduite par les « experts de l'environnement », vers un état où les impacts majeurs sont données par une ACV et

Chapitre 1.

renseignés systématiquement. Dans ce nouveau système industriel, l'évaluation et la prise de décision pour l'amélioration de la performance environnementale des produits seront réalisées par l'équipe de conception. Cela nécessitera la « migration » d'une partie de connaissances environnementales des experts « environnement » vers l'ensemble des acteurs de la conception. Dans ce cadre, le nouveau système industriel implique une pratique collaborative et cohérente de l'éco-conception entre les experts « environnement » et l'équipe de conception.

DEUXIEME PARTIE : PROBLEMATIQUE

CHAPITRE 2. PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE

Après avoir décrit le contexte, nous allons à présent aborder la notion fondamentale de notre travail de recherche: *l'intégration de l'environnement par l'opérationnalisation de l'ACV en conception de produits automobiles.*

Si la prise en compte des aspects environnementaux des produits fait déjà partie des activités de l'industrie automobile depuis des années, l'intégration de connaissances environnementales dans les pratiques des acteurs du processus de conception de produits automobiles, leur permettant de contribuer à l'optimisation de la performance environnementale de leur système, se situe dans une phase embryonnaire. En effet, la problématique de l'intégration systématique des considérations environnementales dans la conception des produits, fait actuellement l'objet de différentes activités de recherche dans les milieux universitaires et industriels [Pierini et Schiavone 2006] , parce que les entreprises manifestent un intérêt croissant pour la conception de produits et de processus qui soient écologiquement rationnels. Cet intérêt est particulièrement important dans les secteurs industriels concernés par des réglementations environnementales contraignantes et en perpétuelle évolution comme le secteur de l'emballage, des produits électriques et électroniques, et de l'automobile [Jacqueson 2002] .

Ce deuxième chapitre propose une analyse approfondie de cette situation pour définir des axes majeurs dans la problématique liée à l'intégration de l'éco-conception en industrie automobile. Cela permettra de poser par la suite la question de recherche, à laquelle cette thèse apporte sa contribution, dans le cadre d'un travail de recherche –action au sein de l'équipementier Faurecia.

Ainsi, ce chapitre commence par un préliminaire sur les divers points de vue concernant l' « *intégration de l'environnement en conception* » de produits et services. Nous présentons une synthèse des différentes approches appliquées pour réduire les impacts environnementaux de produits. Nous choisissons ensuite les axes d'éclairage de la problématique liés à l'intégration de l'évaluation quantitative par l'ACV en conception. Un état de l'art spécifique des approches existantes pour remédier aux problèmes majeurs posés par l'ACV est présenté avant de conclure le chapitre par la formulation de notre problématique de recherche.

I. Positionnement scientifique du travail de recherche

Dans cette première section du deuxième chapitre, nous exposerons les différentes approches permettant aux entreprises d'intégrer les paramètres environnementaux dans leurs pratiques. Un focus sur les niveaux d'intégration de l'environnement en industrie

automobile permettra par la suite de centrer notre travail de recherche-action dans une démarche intégrative de l'environnement dans le processus de conception.

I.1. Les différentes approches d'intégration de l'environnement en entreprise

I.1.1. Historique

Plusieurs classifications des approches d'intégration de l'environnement en entreprises ont été proposées dans la littérature, s'efforçant généralement d'identifier leurs périmètres d'actions. Depuis une quinzaine d'années, les travaux d'une équipe de recherche du Georgia Institute of Technology (*Stewart Coulter et Bert Bras*) ont permis d'identifier sept approches différentes de réduction des impacts environnementaux des produits en fonction de l'étendue de leur prise en compte sur une échelle temporelle [Janin 2000] (Figure 3). Trois classes d'approches ont été ainsi définies dans ces travaux, à savoir :

- *Celles qui sont appliquées au sein d'une seule étape du cycle de vie, ou se concentrent sur certains étapes spécifiques du cycle de vie d'un produit, par exemple : l'ingénierie de l'environnement et la prévention de pollution ;*
- *Celles qui couvrent toutes les étapes du cycle de vie d'un produit : DFE (design for environment), ECDM (environmentally conscious design and manufacturing), LCD (life cycle design) ;*
- *Celles qui vont au-delà du cycle de vie d'un seul produit et font la promotion d'approches systémiques: la notion d'écologie industrielle et du développement durable.*

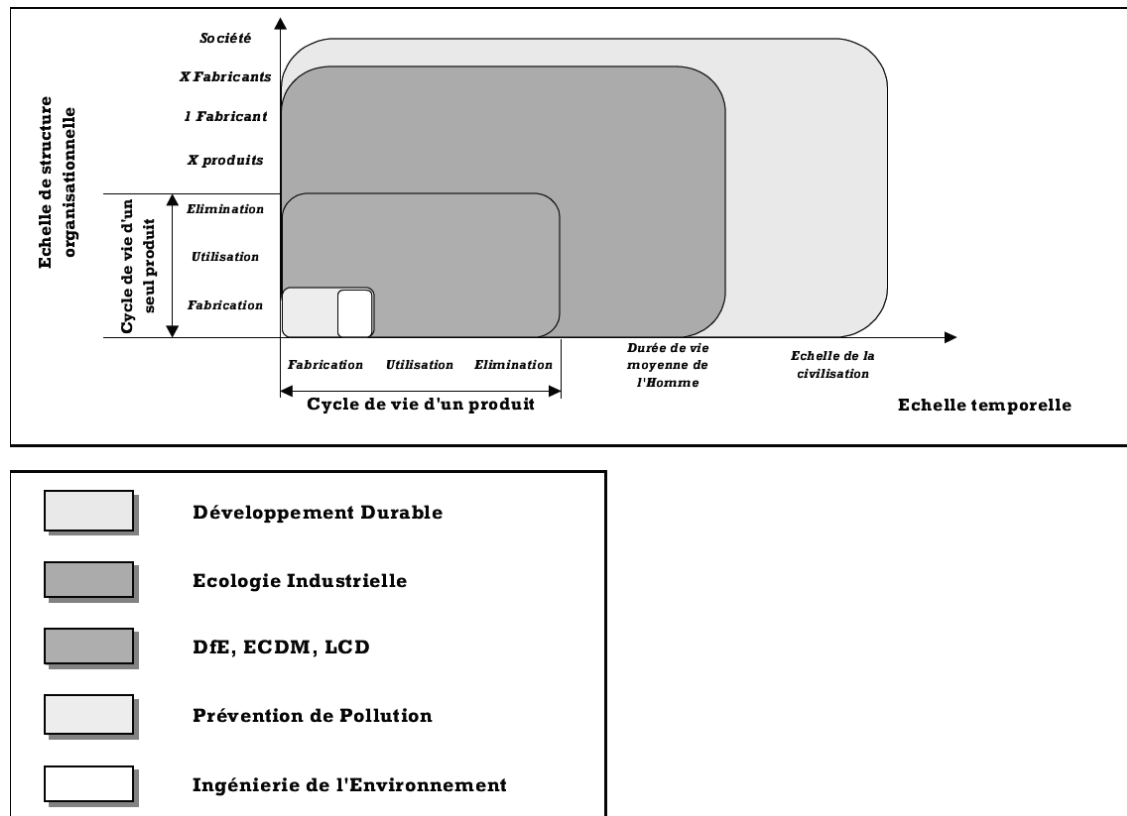


Figure 3. Echelle environnementale et temporelle des différentes approches visant à réduire les impacts environnementaux [Janin 2000] .

Les paragraphes suivants approfondissent ces trois classes d'approches, issues des travaux de [Bras 1997], et reprises ensuite par [Janin 2000] et par [Jacqueson 2002] pour décrire la notion de l'intégration de l'environnement en entreprise.

I.1.1.1. Les approches centrées sur une (des) étape(s) spécifique(s) du cycle de vie d'un produit

Le « management environnemental des sites de production (MESP) », sous son aspect traditionnel, visait à minimiser les impacts environnementaux engendrés lors de la fabrication des produits par la gestion et le contrôle des polluants dans l'eau, les rejets atmosphériques et les déchets solides. Cette approche inclut la nature des traitements de dépollution appliqués par l'usine (approche dite « end of pipe »). Cette pratique était coutumière dans les premières actions des entreprises en matière d'environnement au cours des années 70. Cette approche initiale a évolué vers la « prévention de la pollution », qui fit son apparition en Europe au cours des années 90, visant en plus du traitement des rejets d'usines, au recyclage des déchets de fabrication. Les efforts de prévention de la pollution sont donc plus larges que les efforts traditionnels du MESP. Toutefois ces approches restent focalisées sur l'étape de fabrication du produit.

Depuis les années 90, l'expression « Design for X » est apparue pour englober un large éventail d'approches de conception de produits [Huang et Mak 1997] , afin de relier les

exigences des clients à certains critères tels que la robustesse, la fonctionnalité, la fiabilité et les impacts sur l'environnement. Dans ce contexte, si on parle de critères de conception axés sur l'environnement, diverses approches récentes comme la conception pour le recyclage, la conception pour le remanufacturing, etc... sont également centrées sur des étapes spécifiques du cycle de vie d'un produit.

Ces démarches élargissent donc le cadre du MESP. Toutefois, elles ne demeurent focalisées que sur certains aspects environnementaux et étapes spécifiques du cycle de vie, ce qui peut nuire à d'autres aspects et peut rendre le produit moins respectueux de l'environnement dans l'ensemble de son cycle de vie. Cette réflexion a conduit différents acteurs (chercheurs, sociétés civiles, certaines entreprises...) à préférer une orientation vers des approches qui englobent le cycle de vie complet du produit.

I.1.1.2. Les approches orientées « cycle de vie » d'un produit:

[Tomiyama et al 1997] ont décrit ces approches comme étant une approche holistique et systémique qui fournit une plus grande capacité à réduire l'impact environnemental des produits et des processus associés. Ainsi, les préoccupations environnementales comprennent dans ce cas toutes les étapes du cycle de vie, au-delà du champ d'application de la prévention de la pollution afin d'inclure les impacts résultant de l'utilisation et de l'élimination de ce produit.

La conception consciente de l'environnement (ECDM) recouvre la conception du couple produit et process [Wanyama et Ertas 2003] . Dans cette approche, l'idée est que les concepteurs soient conscients, dans leurs activités, des effets environnementaux négatifs sur l'ensemble du cycle de vie du produit, en incluant des contraintes dans leurs réflexions pour limiter ces effets [Stuart et Sommerville 1998] .

L'approche « conception pour l'environnement (DFE) est un concept qui intègre la dimension « environnement » dans la conception du produit, au même titre que les autres critères gérés habituellement par les concepteurs (coûts, qualités, performances...). Elle est considérée comme une approche multicritère du DFX [Hauschild et al.2005] car elle regroupe par complémentarité plusieurs critères de conception axées sur la dimension « environnement » dans les approches de DFX [Santos-Reyes et Lawlor-Wright 2001] , [Ciechanowski et al.2007] . Ainsi, selon le concept du DFE, un produit sera d'autant mieux conçu pour l'environnement que plusieurs critères environnementaux et toutes les étapes du cycle de vie, ont été considérés au cours de sa conception [Janin 2000] .

L'approche « conception pour le cycle de vie » (LCD) est une approche qualifiée du berceau à la tombe (cycle de vie complet) d'un produit, avec l'objectif de fournir les informations les plus complètes possibles sur le profil environnemental du produit au concepteur. La mise en œuvre de cette approche nécessite des connaissances

multidisciplinaires et sous entend une acquisition de connaissances environnementales suffisantes par le concepteur, permettant à ce dernier à concevoir un produit, dont les impacts potentiels auront été identifiés et minimisés.

I.1.1.3. Les approches systémiques

L'utilisation de l'expression « écologie industrielle », indique qu'on ne se limite pas au périmètre du cycle de vie d'un seul produit, mais qu'on prend en compte les interactions de cycles de vies de plusieurs produits et process des fabricants. On parle ainsi d'un système industriel qui englobe une diversité de produits fabriqués dans des industries n'appartenant pas nécessairement à un même secteur industriel. Ces différents secteurs s'efforcent de réduire l'impact de l'utilisation de l'énergie, des matériaux etc...en échangeant des co-produits. Ils doivent donc travailler ensemble pour réduire les impacts environnementaux du système industriel, dépassant ainsi l'horizon d'une durée de vie humaine. Cette approche s'inspire des échanges multiples existants entre les écosystèmes biologiques et considère que le système industriel doit être intégré à part entière dans l'écosystème terrestre et non plus considéré uniquement comme une source de nuisances.

Il est difficile de donner une définition précise de ces concepts [Commoner 1997], [Oldenburg 1997], [De Bruijn et Hofman 2000], mais il est bien plus simple de les illustrer par quelques exemples :

- *Le parc éco industriel de Kalundborg (Danemark), qui associe plusieurs entreprises au sein d'une même zone géographique [Heeres et al.2004], [Jacobsen 2009].*
- *Le « Zero Emission Research Initiatives (ZERI) » de Gunter Pauli [Pauli 2010], qui vise à concourir à l'augmentation de la biodiversité et intègrent entre autres les principes de bouclage des flux matière et énergie, d'investissement dans le capital social, le bio mimétisme, l'économie circulaire, l'économie de fonctionnalités et tendent vers le zéro déchets. Dans ce concept, chaque population est considérée capable de répondre à tous ses besoins primaires avec ce dont elle dispose localement.*
- *La directive de l'UE du 8 mai 2003, visant à promouvoir l'utilisation de biocarburants ou autres carburants renouvelables dans les transports [2003/30/CE] : la rationalisation de la consommation des ressources fossiles dans le transport par la promotion des sources d'énergies renouvelables est considérée comme un moyen de réaliser les objectifs d'engagements dans la lutte contre le changement climatique [Di Lucia et Nilsson 2007].*

Le développement durable (*rapport Brundtland 1987*) est l'approche la plus large concernant la prise en compte temporelle et spatiale du problème environnemental. Dans ce concept, la préoccupation associée à la maîtrise du développement de la croissance

industrielle et économique est tempérée du souci d'une équité sociale à l'échelle mondiale et dans l'espace temps de notre civilisation.

1.1.2. Les niveaux d'intégration de l'environnement en entreprise

En réalité, la concrétisation de toute démarche environnementale, quelle que soit l'échelle de la structure organisationnelle défini par Bras, ne va pas de soi car les niveaux d'intégration varient d'une entreprise à l'autre suivant sa prise en considération de l'environnement, comme une nouvelle contrainte, un nouveau critère ou une nouvelle valeur. Dans cette vision, la classification de [Millet et al.2001] paraît plus réaliste que le modèle de Bras. La classification de Millet et al consiste à positionner les différentes approches environnementales en fonction, d'une part de l'ordre chronologique de leur émergence dans l'entreprise et d'autre part, de l'importance de la transformation induite dans l'entreprise (Figure 4).

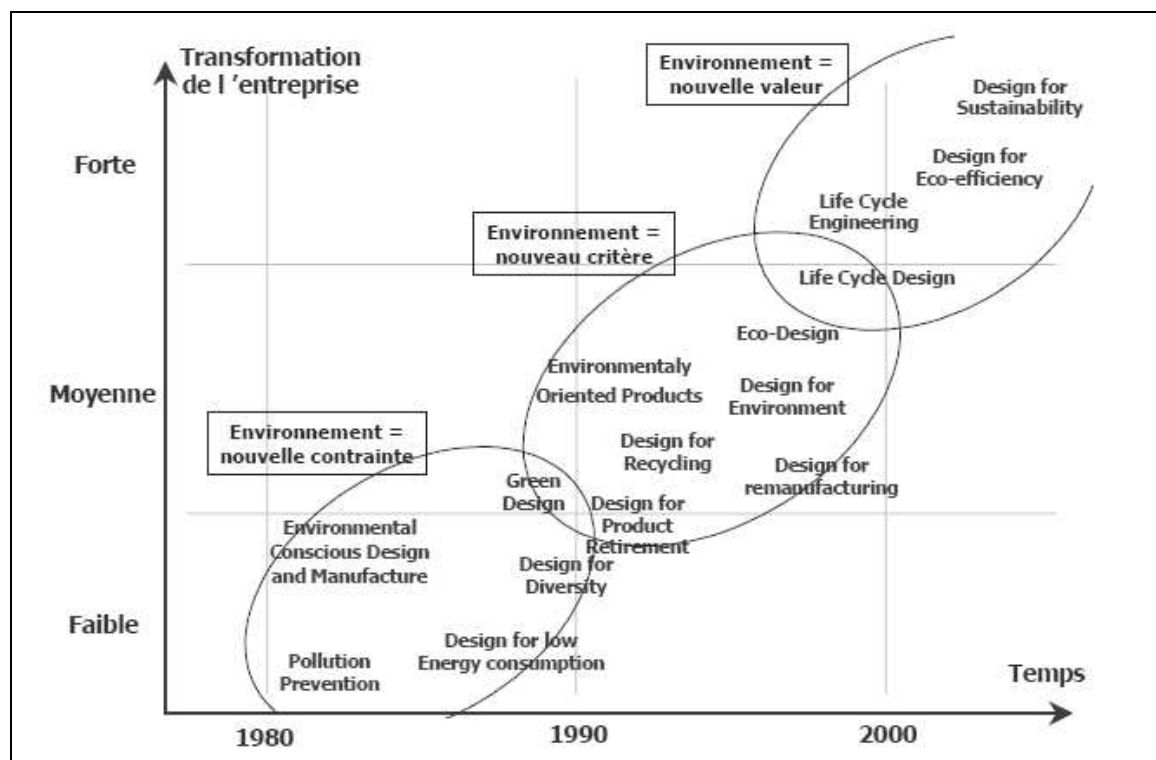


Figure 4. la typologie des différentes démarches environnementales entreprises en milieux industriels [Jacqueson 2002] , de [Millet et al. 2001] .

1.1.2.1. L'environnement comme une nouvelle contrainte

Ce statut décrit la démarche de l'explorateur, qui assimile le monde à un espace infini de nature à exploiter, si on se réfère au concept du développement durable. La stratégie environnementale dans cette approche est celle d'une entreprise attentiste, qui se contente de prendre en compte les pressions de la législation ou les pressions sociales pour agir en matière d'environnement. En termes d'organisation et de communication de l'entreprise, la prise en compte de l'environnement conduit à adopter une attitude défensive, voire de

négligence des problèmes environnementaux. Ce dont rend compte l'absence d'un « vrai » service environnemental dans l'entreprise. Par conséquent, les actions environnementales ne peuvent aller au-delà des actions curatives, c'est-à-dire de traitements de dépollution.

I.1.2.2. L'environnement comme un nouveau critère

Ce statut repose sur une vision moins simpliste de l'espace qui nous entoure et moins optimiste du progrès technique. C'est le concept d'un monde fini qui ne doit pas être exploité au maximum pour satisfaire une croissance constante. L'environnement aussi « borné » apparaît alors comme un espace multidimensionnel à gérer, avec des ressources notamment énergétiques, à consommer en tenant compte de leur vitesses d'épuisement (la notion du cycle de vie des matériaux et des produits) et des rejets à dimensionner en fonction des capacités de régénération du milieu naturel. En termes d'organisation et de communication, l'entreprise qui adopte cette vision de l'environnement est dotée d'un responsable « environnement », légitimé par un système de management environnemental, affichant ainsi la volonté de l'entreprise d'engager un processus d'amélioration continue sur le plan environnemental.

Dans ce cas, les actions environnementales conduites influent sur la définition d'un écoproduit, dans le sens où les choix de matières, de procédés moins énergivores, la réduction de masse ou encore l'amélioration des aptitudes à la valorisation du produit en fin de vie sont faites dans l'objectif d'optimiser les impacts environnementaux et économiques sur le cycle de vie du produit.

I.1.2.3. L'environnement comme une nouvelle valeur

Ce statut correspond à la perception systémique de l'environnement, qui a la prétention d'intégrer les conséquences environnementales, économiques et sociales des rejets et ponctions opérés par une activité sur et dans le milieu constituant notre cadre de vie. C'est le concept qui correspond exactement aux concepts de développement durable, de l'écologie industrielle. De cette vision découle une stratégie environnementale qui reconnaît la responsabilité environnementale de l'entreprise sur l'ensemble des impacts environnementaux générés par le produit sur l'ensemble de son cycle de vie, voire de ses cycles de vie. On peut qualifier cette stratégie de proactive et d'amélioration radicale et innovante. Les objectifs environnementaux (ex : diminuer de 25% la consommation de pétrole en 2020), sont validés au terme d'une consultation incluant des spécialistes, l'Etat, les milieux politiques, les associations de citoyens. La mise en œuvre de cette stratégie permet à l'entreprise de se placer dans le futur et d'« anticiper » en déterminant « en arrière » le chemin possible pour atteindre les objectifs définis par l'adoption des mesures « front end » [Veshagh et Li Wei 2006], qui permettront d'éviter l'apparition des problèmes environnementaux, voire de restaurer l'environnement.

I.1.2.4. Synthèse

Les descriptions précédentes en matières de catégories d'approches environnementales nous ont permis d'identifier une tendance de :

- l'articulation générale des différentes approches, selon leur périmètre de prises en considération de l'environnement (depuis les plus appliquées, qui s'inscrivent dans un contexte de traitement curatif des problèmes, vers les plus conceptuelles correspondant à des démarches d'anticipation et participant à la création de la valeur environnementale à l'entreprise),
- des stratégies de mise en œuvre de ces approches, c'est-à-dire depuis le traitement des pollutions jusqu'au développement durable.

S'il existe aujourd'hui des standards favorisant la prise en considération du développement durable (ex : SD 21000 par l'AFNOR en 2003; ISO 26000 du 1^{er} novembre 2010) au sein des entreprises, des administrations et de la société, une orientation effective vers de tels types d'approches ne suscite pas vraiment l'enthousiasme des entreprises. En effet, si on se base sur la classification de Bras, il apparaît que :

- *Cela entraîne une remise en cause des stratégies des industriels basées sur la production en masse s'ils étaient contraints d'introduire systématiquement sur le marché des produits durables.*
- *Cela nécessite une réorganisation totale intra et interentreprises, où chaque composante de l'écosystème industriel doit tenir compte de ses capacités d'organisation et de structure permettant d'obtenir le statut de d'écosystème industriel.*

Par ailleurs, l'implication d'un périmètre aussi large, voire internationale selon les filières considérées [Jacqueson 2002] , pose des problèmes de complexité de modélisation : il est impossible de considérer de manière exhaustive les entrants et les effluents de l'écosystème industriel global. De ce fait, ces approches sont les moins bien définies en termes de :

- outils et de méthodes utilisés [Janin 2000] ,
- choix d'indicateurs pris en compte ou de modèles de structurations et d'établissement des rapports de développement durable [Guay et al.2004] .

I.1.3. Les niveaux d'intégration de l'environnement en industrie automobile

Dans le domaine de la prise en compte de l'environnement en entreprise, [Orsato et Wells 2007] ont constaté que l'industrie automobile a subi de fortes pressions issues des directives pour devenir plus respectueuse de l'environnement et adopter certaines pratiques et innovations à caractères environnementaux. Par conséquent,

Chapitre 2.

l'ensemble des constructeurs automobiles à travers le monde travaillent actuellement sur des questions similaires telles que la réduction de consommation de carburant, les émissions de CO₂, le traitement en fin de vie des déchets et l'utilisation de matériaux recyclés et de matériaux renouvelables [Sarkis et Gonzalez-Torre 2010] .

Ainsi, dans la phase de fabrication et d'assemblage des composants d'un véhicule, la prise en compte des aspects environnementaux semble être en phase avec les contraintes de la réduction des coûts, qui conduisent les constructeurs à travailler à la productivité des ressources et la minimisation des déchets (par exemple, le principe du « lean production » de Womack [Womack et Jones 2003] , dérivée de l'approche TPS (Toyota production System), initié par le constructeur Japonais Toyota). Un autre exemple illustrant cette stratégie environnementale gagnant - gagnant est l'application des composites à fibres naturelles dans l'industrie automobile qui semble générer à la fois un potentiel économique en raison des faibles coûts du cycle de vie, et des avantages socio-économique dans la région productrice de cette matière première renouvelable [Zah et al.2007] . Le bénéfice environnemental va se jouer sur la réduction du poids que devrait apporter l'utilisation de ce composite à fibres naturelles, par rapport à leurs homologues chargées en fibres de verre, par exemple.

Dans la phase d'utilisation du véhicule, outre la réduction de masse des composants, les solutions de rechange pour le moteur à combustion interne, notamment les véhicules hybrides et électriques [De Haan et al.2007] , ont également suscité les intérêts des constructeurs pour répondre aux exigences de la directive sur les émissions de CO₂, en agissant sur la consommation d'énergie fossile.

Six années après l'approbation de la directive européenne sur l'élimination du véhicule en fin de vie, sa mise en œuvre effective reste toujours controversée au point de vue socio-économique [Smink 2007] , car les constructeurs automobiles d'un côté ne veulent pas être les seuls acteurs de cette filière, pour supporter le coût de traitement des VHU. Les représentants locaux de l'Etat, d'autre part, ne veulent pas courir le risque de provoquer des retombées économiques, d'éventuelles hausses du chômage, si la filière ne s'avérait pas rentable [Orsato et al.2002] .

Cet état de l'art sur la considération des aspects environnementaux dans l'industrie automobile révèle que les constructeurs et leurs équipementiers traitent systématiquement les aspects environnementaux sous la seule pression de la législation, et ont tendance de ce fait à privilégier des actions de type «end of pipe». Ceci est dû à la nature même des réglementations qui fixent des normes d'émissions, ou des objectifs afin d'inciter au recyclage des véhicules en fin de vie. Progressivement, certains constructeurs ont mis en place des actions qui vont au-delà des exigences légales et ont adopté de ce fait une attitude plus volontariste. Ce changement d'attitude, mû par l'intensification continue de la

réglementation et par la sensibilisation des acteurs sociaux au fait que les véhicules automobiles sont clairement reconnus comme une source de pollution importante, est matérialisé par des initiatives visant à produire des produits moins polluants et plus respectueux de l'environnement. L'environnement est devenu un argument de vente, un critère de différenciation et de choix de fournisseurs.

En résumé, il est difficile de décrire précisément le statut actuel de l'environnement dans l'industrie automobile. En effet, les niveaux de son intégration varient sensiblement d'un constructeur à l'autre et par ailleurs, le positionnement respectif des constructeurs, en termes d'engagements dans les actions environnementales, est différent [Jacqueson 2002] .

En conclusion, même si certains constructeurs affichent une tendance vers des engagements plus volontaristes, l'intégration des actions environnementales reflétant ces engagements dans le secteur automobile ne sont pas encore systématiques et sont encore largement soumises à des fins économiques et des objectifs marketing [Orsato et Wells 2007] .

I.1.4. La nécessité de l'orientation vers une approche environnementale intégrée au processus de conception des produits

La contribution de l'entreprise au développement durable associe le concept qui vise à intégrer la dimension environnementale dans l'entreprise, de façon à ce que l'ensemble des choix de matières, de procédés et d'architecture du produit soit systématiquement opéré, non plus à des fins économiques mais dans l'objectif de réduire les ponctions et les rejets dans le milieu naturel, sur tout le cycle de vie du produit.

Quand on parle d'une approche intégrative, nous pensons directement à l'implication du concepteur. Pour cela il doit à la fois être en position d'exercer des choix des matériaux, des procédés et de l'architecture du produit et disposer d'une vision globale du cycle de vie du produit. Ce sont ses choix, ses décisions qui peuvent réduire les charges environnementales de chacune des phases du cycle de vie du produit : « *les concepteurs sont les personnes les plus compétentes pour prendre des décisions environnementales, quand ils disposent des supports et des informations nécessaires* » [Kaïla et Hyvarinen 1996] . Par cette position, le concepteur est donc le mieux placé pour trouver des solutions efficaces pour réduire les impacts environnementaux engendrés par son produit, non seulement ceux engendrés sur le site de production mais aussi ceux induits en amont et en aval de ce site [Millet et al. 2003] . La contrepartie de cet enrichissement de la tâche des concepteurs est l'obligation que cela leur transfère de devoir acquérir de nouvelles connaissances et de nouveaux savoir-faire.

Chapitre 2.

Nous statuons ici que le besoin d'approche intégrative oriente nos travaux de recherche sur deux aspects prégnants de la prise en compte de l'environnement en conception de produits :

- Pouvoir intervenir durant les phases de la conception au cours desquelles il est possible à priori de conduire des changements technologiques sur les caractéristiques des produits, pour que ces derniers soient vraiment plus respectueux de l'environnement ;
- Introduire des outils, connaissances et organisations qui autorisent et facilitent les changements organisationnels.

C'est ainsi que nous introduisons la notion d'intégration de l'environnement dès la conception du produit ou de service, désignée sous le terme « éco-conception ». Plusieurs définitions ont été attribuées à cette notion dans la littérature pour mieux l'appréhender. Ces différentes visions, bien qu'elles diffèrent au niveau des termes employés, se rejoignent vers la mention d'une « méthode qui permet d'évaluer et réduire les impacts environnementaux sur le cycle de vie du produit tout au long de sa phase de conception ». Par la suite, nous avons retenu la définition de Tischner et Charter [Tischner et Charter 2001] , qui conforte notre approche en matière d'approche intégrative : « des termes stratégiques qui visent à intégrer les considérations environnementales dans la conception et le développement de produits . Cela implique :

- *l'intégration de la notion de cycle de vie dès la conception d'un produit ou d'un service,*
- *la modification du système industriel,*

en vue d'améliorer la performance environnementale des nouveaux produits et services au travers le cycle de vie des solutions existantes, tout en remplissant les demandes et les besoins de la société ».

L'analyse de l'intégration de l'environnement au sein de l'industrie automobile (les constructeurs comme les équipementiers) a montré que l'intégration de la pratique de l'éco-conception, telle qu'elle est définie précédemment, n'est pas encore effective.

Cela nous a conduit à positionner notre travail de recherche dans une approche intermédiaire, c'est-à-dire celle qui vise l'intégration de l'environnement comme un « nouveau critère » dans la phase de conception des produits au sein de l'équipementier Faurecia, en considérant l'approche « cycle de vie d'un produit », par rapport aux référentiels de *Bras* ou de *Millet*.

La réussite de l'intégration complète de l'environnement au sein du secteur automobile ne peut se baser toutefois que sur une démarche progressive et consciente de l'organisation, c'est à dire:

Chapitre 2.

- *sans simplifier outrageusement la dimension environnementale (par exemple en se limitant à une approche monocritère), tout en prenant en compte l'ensemble des phases du cycle de vie ;*
- *sans surcharger l'activité de la conception, car l'environnement n'est qu'une des multiples facettes que les concepteurs doivent considérer pour l'optimisation du produit ;*
- *sans freiner le développement de l'innovation (par exemple, en compromettant le développement et l'utilisation de nouveaux matériaux ou la recherche et l'application des meilleures technologies disponibles) ;*
- *en agissant comme un vecteur de transformation d'une organisation apprenante, en provoquant une acquisition progressive des connaissances environnementales par les acteurs de la conception.*

Dans le cadre de notre travail de recherche-action au sein de l'équipementier Faurecia, nous suggérons, pour atteindre ces objectifs, d'élaborer un support méthodologique s'adressant à la fois aux experts de l'« environnement » et à l'équipe de conception. Nous supposons que cette stratégie permet à la fois:

- *d'assurer l'évaluation et l'amélioration de performance environnementale du produit au coeur du processus de conception par le biais de l'implication de l'équipe de conception,*
- *de garantir la migration d'une partie des connaissances créées par les experts de l'« environnement » vers les acteurs de la conception, par l'implication des experts « environnement »,*
- *d'assurer l'évolution de l'acquisition de connaissances environnementales par les acteurs de la conception, en vertu de leur implication et de la migration des connaissances créées par les experts de l'« environnement »,*
- *de construire une politique d'éco-conception cohérente et générer une prise de décision stratégique par les responsables de projets.*

II. Problématique

Après avoir situé notre travail de recherche dans le domaine de l'intégration de l'environnement en entreprise, et dans le cadre de la conception des produits automobiles, nous abordons dans cette partie les outils et méthodes nécessaires aux entreprises pour intégrer concrètement la dimension « environnement » dans le processus de conception de produits. Ainsi, un retour de connaissances sur la catégorisation des outils d'éco-conception est présenté en premier lieu, en mettant en évidence les objectifs qu'ils

remplissent en fonction des natures d'informations qu'ils délivrent. Toutefois, toute démarche d'éco-conception ne peut être légitimée que si d'un côté, l'utilisation des outils est intégrée au processus de conception, et de l'autre côté, si la connaissance environnementale minimum requise (le niveau d'appropriation des outils) est présente lors des étapes du processus de conception qui visent aux choix des solutions de conception. Ces exigences induisent donc trois axes majeurs de la problématique liée à l'intégration des outils et méthodes d'éco-conception dans le processus de conception : la disponibilité des acteurs, l'opérationnalisation des outils par ces acteurs, ainsi que leur niveau d'appréhension de la problématique environnementale.

II.1. L'évolution des outils et méthodes d'éco-conception

II.1.1. L'évolution de la classification des outils et méthodes d'aide à l'éco-conception

Différents outils et méthodes d'éco-conception, à caractères générales ou propres à l'usage dans un contexte défini, ont été développées, dans le but de servir de support d'aide aux concepteurs lors du déroulement du processus d'éco-conception [Le Pochat 2005] . Des travaux de recherche sur le dénombrement de ces outils, notamment ceux de [Janin 2000] ; [Baumann et al.2002] ; [Le Pochat et al.2007] ; [Knight et Jenkins 2009] ont abouti à de différentes catégorisations de ces outils selon les objectifs, ou la nature des informations qu'ils fournissent.

Il y a une dizaine d'années, Janin [Janin 2000] a proposé cinq catégories d'outils pouvant être appropriés par les entreprises souhaitant accomplir une démarche d'éco-conception.

Les **outils stratégiques** sont d'abord ceux qui ont pour objectif d'aider une entreprise à développer une stratégie de développement d'écoproduits à partir de la politique environnementale de l'entreprise.

Les **outils de sensibilisation** sont ceux élaborés pour sensibiliser les différentes entités de l'entreprise (le responsable environnement, les ingénieurs de R&D, les concepteurs le service marketing) à la prise de conscience de la responsabilité de chacun et en particulier des concepteurs en les motivant dans l'intégration des préoccupations environnementales.

Les **outils de communication** sont ceux que l'entreprise emploie afin de communiquer ses actions en matière de conception environnementale, en fonction de ses propres référentiels. Ces outils aident l'entreprise à promouvoir des nouveaux produits sur le marché et à communiquer sur ses démarches environnementales.

Chapitre 2.

Les outils d'évaluation environnementale (de catégorie s'étendant des simples listes de matières interdites aux logiciels d'ACV) sont des outils permettant de tracer ponctuellement ou de façon relativement exhaustive, le profil environnemental⁹ du produit. Ces outils peuvent être :

- de types qualitatifs ou quantitatifs ,
- couvrir une, plusieurs ou toutes les phases du cycle de vie du produit

Les outils d'évaluation sont potentiellement utiles pour informer l'équipe de conception des impacts majeurs de produits déjà existants, et de la performance environnementale des nouveaux produits.

Les **outils d'amélioration** environnementale sont destinés à guider les concepteurs dans leur démarche de recherche de solutions plus respectueuses de l'environnement, en leur fournissant des conseils en matières de stratégies (accroître la valeur utile, faciliter les désassemblages...) et de solutions techniques (Guidelines et Best practices) possibles pour améliorer la performance environnementale des nouveaux produits. Les nouvelles solutions conçues doivent ensuite être réévaluées à l'aide d'un outil d'évaluation.

Plus tard, plusieurs façons de classer les outils et méthodes d'éco-conception sont apparues progressivement dans la littérature.

[Baumann et al.2002] ont identifié les outils et méthodes d'éco-conception comme des supports pour le processus de conception, auxquels il faut ajouter des outils stratégiques et des outils d'organisation de projets. D'après la vision de Baumann et al, il existe deux classes d'outils d'aide au processus d'éco-conception:

Les **outils non spécifiques à l'éco-conception** sont d'abord les outils d'aide classiques accompagnant un processus de conception. Ils permettent de développer une cohérence globale du projet en intégrant l'ensemble des contraintes fonctionnelles et environnementales du produit dans une même stratégie et en favorisant les échanges entre les membres du projet et l'entreprise dans sa globalité. Ce sont des outils d'aide à la décision (stratégie, choix de conception multicritère, etc.), des outils pour la communication interne et externe à l'entreprise, des outils de sensibilisation, etc.

Les **outils spécifiques à l'éco-conception** sont les outils qui permettent de réaliser les phases cruciales de l'éco-conception d'un produit, qui sous tendent l'évaluation et l'amélioration de la qualité environnementale des produits. Ainsi, nous donnerons une

⁹ Le profil environnemental décrit pour un produit, ou une catégorie de produits leurs caractéristiques environnementales vis-à-vis des normes réglementaires et leurs impacts environnementaux sur d'étape(s) spécifique(s) ou tout au long du cycle de vie.

Chapitre 2.

importance particulière aux outils spécifiques à l'éco-conception dans ce qui suit car ils s'inscrivent dans le contexte de notre travail de recherche.

Dans ce cadre, Le Pochat et al. [Le Pochat et al.2007] ont affiné la classification des outils spécifiques à l'éco-conception pour identifier trois types d'outils, selon que leur finalité relève de l'évaluation environnementale des produits, de l'amélioration environnementale, ou qu'ils offrent ces deux fonctionnalités au cours d'un même projet d'éco-conception.

Les travaux de recherches plus récentes de Knight et al. [Knight et Jenkins 2009] ont distingué trois grandes catégories d'outils d'éco-conception, à savoir :

- **les lignes directrices**, qui définissent une famille d'outils offrant un large support avec peu de détails. Ils sont applicables soit à travers le processus de développement produit et du cycle de vie entier (ex ISO / TR 14062), soit pour indiquer des axes spécifiques de la conception pour l'environnement (ex la conception pour le recyclage, la conception pour le démontage, la conception pour l'optimisation de la durée de vie) ;
- **les check-lists**, qui, contrairement aux lignes directrices, définissent une famille d'outils fournissant plus de détails, mais avec une application limitée à des étapes spécifiques du processus de développement, ou du cycle de vie du produit ;
- **les outils analytiques**, qui définissent une famille d'outils offrant une analyse détaillée et/ou systémique à des étapes spécifiques du processus de développement du produit. Leur application peut couvrir, soit une ou plusieurs étape(s) spécifique(s), soit le cycle de vie entier d'un produit ;

qui peuvent être regroupées selon deux approches : les approches qualitatives et quantitatives.

Une synthèse de ces différentes propositions nous a permis de décrire et répertorier les grandes familles d'outils d'éco-conception (Tableau 7), selon :

- *leur finalité, en termes d'évaluation et/ou d'amélioration environnementale*
- *la nature des indicateurs employés : métriques environnementaux d'ingénierie ou indicateurs d'ACV (cf. chapitre I) ;*
- *leur couverture aussi bien du processus de développement que du cycle de vie du produit.*

Chapitre 2.

Grandes familles d'outils d'éco-conception		Finalité					Champ de couverture	
		Evaluation environnementale			Amélioration environnementale	Evaluation et amélioration environnementale	Etapes du processus de conception	cycle de vie du produit
types d'outils	Description	Nature des indicateurs	Qualitative	Quantitative				
Analyse du cycle de vie (ISO 14040 series) ; [Wenzel et Hauschild 2001]	Méthodologie définie sous le standard ISO comme « l'évaluation des entrants et sortants, ainsi que des impacts environnementaux d'un produit au cours de son cycle de vie »	Indicateurs d'ACV		x			spécifiques (en aval)	complet
ACV exhaustives (ex: GaBi, Simapro, Umberto...)	Outils commercialisables de la méthodologie d'analyse de cycle de vie sous forme de logiciels	Indicateurs d'ACV		x			spécifiques (en aval)	complet
ACV simplifiées (ex : MIPS [Ritthoff et al.2002] , ERPA [Graedel et Allenby 1998] ; MECO [Wenzel et Hauschild 2001])	Outils dont les principes reposent sur la méthodologie « <i>analyse du cycle de vie</i> », mais dont on a cherché à réduire les difficultés inhérentes	Métriques d'ingénierie et/ou indicateurs d'ACV	x	x			spécifiques	Spécifique(s) ou complet
Environmental indicators (ex E199, Recipe [Goedkoop et al.2009] ; EPS [Steen 1999])	Outils dérivant de la simplification des résultats d'ACV sur la pondération et l'agrégation d'indicateurs d'impacts environnementaux	Indicateurs d'ACV agrégé		x	x	x	spécifiques	Spécifiques ou complet
Matrices (ex ESQCV; MET [Brezet et Van Hemel 1997])	méthodes d'évaluation basées sur l'identification, des aspects	Métriques d'ingénierie	x	x			spécifiques	Complet

Chapitre 2.

	environnementaux (énergie, matériaux, déchets, etc.) de chacune des étapes du cycle de vie							
Lignes directrices (guidelines) (ex, the ten golden rules [Luttrupp et Lagerstedt 2006])	Outils constitués d'un recueil, classification et hiérarchisation des règles générales et universelles pour écoconcevoir	Métriques d'ingénierie			x		Complet	Complet
Checklists (ex Ecoconcept spider web [Tischner et al.2000] ; EOD (Environmental Objectives Deployment) [Karlsson 1997])	Outils formés par des listes de questions qui permettent une analyse du produit selon ses caractéristiques fonctionnelles. Elles ne permettent pas de réaliser une évaluation environnementale au sens strict, mais elles ont l'avantage de « noter » de manière simple le produit de façon à créer un référentiel de comparaison	Métriques d'ingénierie			x		spécifiques	Spécifiques ou complet
Guides d'éco-conception (ex ecodesign pilot, LiDs wheel [Brezet et Van Hemel 1997] , information/inspiration, ecofaire)	Outils regroupant les principes généraux de l'éco-conception et les règles de base pour mener à bien un projet de conception de produit, intégrant des contraintes environnementaux	Métriques d'ingénierie			x		spécifiques	Spécifiques ou complet
Outils paramétriques (ex Eco-PaS (Eco-efficiency Parametric Screening) [Dewulf 2003])	Les outils paramétriques proposent des évaluations	Métriques d'ingénierie et/ou indicateurs		x	x	x	spécifiques	Spécifiques

Chapitre 2.

	environnementales simplifiées basées sur des relations mathématiques entre paramètres ou fonctions du produit et impacts environnementaux	d'ACV agrégé						
Outils d'aide aux choix de solutions (ex : QFDE [Masui et Miyazaki 2000] ; [Sakao 2007] ; EcoTRIZ [Chen 2002] ; [Jones et Harrison 2000] ; [Lindeman et al.2001]).	Les outils classiques d'aide aux choix des solutions de conception, transformés en outils d'améliorations environnementales du produit	Métriques d'ingénierie			x		spécifiques	Non renseignée

Tableau 7. Classification des outils spécifiques à l'éco-conception montrant leur finalité dans le processus de conception et leur périmètre de couverture des différentes étapes du cycle de vie d'un produit.

II.2. Notions sur l'intégration des outils et méthodes d'éco-conception dans le processus de conception

II.2.1. La notion de cohérence entre les outils d'éco-conception et le processus de conception

D'une manière générale, l'intégration des contraintes environnementales dans le processus de conception est définie (par analogie à la prise en compte des contraintes classiques habituellement gérées par les concepteurs) par la norme [ISO/TR14062] et suit les phases suivantes: (Figure 5).

- *Analyse de l'existant (évaluation de la qualité environnementale du produit)*
- *Recherche et identification des causes d'impacts environnementaux*
- *Recherche de solutions d'amélioration environnementale du nouveau produit*
- *Evaluation des nouvelles solutions*
- *Conception détaillée*
- *Définition du nouveau produit et de son cycle de vie*

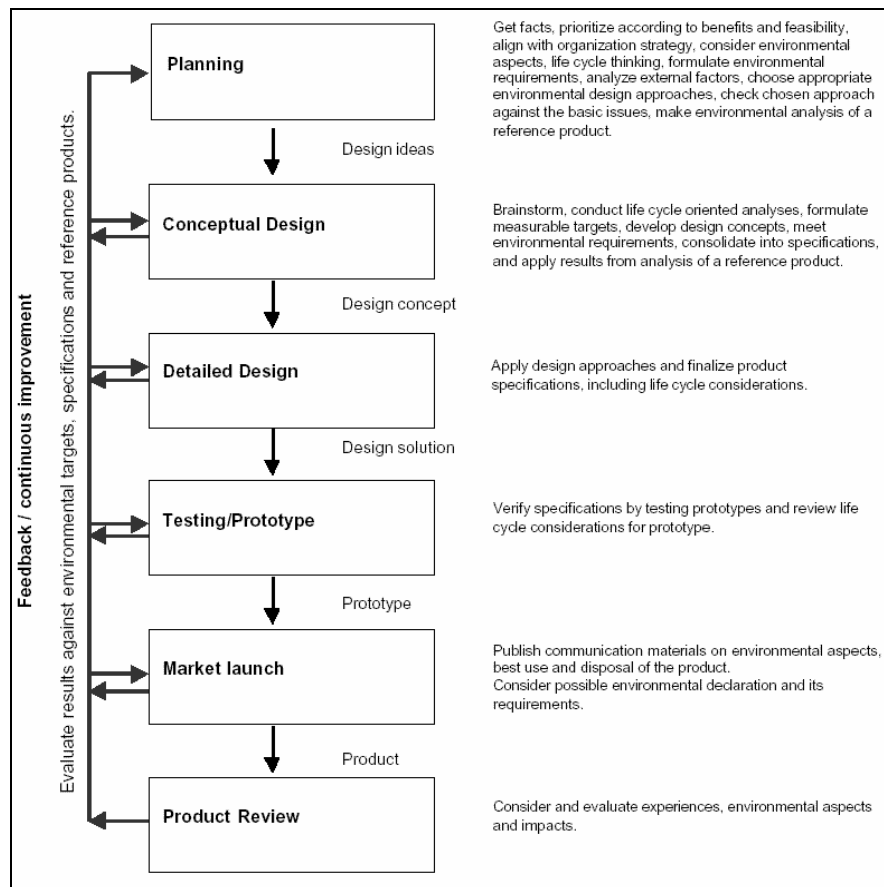


Figure 5. Intégration des aspects environnementaux dans le processus de conception de produit, d'après la norme [ISO/TR14062] .

Chapitre 2.

En termes d'outils et méthodes pour assister ce processus d'éco-conception, [Janin 2000] a également proposé un modèle permettant de visualiser d'une manière générique l'adéquation des différentes catégories d'outils identifiés précédemment dans le processus de conception, selon leur degré d'aide à la décision (Figure 6).

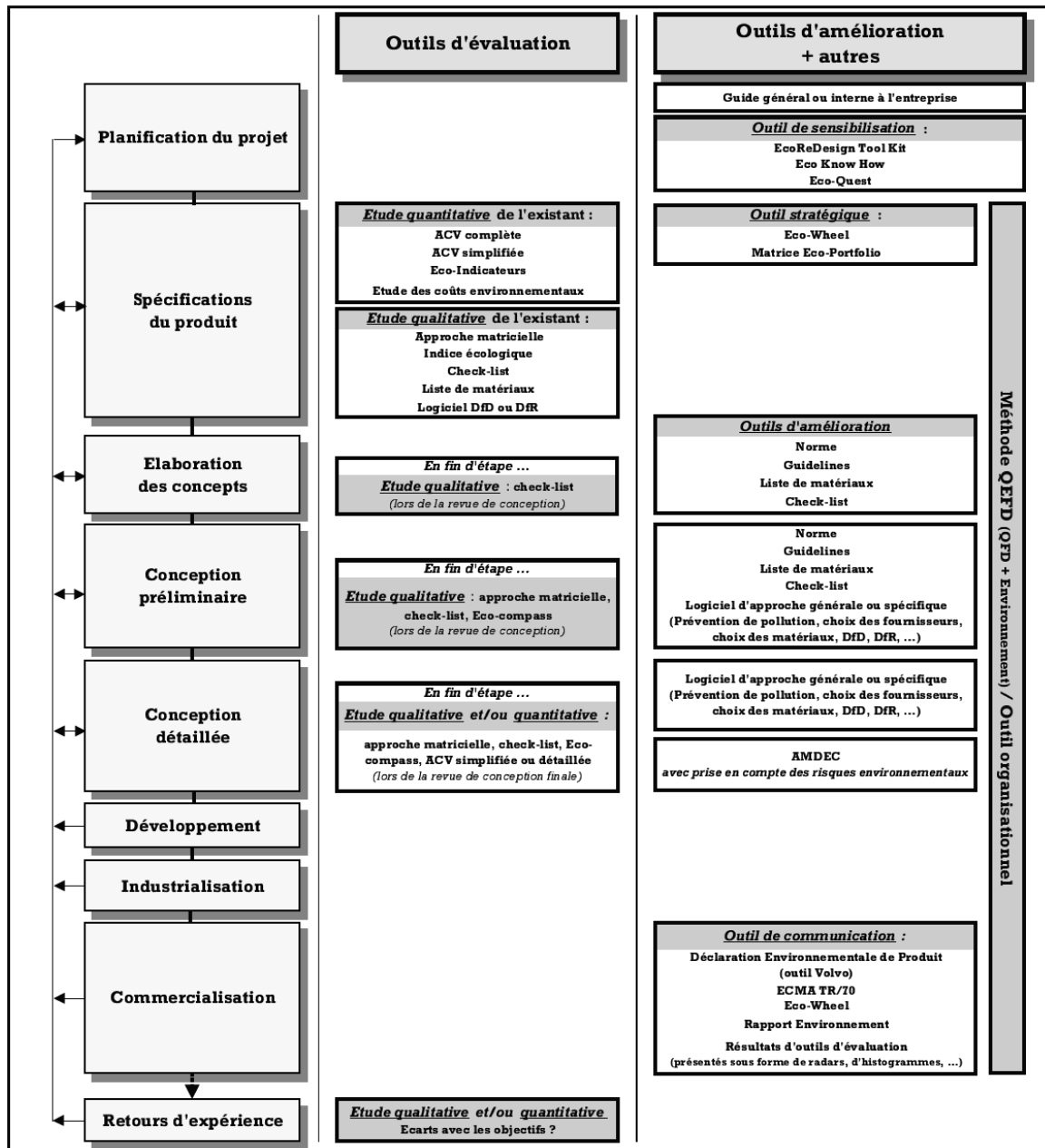


Figure 6. Agencement des outils environnementaux dans le processus d'éco-conception, (d'après [Janin 2000]).

Il ressort de ces deux modèles que la phase cruciale de la prise en compte des aspects environnementaux en conception se situe dans la phase conceptuelle (l'élaboration de concepts et la conception préliminaire du produit), durant lesquelles devraient se dérouler les deux actions « pivots » [Le Pochat 2005] de la démarche d'éco-conception: l'évaluation et l'amélioration de la performance environnementale.

II.2.2. Le triplet : outils, processus et acteurs

Les éléments décrits dans le paragraphe précédent peuvent conduire à considérer que :

- *par l'analogie entre l'intégration de la contrainte environnementale et une autre contrainte classique dans le processus de conception ;*
- *par l'agencement des différents outils dans le processus de conception ;*

l'intégration de l'éco-conception est facile à conduire.

Toutefois, l'utilisation des outils et données qui accompagnent cette intégration au cœur du processus de conception fait appel aux acteurs de ce processus et leurs activités. C'est la prise en compte de cette dimension organisationnelle et de la dynamique de la connaissance qui se développe entre acteurs lors de l'utilisation de ces outils [Legardeur 2001] , qui détermine la capacité des outils et méthodes à être intégrés dans le processus de conception [Dewulf 2003] .

Cette dimension organisationnelle de l'intégration est problématique à plusieurs niveaux car :

- *En réalité, le processus de conception est un univers déjà en surcharge d'activités [Millet et al.2003] ; [Reyes 2007] , Il s'ajoute à cela le problème lié aux temps que demande la mise en œuvre de ces outils, allant de la collecte des données nécessaires, via leur utilisation proprement dite, jusqu'à l'obtention et l'exploitation de leurs résultats.*
- *L'utilisation des outils environnementaux demande des niveaux de maîtrise minima. Ces « minima requis » diffèrent à priori d'un outil à un autre selon leur catégorie et leur complexité [Tukker et al.2000] ; [Clermont et al.2002] . Cela pose le problème de l'appropriation des outils et méthodes d'éco-conception par l'équipe de conception;*
- *La dimension « environnement » est à la fois multicritère et transversale. D'où sa complexité inhérente et sa qualification comme étant une « notion floue » [Millet et al.2003] pour l'équipe de conception. Cela pose le problème de l'intégration progressive et de l'apprentissage organisationnel.*

II.3. Problématique de l'intégration de l'ACV dans le processus de conception des produits automobiles

L'état de l'art sur les outils et méthodes d'éco-conception qui précède a mis en exergue deux approches de l'évaluation environnementale des produits : l'approche qualitative et l'approche quantitative systémique par l'ACV (ISO 14040 séries). La réalisation d'une ACV demande beaucoup d'informations sur le produit, qu'elle est souvent appliquée à des produits complètement définis. L'approche qualitative semble être globalement préférée

Chapitre 2.

par les industriels car les outils sont souvent simple d'usage et mobilisent peu d'informations. Pourtant, l'approche qualitative montre vite ses limites car elle suppose :

- l'utilisation de critères d'évaluation non systémiques et impliquant des possibilités de transferts d'impacts dans les solutions mises en œuvre,
- des choix de pondérations subjectives (souvent par des notes) induisant des prises de décisions pas toujours favorables à l'environnement.

Pour éco-concevoir, il faut disposer d'une approche quantitative et systémique d'aide à l'évaluation des choix de solutions par les concepteurs aux différents stades d'avancement d'un projet. Cette forme dynamique de l'évaluation environnementale [Andriankaja et Al. 2009] est indispensable pour pouvoir garantir à la fin du processus de conception des produits véritablement respectueux de l'environnement.

La véritable solution pour atteindre cet objectif est que les concepteurs puissent réaliser plusieurs ACV tout au long du processus de conception de produit:

- *lors du choix de matériaux et procédés;*
- *lors du dimensionnement des composants et du choix de différents concepts de solutions.*

Pour appréhender ce qu'est réellement l'ACV, une multitude de descriptions apparaît dans la littérature, mais celle proposée par [Jolliet et al.2005] semble montrer clairement comment cette méthodologie peut être utile pour aider dans la conception d'un nouveau produit. Ainsi, selon Jolliet et al, « l'ACV évalue l'impact environnemental d'un produit, d'un service ou d'un système en relation à une fonction particulière et, ceci en considérant toutes les étapes de son cycle de vie. Elle permet d'identifier les points sur lesquels un produit peut être amélioré, et elle contribue au développement de nouveaux produits. Une ACV est, avant tout, employée pour comparer les charges environnementales de différents produits, processus ou systèmes entre eux, ainsi que les différentes étapes du cycle de vie d'un même produit ».

Par ailleurs, selon le standard (ISO 14040), sa résolution scientifique se déroule en 4 étapes cruciales que nous décrivons comme suit:

- Définition des objectifs et du système: est l'étape cruciale de l'ACV car c'est elle qui donne du sens à l'évaluation environnementale, ainsi qu'à l'exploitation des résultats qui en émergeront. La description du produit, et de sa fonction, ainsi que la limitation du système à considérer dans la modélisation du cycle de vie du produit est réalisée à ce stade. Ces éléments permettent respectivement par la suite de définir l'unité fonctionnelle (quel unité de référence permet de remplir la fonction sur une échelle bien définie) et le périmètre de la modélisation du produit (quels composants du produit, quels activités par étape de son cycle de vie, et quel niveau de troncature

Chapitre 2.

des flux pour une activité considérée). La définition de l'unité fonctionnelle est le point vital de l'ACV dans le sens où les interactions du produit avec l'environnement y seront rapportées, tandis que le périmètre de la modélisation conditionnera la gestion en quantité et en qualité des données à prévoir pour la modélisation du cycle de vie.

- L'inventaire du cycle de vie (ICV) : précédée par la modélisation proprement dite du cycle de vie du produit (généralement sous forme de graphe de flux), l'ICV permet de compiler et de quantifier les interactions du système produit modélisé avec l'environnement (flux élémentaires). Le bilan de l'ICV s'exprime en quantité de ponctions (charbon, minerai, eau, gaz naturel...) et de rejets (déchets solides, eaux usées, dioxyde de carbone...) dans l'écosystème, proportionnellement à l'unité fonctionnelle définie du produit.

- L'évaluation des impacts du cycle de vie (EICV): est l'étape de l'évaluation environnementale proprement dite en ACV. L'EICV permet de transformer le bilan de l'ICV précédente en catégories d'impacts sur l'environnement, et sa résolution est purement mathématique dans le sens où la théorie du changement de base (des vecteurs d'inventaire en vecteurs de catégorie d'impacts) y est appliquée. L'EICV peut se dérouler en plusieurs sous-étapes. D'abord, une sous étape de classification détermine quels éléments de l'ICV (consommation de charbon, rejet de nitrates, ...) contribuent à quels impacts (réchauffement global, eutrophisation, épuisement des ressources abiotiques...) sur l'environnement. Ensuite, une caractérisation intermédiaire (midpoint) pondère les flux de l'ICV classés à l'intérieur de chacune des catégories d'impacts, pour donner la valeur absolue de chaque catégorie d'impacts. Les résultats obtenus à ce stade de l'EICV indiquent des « problèmes » sur l'environnement. Enfin, une caractérisation des dommages (endpoint) peut être réalisée en regroupant les catégories d'impacts dans la catégorie des dommages sur l'environnement (comme l'atteinte à la biodiversité, la santé humaine, le changement climatique...). Les résultats de l'EICV à ce stade indiquent des « dommages » sur l'environnement. Par ailleurs, une sous-étape facultative de la « normalisation » peut être effectuée pour mettre en évidence la contribution du produit étudié à l'échelle mondiale ou régional. La normalisation permet par la suite d'appréhender la gravité d'un impact selon l'échelle géographique choisie.

- La dernière étape de l'ACV porte sur l'interprétation des résultats. Elle consiste en le décryptage des informations données par les indicateurs d'impacts, puis en l'identification des points chauds (hot spots) du produit (impact(s) majeur(s) et étape(s) critique(s) sur le cycle de vie), en vue d'étudier ces points clés et d'envisager des solutions alternatives. Toutefois, l'analyse de l'incidence possible des hypothèses de modélisation dans les résultats (revue critique) est recommandée pour assurer la

Chapitre 2.

qualité de la prise de décision qu'on en fera par la suite. Par ailleurs, des études de la propagation des incertitudes et des études de sensibilité peuvent être effectuées pour aider à mettre en évidence les paramètres les plus influents.

Si on considère le cas de l'industrie automobile, la multidisciplinarité de l'ACV expliquée ci-dessus, ainsi que la complexité des produits automobiles font que ce secteur rencontre plusieurs difficultés pour réaliser des ACV et exploiter leur résultats dans la phase de conception, parce que:

- *La collecte de toutes les données requises, en quantité et en qualité pour la réalisation des ACV dès le démarrage d'un projet de conception est difficile en raison de la non disponibilité des données [Koffler et Krinke 2008] , [Schiffleitner et al.2008] , [Schweimer et Levin 2009] .*
- *Les concepteurs ne sont pas formés à l'ACV pour modéliser le cycle de vie du produit dans un outil d'ACV exhaustive et pour interpréter ses résultats. [Dewulf et Duflou 2003] et que cette formation est longue à acquérir*
- *La réalisation d'une ACV de façon classique d'un produit complet nécessite du temps (allant de quelques jours à plusieurs mois, selon la complexité du système à étudier) avec les outils de modélisation dont on dispose aujourd'hui. Ce qui rend l'ACV exhaustive temporellement incompatible avec le processus de conception.*

Ces aspects constituent donc de véritables obstacles pour la mise en place de l'ACV dans le processus de conception des produits automobiles. Nous formulons dans les paragraphes qui suivent les principaux axes relatifs à ces points clés de la problématique d'intégration de l'ACV en conception.

II.3.1. Formulation du premier axe problématique lié à la qualité et la quantité des données

Dans la collecte et la gestion des données, il n'est pas vraiment possible d'être exhaustif comme l'impose le standard [ISO/DIS1404X] pour pouvoir modéliser les procédés/activités sur le cycle de vie d'un produit. Ensuite, lors de la modélisation d'une activité/procédé, c'est l'unité fonctionnelle qui permet d'établir et de lier entre eux les paramétrages de ce procédé. Malheureusement, l'utilité d'un produit ne peut pas être réduit à l'expression d'un ou de deux spécifications [Millet et al.2007] , [Bertoluci et Millet 2009] .

Par ailleurs, la gestion des données est souvent menée avec un certain degré de subjectivité et d'incertitude [Leroy 2009] et est polluée par un manque de représentativité en termes de sources de données [Ayres 1995] . En effet, les sources des données peuvent contribuer à l'inexactitude, car il est bien reconnu que les données utilisées peuvent être basées sur des moyennes, un échantillon non représentatif, ou des mesures obsolètes.

Chapitre 2.

Ainsi, il est rarement possible d'avoir à disposition des données d'inventaire "exactes" [Bala et al.2010] .

En outre, dans un système complexe comme l'automobile, le grand nombre de composants, la quantité de matériaux et de procédés impliqués dans un système de produits, la collecte et le traitement de toutes les données pertinentes nécessaires à la modélisation du cycle de vie des produits sont identifiés comme les premiers obstacles d'une mise en œuvre effective de l'ACV [Fitch et Cooper 2004] ; [Koffler et Krinke 2008] , [Schweimer et Levin 2009] , car ils rendent la réalisation du bilan de l'ICV laborieuse et consommatrice de temps [Bretz 1998] .

Ainsi, « la collecte des données techniques pertinentes pour modéliser le cycle de vie des produits en conception est une tâche laborieuse et très consommatrice de temps. Elle est toutefois indispensable pour obtenir une évaluation environnementale multicritère et couvrant l'ensemble du cycle de vie » .

II.3.2. Formulation du deuxième axe problématique lié à l'appropriation de l'évaluation quantitative par l'équipe de conception

L'appropriation de l'ACV par l'équipe de conception est délicate, car en plus du problème de temps et des efforts nécessaires pour le recueil des données, la modélisation du produit nécessite de maîtriser :

- *les implications des choix du périmètre et les limites du système à modéliser : la conduite d'une ACV est un processus, qui, aujourd'hui dans sa définition laisse la porte ouverte de nombreuses fois à des décisions laissées à son modélisateur : périmètre considéré, âges des données, unité fonctionnelle employée, troncatures des flux... Cette difficulté pourrait être relativement levée dans le cadre d'une évaluation industrielle, car il serait tout à fait possible de figer en amont de manière procédurale, par familles de produits, les instanciations et les paramètres que l'entreprise mettra en œuvre pour chacun de ces points pour une famille de produits fixée. Cette forme de réponse qui amène un certain degré de simplification de l'ACV n'assure pas toutefois une robustesse absolue des résultats (connaissance parfaite du vrai impact environnemental). En revanche, une telle pratique assure la création d'un cadre de référence qui va permettre de mesurer les progrès ou régressions induits par les nouvelles conceptions.*
- *Le gap culturel entre le langage utilisé en conception et le langage spécifique de l'ACV : le travail de modélisation et les choix d'hypothèses qui sont posées implique que celui ou ceux qui le réalise(nt) dispose(nt) de réelles compétences. En effet,*

Chapitre 2.

modéliser le cycle de vie du produit tout en mobilisant des vocabulaires spécifiques comme le flux de référence, le flux élémentaire... nécessite un haut niveau d'expertise environnemental pour pouvoir identifier et connaître les interactions des étapes du cycle de vie des produits avec l'environnement, en termes de ponctions et rejets [Dewulf 2003] . Sur un autre plan, l'obtention de résultats multicritères issues de l'application de la norme ISO 14040 constitue une réelle difficulté cognitive pour les analystes et les concepteurs. Cette difficulté est renforcée par la nature des indicateurs utilisés (Effet de serre, Eutrophisation, Toxicité marine...) qui auront du sens pour un individu disposant de connaissances en biologie par exemple mais resteront opaques pour un concepteur, à moins de renforcer ses connaissances sur ces sujets. Ces deux derniers points rendent l'interprétation et l'exploitation des résultats d'ACV délicats pour l'équipe de conception [Rebitzer et Buxmann 2005] . Dans sa forme classique de réalisation, les résultats d'ACV ne sont compréhensibles que par un expert ACV, et ce dernier n'est pas la bonne personne pour prendre des décisions sur le produit. Cette situation constitue donc un vrai obstacle à son intégration en conception de produits.

En conséquence, « il est impossible d'envisager l'usage systématique des outils d'ACV actuellement disponibles par l'ensemble des concepteurs. Pour permettre une évaluation quantitative et systémique aux concepteurs, il faut être en mesure de leur proposer un outil simplifié ». Le paragraphe suivant va permettre de spécifier cette simplification.

II.3.3. Formulation du troisième axe problématique lié à la simplification de l'ACV exhaustive

Les difficultés énumérées ci-dessus, empêchant l'utilisation de l'ACV en conception, ainsi que le point de vue commun des chercheurs qui travaillent sur le sujet [Janin 2000] ; [Le Pochat 2005] ; [Millet et al.2007] , [Reyes 2007] sur l'usage de l'outil d'ACV exhaustive en entreprise , nous permettent de statuer que cet outil doit rester entre les mains d'un acteur spécifique: l'expert en environnement.

Toutefois, il a été constaté par [Millet et al.2007] que l'ACV pourrait être un moyen d'aide indirect dans le processus de conception, si ses principes et ses résultats étaient traduits en des principes méthodologiques ou des outils compréhensibles par l'équipe de conception. Par ailleurs, [Collado-Ruiz et al.2010] ont décrit l'utilité de l'ACV pour le concepteur s'il est mis en situation d'évaluer et de comparer les impacts environnementaux sur le cycle de vie de différentes alternatives de solutions.

Ainsi, comme l'équipe de conception doit disposer d'une approche quantitative et systémique pour l'évaluation environnementale des impacts tout au long du processus de

Chapitre 2.

conception, mais que l'utilisation directe de l'ACV est impossible, il devient alors impératif de créer une forme intelligente d'évaluation environnementale rendant l'ACV opérationnelle pour l'équipe de conception. Dans notre contexte, cette opérationnalisation de l'ACV implique que le système proposé aux concepteurs leur fournisse un accès continu à une évaluation quantitative de l'environnement de leurs solutions techniques, à tous les stades du processus de conception. Les outils composants ce système doivent être alimentés par les données techniques disponibles, descriptives de la vie des produits. Ils doivent également fournir des résultats compréhensibles par l'équipe de conception, pour qu'ils puissent les interpréter sans difficulté.

D'autre part, plusieurs approches ont été développées et proposées dans la littérature pour simplifier le concept initial de l'ACV en outils applicables en conception des produits [Dewulf 2003]. Ces approches sont connues sous l'appellation d'« ACV simplifiées », déclinées sous plusieurs variantes dans les ouvrages anglo-saxons (comme : streamlined, abridged, scoping, screening, approximate, surrogate LCA). Ces approches simplifiées sont généralement qualifiées comme étant des méthodes moins coûteuses tout en fournissant des informations environnementales pour un temps d'utilisation raisonnable.

Toutefois, aucun consensus n'a encore été établi, ni au sujet des méthodes et procédures « exactes » de simplification de l'ACV, ni des conditions d'utilisations appropriées à leur usage. En revanche, des principes de base ont été établis par la SETAC [Todd et Curran 1999] avec notamment l'édition d'un guide d'orientation des praticiens de l'ACV dans la considération des implications significatives et des effets de l'application des différentes manières de simplification ou de rationalisation. Selon ce guide [Todd et Curran 1999], la conception d'une approche d'ACV simplifiée exige que les aspects fondamentaux suivants soient pris en compte par les praticiens de l'ACV :

- La profondeur et le niveau de détail des données nécessaires à l'application de la simplification (s) ;
- L'ampleur et l'exhaustivité de l'étude: quelles étapes du cycle de vie considérer, quelles frontières du système établir, quel niveau de détail pour l'ICV, et quels indicateurs de catégories d'impacts choisir ;
- Le degré d'ouverture et de compréhension de la présentation des résultats ;
- Les sources et la qualité des données (par exemple, est-ce que l'utilisation de données secondaires est suffisante pour l'étude ou un recours à de données primaires s'avère nécessaire ? Ou bien une combinaison des deux? Quelle confiance les utilisateurs accordent-ils dans les données manipulées et dans les conclusions de l'étude?

Chapitre 2.

Compte tenu de notre expérience chez Faurecia et du positionnement des auteurs en § II.3, nous avons retenu cinq critères qui nous semblent pertinents pour qualifier une analyse environnementale du terme d'ACV simplifiée (outil ou méthode) opérationnelle et intégrable dans le processus de conception.

Nous formulons que « l'intégration effective de l'évaluation environnementale dans le processus de conception implique à la fois la résolution des problèmes de gestion des données et des problèmes liés à l'appropriation de l'évaluation environnementale par l'équipe de conception » :

- Les problèmes de gestion des données se rapportent à trois critères: la quantité de données, la qualité des données, le temps nécessaire pour les recueillir.
- Les problèmes d'appropriation de l'évaluation environnementale par l'équipe de conception se rapportent à deux critères: la charge de travail impliqués dans la modélisation du cycle de vie du produit, et l'interprétation des résultats pour aider au choix des solutions plus favorables à l'environnement pendant le processus de conception.

Nous avons évalué différentes méthodes proposées par la littérature au travers de ces 5 critères et proposons une synthèse de cette analyse (Tableau 8), concernant les travaux de recherches les plus cités et bien évidemment ceux qui sont proposés pour le compte de l'industrie automobile.

Chapitre 2.

Approches de simplification de l'ACV			Contribution dans la résolution de la problématique				
Méthode	Approche utilisant la méthode	Exemple de situations ; d'outils exploitant l'approche	Faciliter la collecte des données techniques pour faire l'inventaire du cycle de vie (ICV)			Faciliter l'appropriation de la méthode par l'équipe de conception	
			Réduire la quantité de données nécessaires	Favoriser l'utilisation des données primaires (qualité)	Réduire le temps nécessaire pour réunir les données techniques	Supprimer les efforts de modélisation du cycle de vie du produit	Faciliter l'interprétation des résultats et la prise de décision en multicritères
Simplification de l'ICV (simplifier dans le cadre de la méthodologie d'ACV) [Todd et Curran 1999]	Limiter ou éliminer les étapes en amont du cycle de vie	"Gate to grave" approach; Resource and waste management	+	Non renseignée	+	partiellement	-
	Limiter ou éliminer les étapes en aval du cycle de vie	"Cradle to gate " approach; Environmental product declaration	+	Non renseignée	+	partiellement	-
	Considérer uniquement la phase de production	"gate to gate" approach, Environmental performance for production, sponsoring	+	++	+	partiellement	-
	Utilisation des entrées spécifiques pour l'ICV	MIPS (material input per service unit) [Ritthoff et al.2002]	+	Non renseignée	+	Non renseignée	+
	Utilisation des critères discriminants	Approches basées sur des jugements d'experts ou des valeurs imposées par une organisation: ex, Fuzzy Life Cycle Assessment [Gonzales et al.2002]	+	Non renseignée	+	incertaine	-
	Utilisation des données qualitatives et/ou quantitatives	Approches typologiques : ATEP [Le Pochat 2005] ; Learning surrogate LCA [Sousa et Wallace 2006] ; FLASC™ [Curzons et al.2007]	+	-	+	partiellement	-
Utilisation des données/procédés par	Learning surrogate LCA [Sousa et Wallace 2006]	+	Non renseignée	+	-	Non renseignée	

Chapitre 2.

	substitution						
	Limitation du nombre des composants d'un produit complexe à ceux jugés prépondérants au regard des autres (acceptant en conséquence un manque de données techniques)	VW slimLCI, [Koffler et Krinke 2008] (streamline inventory for supporting vehicle LCI)	-	+	+ (de 86 jours en 32 jours)	Partiellement (mais avec une réduction de temps considérable, de 40 jours en 2 jours)	Non renseignée
		SLCA module (Prodtect) [Schiffleitner et al.2008] , for supporting flexible LCA	+, flexible en données d'entrées	Non renseignée	+	partiellement	Non renseignée
Simplification du concept du cycle de vie [Todd et Curran 1999]		Matrix: Environmentally Responsible Product Assessment (ERPA) [Graedel et Allenby 1998]	Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	+, mais besoin d'une coopération avec l'expert "environnement"
Simplification de l'évaluation des impacts du cycle de vie [Todd et Curran 1999]		Matrix: Materials, Energy, Chemicals, Others (MECO), [Wenzel et Hauschild 2001]	Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	Non renseignée	+, mais besoin d'une coopération avec l'expert "environnement"

Tableau 8. Synthèse des principales approches de simplification de l'évaluation environnementale.

II.4. Synthèse de la problématique et question de recherche

Bien que les différentes approches exposées dans le tableau 9 contribuent effectivement à résoudre les problèmes de l'intégration de l'ACV en conception, aucune d'entre elles ne répond effectivement aux 5 critères retenus comme permettant de qualifier un outil d'évaluation environnemental quantitatif simplifié comme « totalement opérationnel » et fiable pour l'équipe de conception.

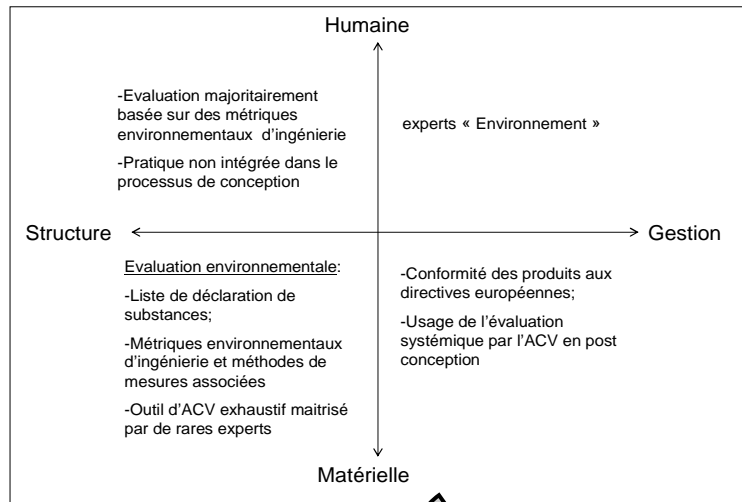
Pour amener une contribution dans ce vide méthodologique, nous formulons notre question de recherche comme suit :

« Comment opérationnaliser l'évaluation environnementale quantitative et systémique de type ACV, pour aider l'équipe de conception dans l'évaluation et l'amélioration de la performance des produits, tout en favorisant le transfert de connaissances environnementales des experts vers les concepteurs par le biais d'une pratique collective de l'éco conception ? »

La Figure 7 ci-dessous montre la synthèse de la problématique de recherche et clarifie notre champ d'actions pour répondre à la question de recherche formulée précédemment.

Chapitre 2.

Statut de l'environnement: non clairement identifiable



Statut de l'environnement: un nouveau critère de conception

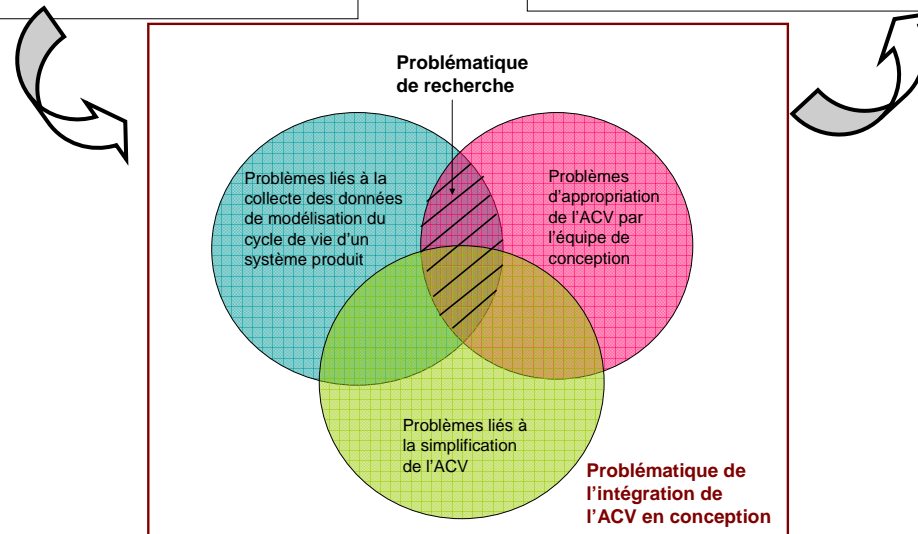
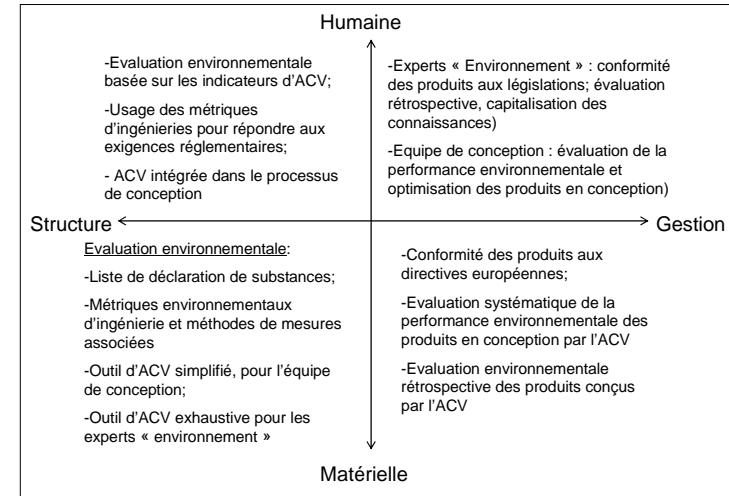


Figure 7. Synthèse de la problématique de recherche.

TROISIEME PARTIE : HYPOTHESES ET PROTOCOLE EXPERIMENTAL

CHAPITRE 3. HYPOTHESES ET CRITERES DE VALIDATION

L'analyse de la problématique de l'intégration de l'ACV (analyse du cycle de vie) dans le processus de conception a montré les difficultés auxquelles nous sommes confrontés pour opérationnaliser une évaluation environnementale quantitative par l'équipe de conception. Cette opérationnalisation de l'ACV par l'équipe de conception au sein de Faurecia est l'objectif de séries d'expérimentations. Elles permettront de déterminer les capacités des nouveaux modèles d'évaluation environnementale, de leur intégration dans le processus de conception, et de leur contribution à la capacité d'éco-conception de l'entreprise.

En se référant au positionnement de ce travail de recherche, une stratégie d'opérationnalisation de l'ACV voulue par l'organisation suppose de mettre en œuvre une méthodologie à caractère évolutif, c'est-à-dire provoquant une transformation progressive de l'organisation industrielle, en :

- *Garantissant une migration progressive de connaissances environnementales vers l'équipe de conception, afin de leur permettre une implication effective dans la résolution des problèmes de l'éco-conception : pratiquer l'évaluation environnementale systémique en conception et contribuer à la recherche des voies d'amélioration environnementale des produits;*
- *Favorisant la mise en place d'une politique d'éco-conception cohérente au sein de l'organisation industrielle. Si l'équipe de conception réalise l'évaluation environnementale et que les experts de l'« environnement » enrichissent la base de données de l'outil d'évaluation (nouvelles données de matières, procédés, impacts...), l'organisation apprenante pourra capitaliser les résultats d'évaluation et les connaissances environnementales, afin de construire progressivement une base de règles solide pour éco-concevoir et éco-innover.*

Ainsi, nous proposons une nouvelle méthodologie d'intégration de l'ACV dans le processus de conception des produits chez Faurecia. Ce qui devra distinguer ce nouveau modèle de ceux qui ont été proposés jusque là se tient dans les caractéristiques suivantes :

- il devra permettre une évaluation quantitative et systémique (en termes de phases du cycles de vie et de natures d'impacts considérés) des produits
- il devra permettre à une organisation de grande taille de fonctionner en partageant des règles communes d'évaluation et d'appréciation des solutions conçues (normalisation des processus des prises de décisions)
- son usage permettra le transfert progressif de connaissances des équipes d'experts vers les concepteurs

Chapitre 3.

Dans ce chapitre, nous énonçons les hypothèses de ce système d'outils à construire, ainsi que leurs critères de validation associés, pour répondre à notre question de recherche.

I. Les hypothèses du nouveau modèle d'intégration de l'ACV

La réponse à la question de recherche posée nécessite :

- *L'élaboration d'un système de captage et de conversion des données techniques en données environnementales : les données doivent être obtenues, traitées et agrégées pour permettre l'évaluation environnementale quantitative. Ces différentes actions imposent la construction d'un système d'informations et de traitement permettant d'agrèger les données techniques (sans la complexité de l'ACV) pour restituer leurs profils environnementaux ;*
- *Un modèle de représentation des résultats obtenus doit être proposés en vue de soumettre aux concepteurs uniquement des informations porteuses de sens à leurs yeux. Les données environnementales exhaustives de l'ACV, qualifiées d'« inutiles » (au sens du « business context » de [Rebitzer et Buxmann 2005]) ou gênantes pour les prises de décisions des concepteurs, doivent être épurées et ou converties en données « utiles », c'est-à-dire compréhensibles et exploitables par ces acteurs, afin de leur servir d'aide aux choix de conception plus respectueux de l'environnement.*
- *Le choix de structuration du système de traitement des données techniques et environnementales : la stratégie d'intégration doit permettre à la fois au système d'outils d'être le moyen d'opérationnalisation de cette pratique d'évaluation environnementale quantitative par les concepteurs, et un moyen d'apprentissage autour de la dimension « environnement » au sein de l'organisation.*

Pour ce faire, les hypothèses de notre travail de recherche sont formulées comme indiqué ci-après.

I.1. Première hypothèse

Si on propose au concepteur un outil simplifié de modélisation des impacts environnementaux au prix d'une perte de flexibilité sur les hypothèses et périmètre de la modélisation, on peut leur permettre de disposer d'un outil d'évaluation systémique sans la complexité intrinsèque de l'ACV. L'ensemble des concepteurs disposera alors d'une méthode standardisée qui favorisera également la comparaison des résultats.

I.2. Deuxième hypothèse

L'exploitation d'une typologie environnementale par famille de produits doit permettre de restreindre le nombre d'indicateurs qui sont fournis au concepteur. Seuls ceux qui ont été mesurés comme jouant un rôle majeur dans la famille de produits doivent être indiqués aux

concepteurs de façon à leur faciliter l'interprétation des résultats. Il faudra cependant prendre garde à éviter les transferts d'impacts.

I.3. Troisième hypothèse

La mise en œuvre des deux premières hypothèses doit permettre aux concepteurs d'améliorer le profil environnemental de leur produit dans les limites/contraintes fixées par le cahier des charges des constructeurs ou marketing (relatives aux stratégies techniques, économiques...)

II. Etablissement de critères de validation des hypothèses

Après avoir énuméré les hypothèses de la recherche, nous nous intéressons dans ce paragraphe aux critères permettant de démontrer la validité de ces hypothèses dans le cadre des expérimentations conduites chez Faurecia.

Il n'existe pas actuellement un standard formalisé, permettant de définir les critères que doivent remplir un « bon » outil d'éco-conception. Toutefois, une synthèse des points de vue de plusieurs chercheurs, notamment [Jones E. 2003] ; [Hoschorner et Finnveden 2003] ; [Lindahl 2006] ; [Le Pochat 2005] ; [Lofthouse 2006] ; [Millet et al.2007] ; [Fargnoli et Sakao 2008] , qui ont abordé ce sujet au cours de la dernière décennie nous a permis d'établir les conditions que devraient remplir un outil ou une méthode d'éco-conception :

- *produire des résultats justes et reproductibles ;*
- *être adapté à la culture de l'entreprise et aux supports matériels/logiciels déjà utilisés ;*
- *favoriser l'apprentissage de l'équipe de conception car les objectifs et stratégies de l'outil sont clairs, tout en permettant une prise en main facile. Par ailleurs, l'outil doit être totalement appropriable tout en mobilisant des vocabulaires familiers aux acteurs de la conception ;*
- *ne demande pas beaucoup de temps, et être flexible en données d'entrée;*
- *inspirer la confiance de l'équipe de conception, car l'outil leur donne une impression de satisfaction en l'utilisant, de travail achevé en visualisant et en interprétant les résultats, car ces derniers sont compréhensibles et exploitables.*

L'analyse du croisement de ces critères avec les 5 critères¹⁰ relevant de notre problématique sur l'intégration de l'ACV en conception et les fonctions contraintes¹¹ que

¹⁰ Voir état de l'art des méthodes et outils de simplification de l'ACV.

Chapitre 3.

doivent remplir le système d'outils à construire, nous amène à définir d'une manière exhaustive dans le Tableau 9 les critères retenus de qualité du modèle que nous proposons et les méthodes de validation de nos hypothèses.

¹¹ Elements du cahier des charges fonctionnel du système d'outils traduisant les besoins d'adaptation au processus de conception de Faurecia.

Chapitre 3.

Hypothèses	Fonctions attendues	Critères d'appréciation	Niveaux	Acceptation/tolérance	moyens de contrôle et de validation
H1	1.1) permettre une évaluation quantitative et systémique adapté au design	visuel	Echelle de 0 à 5 (très mauvais à excellent)	>2	<i>validation</i> : Test de prise en main. <i>contrôle</i> : questionnaire d'évaluation du test de prise en main (cf. annexes)
		objectifs et stratégies	Echelle de 0 à 5 (très mauvais(e) à excellent(e))	>2	
		prise en main	Echelle de 0 à 5 (très mauvais(e) à excellent(e))	>2	
		vocabulaire	Echelle de 0 à 5 (très mauvais(e) à excellent(e))	>2	
		présentation des résultats	quantitative sur le cycle de vie	0	<i>validation</i> : Test d'intégration ; <i>contrôle</i> : questionnaire d'évaluation à chaud (cf. annexes)
	1.2) réduire la complexité de l'ACV	temps d'usage	1h à 2h de temps	< 2h15	<i>validation</i> : Test d'intégration ; <i>contrôle</i> : questionnaire d'évaluation à chaud (cf. annexes)
		flexibilité en données d'entrées	Echelle de 0 à 5 (très mauvais(e) à excellent(e))	>2	<i>validations</i> : Test de prise en main ; test d'intégration <i>contrôle</i> : questionnaire d'évaluation à chaud (cf. annexes)
		appropriation	Echelle de 0 à 5 (très mauvais(e) à excellent(e))	>2	
		interprétation des résultats	Echelle de 0 à 5 (très mauvais(e) à excellent(e))	>2	
	1.3) fournir des résultats de qualité comparable à l'ACV	justesse	±10% de déviation entre les résultats de l'ACV simplifié et l'ACV exhaustive	< 30%	<i>validation</i> : Tests de cohérence (validation initiale) <i>contrôle</i> : GaBi
H2	2.1) permettre facilement une autonomie de l'utilisateur	objectifs et stratégies	Echelle de 0 à 5 (très mauvais(e) à excellent(e))	>2	<i>validation</i> : Test d'intégration ; <i>contrôle</i> : questionnaire d'évaluation à chaud (cf. annexes)
		nombre de critères	approche moins multicritère	0	

Chapitre 3.

		env.			
		appropriation	Echelle de 0 à 5 (très mauvais(e) à excellent(e))	>2	
	2.2) aider au choix environnementaux	interprétation des résultats	Echelle de 0 à 5 (très mauvais(e) à excellent(e))	>2	
	2.3) détecter les erreurs dues à l'utilisateur	verrous et alertes	Echelle de 0 à 5 (très mauvais(e) à excellent(e))	>2	<i>validations</i> : Test de prise en main ; test d'intégration ; <i>contrôle</i> : questionnaire d'évaluation à chaud (cf. annexes)
2.4) inciter la confiance de l'utilisateur	usage et résultats	Echelle de 0 à 5 (très mauvais(e) à excellent(e))	>2		
H3	3.1) être un moyen d'apprentissage organisationnel	motivation des utilisateurs	Non attribué		<i>validation</i> : interview différée; <i>contrôle</i> : questionnaire d'évaluation à froid (cf. annexes)
		qualité perçue de l'outil	Non attribué		
		interactivité	Non attribué		
		compréhension multidisciplinaire	Non attribué		
		intérêts d'usage	Non attribué		
	3.2) générer du changement dans l'organisation industrielle	procédure d'intégration	Plan de validation Plan de transfert		<i>validation</i> : comité innovation <i>contrôle</i> : modification des produits et du processus de conception (action à long et moyen termes)

Tableau 9. Tableau d'analyse des hypothèses du système d'outils et les critères de validation.

CHAPITRE 4. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

La démarche expérimentale comprend trois grandes phases :

- *Une phase de création et de développement d'un outil simplifié d'évaluation environnementale dénommé « EcoT » (Eco assessment per environmental Typology), et de son système d'informations:*
- *Une phase de validation de la qualité et de la robustesse de EcoT, suivant les données collectées (tableau 10) qui permettent d'évaluer la capacité de notre modèle d'intégration de l'éco conception à satisfaire aux hypothèses énoncées.*
- *Une phase d'intégration de « EcoT » dans le processus de conception.*

Dans ce chapitre, nous exposons de manière concise ces trois phases de la démarche expérimentale.

I. La phase de création et de développement de l'outil simplifié d'évaluation environnementale « EcoT » et de son système d'informations

Elle comprend l'identification d'une stratégie d'intégration d'EcoT au sein de l'organisation, la modélisation de l'architecture d'EcoT correspondant à la stratégie identifiée, ainsi que le développement d'un modèle préliminaire de l'outil et de ses interfaces avec les utilisateurs.

Deux fonctionnalités majeures constituent les noyaux de l'outil EcoT:

- Les fonctions d'impacts: *ils sont créés pour rendre l'évaluation environnementale quantitative cognitivement accessible aux concepteurs sans passer par la modélisation du cycle de vie du produit comme dans un outil d'ACV classique, et la collecte des données permettant cette modélisation. Cette opération est valable si on définit en amont pour chaque famille de produit le périmètre de la modélisation de l'ACV et l'unité fonctionnelle. Ces entités et les paramètres associés deviendront dans ce cas des instances fixes pour le concepteur. Ainsi, il devient possible pour un non expert de l'ACV de manipuler une évaluation systémique et quantitative en fournissant uniquement les instances du produit, qui sont mises en paramètres variables.*
- La typologie (ou catégorisation) environnementale par famille de produits: *créée pour faciliter l'interprétation des résultats d'évaluation et l'analyse des solutions de conception par les concepteurs. Dans cette optique, nous supposons qu'il est possible de différencier les produits selon les valeurs prises par les catégories d'impacts environnementaux qui les caractérisent. Cette différenciation en familles de*

Chapitre 4.

produits donne lieu à la création de classes aux profils environnementaux similaires, c'est-à-dire de mêmes catégories d'impacts majeurs à proximité des valeurs moyennes sur ces impacts majeurs. La création des classes environnementales dans cette nouvelle approche vise à simplifier l'interprétation des résultats d'ACV pour le concepteur :

- en lui fournissant un référentiel de comparaison dans une famille de produits (analyse quantitative) ;*
- en lui limitant le nombre de critères à considérer systématiquement à ceux qui sont significatifs par classe environnementale dans une famille de produits (analyse moins multicritère).*
- Les principes détaillés de ces deux fonctionnalités d'EcoT font l'objet de la quatrième partie du document, portant sur les résultats et expérimentation.*

II. La phase de validation de l'outil EcoT et de son système d'informations:

La phase de validation dans cette démarche expérimentale correspond à l'expérimentation proprement dite d'EcoT. C'est l'unique phase du protocole expérimental qui va permettre de mesurer la validité des hypothèses de recherche. Succinctement, cette phase comprend une étape de validation initiale et une étape de mise à l'épreuve de l'outil EcoT:

- L'étape de validation initiale consiste en un recalage du modèle EcoT pour vérifier la cohérence de ses résultats d'évaluation avec les résultats que fournit l'outil d'ACV de référence GaBi. Cette action sera dénommée « test de convergence ». Dans notre cas, elle fait partie de la phase expérimentale proprement dite de EcoT, mais réalisée uniquement par les experts eco-design.*
- L'étape de mise en œuvre est celle qui se trouve au cœur de l'expérimentation d'EcoT, durant laquelle l'outil et son système d'informations sont testés dans les scénarios réels d'usage par ses futurs utilisateurs. Cette étape est conditionnée par deux niveaux de tests:*
 - un test préliminaire de prise en main, qui est réalisée en dehors du processus de conception de Faurecia avec un groupe d'acteurs multidisciplinaires;*
 - un test d'intégration mettant en œuvre EcoT sur un projet en cours de conception chez Faurecia, avec un acteur spécifique : un ingénieur de concept (pilote du projet).*

III. La phase d'intégration de EcoT dans le processus de conception :

L'intégration d'EcoT et de son système d'information dans le processus de conception de Faurecia correspond à la phase d'aboutissement de ce travail de recherche, lorsque EcoT aura franchi la phase expérimentale et sera accepté par l'entreprise par le biais de la signature de son plan de validation. A ce stade, l'organisation sera considérée comme étant en phase d'apprentissage, et la procédure d'intégration d'EcoT dans le processus de l'entreprise sera réalisée par la mise en place d'un jalon spécifique EcoT dans les check-lists de validation des projets en conception, avant qu'un nouveau concept de produit soit proposé au client (request for quotation).

IV. Synthèse du protocole expérimental

Afin de mieux comprendre l'enchaînement et les liens entre les actions à conduire dans le cadre de la recherche de solution et de sa validation, nous représentons ci-dessous sous forme de bloc diagrammes (Figure 8) la synthèse de la démarche expérimentale.

La quatrième partie de ce document sera dédiée à la réalisation de cette démarche expérimentale, dans laquelle nous détaillerons chaque activité énumérée, dans le cadre de la construction de l'outil EcoT et de son expérimentation pour mesurer la validité de nos hypothèses.

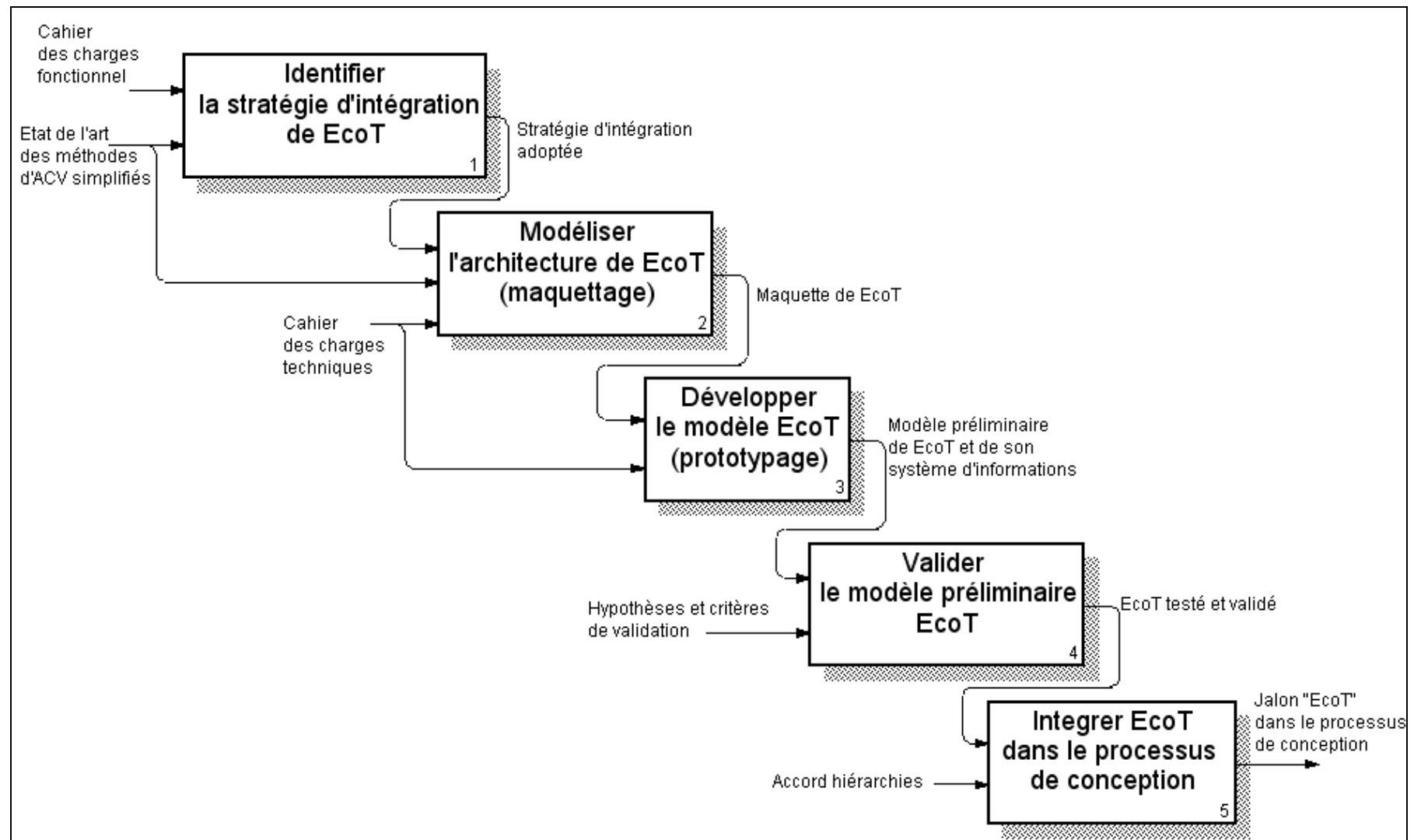


Figure 8. Synthèse du protocole Expérimental

QUATRIEME PARTIE : EXPERIMENTATION ET RESULTATS

CHAPITRE 5. CONCEPTION DE L'ARCHITECTURE D'ECOT ET DE SON SYSTEME D'INFORMATIONS

Le présent chapitre est destiné à l'élaboration de l'architecture de l'outil EcoT et de son système d'informations, que nous avons proposé comme vecteur d'intégration de l'analyse environnementale quantitative par l'ACV dans le processus de conception de Faurecia.

Avant de rentrer dans le vif du sujet, il convient d'indiquer le point d'ancrage des paramètres environnementaux dans le processus de conception de Faurecia, en d'autres termes d'identifier les points où l'évaluation et l'amélioration de la performance environnementale du produit doivent être intégrées.

Ensuite, nous allons identifier quelle stratégie d'intégration permet une configuration pertinente du futur EcoT, pour une intégration consciente de l'équipe de conception, c'est-à-dire sans simplifier outrageusement la problématique environnementale, tout en maintenant la cohérence au sein de l'organisation industrielle. Pour ce faire, nous nous appuyons, d'un côté sur les analyses de besoins et de faisabilité définies dans le cahier des charges fonctionnel du système d'outils, et de l'autre côté sur l'état de l'art des différentes méthodes pour simplifier la méthodologie de l'analyse du cycle de vie.

Le choix de la stratégie d'intégration conduit à la création de l'architecture du système d'informations à construire entre l'ACV et le processus de conception. Il en résulte au final une silhouette de la configuration de l'outil « EcoT » et de son système d'informations, constitué:

- De l'outil simplifié d'évaluation environnementale EcoT
- De l'outil d'ACV exhaustive de référence GaBi, réservé à l'usage des experts eco-design, afin de créer et d'alimenter les fonctionnalités de l'outil EcoT.

I. Les points d'ancrage des paramètres environnementaux dans le processus de conception de Faurecia

Afin de mieux comprendre et mieux situer la phase déterminante du processus de conception (comme expliquée dans la notion d'intégration par Janin au chapitre II, §II.2), durant laquelle la performance environnementale du produit doit être optimisée, nous faisons appel à la recherche d'une correspondance du processus de conception de Faurecia au modèle générique du processus de conception (nous choisissons ici une approximation suivant la configuration de Millet et al. [Millet et al.2007]). Nous ne focaliserons pas sur la présentation des acteurs métiers impliqués dans cette phase déterminante du processus de conception (leur multidisciplinarité, ainsi que la nature transversale du processus de

Chapitre 5.

conception ont été déjà discutées dans la première partie de ce document) mais plutôt sur les points adéquats de l'intégration des paramètres environnementaux.

Ainsi, cette phase déterminante du processus de conception chez Faurecia correspond au moment où :

- *L'équipe de conception impliquée peut réaliser une évaluation environnementale quantitative, en se basant sur la nomenclature (BOM, bill of materials), qui se consolide au fur et à mesure de l'avancement du projet;*
- *La marge de manœuvre de l'équipe de conception pour choisir une solution plus respectueuse de l'environnement est maximale; l'architecture définitive du produit n'est pas encore définie, et les acteurs peuvent générer et évaluer plusieurs alternatives de concept du nouveau produit.*

Dans la Figure 9, nous mettons en évidence cette phase déterminante chez Faurecia, avec les actions environnementales devant y être pris en compte. Cela sous-entend qu'outre le devoir de rendre l'évaluation environnementale elle-même opérationnelle par l'équipe de conception, les outils à intégrer doivent être suffisamment exhaustifs et robustes pour couvrir l'ensemble des actions environnementales requises à ce stade.

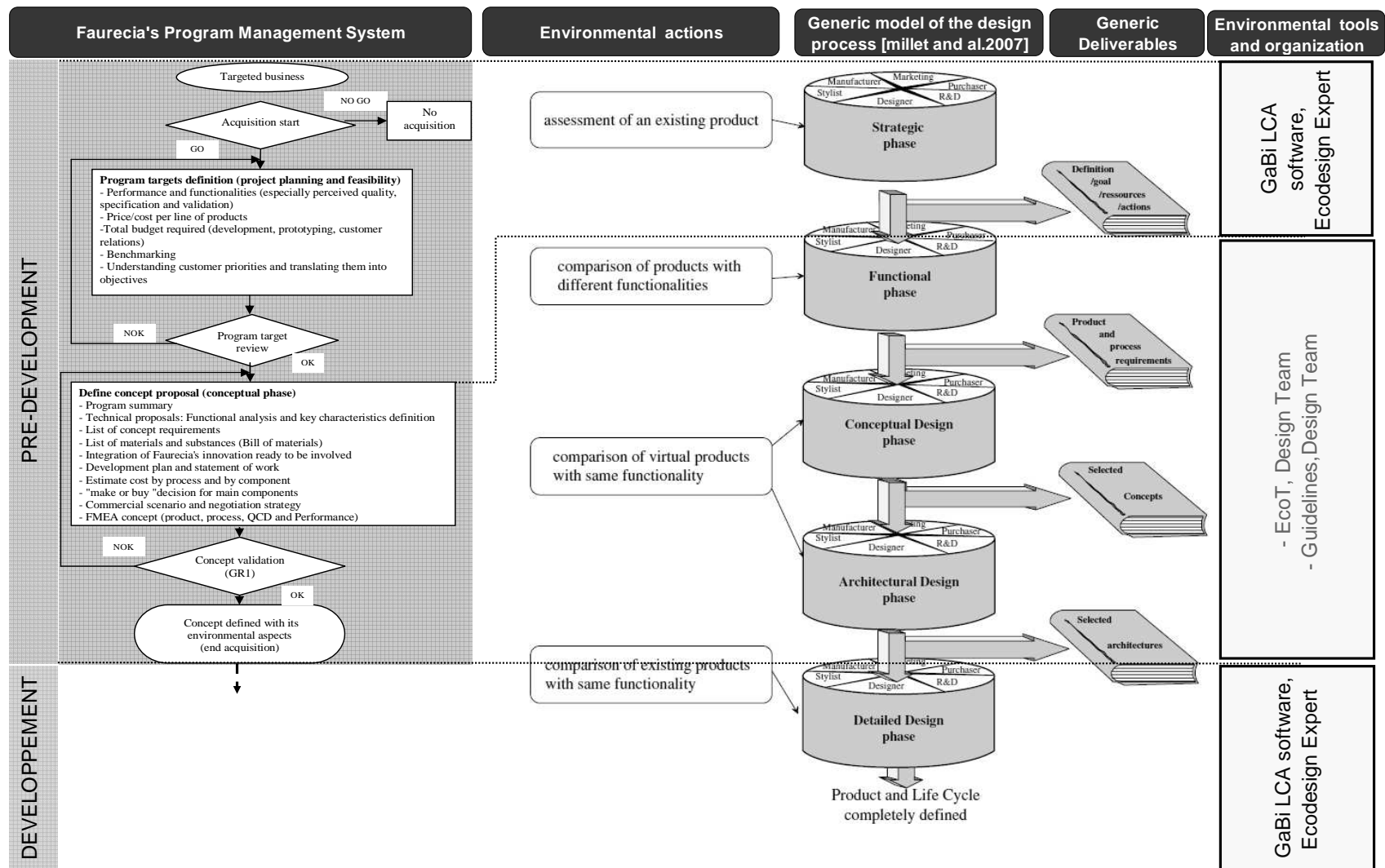


Figure 9. La cartographie de la cohérence entre le processus de conception de Faurecia et le modèle générique de Millet et al, montrant l'agencement de nos outils environnementaux à construire et à intégrer dans le processus de conception.

Chapitre 5.

La deuxième partie de la phase de pré-développement (proposition de concepts et construction de l'offre, Figure 2 et Tableau 5, chapitre I §II.2) est ainsi identifiée comme le barycentre de l'évaluation et de l'amélioration de la performance environnementale. C'est à ce moment que l'équipe de conception joue un rôle primordial de création, d'analyse et de choix de solutions pour définir l'architecture du nouveau produit.

La réussite du greffage de l'analyse environnementale quantitative par le biais de EcoT dans la phase conceptuelle du produit chez Faurecia réside dans :

- *une stratégie d'intégration de EcoT, qui va modifier l'organisation industrielle, dans la pratique environnementale traditionnelle basée sur « le tout à la charge de l'expert environnement » vers une pratique collaborative « impliquant fortement les concepteurs » dans l'éco-conception de leurs produits;*
- *une simplification de l'ACV pour la rendre à la fois « appropriable » par les concepteurs et « adaptée aux contextes des produits et des procédés de fabrication » de l'entreprise.*

II. Identification d'une stratégie d'intégration de EcoT

Dans cette section, nous donnerons dans un premier temps une brève historique sur les stratégies d'intégration de l'environnement en conception, révélées dans des travaux de recherches antérieures similaires à la notre. Ensuite, nous proposerons de nouvelles pistes de stratégies d'intégration de l'ACV au sein des acteurs de la conception, permettant à ces derniers de prendre part effectivement dans l'analyse environnementale de leurs produits. Il en résultera une forme esquissant l'architecture des outils dérivés de la simplification de l'ACV, que nous souhaitons développer et intégrer dans le processus de conception de l'entreprise.

II.1. Brève historique

R. Le Borgne [Le Borgne 1998] , après avoir démontré dans ses travaux de thèse chez PSA Peugeot Citroën les potentiels de l'usage des ACV en industrie automobile, a proposé une stratégie pérenne pour l'implantation de cet outil au sein de l'organisation industrielle, en proposant la création d'une cellule ACV (des experts environnement) reliée aux différents services de l'entreprise, voire des parties prenantes, pour l'alimentation en données et la communication partielle des résultats de l'étude. Cette proposition (Figure 10) est basée sur l'instrumentation de l'expert environnement, qui, par la suite va communiquer plus ou moins partiellement aux différentes entités de l'entreprise, les résultats de l'analyse environnementale.

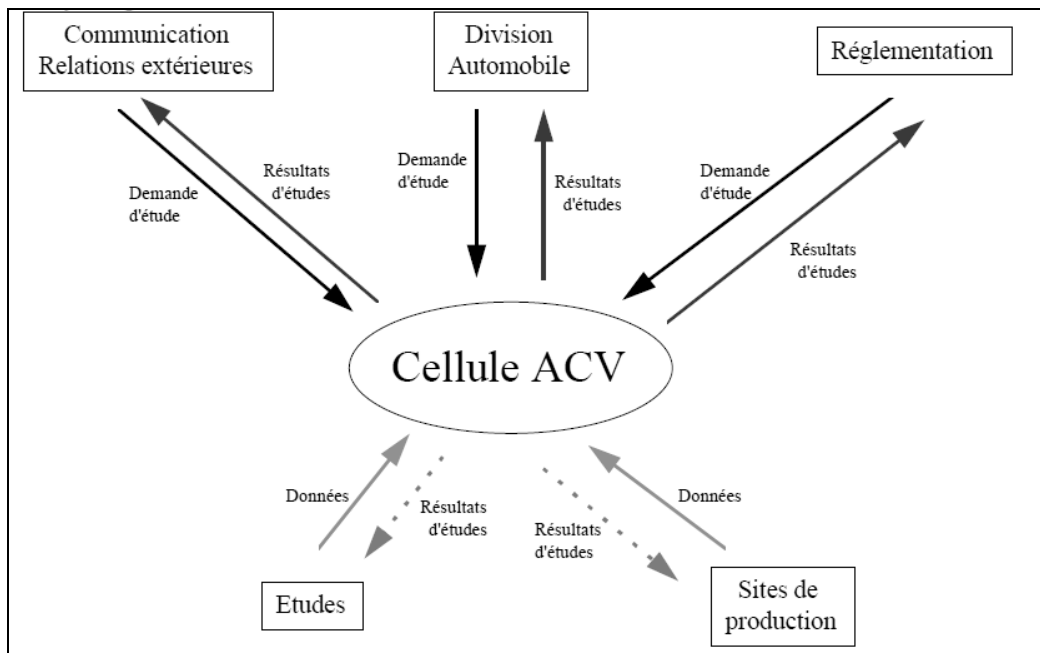


Figure 10. Proposition d'une stratégie d'implantation de l'activité ACV (d'après R. Le Borgne)

Elle est identifiée comme une bonne stratégie, dans le sens où cela modifie le statut de la connaissance environnementale de l'entreprise en créant une expertise en interne. En revanche, elle génère des difficultés car elle entraîne une déconnexion entre la cellule « environnement » et l'équipe de conception, provoquant une faible remise en cause du produit sur le plan environnemental [Millet et al.2003] .

C'est ainsi que la majorité des travaux de recherche relativement récents (nous citons ici notamment ceux entrepris par [Jacqueson 2002] ; [Le Pochat 2005] et [Reyes 2007] qui s'inscrivent dans des cadres similaires à celui notre travail de recherche) misent sur l'instrumentation méthodologique des acteurs du processus de conception, afin de promouvoir la création de connaissances environnementales, de faciliter l'amélioration de produits et de favoriser une coordination dans l'équipe de conception. [Jacqueson 2002] a utilisé une stratégie d'intégration basée sur la création de connaissances environnementales au sein de l'entreprise « Faurecia Automotive Seating ». La question de l'intégration est donc posée par Jacqueson sous l'angle des connaissances et des interactions humaines à leur origine, comme la création, l'apprentissage et la diffusion de connaissances, des échanges fructueux sur les thématiques environnementales entre les acteurs de la conception et les experts eco-design, plutôt qu'en terme de mise en place de ressources techniques. Plus tard, [Le Pochat 2005] et [Reyes 2007] ont exploré (dans le cadre de l'intégration de l'éco-conception dans les PME) cette seconde voie d'intégration, en proposant une stratégie basée sur le déploiement d'un outil environnemental spécifique dédié aux acteurs de conception afin de provoquer l'acquisition de connaissances environnementales et la transformation de l'organisation apprenante.

II.2. Proposition de stratégies d'intégration de EcoT

L'approche d'intégration de l'évaluation environnementale par EcoT, que nous proposons dans ce travail de recherche, emprunte également la voie d'intégration par l'instrumentation méthodologique de l'équipe de conception. L'objectif majeur est de permettre à l'équipe de conception la réalisation d'une analyse quantitative et systémique de type ACV et l'exploitation de ses résultats au cœur du processus de conception.

Nous avons déjà abordé dans les chapitres précédents la complexité qui réside dans la conduite d'une ACV, et son incompatibilité avec les acteurs de la conception. La surcharge des activités au cœur de ce processus de conception et le nombre de critères que les concepteurs doivent déjà prendre en compte pour valider un produit, ne laisse pas d'autre solution que simplifier l'ACV et l'adapter au contexte de l'entreprise.

[Millet et al.2007] ont déjà mené une réflexion sur ce sujet et ont conclut que l'ACV sous sa forme actuelle ne peut pas être un outil d'aide à la conception environnementale d'un produit, mais plutôt un outil permettant de construire divers outils environnementaux adaptables aux besoins de l'équipe de conception et intégrables dans leurs pratiques.

En s'appuyant sur les propos de Millet et al, nous postulons que l'intégration de l'ACV par le biais des outils dérivés de sa simplification est plausible, moyennant l'identification d'une stratégie d'intégration, permettant de le relier à l'organisation industrielle.

A partir des résultats des interviews (Tableau 6) de recueil des besoins synthétisés dans le cahier des charges de EcoT, ainsi que l'état de l'art sur les méthodes de simplification de l'ACV (cf. II.4 du chapitre 2), nous avons imaginé quatre configurations possibles (Figure 11), de l'architecture de EcoT et de son système d'informations.

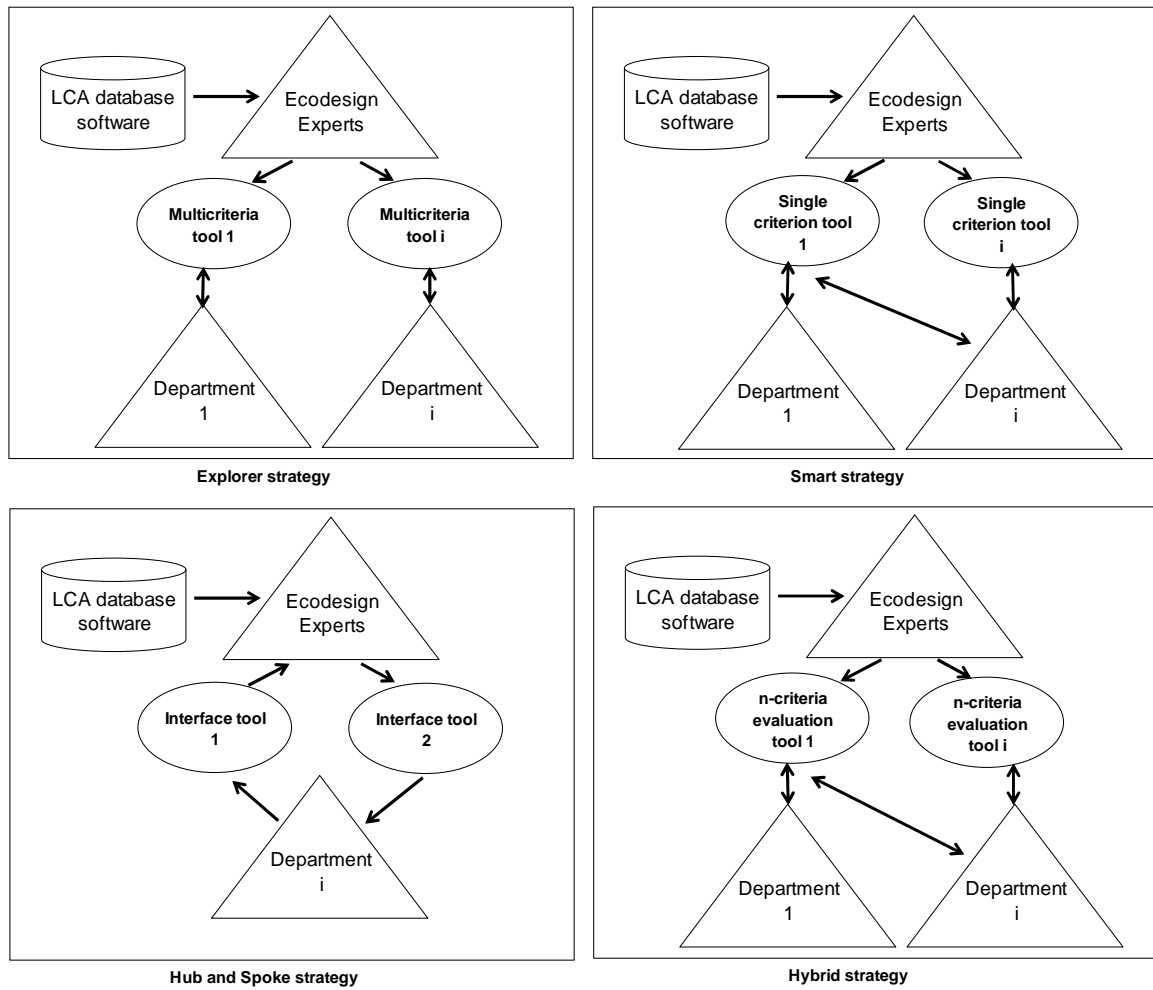


Figure 11. Les quatre stratégies esquissant l'architecture des outils dérivés de la simplification de l'ACV en vue de leur intégration au sein de l'équipe de conception (extraits du cahier des charges fonctionnel du système d'outils)

Une description de chaque stratégie d'intégration proposée pour EcoT est présentée dans le Tableau 10.

Chapitre 5.

Stratégie	Description	Principaux avantages	Principaux inconvénients	Méthodes génériques de simplification de l'ACV applicables [Todd et curran 1999]
Intégration par service, alias « Explorer »	Outils quantitatifs multicritère par service	Garantit une implication effective de chaque service ;	Remet en cause le fonctionnement transversal du processus de conception Fonctionnalités et mises à jour de la BDD délicates	Simplification de l'ACV dans le cadre de la méthodologie : toutes; Simplification du concept du cycle de vie ; Simplification de l'évaluation des impacts du cycle de vie.
Intégration par critère, alias « Smart »	Outils monocritère interactifs	Favorise une pratique collective et échange entre les acteurs ; Résultat facile à interpréter ;	Fort risque de focalisation sur un seul critère ; Risque de confusion au sein des acteurs dans le choix d'utilisation des outils	Simplification de l'ACV dans le cadre de la méthodologie : utilisation d'entrées spécifiques, utilisation des critères discriminants.
Intégration par le potentiel d'un expert ACV, alias « Hub and Spokes »	un réseau en interne permettant de lier l'équipe de conception avec les experts environnement via des interfaces (spokes) de captage des données de produits et de présentation des résultats.	Grande flexibilité pour les données d'entrées : les concepteurs peuvent renseigner et compléter en permanence les données d'entrées, au fur et à mesure de l'avancement d'un projet ; BDD d'ACV (Hub) accessible en permanence par les experts pour effectuer les mises à jour.	Faible implication de l'équipe de conception dans la pratique et dans l'acquisition de connaissances environnementale ; Beaucoup de charges de travail pour les experts «environnement » ;	Simplification de l'ACV dans le cadre de la méthodologie : Utilisation des données/ procédés par substitution ; limitation du nombre des composants d'un produit. Simplification de l'évaluation des impacts du cycle de vie.
Intégration thématique par catégorisation de critères potentiels selon une famille de produits, alias « Hybrid »	Outils multicritères interactifs, dérivés des ACV par famille de produits	Favorise une pratique collective et échange entre les acteurs, tout en restant multicritères.	Fonctionnalités et mises à jour de la BDD délicates	Simplification de l'ACV dans le cadre de la méthodologie : Utilisation des données/ procédés par substitution ; limitation du nombre des composants d'un produit ; utilisation des critères discriminants. Simplification de l'évaluation des impacts du cycle de vie.

Tableau 10. Descriptif des stratégies d'intégration et analyse de faisabilité afin de proposer de solutions implicites pour EcoT et son système d'informations (source cahier des charges de EcoT)

II.3. Choix de l'architecture du système d'outils :

L'architecture du système doit être choisie afin de pouvoir mettre en place une politique d'éco-conception cohérente au sein de l'organisation de l'entreprise : permettre à la fois l'usage de l'ACV exhaustive par les experts Ecodesign pour alimenter et mettre à jour l'outil EcoT, et, l'usage de EcoT par les concepteurs afin que ces derniers puissent prendre part dans l'évaluation environnementale et intégrer par la suite les paramètres environnementaux dans la prise de décision stratégique sur les produits (en réponse à la troisième hypothèse formulée dans le troisième chapitre).

En outre, ce choix de l'architecture à développer doit tenir compte du besoin formel d'intégration et d'adaptation au processus de conception, qu'on peut énoncer d'une manière concise comme étant une approche quantitative et dynamique « totalement appropriable » par l'équipe de conception, à savoir :

- *Nécessitant moins de temps et de charges de travail que l'ACV exhaustive ;*
- *Flexible en données d'entrée et en usage, donc accessible et utilisable tout au long du processus de conception;*
- *Fournissant des résultats « utiles », c'est-à-dire des résultats compréhensibles et exploitables par l'équipe de conception;*
- *Interdépendants et adaptés au contexte industriel, car intégrant une base de données comportant les matières et procédés de fabrication spécifiques à l'entreprise;*
- *Evolutif, interactif et robuste, car permettant à l'équipe de conception d'acquérir de nouvelles connaissances au fur et à mesure de son usage, d'échanger entre eux sur les voies d'amélioration de la performance environnementale de leurs produits, sans simplifier excessivement la problématique environnementale.*

En se référant aux missions que doit remplir « EcoT » et son système d'informations, l'architecture à développer ne pourrait que prendre une forme résultante de la troisième et la quatrième proposition. En effet, la création d'un outil d'ACV simplifiée par famille de produits nécessite que le système doive intégrer, à part les experts eco-design et son outil d'ACV de référence, une base de données d'ACV simplifiée, permettant d'alimenter les outils simplifiés (stratégie 3). Ensuite, les outils créés sont appropriables par l'équipe de conception pour leur permettre directement (sans avoir besoin des experts eco-design) de réaliser des ACV simplifiées par famille de produits (stratégie 4).

En Figure 12, nous allons créer, dans un premier temps, une base de données d'ACV relative aux activités de « Faurecia Interior System ». Cette base de données d'ACV permet par la suite de créer l'outil EcoT et son système d'informations, permettant à l'équipe de conception de réaliser des ACV simplifiés par famille de produits (FPI). Nous détaillerons les

mécanismes du système d'outils, dans le cadre de la création de la base de données d'ACV exhaustive et du développement des fonctionnalités de l'outil EcoT dans le chapitre suivant.

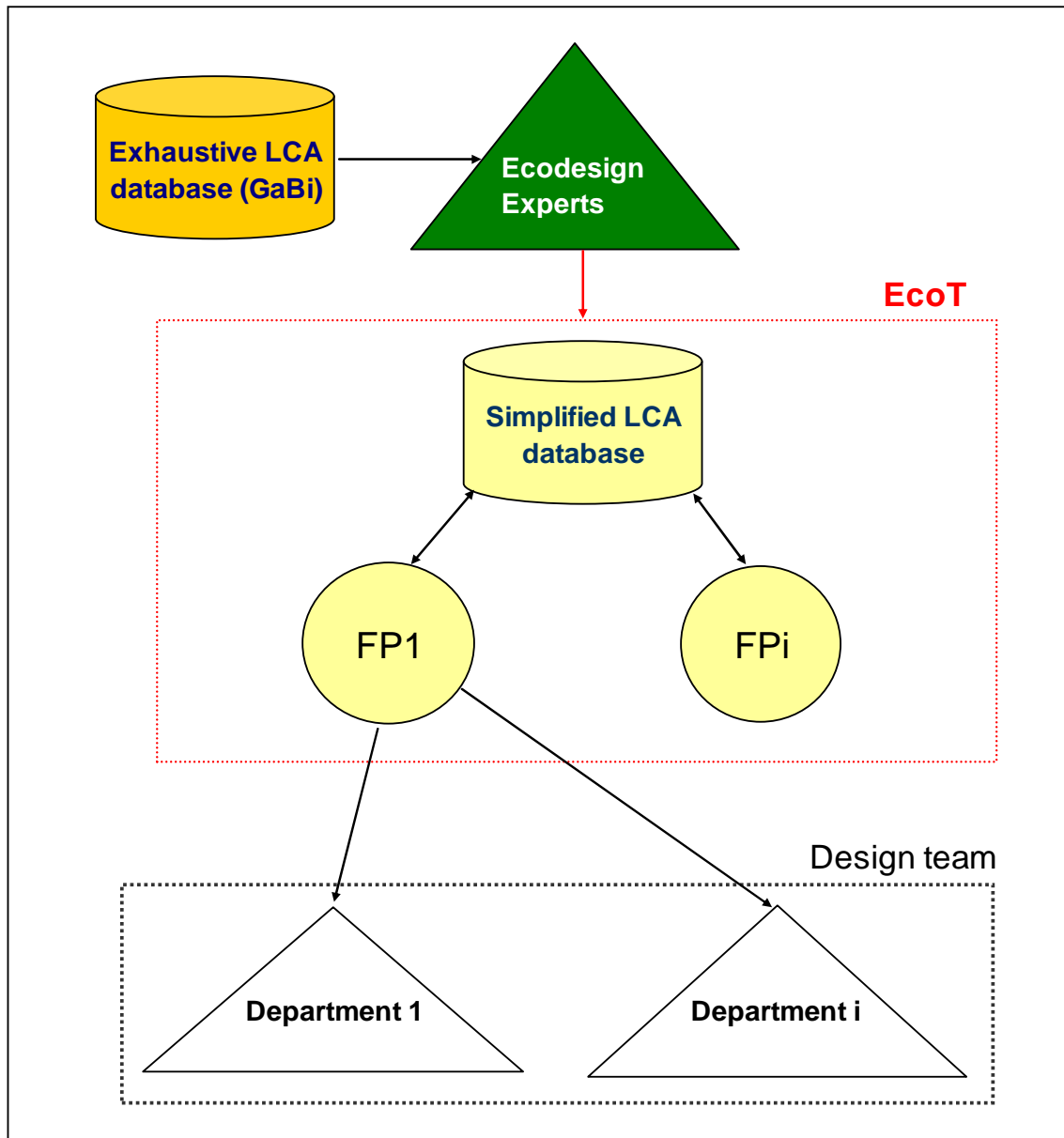


Figure 12. Silhouette de l'architecture d'EcoT et de son système d'informations

CHAPITRE 6. DEVELOPPEMENT DE L'ARCHITECTURE D'ECOT ET DE SON SYSTEME D'INFORMATIONS

Le développement de l'architecture de EcoT et de son système d'informations se déroule en plusieurs étapes successives.

Il est nécessaire dans un premier temps de réaliser un inventaire des familles de matières et procédés de fabrication impliquée dans les activités de l'entreprise. Ensuite, un travail de collecte des données sur le cycle de vie des produits de Faurecia permet de construire une base de données dans le logiciel d'ACV en quantifiant tous les impacts environnementaux de chaque procédé du cycle de vie.

L'extraction, à partir du logiciel d'ACV, des impacts par instanciations de l'unité d'œuvre des activités/procédés modélisés, conduira à la création d'une base de données secondaire qu'EcoT utilisera pour permettre une évaluation simplifiée d'impacts, sans passer par la modélisation du produit. C'est l'ensemble des fonctions paramétrées.

La création d'une fonctionnalité basée sur la simplification de l'ACV par famille de produits et son association avec la base de donnée secondaire conduiront par la suite à la création de la maquette de l'outil EcoT.

La création des interfaces avec l'équipe de conception, et son association aux composantes de base permettront au final de définir un prototype fonctionnel de l'outil d'ACV simplifié par famille de produits « EcoT », intégrable en phase de conception des produits chez Faurecia.

I. Construction de la base initiale : base de données d'ACV relatives aux activités de « Faurecia Interior system »

I.1. Finalités

Construire une base initiale de données d'ACV relative aux activités de « Faurecia Interior System » dans GaBi permet de :

- *De traduire des variables physiques : quantité d'un matériau X exploité, kilomètre parcouru par une masse M dans un moyen de transport Y..... en impacts environnementaux. Cette transformation est rendue possible par la détermination des fonctions paramétrées qui lient chacun des paramètres à l'expression d'un impact environnemental. La compilation de ces fonctions constitue la base de données secondaire d'EcoT (simplified LCA database).*
- *Evaluer des produits déjà existants ou en développement pour un double objectif :*

- Créer des références par classe de produits, selon une typologie environnementale de la famille de produit considérée;
- Identifier les composants, matières, procédés de fabrication, leur combinaison, ainsi que les étapes du cycle de vie les plus (ou moins) impactant pour définir une base de connaissances environnementales. Suffisamment formalisées, ces dernières pourraient être converties en base de règles d'éco-conception (guidelines).

I.2. Modélisation du cycle de vie d'un produit « Faurecia Interior System » : cas de la famille « planche de bord »

I.2.1. Description du produit

Nous allons présenter dans ce qui suit en quoi consiste une planche de bord en termes de fonctions principales et de composants.

La planche de bord est un produit d'équipement d'« intérieur véhicule », jouant le rôle d'une interface principale entre le véhicule et ses occupants ; elle doit assurer quatre fonctions principales:

- La fonction « **support** » : la planche de bord doit intégrer les divers organes nécessaires au conducteur pour les commandes de son véhicule (par exemple : la colonne de direction, le tableau de bord, le head-up display, etc...)
- La fonction « **confort** », regroupant la fonction d'aéraulique (climatisation et désembuage) et de rangement (boite aux gants).
- La fonction « **style** », regroupant les aspects visuels et de touchers (par exemple, le design de forme, le volume fonctionnel du produit, les revêtements de surfaces, les couleurs, etc...) pour mettre en valeur les qualités que devront percevoir les utilisateurs du véhicule.
- La fonction « **sécurité** » : la planche de bord, interface directe entre le véhicule et ses occupants, doit participer à la sécurité de ces derniers. Ainsi, les composants de la planche comme le canal de tir d'airbag et les absorbeurs de chocs genoux jouent un rôle primordial à cet effet.

La planche de bord est un produit technique complexe (même si son aspect extérieur a une apparente simplicité, une planche de bord peut comporter plus de 200 composants), et pour remplir toutes les fonctionnalités ci-dessus, sa conception fait appel à une grande diversité de matériaux, de procédés et de composants. Le Tableau 11 montre à titre indicatif ces diversités de matériaux et procédés de fabrication qui feront l'objet de la modélisation dans la base de données d'ACV à construire.

Chapitre 6.

Les principaux composants d'une planche de bord	Famille de matières	Procédés de fabrication
Corps de planche	Polyoléfines (PP, P/E) chargées talc, fibres de verre, fibres naturelles (chanvre, lin...); Polycarbonate- acrylonitrile butadiène styrène (PC-ABS).	Moulage par injection ; Thermo compression ; Thermoformage
Garnitures de revêtement de planche	<u>Peau</u> : PVC, thermoplastic olefins (TPO), Polyuréthane (PU) ; cuir et textile PET (polyéthylène téréphtalate) <u>Mousse</u> : PU, PP expansible	<u>Peau</u> : Rotomoulage, thermogainage, affichage, gainage manuelle ; <u>Mousse</u> : moussage.
Module de dégivrage	Polyoléfines (PP, P/E) chargées talc, fibres de verre; Styréniqes : PC-ABS, ABS.	Moulage par injection
Conduits d'air	Polyéthylène haute densité (PEHD)	soufflage
Buses d'aérateurs	Polyoléfines (PP, P/E) chargées talc ; Styréniqes : PC-ABS, ABS	Moulage par injection
Aérateurs	PC-ABS ; ABS	Moulage par injection
Cuve de la boite aux gants	Polyoléfines (PP, P/E) chargées talc; Styréniqes : PC-ABS, ABS.	Moulage par injection
Couvercle de la boite aux gants	Polyoléfines (PP, P/E) chargées talc ; Styréniqes : PC-ABS, ABS.	Moulage par injection
Palette d'ouverture de la boite aux gants	PC-ABS ; ABS, PA-GF (polyamide – fibres de verre)	Moulage par injection
Canal de tir d'airbag	Polyoléfines (PP, P/E) chargées talc, fibres de verre; Styréniqes : PC-ABS, ABS, ABS-PA ; Tôle d'acier	Moulage par injection ; estampage
Absorbeurs de choc genoux	Polystyrène, polypropylène copolymère (P/E) ; polyoxyméthylène (POM)	Moulage par injection
Gaine de la colonne de direction	Polyoléfines (PP, P/E) chargées talc ; Styréniqes : PC-ABS, ABS.	Moulage par injection
Trappe fusibles	Polyoléfines (PP, P/E) chargées talc ; Styréniqes : PC-ABS, ABS.	Moulage par injection
Cache bas de planche	Polyoléfines (PP, P/E) chargées talc ; Styréniqes : PC-ABS, ABS.	Moulage par injection
Caches latérales	Polyoléfines (PP, P/E) chargées talc ; Styréniqes : PC-ABS, ABS.	Moulage par injection
Joint ligne pare-brise	Caoutchouc (EPDM)	Extrusion
Matériau d'isolation acoustique	Feutrine	tissage
Façade centrale	PC-ABS, ABS	Moulage par injection
Façades d'aérateurs	PC-ABS, ABS	Moulage par injection
Visière	Polyoléfines (PP, P/E) chargées talc ; Styréniqes : PC-ABS, ABS	Moulage par injection

Tableau 11. Vue sommaire de la diversité des matériaux et procédés entrant dans la fabrication des planches de bord.

I.2.2. Périmètre de l'étude et hypothèses de la modélisation

I.2.2.1. Système produit

La production et l'assemblage d'une planche de bord impliquent :

- des pièces conçues, fabriquées et assemblées par Faurecia (Faurecia in house parts),
- des pièces conçues par Faurecia, fabriquées par des fournisseurs experts et assemblées par Faurecia (bought out parts),
- des pièces qui sont produites par Faurecia ou chez des fournisseurs, mais emballées par Faurecia et assemblées chez les constructeurs (pièces livrées séparément),

Outre la complexité de la supply chain du produit, la collecte de données relatives aux activités (ou procédés) qui entrent en jeu dans le périmètre de ce système produit est un des axes de la problématique environnementale. Or, dans la réalité d'un système, le nombre de toutes les activités qui y sont impliquées peut être indéterminé [ILCD 2008] . C'est la raison pour laquelle il est nécessaire de poser les « limites du système », afin de pouvoir modéliser le cycle de vie du produit en représentant les activités/procédés directement liés au produit et qui génèrent des flux pouvant être significatifs dans la contribution aux impacts environnementaux, tout en négligeant les activités peu significatives liées au produit.

Dans le cas de la modélisation du cycle de vie d'une planche de bord, les procédés indirectement liés au produit, tels que : la fabrication de la presse à injecter, la fabrication des moules d'injection, la consommation d'huile moteur pendant la phase d'usage du véhicule à équiper, etc...peuvent être exclus du périmètre¹² pour simplifier la modélisation. Cela permet de diminuer considérablement les efforts de collecte des données.

I.2.2.2. Hypothèses de la modélisation - Règles d'inclusion et d'exclusion – règles des allocations

a. Extraction des matières premières :

Les procédés d'extraction des matières premières sont directement issus de la base de données de GaBi (données génériques) qui incluent la consommation d'énergie, de substances intermédiaires, ainsi que les émissions physico-chimiques et les déchets solides relatives à ces activités. Plus de détails sur la modélisation dans GaBi des familles de

¹² Les activités indirectement liées au système produit sont loin d'être maîtrisées par « l'entreprise manufacturière », entraînant forcément le recours aux données secondaires, voire à des approximations souvent erronées lorsque les procédés relatifs à ces activités ne sont pas disponibles dans une base de données génériques.

Chapitre 6.

matières premières impliquées dans la fabrication des produits de Faurecia¹³ sont données dans la partie inventaire des données modélisées (annexe C).

b. La phase de transport

La phase de transport modélisable dans cette étude est celle qui se trouve en amont de la production chez Faurecia. Des informations sont accessibles via la liste des fournisseurs de matières premières (pour les pièces produites par Faurecia) et des fournisseurs experts (pour les pièces sous-traitées), dans laquelle est indiquée leur localisation géographique. Nos modèles n'intègrent pas les transports post-production et la logistique inverse aval à Faurecia en raison de la non disponibilité d'informations sur ce sujet.

Les valeurs associées aux transports sont directement issues de la base de données de GaBi (données secondaires) qui incluent la consommation d'énergie et/ou de carburant du mode de transport . Ces valeurs sont basées sur le poids d'une marchandise transportée et les émissions physico-chimiques relatives à cette activité. La seule modification amenée est la création d'un retour à vide des camions non existants dans GaBi et pour lequel nous avons considéré une consommation réduite de moitié.

Plus de détails sur la modélisation des quatre modes de transport possibles (routière, aérienne, rails, maritime) sont données dans la partie inventaire des données modélisées (annexe C).

c. Fabrication du produit

Les procédés impliqués dans la phase « production » du produit comprennent des procédés génériques et des procédés spécifiques aux activités en interne de Faurecia. Les procédés génériques sont ceux disponibles dans GaBi et utilisés pour modéliser les procédés de fabrication chez les Fournisseurs, tandis que les procédés spécifiques sont créés pour modéliser les procédés de fabrication employés et non disponibles dans GaBi.

Afin de ramener à un même niveau de flux la modélisation de ces différents procédés de fabrication, des ajustements ont été nécessaires selon les règles suivantes:

- Les émissions polluantes engendrées par les procédés de transformation des matières plastiques (par exemple, le compoundage, le moulage par injection, le rotomoulage, le thermoformage ...), tels que : la CO₂, le groupe COV, SO₂, NO₂,

¹³ Bien que nous nous intéressions particulièrement aux familles de matières premières permettant de fabriquer les « planches de bord », ces matières sont aussi largement utilisées dans la fabrication d'autres familles de produits de Faurecia Interior System, comme les panneaux de portes et les consoles centrales.

Chapitre 6.

PPM (particules par milliers) et le DEHP (Diethylphtalate) sont enregistrés dans le décompte des flux de l'inventaire, que ce soit pour les procédés spécifiques ou pour les procédés génériques. Ces émissions sont jugées contributives aux impacts environnementaux car leurs facteurs d'émissions ne sont pas négligeables, c'est à dire supérieurs à 0,001g/kg de produit [Thiriez et al.2006] .

- La gestion des déchets de la production suit la politique du site de Faurecia pour les pièces produites en interne¹⁴, et défini par défaut en scénario de "mise en décharge" pour les procédés génériques utilisés pour modéliser la fabrication chez les fournisseurs¹⁵.

Par ailleurs, pour rationaliser les efforts de décompte et de modélisation des composants, un critère d'inclusion/exclusion est également appliqué au niveau de la masse des composants en identifiant les composants essentiels¹⁶, notamment dans le cas fréquent où les données techniques permettant de modéliser ces derniers ne sont pas toujours disponibles. Pour ce faire, les critères employés sont explicités dans ce qui suit.

Pour la modélisation d'une planche de bord, les composants sont tout d'abord hiérarchisés, allant du plus lourd au plus léger, suivant quatre sous ensembles que nous définissons comme suit: Figure 13

- Le module porteur (carrier): regroupe les composants de la structure de planche, c'est-à-dire le corps de planche (le composant le plus volumineux et le plus lourd de la planche, pouvant être monobloc ou multiblocs) et leurs matériaux de revêtement ou peaux.
- Le module aéraulique (climate) : regroupe les composants permettant d'assurer la fonction aéraulique, à savoir : le module de dégivrage (defroster) qui est la deuxième pièce plus massive après le corps de la planche, les conduits d'air (air ducts) et les aérateurs (air vents).
- Le module rangement (storage) : regroupe les composants des vides poches, parmi lesquels la boîte aux gants est la troisième pièce massive de la planche, après le corps et le module de dégivrage.

¹⁴ Les scraps et les rebuts d'injection sont généralement broyés et mélangés à la hauteur d'environ 10% aux matières vierges pour être réinjectés.

¹⁵ N'ayant pas des informations sur la politique de gestion des déchets de fabrication chez les fournisseurs.

¹⁶ Les composants essentiels peuvent être définis comme étant les 20% en nombre des composants qui représentent plus de 80% en masse d'une planche de bord.

Chapitre 6.

- Les pièces d'ajustement (trim parts) : regroupent les pièces d'habillage et de finition de la planche de bord (c'est à dire, les façades centrales, les gaines de la colonne de direction, la visière, la canal de tir d'airbag ...), hormis les matériaux de revêtement ou peaux. Selon la complexité du produit, le nombre de ces pièces est très variable. Toutefois, elles représentent généralement une masse inférieure à 20% de la masse totale de la planche.

Ainsi, et en se référant au standard [ILCD 2008] et aux critères de [Muñoz et al.2006], nous avons exclus tous les composants de masse inférieure à 10 g mais également tous les sous-ensembles représentant moins de 5% de la masse du produit, si ces derniers existent. Cette règle peut être appliquée dans toutes les études ACV sur les produits Faurecia, sauf exception des petits composants contenant des substances dangereuses. Une étude spécifique doit être menée dans ce cas sur la contribution de ces composants aux impacts environnementaux, afin de procéder à une dérogation si nécessaire.

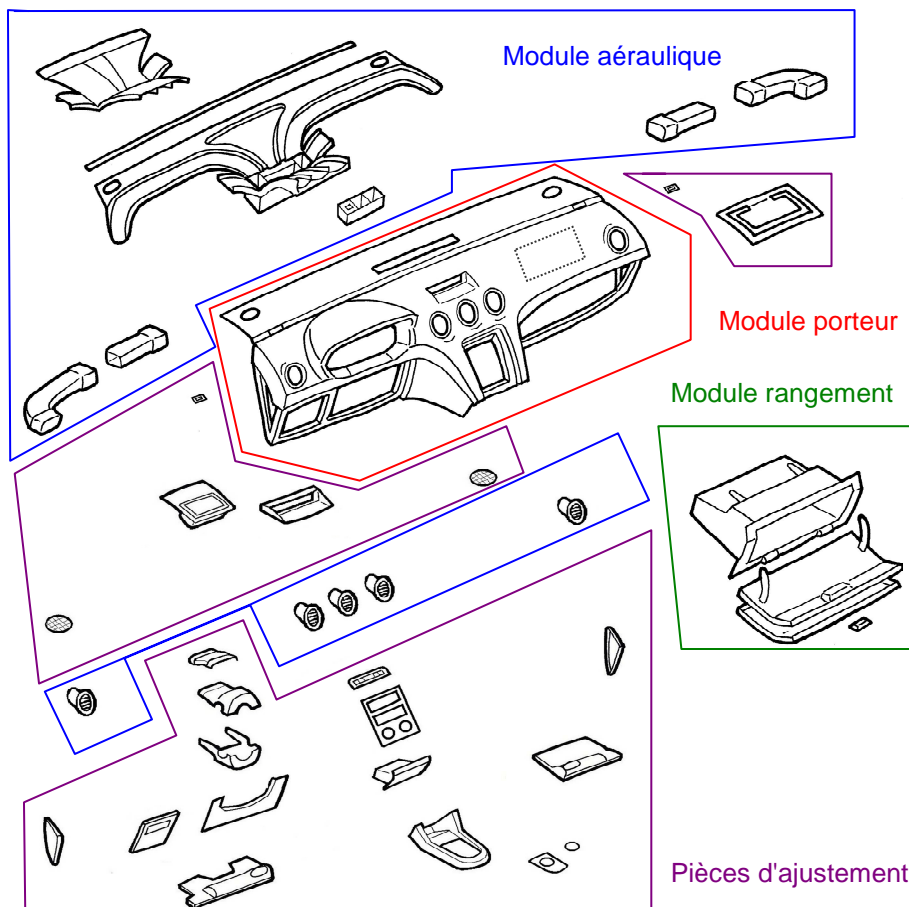


Figure 13. Vue éclatée d'une planche de bord montrant la hiérarchisation de ses composants essentiels (Exemple de la planche de bord d'une Peugeot 308, source : Faurecia R&D Méru)

d. Phase d'utilisation

La phase d'utilisation du véhicule à moteur thermique est assimilée à un procédé de transformation de l'énergie issue de la combustion du carburant en travail mécanique. Au

Chapitre 6.

niveau des flux élémentaires, ce processus a comme « entrant » une consommation de ressources (le carburant) et comme « sortant » des rejets dans l'atmosphère (les résidus de la combustion). La modélisation de la phase d'utilisation d'un composant du véhicule consiste donc à imputer à ce composant sa part de consommation de carburant durant la phase d'utilisation du véhicule, et donc la part d'émissions correspondantes.

- *Allocation de la consommation de carburant d'un composant :*

Aucun consensus n'est encore établi au sein des constructeurs automobiles et équipementiers quant au mode d'allocation en consommation de carburant de cette phase d'utilisation, mais les études antérieures ont permis d'identifier un lien entre la consommation de carburant et la masse d'un composant véhicule, qu'on peut établir de deux manières :

- Le calcul au prorata de la masse [Le Borgne 1998] :

Cette méthode permet de calculer directement la part de consommation d'un composant FC_{comp} en fonction de sa masse M_{comp} , connaissant la masse totale M_{veh} et la consommation FC_{veh} d'un véhicule :

$$FC_{comp} = \frac{FC_{veh} \times M_{comp}}{M_{veh}} \quad (1)$$

L'avantage de cette méthode, à part sa simplicité, est de permettre de retrouver la consommation du véhicule par la somme des consommations élémentaires. On peut vérifier au niveau d'un véhicule la cohérence des informations fournies par les équipementiers. Cette méthode est préconisée pour la modélisation des ensembles de masse > 20% de celle du véhicule.

Son inconvénient majeur est d'induire des impacts trop dominants de la phase d'utilisation par rapport aux impacts sur les autres étapes du cycle de vie, alors qu'on ne considère que le paramètre « masse » dans le calcul. Ce qui met en cause la perception des variations d'impacts induites, aussi bien dans la phase d'utilisation que dans les autres phases, par la modification des autres paramètres de conception du produit.

- Le calcul au travers un coefficient de variation de consommation ($\Delta conso$) en fonction d'une variation de masse ($\Delta masse$) [Le Borgne 1998] (PSA Peugeot Citroën); [Eberle et Franze 1998] (BMW AG); [Rohde-B et Obernolte 2002] (VW AG):

Cette méthode est préconisée dans la plupart des cas (composant de masse $\leq 20\%$ de celle du véhicule, donc dans le domaine des composants fabriqués par Faurecia Interior System), en prenant en compte en plus de la masse du composant d'autres paramètres importants, comme la résistance de l'air, la résistance au roulement du véhicule, etc.... qui interviennent dans la consommation en carburant du véhicule.

La Méthode incrémentale de Eberle-Franze ou méthode «fuel reduction coefficient» :

C'est une méthode empirique reconnue par la SAE, et elle est une variante de l'approche Δ conso/ Δ masse, en introduisant un coefficient FRC (Fuel Reduction Coefficient) pour ramener la consommation imputée au composant FC_{comp} à la variation de la consommation absolue FC_{veh} du véhicule (déterminée empiriquement) lorsque la masse de ce dernier est diminuée de 100 kg, mesuré dans le NEDC¹⁷. (2)

$$FC_{comp} = FRC \cdot M_{comp} \quad (2)$$

Où FC_{comp} (litres) est la consommation absolue de carburant imputée au composant; M_{comp} (kg) la masse du composant et le coefficient FRC (litres/100kg.100km).

A titre indicatif, le coefficient FRC est déterminé empiriquement [Eberle et Franze 1998] en fonction de la variation de consommation absolue FC_{veh} du véhicule, qui intègre les paramètres suivants :

- la résistance de l'air : $F_{air} = \rho_{air} \cdot C_d \cdot A \cdot V^2$ avec C_d le coefficient d'aérodynamisme et A la surface frontale du véhicule.
- la résistance au roulement : $F_{roll} = M_{veh} \cdot g \cdot tg \alpha$ où g est l'accélération de la pesanteur et α l'angle de frottement de roulement (sol – pneumatique).
- la résistance de gradient : $F_{grad} = M_{veh} \cdot g \cdot \sin \alpha$
- la résistance à l'accélération : $F_{acc} = M_{veh} \cdot \frac{dV}{dt}$

Ainsi, la prise en compte de ces différents paramètres influant sur la consommation de carburant se fait donc au niveau des composantes de la résistance au déplacement du véhicule F_{req} , telle que : $F_{req} = F_{air} + F_{roll} + F_{grad} + F_{acc}$

Or, la puissance théorique nécessaire P_{req} pour déplacer le véhicule s'écrit : $P_{req} = F_{req} \cdot V$

En prenant en compte le rendement des organes de transmission (η_{tr}), la puissance effectivement consommée par le véhicule serait : $Pe = \frac{P_{req}}{\eta_{tr}}$

¹⁷ Test d'accélération de 0 à 100km/h et test d'élasticité de 80 à 120km/h en 5^{ème} rapport.

Chapitre 6.

Enfin, la consommation absolue du véhicule s'obtient par la relation

$$FC_{veh} = \frac{Pe}{\rho \cdot V \cdot \eta_{eng} \cdot c_l} \times 100 \quad \text{où } V \text{ est la vitesse du véhicule ; } \rho \text{ la densité du carburant, } \eta_{eng}$$

le rendement du moteur ; c_l le pouvoir calorifique inférieur du carburant.

Nous avons choisi la méthode FRC pour modéliser la phase d'utilisation des produits Faurecia, car en plus de sa reconnaissance par la SAE, elle est dotée d'une certaine crédibilité au sein des constructeurs¹⁸.

Choix de l'Unité fonctionnelle

Elle a été construite d'après les durée de vie véhicule pris en considération chez Faurecia, ce qui se traduit de la façon suivante :

« Une planche de bord permettant d'équiper un véhicule léger (light weight passenger vehicle) pour une durée de vie moyenne équivalente à $L=150000$ km parcourus pour la motorisation essence, et à $L=200000$ km pour la motorisation diesel. »

Ainsi, en considérant l'équation (2), la contribution d'une planche de bord (IP)¹⁹ sur la consommation (FC ramenée au kg) en carburant du véhicule pendant sa phase d'utilisation s'écrit : (3)

$$FC_{IP} = \frac{\rho \cdot FRC \cdot M_{IP} \cdot L}{10000} \quad (3)$$

Pour l'application numérique, Eberle et Franze ont donné les plages de valeurs suivantes pour le FRC en fonction de la motorisation du véhicule : 0,34 à 0,48 litre/100kg.100km pour la motorisation essence et 0,29 à 0,33 pour la motorisation diesel, dans le NEDC. Par ailleurs, en rapport avec l'unité fonctionnelle définie ci-dessus, le paramètre L (life cycle mileage) prend respectivement les valeurs $1,5 \cdot 10^5$ km pour la motorisation essence et $2 \cdot 10^5$ km pour la motorisation diesel.

- *Allocation des émissions de la phase d'utilisation*

¹⁸ La méthode de Eberle-Franze initiée et expérimentée chez BMW pour modéliser la phase d'utilisation est reconduite dans le projet LIRECAR (identification et analyse des concepts d'allègement véhicule et des options de fin de vie sur le plan environnemental – approche cycle de vie) représentant 7 autres constructeurs : Opel, Fiat, Daimler, Ford, Renault, Volvo et VW.

¹⁹ IP (Instrument Panel) est une dénomination spécifique de la « planche de bord », que nous utiliserons plusieurs fois par la suite dans ce document pour l'abrèger, notamment dans la partie expérimentale.

Chapitre 6.

Les rejets de polluants imputés à un composant durant la phase d'utilisation du véhicule sont déduits quantitativement de sa part de carburant consommé, multipliée par des facteurs d'émissions définis pour chaque nature de polluant et en fonction du type de motorisation du véhicule (Tableau 12)

Facteurs d'émissions [kg/kg fuel]	Motorisation essence	Motorisation diesel
f_{CO_2}	3,3	3,4
f_{CO}	$5,5 \cdot 10^{-2}$	$0,5 \cdot 10^{-2}$
f_{NO_x}	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$
f_{CH_4}	$6,6 \cdot 10^{-2}$	$0,85 \cdot 10^{-4}$
f_{N_2O}	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,26 \cdot 10^{-4}$
f_{PPM}	$8 \cdot 10^{-5}$	$48 \cdot 10^{-5}$
f_{NMVOC}	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$

Tableau 12. Les facteurs d'émissions de la phase d'utilisation (source NEDC, NREL)

e. La phase de fin de vie

Elle s'intéresse aux différentes voies de traitement ou d'élimination des différents constituants du véhicule lorsque ce dernier arrive en fin de vie et devient un déchet, donc une source de pollution pour l'environnement. Si les fractions métalliques d'un véhicule sont totalement recyclées aujourd'hui, ce n'est pas le cas de la majorité des composants en matières plastiques en particulier des pièces d'intérieur du véhicule. Etant donnée l'évolution des fractions plastiques que contiennent les véhicules modernes Figure 14, la recherche de technologies d'amélioration de la voie de traitement des déchets de plastiques automobiles, notamment leur recyclage, est actuellement en effervescence mais la réalité économique (coût) et géographique (disponibilité et applicabilité des technologies et du supply chain de recyclage dans chaque pays), ainsi que le rendement global de ce processus constituent des freins à cette évolution.

Ainsi, les voies de traitement classiques comme la mise en décharge (qui ne devra plus dépasser les 5% en masse du véhicule d'ici 2015), et l'incinération pour la valorisation énergétique restent néanmoins les voies les plus courantes actuellement pour le devenir de ces matières plastiques. Cependant, des résultats sensibles ont déjà vu le jour et sont applicables actuellement comme :

- le recyclage des pièces en polyoléfines (à base de polypropylène PP, P/E), en polymères styréniques (à base de ABS, PC-ABS), ou en polyéthylènes (PE) démontées ou issues d'un tri des résidus de broyage automobile (Tableau 13);
- l'amélioration de la recyclabilité des modules en matières plastiques dès la conception par le choix d'assemblages adaptés permettant de faciliter la séparation

Chapitre 6.

des pièces en fin de vie ou encore par des modes de conception mono matériaux (axes du design for recycling).

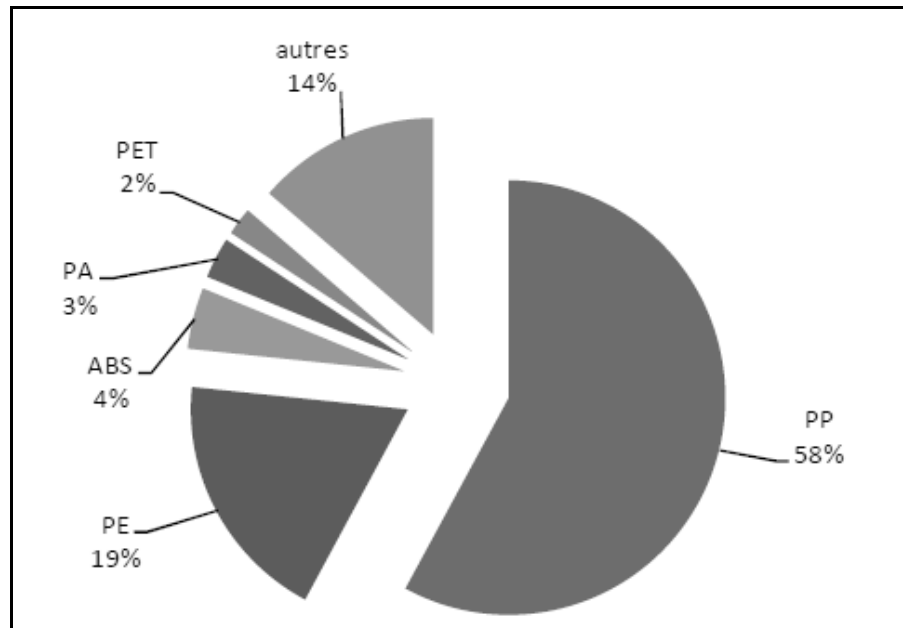


Figure 14. La répartition moyenne de la fraction plastique dans un véhicule léger moderne (source ADEME – Bio Intelligence service 2008).

Pays	Nom de l'entreprise / nom du procédé	Origine des produits en entrée			Acteur en aval	Description du matériau recyclé
		Pièce démontée	Résidus de broyage	Fraction issue d'un tri post-broyage		
Pays-Bas	AKG polymers			x	Automobile, construction, horticulture	PS, ABS, PA, PC, PET et TPE
Pays-Bas	PHB	x		x	Horticulture, non-alimentaire, automobile	PP, PET, PS, ABS
France	Galoo Plastics	x		x	Automobile,...	Granulés de PP, PE, ...
Etats-Unis / Autriche	MBA polymers	x		x	Automobile, Equipements électriques et électroniques	PP, HIPS, ABS

Tableau 13. Installations actuellement existantes pour le traitement des pièces plastiques démontées ou issues d'un tri post-broyage des RBA²⁰. Nous remarquons le traitement des déchets plastiques en provenance d'autres filières que l'automobile (source ADEME – BioIntelligence service 2008).

Hypothèse de la modélisation :

Le problème de la modélisation de la fin de vie réside notamment dans l'absence d'un scénario conventionnel qui permette de représenter ce qui se passe réellement pour les

²⁰ RBA (Résidus de broyage automobile) ou ASR (automotive shredding résidue).

Chapitre 6.

véhicules arrivant en fin de vie, du moins pour chacun des composants spécifiques du véhicule comme une planche de bord, un siège ou un panneau de porte. Cela nous amène à modéliser, dans notre cas, cinq scénarios de fin de vie dans la base de données d'EcoT afin de définir des scénarii réalistes sur le territoire européen pour une planche de bord (représentant en moyenne 14% des fractions plastiques d'un véhicule):

- Incinération: dans ce cas on prend l'hypothèse de la pure valorisation énergétique des matières plastiques incinérables de la planche, du recyclage des pièces métalliques si elles existent à plus de 10g chacune (en appliquant la règle de cut-off) et à l'enfouissement des déchets ultimes.
- Enfouissement (landfill): représente le cas le plus défavorable a priori, dans lequel toute la partie plastique de la planche est considérée comme un déchet ultime et est mise en décharge. Seules les pièces métalliques seront recyclées lorsqu'elles existent.
- Recyclage par voie de démontage : est un scénario encore fictif mais réalisable, dans l'hypothèse où la planche de bord est démontée en fin de vie, et que toutes les pièces en matières plastiques recyclables (Tableau 14), ainsi que les pièces métalliques de la planche sont recyclés ; les matières non recyclables sont incinérées et les déchets ultimes sont mis en décharge.
- EU 2010 : scénario de fin de vie spécifiquement créé afin de représenter le scénario le plus proche de la réalité dans l'UE actuellement. Il est établi sur la base des performances moyennes actuelles du traitement de fin de vie des VHU dans 5 pays européens (Allemagne, Espagne, France, Pays Bas et Italie), pour lesquels nous avons pu obtenir des informations exploitables, notamment en ce qui concerne le devenir des fractions plastiques issues du tri post-broyage d'un véhicule. Une allocation au pourcentage de la masse a été appliquée aux composants plastiques de la planche de bord. Les composants métalliques sont toujours supposés recyclés et les déchets ultimes mis en décharge.
- EU 2015 : qui est également un scénario de fin de vie spécifique, crée pour représenter la mise en œuvre des performances requises par la directive ELV pour 2015. Des estimations ont été effectuées pour ce faire notamment sur les fractions plastiques du véhicule qui devraient être recyclés pour que les objectifs de la réglementation soient atteints (85% en masse du véhicule recyclés. Seules les 15% restantes seront réservées à la valorisation énergétique et à la mise en décharge, sachant que cette dernière ne devra pas dépasser les 5% en masse du véhicule). Ainsi, une allocation au pourcentage de la masse a été appliquée aux composants

Chapitre 6.

plastiques de la planche de bord. Les pièces métalliques sont toujours supposées recyclées et les déchets ultimes mis en décharge.

Grandes familles de matières plastiques	variantes considérées recyclables
matières plastiques polyoléfiniques	Polypropylène caoutchouc (PP-EPDM), polypropylène copolymère (P/E) ; polypropylène (copolymère) chargée talc (PP-MDxx, PP-TDxx, P/E-MDxx) ; Polypropylène chargée fibres de verre (PP-(L) GFxx)
Matières plastiques styréniques	Polycarbonate -Acrylonitrile-Butadiène-Styrene (PC-ABS); ABS ; ABS- PA (polyamide)

Tableau 14. Les matières considérées recyclables dans notre cas de la modélisation de la fin de vie des produits « Faurecia Interior System »

Allocation des scénarii de fin de vie d'une planche de bord :

Afin d'illustrer les hypothèses précédentes, nous représentons dans la Figure 15 ci-dessous les différents scénarii avec les coefficients d'allocations établis pour modéliser la fin de vie d'une planche de bord. Pour les opérations de recyclage, les rendements de la chaîne sont pris en compte dans la modélisation de la fin de vie d'une planche de bord, dans la mesure où le rendement mécanique du recyclage est différent pour une planche revêtue ou sans revêtement de surface, notamment au niveau du déchiquetage et de la séparation (délaminage, cellule de flottation, etc....).

I.2.3. Evaluation des impacts du cycle de vie

L'évaluation des impacts du cycle de vie (EICV) est une étape importante de l'analyse de cycle de vie, qui vise à transformer l'inventaire des flux en une série d'impacts sur l'environnement. Comme dans les autres étapes de la réalisation de l'ACV, elle dépend de l'«unité fonctionnelle» du produit. Ainsi, l'évaluation des impacts du cycle de vie prend comme données d'entrées l'analyse de l'inventaire du cycle de vie (ICV), c'est-à-dire une liste de flux entrants (les matières premières, matières transformées dans les process, énergies, etc.) et sortants (les rejets, déchets, émissions, etc.) agrégés sur l'ensemble du système produit, à toutes ses étapes de vie. Ces flux sont ensuite traduits en équivalents de l'indicateur d'impact (par exemple exploitation du coefficient de forçage radiatif de l'ozone et de la durée de vie de la molécule au regard de ceux du CO₂ pour établir l'équivalence d'effet de serre entre une molécule d'ozone et X molécule CO₂) et agrégés dans des catégories d'impacts pour ensuite donner des indicateurs de catégorie.

En termes de méthodologie, il existe plusieurs méthodes d'évaluation (on peut citer notamment la méthode orientée « problèmes » et celle orientée « dommages ») et de pondération des indicateurs d'impacts (single score, midpoint (ex : acidification des eaux), endpoint (ex : pertes de biodiversité), etc....). Cette diversité de représentation des pressions

Chapitre 6.

environnementales rend plus difficile la compréhension et l'interprétation des résultats. Un autre problème réside dans l'incertitude qui pèse sur la représentativité des résultats, la transparence des informations fournies et la facilité de leur interprétation.

Afin de ne pas compromettre la transparence des résultats d'évaluation, nous optons l'intégration dans EcoT d'une représentation en mode « midpoint » qui « manipule » moins les résultats qu'une méthode Endpoint (ces dernières impliquant des pondérations d'impacts entre eux). Nous avons retenu la méthode CML qui fait partie des méthodes d'évaluation bien formalisées [Guinée et al.2001] , permettant de représenter les impacts environnementaux en mode « midpoint ». Ce choix a été réalisé, par ailleurs, en vue de pouvoir échanger avec d'autres industriels de l'automobile qui utilisent également cette méthode dans les communications de leurs résultats d'ACV (e.g : VW A.G, Volvo, Faurecia Automotive Seating Business Group, Ford, Renault...).

L'évaluation des impacts du cycle de vie est ainsi réalisée avec un jeu de 6 indicateurs de catégories d'impacts définis par la méthode d'évaluation « CML2001 - Déc. 07, Experts IKP (southern Europe)²¹ », Tableau 15 :

Catégories d'impacts	Unités	Facteurs de normalisation CML 2001-Dec 07, world [unités par habitant dans le monde en 1 an]
ADP : abiotic depletion potential	kg Sb eq.	$1,83.10^{11}$
AP : acidification potential	kg SO ₂ eq.	$2,38.10^{11}$
EP : eutrophication potential	kg PO ₄ eq.	$1,58.10^{11}$
GWP 100 : global warming potential (horizon de 100 ans)	kg CO ₂ eq.	$4,19.10^{13}$
ODP: ozone layer depletion potential	kg R11 eq.	$1,93.10^8$
POCP: photochemical ozone creation potential	kg ethene eq.	$4,01.10^{10}$

Tableau 15. Méthode utilisée pour l'évaluation des impacts environnementaux du cycle de vie des produits Faurecia.

²¹ Visiter la rubrique « acronyme » pour plus de détail sur la signification des catégories d'impacts inclus dans ce panel.

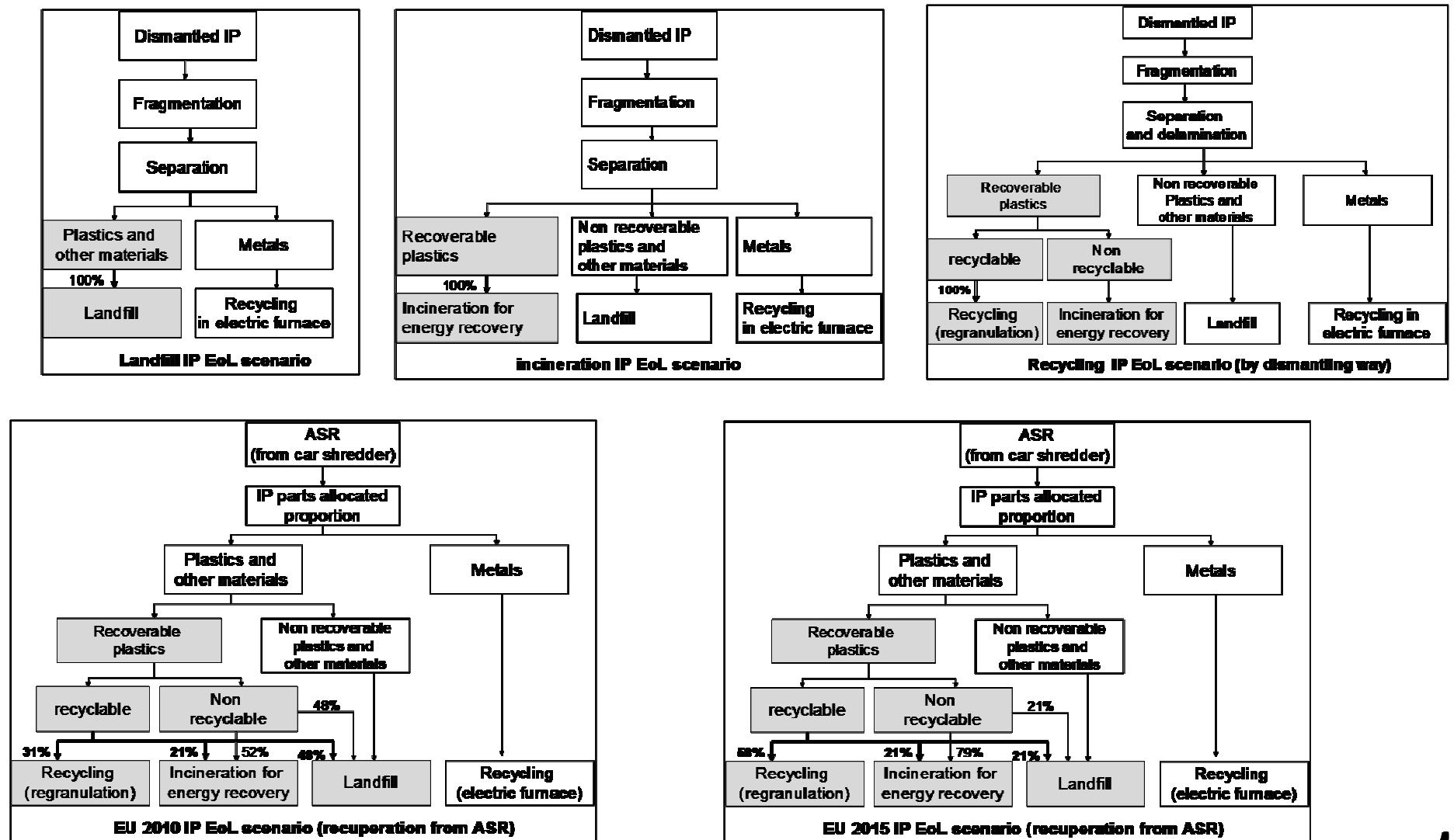


Figure 15. Les cinq scenarii pris en compte pour modéliser la phase de fin de vie d’une planche de bord.

I.2.4. Inventaire et sources des données modélisées

Après avoir défini le périmètre et les hypothèses de la modélisation pour le cas de la famille de produits « planche de bord », nous synthétisons dans ce paragraphe les principales données modélisées et entrant dans la construction dans GaBi d'une base de données d'ACV et des graphes de flux des procédés/activités sur le cycle de vie des produits Faurecia.

Le principe du graphe de flux du cycle de vie repose sur la modélisation de chaque activité ou procédé sur une étape du cycle de vie considérée, dont les principaux entrants (matières grises) et les sortants (produits) sont « les flux économiques ». Toutefois, la réalisation de ce (tte) procédé/activité puise des ressources et émet des rejets polluants dans l'environnement. Ces échanges avec l'environnement sont appelés « flux élémentaires », qui contribuent majoritairement dans le bilan environnemental du procédé.

L'inventaire de la bibliothèque des données modélisées (consultables en annexe B et annexe C) a permis de recenser :

- 11 types de ressources consommables qui entrent en jeu dans la modélisation des procédés/activités du cycle de vie des produits Faurecia,
- 51 modèles de procédés/activités en eux-mêmes. Ces modèles de procédés serviront à la construction de la base de données d'EcoT, que nous détaillerons dans la partie modélisation d'EcoT et de son système d'informations.

II. Modélisation de EcoT et de son système d'information

II.1. Protocole

Le développement d'une base de données d'ACV dans le logiciel GaBi, et de l'outil d'ACV simplifié EcoT repose sur une catégorisation environnementale par famille de produits. Dans cette section, nous détaillerons la démarche pour créer cet outil EcoT, ainsi que le premier applicatif de l'outil (sous forme d'un démonstrateur) pour une famille de produits de « Faurecia Interior System » : les planches de bord.

Le protocole de développement d'EcoT est synthétisé dans la Figure 16 ci-dessous.

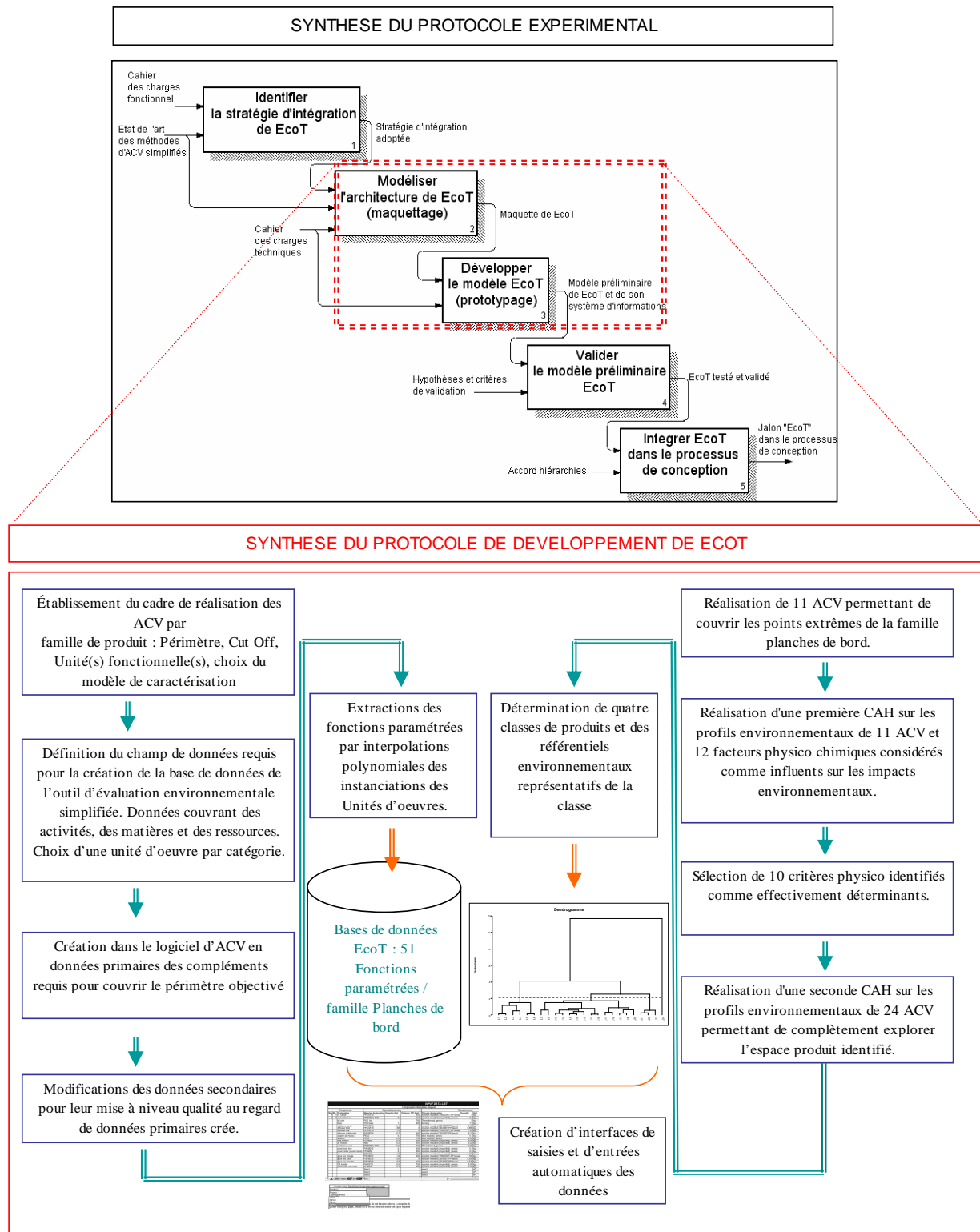


Figure 16. Synthèse du protocole de développement d'EcoT (par G. Bertoluci)

II.2. Création des fonctionnalités de EcoT

II.2.1. Les fonctions d'impacts : la base de données d'EcoT

II.2.1.1. Principe

Les fonctions d'impacts sont théoriquement assimilables à des fonctions de transformation basées sur le principe du « changement de base » d'un vecteur des composantes d'unité d'oeuvre : « x » quantités d'oeuvre d'un procédé/activité, vers le vecteur « I » d'impacts environnemental. Ainsi, cette simplification s'applique au sein de la méthodologie d'ACV (streamline within the LCA methodology) [Todd et Curran 1999], car la résolution mathématique de l'ACV fait l'usage d'une série de calculs matriciels pour passer de l'inventaire des flux à l'agrégation des impacts. Cette série de calcul induit des matrices de passage à des étapes intermédiaires [ISO 14040], c'est-à-dire de l'inventaire brut des flux à l'inventaire mis à l'échelle, puis de l'inventaire mis à l'échelle aux indicateurs d'impacts.

Pour ce faire, la modélisation des procédés du cycle de vie dans le logiciel d'ACV se fait par voie de « paramétrage de procédés » (e.g, dans GaBi : process parameters), qui se décomposent en instanciations fixes et en instanciations variables. Les instanciations fixes sont ceux établis et bloqués pour les concepteurs, en fonction du périmètre de la modélisation, de l'unité fonctionnelle. Les instanciations variables sont ceux relatifs aux quantités d'oeuvres d'un procédé/activité qui doivent varier selon le produit. Ce verrouillage d'instanciations rapportant au périmètre de la modélisation constitue le premier niveau de simplification du principe de l'ACV que nous amenons dans le cadre de cette recherche. Ainsi, il devient possible de réaliser un bilan environnemental d'une série des instanciations variables de l'unité d'oeuvre de chaque procédé modélisé, afin d'obtenir les impacts environnementaux correspondant à ces variations d'instances. Le Tableau 16 montre à titre indicatif des exemples d'unités d'oeuvres prises en compte, qui sont mises en instanciations variables dans le paramétrage des procédés sur chaque étape du cycle de vie du produit.

Etapes du cycle de vie	Unité d'oeuvre des procédés (x)
Matières premières	x kg de matière première extraite
Transports	x kg de charge transportée sur 100 km
Production	x kg de produit fabriqué ou x m ² de surface revêtue
Utilisation	x kg de masse embarqué sur le véhicule
Fin de vie	x kg de matière traitée

Tableau 16. Les unités d'oeuvre des procédés sur le cycle de vie des produits Faurecia.

Les fonctions d'impacts $I=f(x)$ d'un procédé sont obtenues par le tracé des courbes d'approximation des résultats d'évaluation environnementale d'un procédé, pour chaque série d'instanciations de son paramètre variable. En agissant de la même manière sur tous

les autres procédés, nous arrivons à construire et consolider une base de données secondaire destinée à alimenter l'outil simplifié « EcoT ».

Ainsi, plus précisément, il en résulte une création de « α » (qui équivaut au nombre total des procédés/activités modélisés) fonctions d'impacts pour chaque catégorie d'impact « I » (dans notre cas, chaque procédé/activité modélisé contient 6 catégories « I » d'impacts). D'une manière générale, chaque fonction d'impact peut s'écrire sous la forme polynomiale suivante (4) :

$$I = A_n x^n + A_{n-1} x^{n-1} + \dots + A_1 x \quad (4)$$

Où A_k ($k=1\dots n$) sont les coefficients des termes en degrés du polynôme, dépendant de la linéarité ou la non linéarité de la fonction d'approximation de l'impact I.

II.2.1.2. Application

Dans l'applicatif, si on se situe a priori dans le cas où la fonction est non linéaire, l'approximation est réalisée par le biais de la représentation graphique (sous Excel) des résultats d'évaluation environnementale incrémentale de chaque procédé sous forme d'un ensemble de points expérimentaux, pour lesquels les coefficients A_k sont déterminés sur Excel de manière à ce que la courbe de tendance associée aux points expérimentaux représentées passe au plus près de ces points. Au cours de cette étude, l'approximation par un polynôme de degré $n=4$ a donné les meilleurs résultats, avec un coefficient de détermination R^2 qui tend vers 1 (compris entre 0,996 et 1, pour les fonctions d'impacts non linéaires).

En pratique, EcoT utilise ces fonctions d'impacts afin de permettre à l'équipe de conception d'accéder au calcul des impacts environnementaux en renseignant uniquement les quantités d'œuvre des activités et les quantités de matériaux entrant dans la composition des composants.

La Figure 17 illustre la démarche de création de la base des données pour EcoT au travers d'un exemple d'extraction de chaque fonction d'impact par procédé. Chaque procédé doit comporter un set de N fonctions d'impacts, correspondantes au nombre de catégories d'impacts pris en compte.

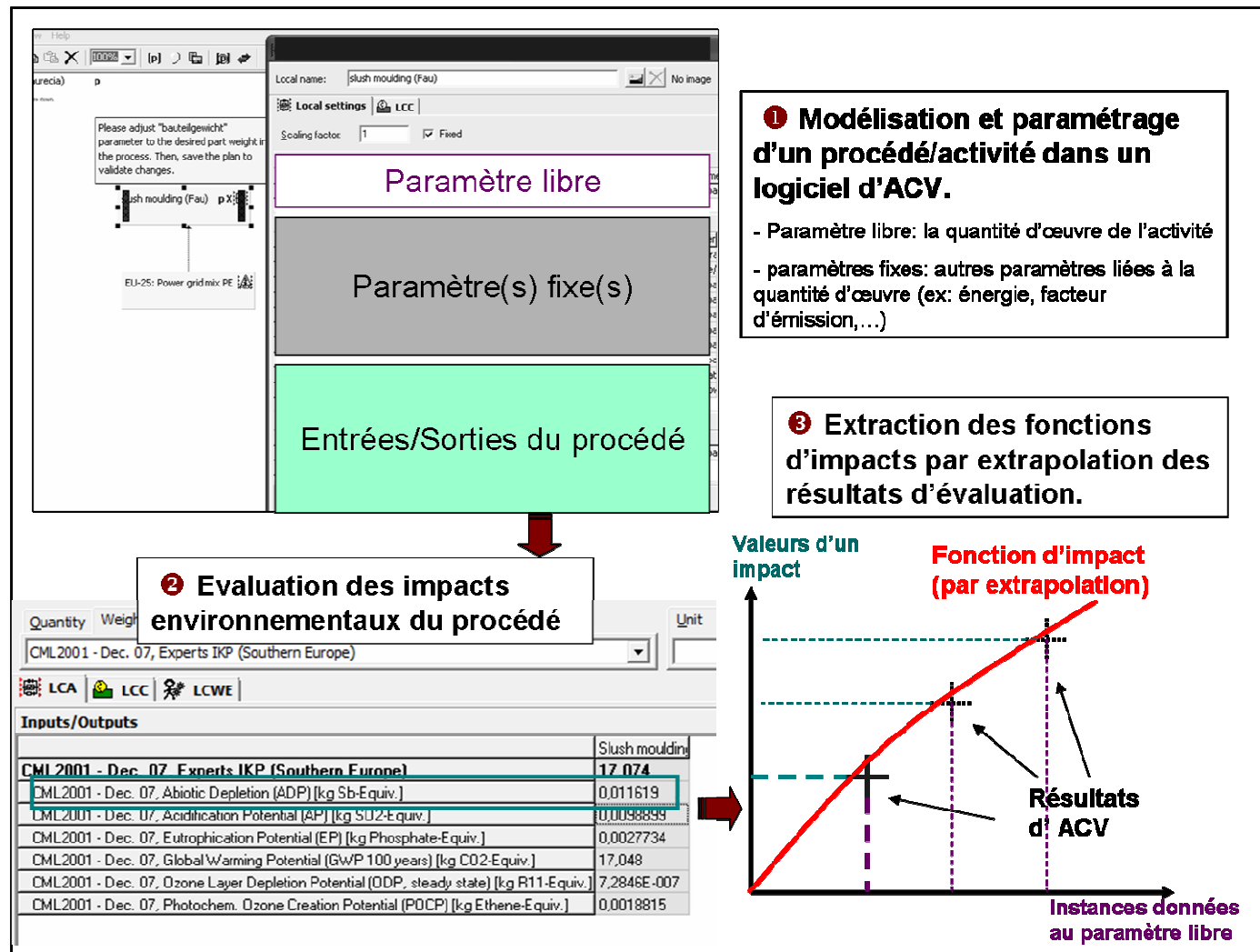


Figure 17. Extraction de fonctions d'impacts à partir de la modélisation d'une activité / procédé dans un logiciel d'ACV: illustration du principe.

II.2.1.3. Raisonnements sous-jacents

La procédure de simplification du calcul de l'EICV par le passage aux « fonctions d'impacts » donne l'apparence d'une catégorie d'impact qui soit forcément en fonction d'une et une seule variable : la quantité d'œuvre d'un procédé. Si nous analysons toutefois le mécanisme de l'ACV, Les résultats d'évaluation obtenus en Figure 17 ont passé les différentes étapes intermédiaires de comptabilisation et d'agrégation des flux, c'est-à-dire, l'ICV et l'EICV. Ainsi, Ces deux étapes importantes de l'ACV (que nous masquerons pour les concepteurs, par le biais des fonctions d'impacts) ont pris en compte tous les paramètres définis et tous les flux d'échanges avec la technosphère enregistrés lors de la modélisation du procédé. Il en résultera alors des phénomènes de « linéarité » et de « non-linéarité » des différentes fonctions d'impacts extrapolés, selon l'influence des jeux de paramétrages des procédés (Tableau 17)

Procédé/ activité	Modélisation	ICV et EICV	fonctions d'impacts	Cas pratiques
procédé A	1 paramètre libre 0 paramètres fixés	La comptabilisation des flux enregistrés, l'agrégation des flux des échanges avec la technosphère via l'ICV, et la contribution aux impacts env. sont directement liées au paramètre libre, i-e à la quantité d'œuvre du procédé. En conséquence, les impacts varieront <i>linéairement</i> par rapport aux instances données à la quantité d'œuvre du procédé.	$I = A_1 x$ où A_1 représente dans ce cas l'impact d'une unité d'œuvre de l'activité.	Cas d'une activité dont les flux d'échange avec la technosphère sont déjà fournis dans la base de données ACV par unité d'œuvre de l'activité. Exemple : extraction de x [kg] d'une matière première
Procédé B	1 paramètre libre ; n paramètres fixés ($n \geq 1$)	La comptabilisation des flux enregistrés, l'agrégation des flux des échanges avec la technosphère via l'ICV et la contribution aux impacts env. sont directement liées aux paramètres fixes, qui sont, à leur tour, des fonctions du paramètre libre. En conséquence, les impacts <i>ne varieront plus linéairement</i> par rapport aux instances données au paramètre libre.	$I = f(x)$ prend la forme générique de l'équation (4)	Cas d'une activité dont les flux d'échanges avec la technosphère sont des fonctions de un ou plusieurs paramètres (temps de cycle, énergie...), outre la quantité d'œuvre. Exemple : les procédés de fabrication intégrant des données primaires, et présentant une forte interdépendance entre les paramètres (consommation d'énergie en fonction de la puissance de la machine ; les facteurs d'émission de polluants en fonction de la durée de l'opération qui, varie selon la quantité d'œuvre à traiter...)

Tableau 17. Le principe de la linéarité et de la non linéarité des fonctions d'impacts selon les raisonnements derrière l'ACV et les jeux de paramétrage des activités/procédés.

II.2.2. La typologie environnementale par famille de produits

II.2.2.1. **Le contexte de la création de classes environnementales des produits**

La catégorisation ou classification des produits dans un contexte d'observation quelconque fait appel à l'analyse multi variable des données (multidimensional scaling, MDS) [Cox et Cox 2008] , [Dagher 2008] , [Gutierrez et Adenso-Diaz 2009] . La MDS constitue un ensemble de techniques statistiques permettant d'analyser les relations de dépendances ou de similarité entre les objets suivant des variables qui les caractérisent. Les similitudes ou les différences entre les objets sont déterminées dans une « matrice de (dis) similarités » des variables par le calcul de la « distance » entre les objets.

Dans le contexte de la catégorisation environnementale des produits, les variables qui peuvent donner lieu à la création de classes de produits sont les profils environnementaux de ces produits. Des travaux de cette nature ont déjà conduit par [Sousa et Wallace 2006] , [Collado-Ruiz et al.2010] en vue de simplifier la représentation des résultats d'ACV.

Dans les travaux de [Sousa et Wallace 2006] il s'agit de définir des catégories de profils environnementaux. Ainsi les machines à café et les mixeurs possèdent le même comportement environnemental car ils sont fabriqués avec une quantité considérable de matières plastiques et consomment de l'énergie électrique pendant leur phase d'utilisation. Ces deux types de produits font donc parties d'une même classe environnementale, même s'ils ne remplissent pas la même fonction.

Dans les travaux de [Collado-Ruiz et al.2010] , la classification environnementale est fondée sur le principe du « life cycle comparison product families (LCP-families) » et requière de véritables résultats d'ACV. Les "LCP-families" ont été définies par Collado-Ruiz et al comme étant *"un ensemble de produits qui partagent un même comportement, et que les ACV peuvent en conséquence les comparer d'une certaine manière"*. Cela signifie qu'une classe environnementale ou une « LCP-family » est constituée avec des produits possédant une même unité fonctionnelle et les ACV peuvent être de ce fait comparées. Une hiérarchisation de la similarité/dissimilarité des produits autour de l'unité fonctionnelle (Collado-Ruiz et al distinguent respectivement des produits similaires, équivalents et différents) est attribuée comme une référence commune aux « LCP-families », afin de définir le positionnement environnemental d'un nouveau produit au regard de sa « LCP family ». Les produits d'une « LCP-family » ne possèdent donc pas forcément le même comportement environnemental comme dans le modèle de Sousa et Wallace.

Enfin, [Gutierrez et Adenso-Diaz 2009] ont utilisé la MDS dans le cadre du traitement des résultats d'ACV sur des équipements électriques et électroniques, afin de pouvoir fournir aux consommateurs et aux producteurs une description synthétique des impacts

environnementaux de ces produits, ainsi que leur hiérarchisation en matière de performance environnementale.

II.2.2.2. La nouvelle approche basée sur une « typologie environnementale par familles de produits »

a. Objectif

Dans cette nouvelle vision, nous supposons qu'il est possible de différencier les produits selon les valeurs prises par les catégories d'impacts environnementaux qui les caractérisent. Cette différenciation en familles de produits donne lieu à la création de classes aux profils environnementaux similaires : mêmes catégories d'impacts majeurs et proximité des valeurs moyennes sur ces impacts majeurs. Ces classes permettent de simplifier l'interprétation des résultats d'ACV pour le concepteur en lui fournissant un référentiel de la famille de produits [Andriankaja et al.2010] .Cette nouvelle approche repose scientifiquement sur le MDS, en utilisant les techniques statistiques de la classification ascendante hiérarchique (CAH). Toutefois, elle se différencie principalement des travaux de recherche présentés précédemment en termes d'application méthodologique. L'objectif de la simplification de l'ACV dans notre contexte est en réalité de rendre l'interprétation des résultats de l'ACV plus facile pour les concepteurs, sans compromettre la transparence des informations. Pour ce faire, EcoT est censé produire des résultats similaires à ceux fournis originellement par une ACV, c'est-à-dire pas de déclinaison, ni de pondération des catégories d'impacts présentées en d'autres informations.

Cette « catégorisation environnementale par famille de produits » intégrée dans "EcoT" constitue donc un second axe de « simplification » de l'ACV pour le concepteur au sens où en procédure classique l'outil lui renvoie uniquement les valeurs environnementales de ces impacts majeurs. Pour autant l'ensemble des impacts (tels qu'indiqués en paragraphe 1.2.3) est calculé par EcoT pour chaque produit. Il y a deux cas de figures dans lesquels le concepteur y a accès:

- S'il les demande
- Si la valeur d'un des impacts sort de la fourchette de valeurs de la famille de produit défini préalablement.

L'évaluation environnementale quantitative par l'ACV devient ainsi « appropriable » par les concepteurs, dans le sens où "EcoT" leur donne à la fois accès au calcul des impacts et à l'interprétation des résultats d'évaluation par comparaison au référentiel de la famille de produit. Les concepteurs peuvent alors se concentrer sur la mission présentant une réelle valeur ajoutée pour l'éco-conception: il devient facile de mesurer l'impact d'un changement de masse, de fournisseur de matériaux, de matériaux...

b. Méthodologie

Les classes de produit sont identifiées en utilisant la méthode de la « classification ascendante hiérarchique (CAH) » en se basant sur les dissimilarités de valeurs d'impacts environnementaux fournis par des ACV réalisées au préalable sur un échantillon représentatif de la famille de produits. Pour ce faire l'analyse est conduite en des étapes suivantes :

- Génération d'un « espace produit paramétré » (plan factoriel) sur la base des critères physico-chimiques (descripteurs produits) pressentis comme impactant.
- Réalisation des ACV des « p » produits (objets) du plan factoriel.
- Génération d'une matrice de proximité (p x p) pour identifier les dissimilarités entre les impacts environnementaux des produits (les objets), par le biais d'une fonction de « distance ». Dans cette étude, la méthode de « distance euclidienne » est utilisée :

$$d^2(i, j) = \sum_{i=1}^n (x_{i1} - x_{i2})^2$$

où : i, j sont deux variables de l'espace produit et x_{i1} , x_{i2} sont les valeurs de chaque catégorie d'impacts respectifs des deux variables.

- Classification ascendante hiérarchique (CAH) des variables afin de définir une hiérarchie (sous forme de dendrogramme) selon leur degré de dissimilarités en termes d'impacts environnementaux. Pour cela, nous utilisons une méthode d'attribution de classe par le procédé agglomérative du « lien complet », dans lequel le regroupement dichotomique se fait progressivement par ordre des maxima du $d^2(i, j)$ (la « valeur de la dissimilarité », ou encore l'« indice d'agrégation » est maximale) entre les classes.
- Clustering ou observation des classes en coupant l'arbre de la CAH (en cherchant à réduire le nombre de classes à $n_{classes} < p$), pour former des K sous-groupes (clusters) aux profils environnementaux similaires, relatifs à un ou plusieurs descripteur(s) significatif(s) des produits pour cette partition.

Pour initier cette démarche nous assimilons la typologie environnementale de la famille de produits à construire à un ensemble que l'on désigne par « Ω » dans ce qui suit, et les différentes étapes successives à des applications. Ainsi, le problème revient analytiquement à caractériser l'antécédent et l'image (respectivement, les ensembles de départ et d'arrivée) de chaque application dans deux espaces intermédiaires différents.

- *Espace produits – plan factoriel:*

Soit \mathbf{P} cet espace. Considérons un ensemble \mathbf{F} de n facteurs physico-chimiques f_i à q_i niveaux, propres à une famille de produits. On suppose qu'à chaque combinaison Π de ces facteurs, à niveaux distincts, correspond un produit \mathbf{p} qui pourrait être caractérisé par

Chapitre 6.

son attribut physico-chimique f et sa masse m . Ainsi, pour toute combinaison possibles des facteurs, on obtient le plan factoriel P correspondant à l'ensemble des produits $p(f,m)$; Figure 18.

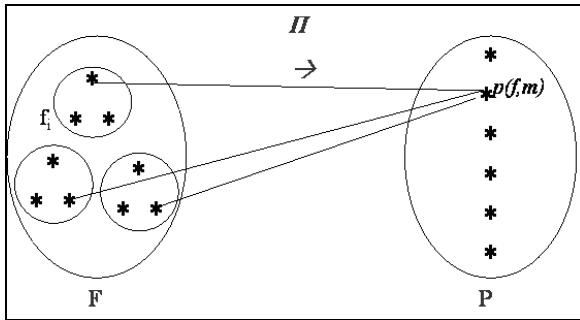


Figure 18. La génération de l'espace produit paramétré

$$\forall f_i \subset F, (i = 1 \dots n); q_i = \text{card}(f_i), \exists ! P = \prod_{i=1}^n q_i \Rightarrow P = \{p(f, m)\} \quad (5)$$

Où :

- F : ensemble des facteurs physico-chimiques f_i ;
- q_i : niveaux de chaque facteur f_i pour $i=1 \dots n$
- P : plan factoriel
- p : produit
- f : attribut physico-chimique
- m : masse du produit

• Espace des impacts environnementaux :

On considère le plan factoriel P . Si on applique une évaluation environnementale E à chaque produit de P , on aura une réponse sur les « impacts environnementaux ». Ainsi, dans l'ensemble des impacts environnementaux, que nous nommons T , chaque produit d'une famille donnée est caractérisé par son attribut physico-chimique f , sa masse m et ses catégories d'impacts environnementaux I . Figure 19

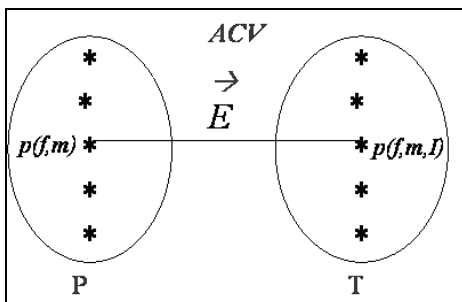


Figure 19. La génération de l'espace des impacts environnementaux

$$\boxed{\forall p(f, m) \in P, \exists E : P \rightarrow T, T = \{p(f, m, I)\} / I = E(p(f, m))} \quad (6)$$

- *Espace de la typologie environnementale d'une famille de produits:*

L'objectif est de former des classes environnementales K_N , obéissant au principe de la CAH (classification ascendante hiérarchique), noté C , des produits et leurs impacts environnementaux, dans l'ensemble Ω des classes de la typologie environnementale d'une famille de produits. (Figure 20)

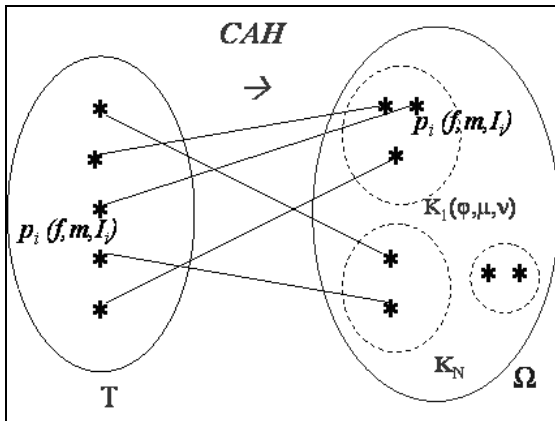


Figure 20. La génération de l'espace de la typologie environnementale dans une famille de produits.

$$\boxed{T \rightarrow \Omega : C(T) = CAH\{p_i(f, m, I)\} : \exists ? K_N(\varphi, \mu, \nu) = \{p_i : I_i = \nu \pm \Delta I\}; K_N \subset \Omega} \quad ($$

7)

Ainsi, si les classes environnementales existent, chaque classe K est alors un sous-ensemble de Ω , définie comme étant l'ensemble des produits $p_i \in T$ possédant des profils environnementaux similaires, auquel on peut associer :

- un attribut qualitatif représentatif de la classe: φ
- un barycentre ou référentiel environnemental de la classe, ayant comme coordonnées les impacts moyens des produits p_i de la classe K : ν
- une mesure d'éloignement/proximité d'un produit par rapport au barycentre, définie par la variation en pourcentage de la valeur de ses impacts $\pm \Delta I$ ²² par rapport aux moyennes.

²² Dans la pratique, c'est cette mesure d'éloignement/proximité qui permet au concepteur d'évaluer les impacts d'une solution de conception à l'échelle de la classe, sans passer au décryptage des valeurs réelles des indicateurs d'impacts.

II.2.2.3. Création d'une typologie environnementale pour la famille de produits « planche de bord »

a. Protocole

L'application de la méthodologie décrite précédemment fait appel aux éléments suivants:

- Les nomenclatures des produits (bill of material, BOM), qui fournissent les informations techniques et physico-chimiques des produits pour réaliser leurs ACV,
- Le logiciel d'ACV GaBi,
- XLSTAT, un module complémentaire fonctionnant sous Excel pour réaliser nos calculs de statistiques (distance, matrice de proximité, classification ascendante hiérarchique, etc....).

b. Facteurs physico-chimiques

Compte tenu de la complexité de nos produits automobiles les facteurs susceptibles d'influencer les profils environnementaux sont très nombreux. Dans notre cas il aurait fallu étudier l'influence des 2*4*6 paramètres sur les 6 grandeurs de sortie (i-e les impacts env.), mobilisant une matrice à 288 composantes pour arriver à un système de 6 modèles de comportement des impacts à optimiser, afin de déterminer quels facteurs sont effectivement à prendre pour élaborer un plan factoriel réalisable. Il nous était donc impossible de conduire une approche par plan d'expérience sur l'ensemble des facteurs identifiés car celui aurait signifié conduire 48 ACV dans notre cas rien que pour la famille des planches de bords. C'est pourquoi nous avons préféré ici travailler en deux temps en conduisant deux CAH successives. La première permet d'éliminer une première série de facteurs. Le nombre de facteurs ayant été réduit nous avons avec la seconde CAH exploré de façon systématique les différents niveaux de facteurs sélectionnés au travers de la conduite de 24 ACV, permettant d'échantillonner l'ensemble de ces niveaux de facteurs. Ainsi, avant la première CAH les facteurs pris en compte sont ceux qui sont caractéristiques des produits et susceptibles de montrer des dissimilarités sur leurs impacts environnementaux (dans le sens où le minimum d'intuition s'impose, il est évident qu'une observation du genre « différencier le goût des fromages en fonction de la forme de leur emballage » s'avère ridicule. Un bon facteur peut être la durée de l'affinage). La première CAH, dans laquelle tous les niveaux de facteurs ne sont pas couverts, permet de mettre en évidence les facteurs les plus influents et d'éliminer les autres. Ceux qui sont retenus sont ensuite totalement explorés dans la seconde CAH.

Dans le cas de la famille planche de bord, les facteurs physico chimiques initialement retenus sont :

Chapitre 6.

- Les matières premières employées (Mi) pour les composants essentiels²³ d'une planche de bord,
- Les procédés de fabrication des composants essentiels²⁴ (PFI)
- Les configurations de la planche (Ci), (monobloc ou multiblocs)
- La technologie de surface (Si), (matériau de revêtement et procédés associés)

Par ailleurs, on peut considérer à priori que les procédés de fabrication des composants essentiels sont systématiquement rencontrés dans toutes les planches de bords fabriqués par Faurecia. PFI est donc un facteur commun de la famille de produits et peut être retiré de la liste. Les facteurs préliminairement retenus pour la construction d'un espace produit initial sont ceux qui sont présentés dans le Tableau 18, avec leurs niveaux respectifs.

Physico-chemical factors	level	description
Configuration : C	C1	Monoblocs
	C2	Multi blocs
Basic Materials : M	M1	polyolefin talc filled
	M2	partition polyolefin talc filled /polyolefin glass fibre filled
	M3	Partition polyolefin talc filled/ styrenic
	M4	styrenic
Surface technologies : S	S1	No skin, no foam
	S2	Thermocovered TPO skin, without foam
	S3	Thermocovered or slushed TPO skin, with PU foam
	S4	Sprayed PU skin with PU foam
	S5	Slushed PVC skin with PU foam
	S6	Covered with leather in s [m ²]*

Tableau 18. Facteurs physico-chimiques préliminairement retenus pour créer un espace produit initial.

L'espace produit initial a été créé avec un échantillon de produits réels, choisis, non pas pour couvrir l'ensemble des niveaux des facteurs physico-chimiques ci-dessus, mais pour représenter chacun des triplets différents formés par (Ci, Mi, Si) et couvrant les segments de véhicules potentiellement équipés par l'équipementier (notamment les segments B, C et D), Tableau 19.

²³ Les composants essentiels tels que nous l'avons décrit dans les hypothèses de la modélisation ACV des planches de bord, exceptés les matériaux de revêtement de surfaces qui vont être recensés dans un autre facteur (Si)

²⁴ Idem au 13

		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
physico-chemical factors	IP configuration											
	Monobloc		■					■				
	Multiblocs	■		■	■	■	■			■	■	■
	Basic materials											
	polyolefin talc filled	■	■	■	■						■	
	partition polyolefin talc filled /polyolefin glass fibre filled						■	■	■	■		
	Partition polyolefin talc filled/ styrenic						■					
	Styrenic											■
	Surface technologies											
	No skin, no foam	■	■	■								
	Thermocovered TPO skin, without foam				■	■						
	Thermocovered or slushed TPO skin, with PU foam						■	■				
	Sprayed PU skin with PU foam								■			
	Slushed PVC skin with PU foam									■		
	covered with leather										■	■
	IP weight (kg)	10,4	10,5	11,2	12	14	15	16	15,6	15,3	15	17,5
	Equiped vehicle market segment	A	B	B	B	C	C	D	D	D	C	SUV

Tableau 19. Espace produit initial obtenu avec un échantillon de 11 ACV de produits existants avec leurs masses respectives, indiqués par les cases noircies.

L'analyse de la répartition des valeurs de chaque facteur à chaque niveau du dendrogramme initial permet de définir les facteurs contributifs. Ces facteurs contributifs avec leurs niveaux respectifs sont retenus par la suite à la construction du plan factoriel (Figure 21) qui précède la seconde CAH.

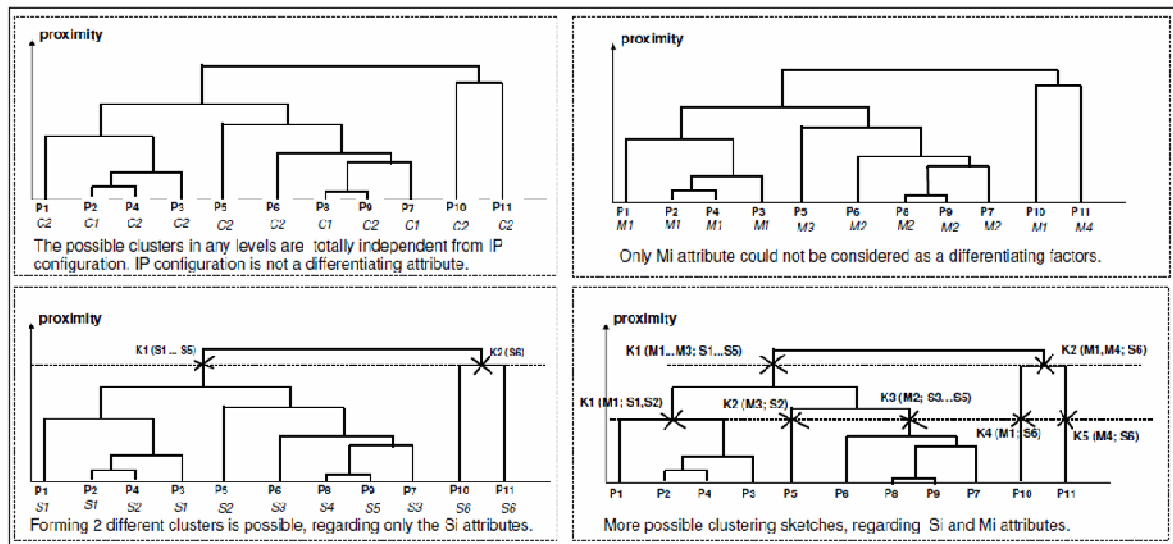


Figure 21. Extrait de l’exploitation conduite sur la première CAH

Le dendrogramme construit, il est possible par simple analyse, d’identifier les facteurs qui apparaissent comme effectivement différenciant ou non, en examinant chacun de ses niveaux, tel qu’illustré dans la figure.

c. Plan factoriel

Après le retrait du facteur (Ci) de la liste des facteurs physico-chimiques préliminairement établie, les facteurs de différenciation retenus sont ceux présentés dans le Tableau 20.

Physico-chemical differentiating factors	level	description
Basic Materials : M	M1	polyolefin talc filled
	M2	partition polyolefin talc filled /polyolefin glass fibre filled
	M3	Partition polyolefin talc filled/ styrenic
	M4	styrenic
Surface technologies : S	S1	No skin, no foam
	S2	Thermocovered TPO skin, without foam
	S3	Thermocovered or slushed TPO skin, with PU foam
	S4	Sprayed PU skin with PU foam
	S5	Slushed PVC skin with PU foam
	S6	Covered with leather in s [m ²]

Tableau 20. facteurs de différenciation émergent du premier niveau d’investigation, permettant l’élaboration d’un plan factoriel composé de $4 * 6 = 24$ variables pour construire la typologie environnementale de la famille de produit « planches de bord »

Le plan factoriel qui forme l’espace produit final (Tableau 21) est une liste des scénarii possibles des planches de bords concevables « couvrant » la diversité (Mi) de matières de base pour la fabrication des composants Faurecia (in house parts), pour une variabilité (Si)

Chapitre 6.

de la technologie de surface. Les hypothèses suivantes sont considérées dans la définition des objets du plan:

- Les « Mi » considérées ici sont des polymères issus de la pétrochimie: «polyoléfines»et le «styréniques", principalement utilisés par Faurecia pour la fabrication des planches de bord.
- Un objet (var i) du plan factoriel est un produit réel ou fictif (équivalent à son homologue réel de l'espace produit initial présenté dans le Tableau 19, mais avec une matière différente). La conception fictive doit absolument tenir compte des éventuelles modifications des paramètres de conception du produit tels que le volume, l'épaisseur, la densité, la surface, la masse équivalente, si ce produit était fait d'une autre matière.

Si	Var i	Material substitution (Mi)	IP weight m (kg)
S1	var1	All Faurecia parts are made of talc filled polypropylene	10,47
	var2	IP carrier made of polypropylene glass fibres filled	10,60
	var3	IP carrier made of styrenic	10,97
	var4	All Faurecia parts are made of styrenic	11,39
S2	var5	All Faurecia parts are made of talc filled polypropylene	11,80
	var6	IP carrier made of glass fibre filled polypropylene	11,94
	var7	IP carrier made of styrenic	14,16
	var8	All Faurecia parts are made of styrenic	15,19
S3	var9	All Faurecia parts are made of talc filled polypropylene	16,04
	var10	IP carrier made of glass fibre filled polypropylene	16,04
	var11	IP carrier made of styrenic	16,32
	var12	All Faurecia parts are made of styrenic	16,71
S4	var13	All Faurecia parts are made of talc filled polypropylene	15,62
	var14	IP carrier made of glass fibre filled polypropylene	15,62
	var15	IP carrier made of styrenic	15,90
	var16	All Faurecia parts are made of styrenic	16,25
S5	var17	All Faurecia parts are made of talc filled polypropylene	15,30
	var18	IP carrier made of glass fibre filled polypropylene	15,30
	var19	IP carrier made of styrenic	15,80
	var20	All Faurecia parts are made of styrenic	16,81
S6	var21	All Faurecia parts are made of talc filled polypropylene, s=0,45 m ²	14,94
	var22	IP carrier made of glass fibre filled polypropylene, s=0,45 m ²	14,94
	var23	IP carrier made of styrenic, s=0,45 m ² leather covered	15,32
	var24	All Faurecia parts are made of styrenic, s= 2 m ² leather covered	17,41

Tableau 21. Les 24 objets du plan factoriel, servant à construire la typologie environnementale de la famille des planches de bord

d. ACV et Classification ascendante hiérarchique des variables suivant les impacts environnementaux

Les ACV sont réalisées avec le logiciel GaBi sur 24 objets en considérant comme:

- scénarios de la phase d'utilisation deux alternatives de motorisation : diesel et essence,
- un scénario de fin de vie : le modèle EU 2010²⁵;

La dissimilarité entre les impacts environnementaux, puis la réalisation de la classification ascendante hiérarchique sont conduits sur XLSTAT. La cartographie des classes environnementales discernables est montrée par la Figure 22 et la Figure 23, respectivement pour les motorisations essence et diesel d'un véhicule léger.

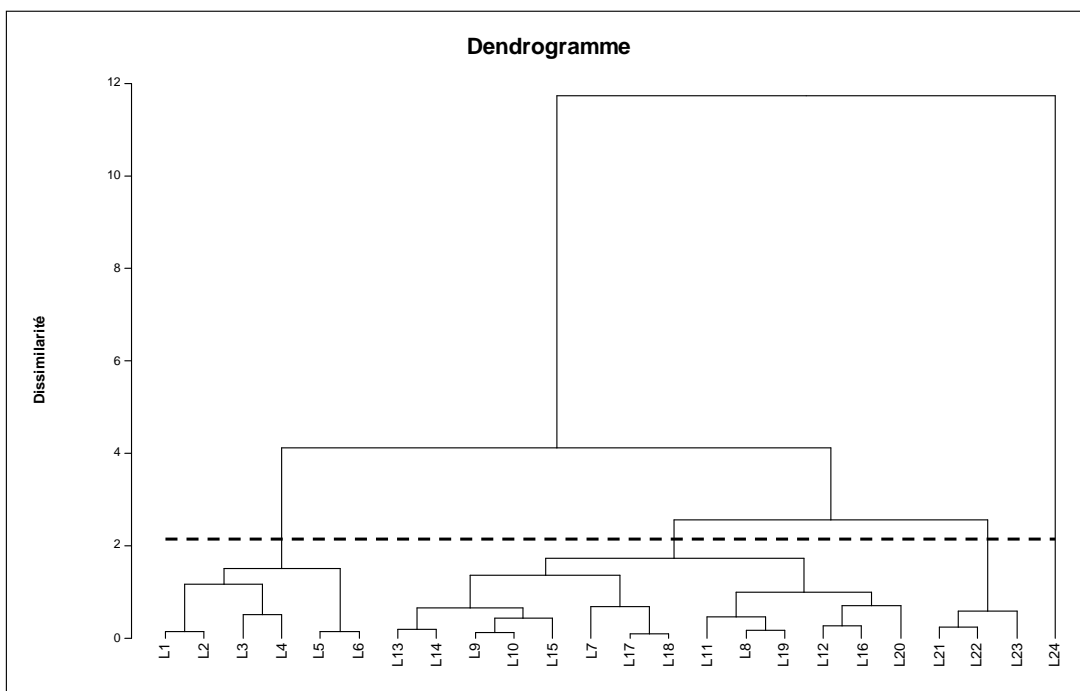


Figure 22. Les résultats de la CAH des résultats d'ACV des 24 objets en termes de dissimilarités sur leurs impacts environnementaux – utilisation sur des véhicules à moteur essence sur 150000 km

²⁵ Le scénario de fin de vie EU 2010 est choisi car il est le scénario actuel de fin de vie de référence pour l'analyse comparative par classe dans EcoT.

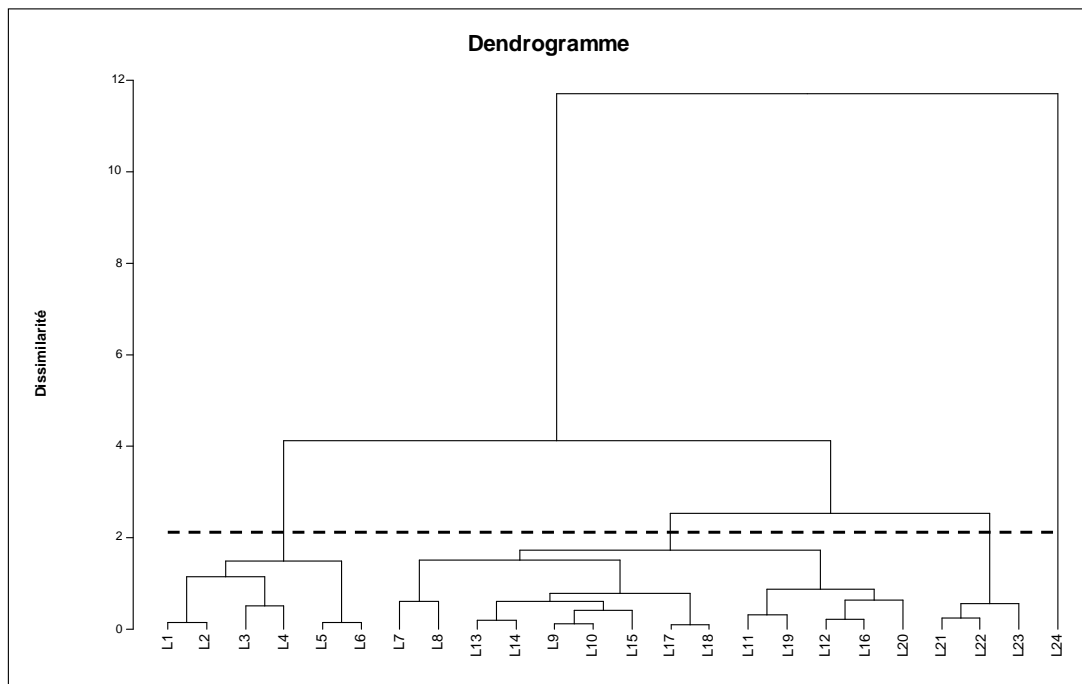


Figure 23. Les résultats de la CAH des résultats d'ACV des 24 objets en termes de dissimilarités sur leurs impacts environnementaux – utilisation sur des véhicules à moteur diesel sur 200000 km.

e. Attribution des classes environnementales à la famille de produits « planches de bord »

La troncature optimale (minimisation des variances intra-classes et maximisation des variances inter-classes) des arbres de CAH a donné 4 classes environnementales pour les variables observées. Les caractéristiques de l'attribution de classes sont données dans le Tableau 22, **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Le partitionnement dans le dendrogramme de la Figure 23 est présentée ci-dessous à titre illustratif:

- Décomposition de la dispersion :

Variance	Valeur
Intra-classes	4,98E-23
Inter-classes	4,67E-20
Totale	4,67E-20

Tableau 22. Les variances du partitionnement en 4 classes.

- Barycentres des classes :

	ADP [kg Sb eq]	AP [kg SO2 eq]	EP [kg PO4 eq]	GWP [kg CO2 eq]	ODP [kg R11 eq]	POCP [kg ethene eq]
Classe1						
Classe2						
Classe3						
Classe4						

Chapitre 6.

Tableau 23. Les barycentres des classes et leurs coordonnées en impacts environnementaux exprimés en quantité d'impacts (contient une zone classée confidentielle)

En vue de l'intégration des classes environnementales créées dans l'outil EcoT, on est amené à faire une approximation afin de créer des descriptifs produits plus familiers et mieux exploitables par l'équipe de conception. À cette fin, le singleton (classe 4) est intégré dans la classe 3 (classe des planches de bord en finition cuir). Ainsi, il en ressort 3 classes environnementales K_i , avec de nouveaux attributs φ_i (Tableau 24) et de centre de classes (Tableau 25), ainsi que de nouveaux barycentres v_i (Tableau 26) pour la famille des planches de bord.

classes	observed samples	Products descriptors	
		Surface technology (skin material & process)	Basic materials (parts)
K1 (φ_1)	var 1...var 6	No skin and no foaming (familiarily called "injected dashboard")	- polyolefin talc or glass fibres filled; - styrenic
		skin made of thermocovered thermoplastic polyolefin, no foaming	polyolefin talc or glass fibres filled
K2 (φ_2)	var 7...var 20	skin made of thermocovered thermoplastic polyolefin (TPO), no foaming	styrenic
		skin made of TPO, PU or PVC with foaming, process: thermocovering, spraying or slush	- polyolefin talc or glass fibres filled; - styrenic
K3 (φ_3)	var 21...var 24	skin made of leather	- polyolefin talc or glass fibres filled; - styrenic

Tableau 24. Descripteurs qualitatifs des différentes classes environnementales des planches de bord pour guider les concepteurs dans le choix de la classe pour évaluer un nouveau produit sur EcoT

Partition			
Env. Classes	Intra-class subpartition		closeness
Class 1	product weight (w) < 10kg	atypic 1-	< -25% impacts average
	10kg ≤ w ≤ 12kg	Class 1 centre	±25% impacts average
	w > 12kg	atypic 1+	> +25% impacts average
Class 2	product weight (w) < 14kg	atypic 2-	< -25% impacts average
	14kg ≤ w ≤ 17kg	Class 2 centre	±25% impacts average
	w > 17kg	atypic 2+	> +25% impacts average
Class 3	product weight (w) < 14kg	atypic 3-	< -25% impacts average
	14kg ≤ w ≤ 20kg	Class 3 centre	±25% impacts average
	w > 20kg	atypic 3+	> +25% impacts average

Tableau 25. Descripteurs quantitatifs des différentes classes environnementales des planches de bord.

Les objets ayant servi à l'ACV du plan factoriel sont placés par défaut aux centres des classes, dans la mesure où il faudrait prendre en compte l'influence de la masse des produits sur l'ampleur des impacts (même si elle n'en modifie pas la nature). En effet, comme l'allure des profils environnementaux donne une part importante de la phase d'utilisation dans les impacts du cycle de vie, et comme cette étape est en partie conditionnée par l'imputation de la consommation par rapport à la masse (dans le cas des composants automobiles), cette mise en garde s'impose. La maturité de l'outil EcoT et la compilation des résultats d'ACV dans l'avenir éclairciront au fur et à mesure le vrai comportement des classes créées.

f. Référentiels environnementaux – seuil de notabilité – impacts significatifs

Dans EcoT, les impacts sélectionnés pour définir la référence de la classe de produits, sont caractérisés par rapport à un « seuil de notabilité », fixé arbitrairement. Il est à calculer pour chaque classe par rapport au total des 6 catégories d'impacts, selon le ratio :

$$S = \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \text{ Où } X_i \text{ est la valeur normalisée}^{26} \text{ d'une catégorie d'impact } i \text{ (} i=1 \dots n \text{)}.$$

Ainsi, pour chaque classe attribuée, seuls les indicateurs ayant des valeurs $\geq S$ seront affichés sur les référentiels environnementaux dans EcoT. En fixant cette règle, nous supposons être en mesure avec EcoT de:

- réduire le nombre de critères à traiter par le concepteur, tout en lui donnant un profil environnemental représentatif des impacts majeurs,
- détecter d'éventuels transferts d'impacts, car les autres indicateurs sont également calculés mais ne seront signalés que lorsque leurs valeurs dépassent soudain ce seuil et se trouvent suffisamment à l'écart de celles du barycentre de la classe.

Ainsi, on peut définir comme suit les référentiels par classe dans la typologie des planches de bord : (Tableau 26)

Classes	Catégories d'impacts	ADP	AP	EP	GWP	ODP	POCP
K1	niveau	1	0	1	1	0	1
	valeur moyenne (centre de classe)						
K2	niveau	1	0	1	1	0	1
	valeur moyenne (centre de classe)						
K3	niveau	1	1	1	1	0	0
	valeur moyenne (centre de classe)						

Tableau 26. Les référentiels environnementaux (cette partie contient une zone confidentielle) pour chaque classe de la typologie des planches de bord. Dans EcoT, les catégories d'impacts indiqués en niveau 1 seront ceux affichés systématiquement et les impacts à niveau zéro seront masqués.

II.2.2.4. Reproduction de la méthode en vue de la création d'une typologie environnementale de la famille des panneaux de portes

La famille des « panneaux de portes » possède des spécificités particulières, comparée aux planches de bord. Certes, le nombre de composants d'un panneau de porte est d'environ 10 fois moins important que celui d'une planche de bord. En revanche, on peut rencontrer sur un panneau jusqu'à 5 fois plus de variantes de matières, à cause des aspects

²⁶ Normalisation CML2001 – Dec 2007, world (impact d'un individu dans le monde pendant une année), .

Chapitre 6.

de décoration qui sont plus mis en relief sur ces produits qu'au niveau des planches de bord. Dans notre contexte, la prise en compte de ces spécificités engendre dans un premier temps l'évolution de la base de données de l'outil en termes de diversité de matières. Les hypothèses de la standardisation du périmètre restent inchangées et les nouveaux procédés et/ou matières à intégrer sont modélisés suivant les mêmes principes. Toutefois, la question que nous éluciderons par la suite porte sur la typologie environnementale de cette famille. L'état des travaux actuellement en cours sur ce sujet a permis d'identifier que le plan factoriel comporte 55 objets pour échantillonner l'ensemble de la variabilité des panneaux de porte (Tableau 27)

Factorial plan for DP environmental categorization			
Basic materials (Carrier and others components insert)	petrochimie	M1	Polyolefin-talc filled (PP or P/E talc filled)
		M2	neat PP (P/E)
		M3	partition polyolefin talc filled and neat PP
		M4	partition polyolefin talc filled and styrenic
		M5	styrenic (ABS, PC-ABS)
	PP chargée fibres naturels	M6	polypropylene(PP) - hemp fibre
		M7	polypropylene(PP) - flax fibre
	Composites fibres de bois	M8	Lignotock/lignoflex
		M9	Lignoprop
Surface technology		S1	No covering materials (injected DP): only for M1--> M5)
		S2	PU painting (only for M1--> M5)
		S3	TPO foil thermoformed (M1-->M9)
		S4	PVC compact thermocovered (M1-->M9)
		S5	PVC slush ou PU sprayed + PU foam (M1-->M9)
		S6	TEP PVC or PU + PET spacer fabric pressed and bounded (M1-->M9)
		S7	Leather coated cut and saw (M1-->M9)

Tableau 27. Facteurs de différenciation pour l'élaboration d'un plan factoriel composé de $(5*7) + (2*5) + (2*5) = 55$ variables pour construire la typologie environnementale de la famille de produits « panneaux de portes »

Cela est justifié par l'utilisation de plusieurs variétés de revêtement de surfaces, ainsi que des composites à base de fibres de bois et des composites en polypropylène, chargées de fibres naturelles sur ces produits. La Figure 24 ci-dessous donne un aperçu global du protocole mis en œuvre, afin de créer une typologie environnementale pour la famille des panneaux de portes.

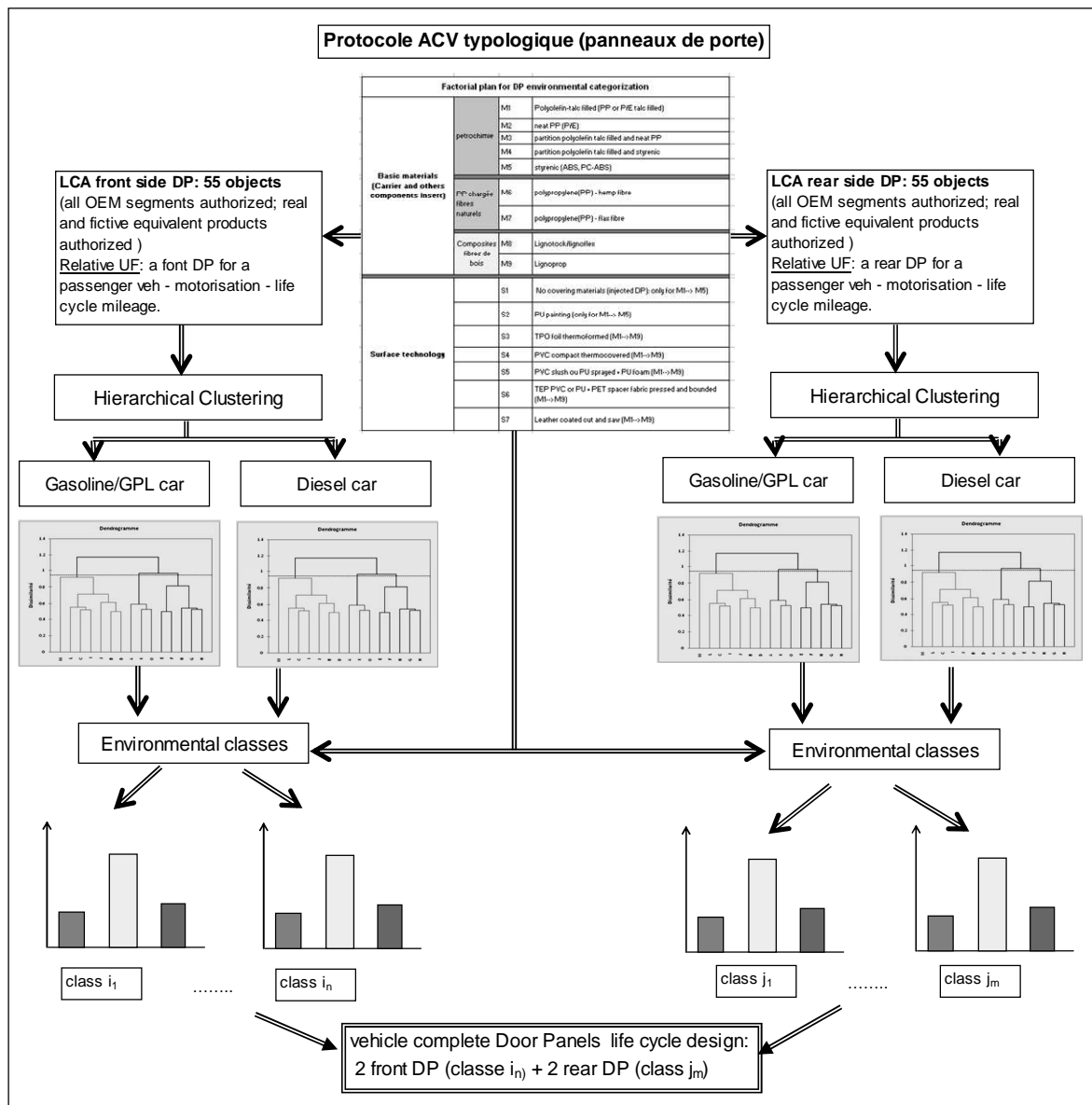


Figure 24. synthèse du protocole de la création d'une typologie environnementale pour la famille panneaux de portes.

II.3. La maquette de l'outil EcoT sur la famille « planches de bord »

L'intégration de l'ensemble des fonctionnalités créées précédemment dans un même support (classeur Excel), à savoir :

- la base de données formée par les fonctions d'impacts,
- les descripteurs produits et les référentiels environnementaux,

conduit à l'obtention d'un démonstrateur de l'outil d'ACV simplifié EcoT, fonctionnel pour une analyse comparative de la famille des planches de bord. Un extrait de cette maquette est présenté dans les Figure 25 et Figure 26, montrant la nature des informations nécessaires pour obtenir des profils environnementaux avec EcoT.

INPUT DATA LIST								
Components Information Request								
Components		Materials sourcing			Manufacturing			
Rep	Nb.	Designation	Material designation	Quantity (kg)	Distance S/P (km)	Process designation	Quantity	Unit
1	1	IP carrier	PP-LGF20	4	450	injection moulded (1100-2300T) PP based	4	kg
2	1	chute channel	PP-EPDM; TPO	0.4	450	injection moulded (unspecified), generic	0.4	kg
		foil skin	PUR foil	2	750	Thermoformed, generic	2	kg
		foam	PUR foam	1.3	650	foaming	1.3	kg
		subframe carrier	PP-LGF20	0.45	0	injection moulded (300-800T) PP based	0.45	kg
		defroster front	PP-LGF20	0.885	0	injection moulded (300-800T) PP based	0.885	kg
		defroster rear	PP-LGF20	1.22	0	injection moulded (1100-2300T) PP based	1.22	kg
		defroster outlet sides	P/E-MD20	0.31	450	injection moulded (300-800T) PP based	0.31	kg
		adapter air mixbox	PELD	0.1	750	blow moulded, generic	0.1	kg
		airducts	PELD	0.05	750	blow moulded, generic	0.05	kg
		side airvents	PC-ABS	0.05	650	injection moulded (unspecified), generic	0.05	kg
		air mixbox	ABS	0.22	650	injection moulded (unspecified), generic	0.22	kg
		windscreen seal	PP-EPDM; TPO	0.09	650	Thermoformed, generic	0.09	kg
		panel lower trim	P/E-MD15	0.7	450	injection moulded (unspecified), generic	0.7	kg
		panel center (cluster bezel)	PC-ABS	0.2	650	injection moulded (unspecified), generic	0.2	kg
		driver face combi	PC-ABS	0.105	650	injection moulded (unspecified), generic	0.105	kg
		glove box storage	P/E-MD15	1.146	450	injection moulded (1100-2300T) PP based	1.146	kg
		glove box outer	P/E-MD15	0.556	0	injection moulded (300-800T) PP based	0.556	kg
		glove box lid outer	P/E-MD20	0.639	450	injection moulded (300-800T) PP based	0.639	kg
		GB handle	PA6GF30	0.02	750	injection moulded (unspecified), generic	0.02	kg
		panel sides end cover	PC-ABS	0.18	650	injection moulded (unspecified), generic	0.18	kg
			Select			select		m²
			Select			select		m²
			Select			select		m²

IN Base / R.ES / WI / SC / OUT / Feuill /

Product key: Significant for product system only!

Product:

Project:

Typology:

select

A group

B group

C group

you do not have to refer to a complete da

2.After filling this page, please go to WI to view the whole life cycle impacts

Figure 25. Un écran de la maquette de EcoT montrant une feuille de saisie des données d'entrées

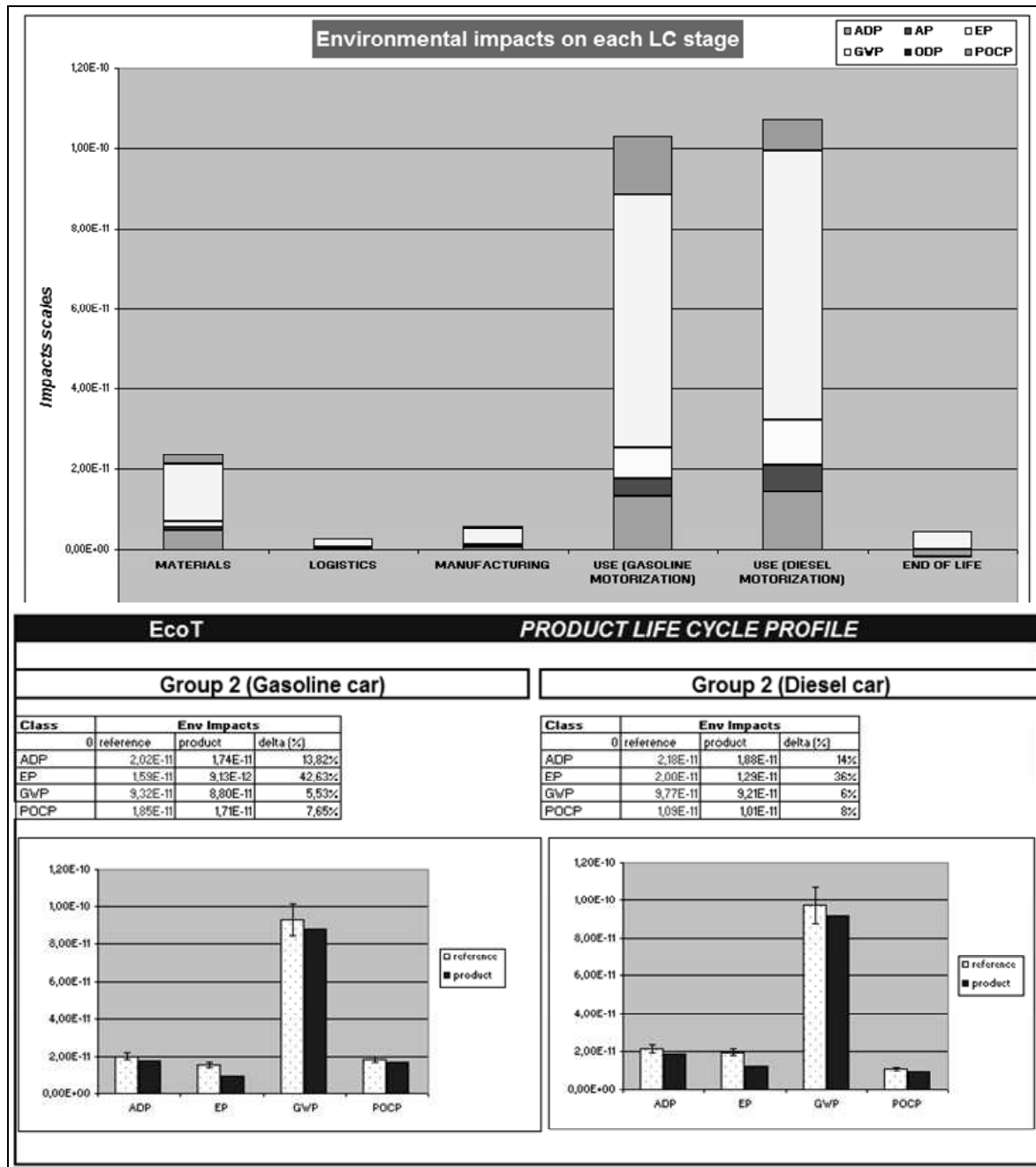


Figure 26. Un écran de la maquette de EcoT montrant une feuille de présentation des résultats

II.4. Le prototype de l'outil EcoT « planche de bord » et de son système d'information

II.4.1. Composantes de EcoT et de son système d'information

Le développement d'un prototype de EcoT consiste à matérialiser son architecture complète, en créant les interfaçages qui permettent à l'équipe de conception d'exploiter les fonctionnalités développées précédemment.

Chapitre 6.

Dans sa réelle configuration, EcoT est constitué d'un processeur de calculs matriciels lié à la base de données des fonctions paramétrées et des interfaces pour les échanges d'informations avec l'équipe de conception (Figure 27).

Par ailleurs, l'outil propose aux utilisateurs deux manières de remplir les données d'entrée (Figure 27 et Figure 29):

- Une interface de saisie manuelle (via MDI interface), où l'utilisateur saisit manuellement les données requises par EcoT pour réaliser l'évaluation d'un produit ;
- Une interface de saisie semi-automatique (via ADI interface), qui peut « apprendre » une nomenclature (Bill of Material, BOM) du produit au travers une comparaison des informations saisies avec le contenu de la base de données de EcoT. Cette fonctionnalité supplémentaire est prévue pour faciliter la tâche des utilisateurs lorsque ces derniers se trouvent avec un grand volume de données à saisir.

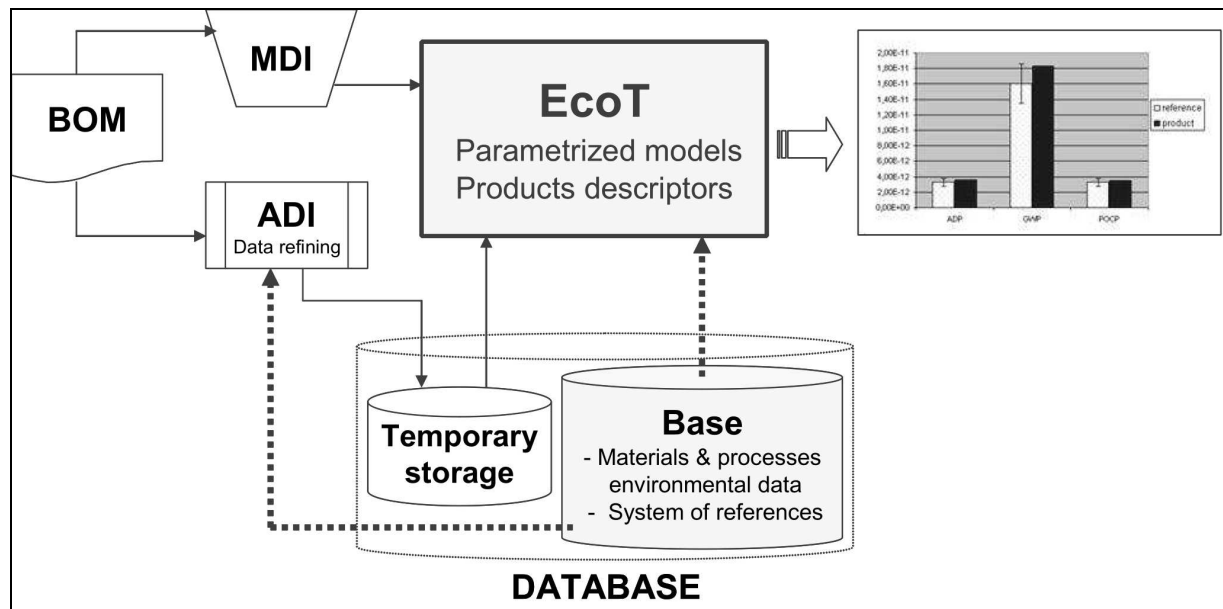


Figure 27. Les composants du prototype de l'outil EcoT et le processus de traitement de données. Les flèches en ligne continue indiquent les flux de données et les flèches en ligne interrompue représentent les flux d'information. BOM (Bill of Material), MDI (entrée manuelle des données), ADI (entrée automatique des données)

II.4.2. Prototype fonctionnel

Dans les conditions réelles de fonctionnement, l'outil autorise deux utilisations possibles, donc de présentation des résultats (Figure 29):

- Le mode « ACV simplifiée descriptive », dans lequel EcoT affiche tout simplement les résultats d'évaluation de la même manière qu'un logiciel d'ACV pourrait le faire, mais sans demander le même effort et le même temps d'usage. Cela correspond au

Chapitre 6.

cas où le concepteur réalise une analyse descriptive d'un produit, une évaluation environnementale d'un sous-ensemble du produit ou encore d'un composant.

- Le mode « ACV simplifiée dans une famille de produits », conditionné par la mise en application du mécanisme de l'analyse comparative par une classe environnementale. Cela correspond au cas où le concepteur évalue un nouveau produit conçu et positionne ses impacts par rapport à l'existant, pour une classe environnementale spécifiée. Ainsi, dans ce mode d'usage, EcoT affiche un nombre limité d'indicateurs définis comme les impacts majeurs de la classe concernée (c.f § f).

The figure displays the EcoT software interface, which is used for environmental impact analysis. It consists of several main components:

- Top Menu Bar:** Contains buttons for file operations (Use a saved file, Proceed to a full save, Proceed to a subset save, Back to main menu, Quit ECOT ?) and data management (Select - Unselect, Clean it!, Delete, Copy, Paste, Insert new part..., Edit Part..., Calculate it!, Scenario 2, Scenario 3).
- Main Data Table:** A large table with columns for 'Part', 'Material Family', 'Material', 'Mass (g) or Nbr of operation', 'Surface (cm²)', 'Distance (km)', 'Transport', 'Distance (km)', '2nd Transport', 'Transformation process', 'Unit', and 'End of life'. The title of the table is 'IP carriers assy - Scenario 1'.
- Input Selection Dialog:** A window titled 'Input selection for Instrument Panel (IP)' with the Faurecia logo. It offers two input methods:
 - Manual Input:** Described as 'Manual keyboarding via EcoT file'. It includes cut-off rules: 'Subsets below 5% of the IP total mass' and 'Parts below a mass of 10 g are excluded of the perimeter of the analysis. Also, the cross car beam should be excluded of the analysis.' A '< Previous' button is at the bottom.
 - Automatic Input:** Described as 'Automatic keyboarding via Automatic Data Input file (ADI)'. It notes that data is sorted from a special paste of the BOM. A warning states: 'Nevertheless, the user has to select one version of the product (LHD, RHD, Surface technology...)' and 'Also, the cross car beam should be excluded of the analysis.' A 'Cancel' button is at the bottom.
- Pasting table from BOM:** A window with a warning icon and text: 'Please note, don't forget to: 1- Remove all the cross car beam 2- Select only one version (RHD, LHD, Surface technology...) 3- Be rigorous for this analysis, the relevant and the accuracy of your results will depend on it!'. It features a table with columns: 'Part', 'Material', 'Mass per vehicle (g)', 'Developped surface (cm²)', 'Transformation process', 'Ton', 'Assembly process', 'Supplier', 'Make or Buy', and 'Unit'. A 'Sorting' button is in the top right.

Figure 28. Un extrait de la configuration d'un prototype fonctionnel d'EcoT: les interfaces de captage des données (MDI et ADI)

modification follow up available		BASE		Insert new material			
Materials							
Famille du Matériau	Référence du Matériau	ADP (kg Sb-Eq)	AP (kg SO ₂ -Eq)	EP (kg Phosphate-Eq)	GWP 100 (kg CO ₂ -Eq)	ODP (kg Rf-Eq)	POCP (kg Fluor-Eq)
Styrenic Based	ABS	0,00590894	0,00189193	0,00176544	20,2230147	0	0,00456707
Styrenic Based	ABS-PA (70-30)	0,065495783	0,08739254	0,08742959	49,3026747	0	0,00510407
Aluminum based	Aluminum sheet	0,002309239	0,05567283	1,48E-02	1,23E-02	1,68E-06	0,009787302
Flax	Industrial Flax	0,008474442	3,93E-02	0,04440099	2,98E-02	1,26E-05	1,79E-01
Natural Based	Leather (cm ²)	0,094093639	14,89947204	19,6505037	195,584258	5,58047E-05	-17,07456277
Natural Based	Lignopropes (88% pine)	0,007249727	0,00122959	0,00240471	4,45937026	17E-08	0,000859582
FP based	PIE	0,00516184	0,00434931	0,00302029	197E-01	1,06E-07	0,000527063
FP based	PIE-MD15	0,05489418	0,05989343	0,05449834	27,78631963	6,2E-07	0,00380232
FP based	PIE-MD20	6,23E-02	3,73E-03	4,25E-03	26,9030263	6,24E-07	3,59E-01
Other Polymers	PA6	0,009292944	0,000893944	0,00748949	31,9414094	0	0,000124533
Other Polymers	PA6.6	8,82E-02	2,89E-02	6,25E-02	8,07E-01	0,00E-00	6,78E-03
Other Polymers	PA6.6 GF	2,29E-02	2,44E-02	3,03E-02	7,07E-01	0,00E-00	5,93E-03
Other Polymers	PA6.6 GF 20	0,09566911	3,53E-02	0,06230594	96,4306439	6,85E-07	0,00224461
Other Polymers	PA6.6 GF 20	0,008874442	3,52E-02	0,04448899	87,827432	4,97E-07	0,00242309
Other Polymers	PA6.6 GF 30	0,00722056	0,02796397	0,01422056	73,8384645	0	0,00190763
Other Polymers	PA6.6 GF 30	0,07374497	0,01222259	0,01954449	91,6699341	5,98E-07	0,00194520
Styrenic Based	PC-ABS	0,052579849	0,027304588	0,02678467	79,23564189	4,11E-07	0,00742399
Other Polymers	PIED	0,00610923	0,006294738	0,00300499	8,880323863	0	0,003769908
Other Polymers	PIED	0,04777395	0,00742393	0,00252954	214,382294	0	0,00356034
Other Polymers	PET	5,39E-02	3,94E-02	2,37E-02	2,44E-01	1,68E-06	4,80E-02
Other Polymers	PET fabric (cm)	0,33242430	0,04827427	0,04933799	19,20308449	4,18E-06	0,02144739
Other Polymers	PET film (cm ²)	0,06847491	2,27E-02	1,04E-02	56,06272869	0	0,000703032
Natural Based	Pine log (Dry humidity)	7,10E-05	6,29E-05	7,07E-05	40,27092739	2,37E-11	9,97E-05
Other Polymers	PMMA	0,004244406	0,03789849	0,03232236	72,2320231	0	0,00139469
Other Polymers	PCM	0,043486209	0,00977545	0,00689345	28,2091276	5,9E-07	0,00444878
Other Polymers	PCM-GF 10	0,05392991	0,02628279	0,00989396	44,83244991	1,03482E-06	0,00746107
Other Polymers	TPU-GF 10	0,01696691	0,00666691	0,00666691	47,47199692	1,00000E-06	0,00746107

Please select a kind of analysis :

Descriptive analysis :

Single Scenario analysis, without referential

Product descriptors

Comparative analysis

Several Scenarios analysis (up to 3), without referential

With typology = Comparative analysis By choosing a the evaluated product class according to the following explanations :

Class 1 - Low cost, Medium & lower premium

Main IP injected parts	Surface technology
Polyolefin talc or GF filled Polyolefin talc or GF filled and styrenic Polyolefin natural fibers-filled	Covering materials No covering TPO skin (foil or complex) without foam
	Processes No process Thermocovering / Thermoforming

Class 2 - Premium

Main IP injected parts	Surface technology
Polyolefin talc or GF filled Polyolefin talc or GF filled and styrenic Polyolefin natural fibers-filled	Covering materials PVC (foil or powder) with foam TPO skin (foil or complex) with foam
	Processes Slushed or Thermoforming

Class 3 - Luxuries

Main IP injected parts	Exterior surface technology
Polyolefin talc or GF filled Polyolefin talc or GF filled and styrenic All styrenics Polyolefin natural fibers-filled	Covering materials Leather coated
	Processes Manual or machine covering (cutting and sewing)

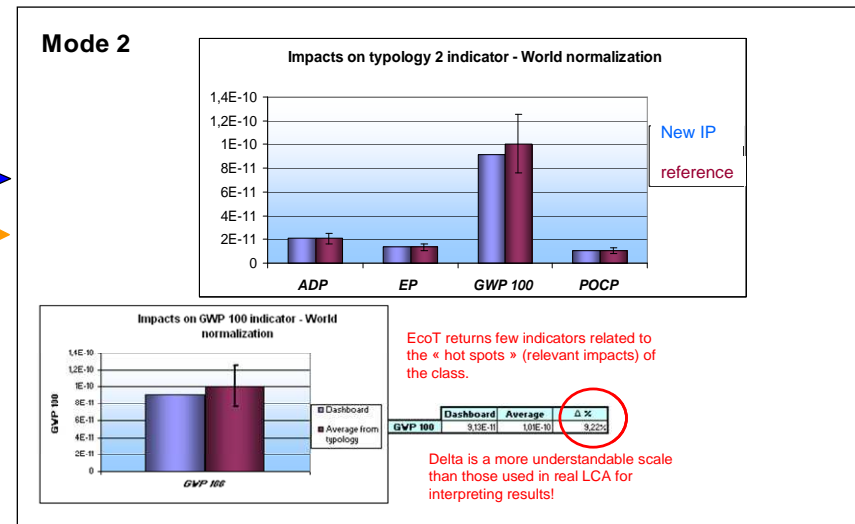
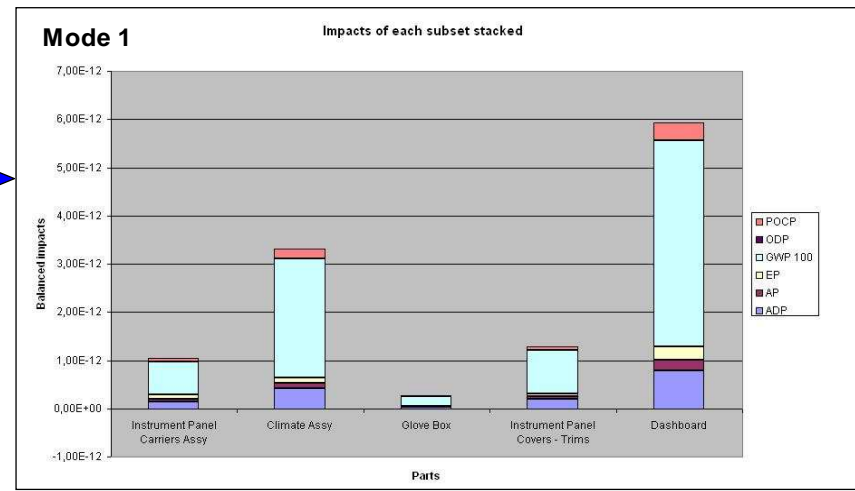


Figure 29. Un extrait de la configuration d'un prototype Fonctionnel de l'outil EcoT : la base, le descripteur produits et les interfaces de présentation de résultats.

CHAPITRE 7. EXPERIMENTATION ET INTEGRATION DE L'OUTIL ECOT

Comme nous l'avons déjà décrit dans le protocole expérimentale, la phase expérimentale proprement dite de EcoT (Figure 30) nous permet de mesurer la validité des hypothèses que nous avons établies auparavant, en évaluant l'aptitude de l'outil développé à répondre à la problématique posée de l'opérationnalisation de l'ACV en conception. Toutefois, avant de mettre à l'épreuve le nouveau modèle développé par l'équipe de conception, les Experts Eco-design ont réalisé une phase de validation initiale, qui consiste en une vérification de la justesse et de la précision des résultats fournis par EcoT. Nous détaillerons cet aspect en première section de ce chapitre. Ensuite, l'étape de mise à l'épreuve est celle qui se trouve au cœur de cette phase expérimentale et durant laquelle l'outil EcoT est testé dans ses conditions réelles d'usage par ses futurs utilisateurs. Cette étape comprend deux niveaux de tests, à savoir, un test préliminaire de prise en main, mené en dehors d'un réel processus de conception de Faurecia avec un groupe d'acteurs multidisciplinaires, qui fera l'objet de la deuxième section, et un test d'intégration, détaillé dans la troisième section, mettant en œuvre EcoT sur un projet en cours de conception, impliquant l'ingénieur de concept qui pilote ce projet.

En dernier lieu de ce chapitre, nous abordons la procédure de l'intégration de EcoT dans le processus de Faurecia, avant de conclure sur la synthèse des apports et des limites de notre travail de recherche.

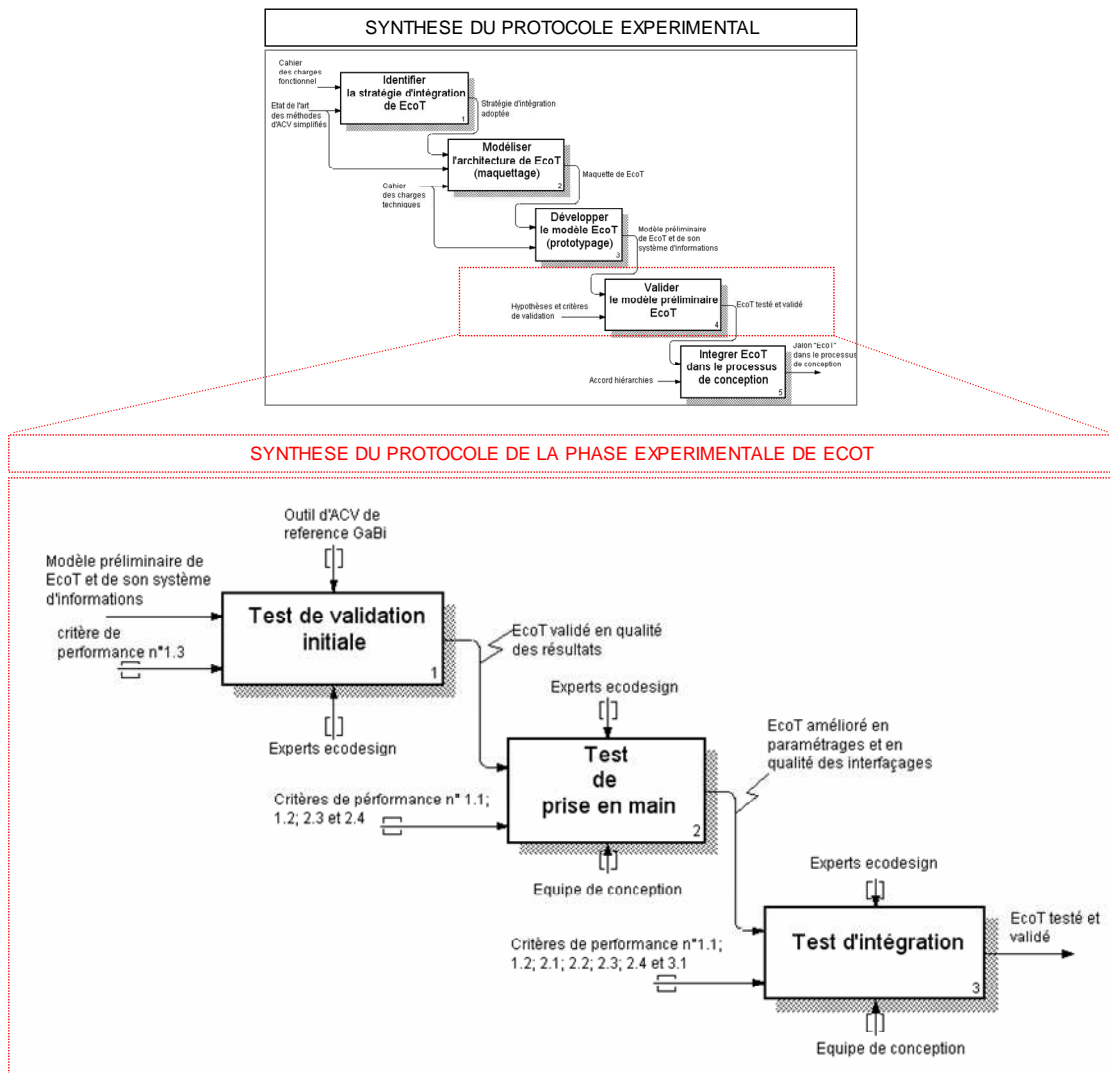


Figure 30. La phase expérimentale de EcoT est conduite sous trois niveaux de tests

I. Tests de validation initiale

I.1. Protocole des tests

Les tests de validation initiale permettent d'accomplir une validation technique de l'outil EcoT développé, dans le but d'assurer la fiabilité des résultats qu'il fournit. La Figure 31 décrit son déroulement.

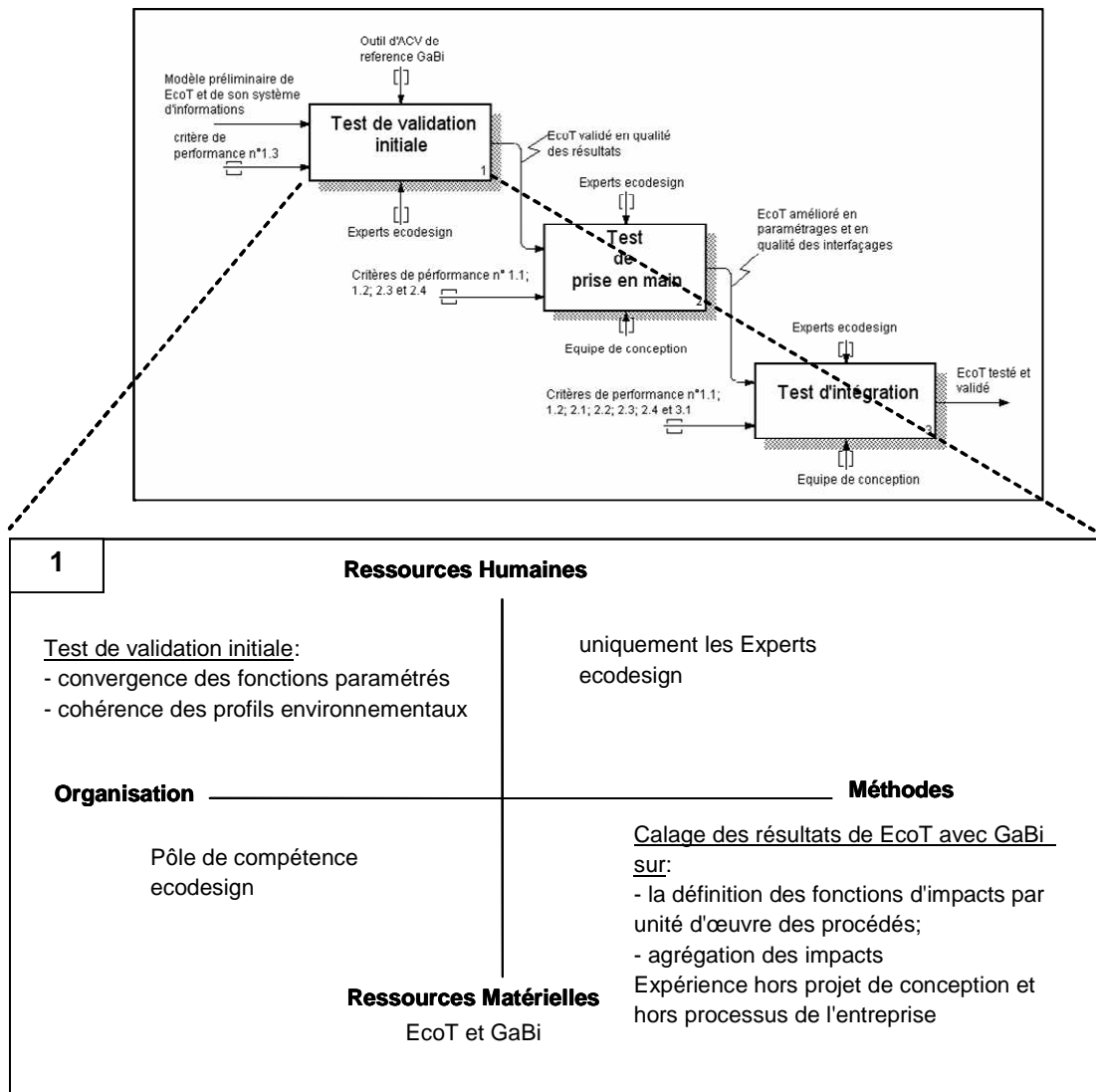


Figure 31. Protocole du test de validation initiale d'EcoT

I.2. Convergence des fonctions d'impacts

Le fait d'avoir créé des fonctions d'impacts pour éviter aux concepteurs de manipuler des données et logiciels autres que ceux qu'ils connaissent, induit la question de la robustesse des résultats fournis par l'EcoT en comparaison d'une évaluation similaire réalisée avec GaBi. La qualité d'EcoT a été obtenue en travaillant à accroître la proximité des résultats fournis par EcoT de ceux issus de GaBi. La Figure 32 montre l'ensemble des actions effectuées sur les fonctions paramétrées ; elles ont permis le calage de l'outil EcoT par rapport à l'outil étalon GaBi à un intervalle d'erreur de $\pm 5\%$.

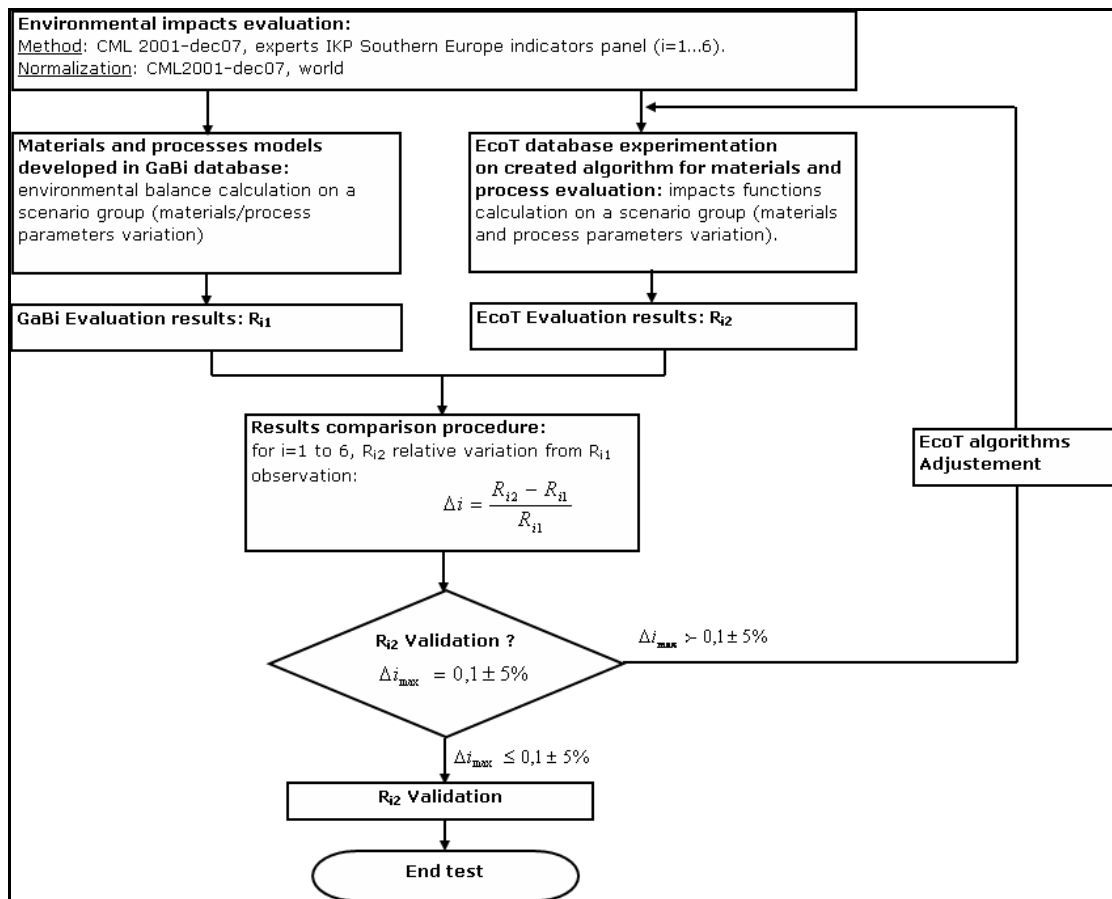


Figure 32. Procédure de contrôle de la convergence et calage des modèles paramétrés

I.3. Cohérence des profils environnementaux

La cohérence des résultats finaux de l'évaluation environnementale sur EcoT dépend directement de la précision de l'algorithme de calcul (l'ensemble de fonctions paramétrées entrant en jeu dans l'évaluation d'un produit). Une cohérence à x% des profils environnementaux restitués par EcoT avec ceux donnés par un logiciel d'ACV est dans ce cas un moyen potentiel d'estimation de la confiance qu'on peut accorder aux fonctions paramétrées implantées dans la base de données de EcoT. Ainsi, nous nous focalisons plutôt sur l'aspect « cohérence des profils environnementaux » dans la discussion des résultats de tests. Pour cela, nous considérons que le résultat de EcoT est cohérent avec le résultat d'une ACV correspondante si le profil environnemental restitué par EcoT est à une proximité de 90% (déviations max =10%) du résultat d'évaluation donné par le logiciel d'ACV.

I.4. Résultats de la validation initiale

Les tests de validation initiale nous ont permis de nous assurer que les informations sont manipulées et agrégées avec précision, tout au long du processus de traitement de données par EcoT. En réalité, les tests de validation initiale sont des actions itératives, permettant de recalibrer les déviations observées dans les résultats d'EcoT. Réciproquement,

Chapitre 7.

le recalage d'une fonction d'impact requiert le contrôle de la cohérence des résultats de l'outil.

Nous avons d'abord observé dans un premier test de cohérence comment le recalage des fonctions paramétrées influençait la précision des résultats de EcoT par rapport à ceux donnés par le logiciel GaBi. Dans ce premier cas, des planches de bords similaires, mais avec des paramètres de conception différentes (masse, quantité de matière, instance des procédés...) sont simulés sur EcoT. A titre d'illustration, un extrait de ce premier test sur 3 planches similaires (inserts en polypropylène injectée, technologie de surface : peau PVC rotomoulée avec technologie de moussage en polyuréthane) est présenté dans le Tableau 28.

Ce premier test sur les fonctionnalités techniques a permis d'identifier l'origine des décalages initiaux entre EcoT et GaBi, suivant deux cas de figures :

- Erreurs occasionnées par les experts eco design, tant dans la modélisation des procédés dans GaBi que dans les calculs des fonctions d'impacts pour EcoT.
- Erreurs dues à un phénomène mathématique d'oscillation des fonctions d'impacts, lorsque les coefficients des termes du plus haut degré des polynômes prennent des valeurs très faibles. C'est souvent le cas des fonctions associées à l'impact ODP.

La plus importante source de décalage identifiée au cours de cette expérience est celle induite par la différence des impacts de l'utilisation de deux modèles différents de l'électricité (entraînant une déviation jusqu'à 60% dans les résultats d'évaluation lorsque certains procédés d'EcoT ont été modélisés par erreur avec des sources d'énergie différentes de ce qui a été prévu dans les hypothèses de la base de données ACV). Ainsi, la nature de l'énergie électrique prise en compte dans les procédés a été vérifiée (aussi bien dans la base de données d'ACV que dans les fonctions d'impacts modélisées) et ont été homologuées au modèle « EU-25 power grid mix ». Le Tableau 28 donne les résultats du test de validation (pour les dates du 30 novembre 2009 et du 7 mai 2010), montrant l'évolution de la cohérence des profils fournis par EcoT en vertu de l'application de cette correction.

Chapitre 7.

Date of statement: 30/11/09				Date of statement: 07/05/10			
Products		Evaluation results		Products		Evaluation results	
P1	Standard (GaBi)	EcoT	Coherence	P1	Standard (GaBi)	EcoT	Coherence
ADP	1,66E-11	1,82E-11	9,86%	ADP	1,66E-11	1,66E-11	0,37%
AP	6,70E-12	7,38E-12	10,23%	AP	6,70E-12	6,71E-12	0,26%
EP	1,10E-11	1,18E-11	7,51%	EP	1,10E-11	1,10E-11	0,36%
GWP	8,05E-11	8,83E-11	9,73%	GWP	8,05E-11	8,05E-11	0,02%
ODP	4,75E-14	6,64E-14	1,77%	ODP	4,75E-14	4,92E-14	3,63%
POCP	8,39E-12	9,35E-12	11,38%	POCP	8,39E-12	8,42E-12	0,28%
P2	Standard (GaBi)	EcoT	Coherence	P2	Standard (GaBi)	EcoT	Coherence
ADP	1,32E-11	1,38E-11	4,98%	ADP	1,32E-11	1,31E-11	0,15%
AP	5,30E-12	5,53E-12	4,26%	AP	5,30E-12	5,30E-12	0,04%
EP	8,80E-12	9,08E-12	3,13%	EP	8,80E-12	8,79E-12	0,14%
GWP	6,31E-11	6,67E-11	5,75%	GWP	6,31E-11	6,31E-11	0,05%
ODP	3,71E-14	4,28E-14	27,36%	ODP	3,71E-14	3,69E-14	0,33%
POCP	6,68E-12	7,08E-12	5,92%	POCP	6,68E-12	6,68E-12	0,11%
P3	Standard (GaBi)	EcoT	Coherence	P3	Standard (GaBi)	EcoT	Coherence
ADP	1,84E-11	1,89E-11	2,98%	ADP	1,84E-11	1,85E-11	0,97%
AP	7,64E-12	7,89E-12	3,31%	AP	7,64E-12	7,64E-12	0,02%
EP	1,27E-11	1,27E-11	0,42%	EP	1,27E-11	1,27E-11	0,09%
GWP	8,99E-11	9,17E-11	1,99%	GWP	8,99E-11	9,02E-11	0,26%
ODP	4,98E-14	7,91E-14	58,94%	ODP	4,98E-14	4,90E-14	1,55%
POCP	1,02E-11	1,08E-11	6,48%	POCP	1,02E-11	1,02E-11	0,35%

Tableau 28. Extrait des résultats des tests de cohérence des profils environnementaux de EcoT vs. GaBi dans le cadre du premier test de cohérence des résultats (les résultats d'évaluation affichés sont normalisés CML 2001-dec 07, world)

Une fois la précision de l'ensemble des fonctions paramétrées vérifiée et validée, un deuxième test de simulations a été mené avec les deux méthodes ACV et EcoT. Cependant, contrairement au premier test, les échantillons sont choisis en fonction de la variabilité de la famille des planches de bord en termes de matières premières, technologies de surface, afin que plusieurs fonctions paramétrées d'EcoT entrent en jeu dans les simulations, pour vérifier ainsi leur reproductibilité. A l'issue du test, si les profils environnementaux émergent de EcoT restent cohérents (avec 10% de déviation max) avec les résultats d'ACV, la validation initiale de l'outil pourra être accordée.

Un extrait des résultats de ce deuxième test est donné dans le Tableau 29 qui décrit un échantillon de 4 planches de bord (les évaluations environnementales ont été menées sous ces hypothèses : phase d'utilisation sur une motorisation diesel pour une vie équivalente à 2^E5 km parcourus; scénario de fin de vie EU_2010).

Sample of dashboards		Environmental evaluation results (normalization CML2001 – dec07, world)			
N°	product description	environmental impacts	LCA software	EcoT	Deviation (%)
1	<u>Configuration:</u> multi bloc <u>Basic structure:</u> upper and lower carriers made of PP-GF20, injection moulded. <u>Surface technology:</u> TPO skin thermocovered; total approx. weight: 9,2 kg	ADP	1,23E-11	1,14E-11	7,32
		AP	3,89E-12	3,58E-12	7,97
		EP	1,03E-11	1,02E-11	0,97
		GWP	5,25E-11	5,14E-11	2,10
		ODP	4,41E-14	4,53E-14	2,72

		POCP	1,20E-11	1,08E-11	10,00
2	<u>Configuration</u> : multi bloc <u>Basic structure</u> : upper carrier made of PP-flax 50% one shot process, lower carrier made of PP-GF20, injection moulded. <u>Surface technology</u> : TPO skin thermocovered. total approx. weight: 8,9 kg	ADP	1,23E-11	1,15E-11	6,50
		AP	3,91E-12	3,63E-12	7,16
		EP	1,04E-11	1,01E-11	2,88
		GWP	5,23E-11	5,16E-11	1,34
		ODP	4,89E-14	5,05E-14	3,27
		POCP	1,15E-11	1,09E-11	5,22
3	<u>Configuration</u> : mono bloc <u>Basic structure</u> : carrier made of PP-GF20, injection moulded. <u>Surface technology</u> : PVC skin slushed+ PU foaming. total approx. weight: 9,6 kg	ADP	1,26E-11	1,17E-11	7,14
		AP	3,98E-12	3,87E-12	2,76
		EP	1,23E-11	1,11E-11	9,76
		GWP	5,39E-11	5,31E-11	1,48
		ODP	4,79E-14	4,87E-14	1,67
		POCP	1,25E-11	1,17E-11	6,40
4	<u>Configuration</u> : mono bloc <u>Basic structure</u> : carrier made of PC-ABS, injection moulded. <u>Surface technology</u> : TPO skin thermoformed + PU foaming. total approx. weight: 10 kg	ADP	1,26E-11	1,17E-11	7,14
		AP	3,92E-12	3,70E-12	5,61
		EP	1,21E-11	1,12E-11	7,44
		GWP	5,31E-11	5,23E-11	1,51
		ODP	5,29E-14	5,46E-14	3,21
		POCP	1,23E-11	1,11E-11	9,76

Tableau 29. Comparaison des profils environnementaux fournis par EcoT vs. GaBi dans le cadre du second test de cohérence des résultats

II. Test de prise en main

II.1. Protocole du test

La non acceptation et l'inadaptabilité d'un nouvel outil, dues aux manques de consultations au préalable des utilisateurs ont été identifiés comme la cause majeure des échecs dans l'intégration et dans l'adaptation des outils environnementaux en entreprise, selon [Lindahl 2006] ; [Jänsch et Birkhofer 2007] ; [O'Hare 2010] .

Dans notre cas, bien que le test de prise en main ne soit pas un test en situation réelle, il a une importance particulière dans le sens où il nous permet de consulter les futurs utilisateurs de l'outil (l'équipe de conception), afin qu'ils puissent donner leurs recommandations potentielles pour améliorer l'outil. Cela augmente les chances que l'équipe de conception accepte plus facilement EcoT lors du test d'intégration. Le déroulement du test de prise en main est décrit par la Figure 33

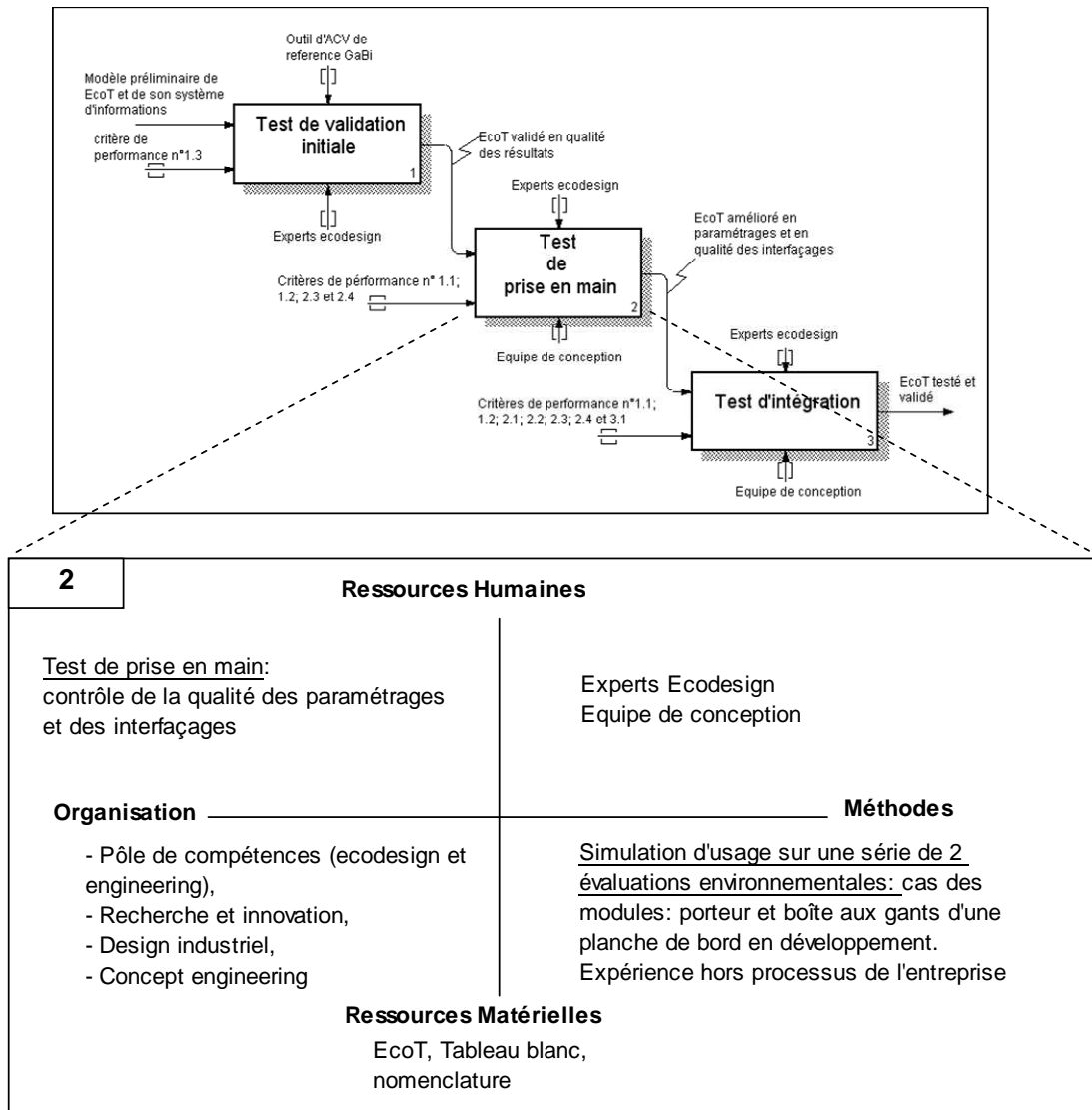


Figure 33. Protocole du test de pris en main

II.2. Déroulement du test

Précédé d'une formation basique sur l'ACV et l'éco-conception, ce test consiste à présenter EcoT à l'équipe de conception afin d'obtenir la perception de ces acteurs sur l'adéquation de l'outil aux besoins des utilisateurs et, éventuellement les défauts majeurs qui pourraient empêcher l'intégration et l'usage effectif de l'outil dans les projets. Sept participants (Figure 34,) ont été impliqués dans ce test, qui a été réalisé sous forme de workshop²⁷. Les participants représentent chacun des quatre départements d'ingénierie de "Faurecia Interior System" (centre R&D): Concept engineering, Pôle de compétences (ecodesign et engineering), Design industriel, Recherche et innovation.

Ce workshop a duré 5 heures 30 min, dont 2 heures dédiées à une formation basique à l'éco conception et 3 heures d'initiation à l'utilisation de l'outil et à la simulation des 2

²⁷ Déroulement dans les locaux de Faurecia Interior System, centre R&D de Méru (France).

Chapitre 7.

modules d'une planche de bord (module carrier et boîte aux gants), suivi d'une demi-heure de compte rendu de la séance. Le contenu de ce workshop est le suivant:

- Une formation en ACV et méthodes d'éco-conception,
- Une présentation de l'outil EcoT et de sa procédure de traitement des données, Un étude de cas: démonstration de l'usage de l'outil sur un exemple de sous ensemble d'une planche de bord : la boîte aux gants,
- Un atelier impliquant 2 sous-groupes des participants pour la simulation sur EcoT des 2 modules de planche. Des ACV simplifiées descriptives (mode 1) sont réalisées par les participants,
- Une discussion et une évaluation des critères de performance de l'outil par les participants, sur une fiche d'évaluation mentionnant ces critères,

Le workshop a été clôturé par un recueil de la perception des participants et leurs recommandations pour l'amélioration de l'outil, notamment sur :



Figure 34. Les participants de l'atelier sur le test de prise en main de l'outil EcoT.

- l'aspect visuel et les fonctionnalités installées, ainsi que la validité des hypothèses associées (cf. Tableau 9). Pour l'évaluation de la qualité de l'outil, les participants ont donné des appréciations qualitatives selon le barème suivant: 0 = mauvais, 1 = faible 2 = acceptable, 3 = correct, 4 = bien et 5= excellent;
- La perception des participants sur les réels avantages de l'utilisation de EcoT et les corrections qu'on doit apporter à l'outil (notamment sur les paramétrages et les interfaçages), afin de favoriser son intégration lors du prochain test.

II.3. Compte rendu du test de prise en main et perception des participants

En ce qui concerne l'acceptation d'un nouvel outil, les utilisateurs ont particulièrement mis en évidence comme critères importants le temps, la compréhension et la lisibilité des résultats et la clarté des objectifs de l'outil. Après test d'EcoT, les participants ont apprécié la clarté de la présentation des objectifs et stratégies de l'outil. Toutefois, le temps nécessaire pour réaliser une évaluation environnementale sur EcoT a été jugé « excessif ». Cette perception est notamment due au temps consacré à la découverte et l'apprentissage des fonctionnalités de l'EcoT. Ensuite, à cet aspect s'ajoute le temps lié aux difficultés rencontrées par certains participants pour remplir l'interface de saisie. D'autres recommandations pour l'amélioration de l'outil ont été proposées par les participants afin de mieux préparer l'étape de saisie. Les remarques souvent évoquées sont celles liées au vocabulaire utilisé dans l'outil, aux paramétrages (matériaux et les procédés de fabrication manquants dans la base de données) et à la présentation des résultats. La synthèse des options retenues sur les recommandations d'améliorations est présentée dans le Figure 35, tandis que les scores d'évaluation des participants sur la performance de l'outil sont consultables en annexe D de ce document.

Chapitre 7.

Principaux axes de recommandations	Participant 1	Participant 2	Participant 3	Participant 4	Participant 5	Participant 6	Participant 7
Représentativité et complétude des paramétrages	N.A	Manque quelques procédés et matières dans la liste	N.A	N.A	Manque quelques procédés de fabrication	Quelques procédés spécifiques Faurecia sont absents de la liste	N.A
Qualité et compatibilité des interfaces	Il doit être possible d'éditer une ligne	N.A	Utiliser une dénomination standardisée Faurecia pour les familles de matières, les unités d'œuvre.	Clarifier la flexibilité en données d'entrées: Préciser les champs obligatoires/ optionnels.	Améliorer les fonctionnalités des interfaces sur la sélection des matières/ procédés	Intégrer un détrompeur en bloquant le processus lors d'un oubli de saisi/ champs obligatoires	Créer une fonction « édition » pour pouvoir modifier une ligne
Vocabulaire	N.A	Vérifier la dénomination de certaines familles de matières	N.A	N.A	N.A	Vérifier la conformité des appellations de certaines familles de matières au standard PoC	Toujours utiliser une dénomination conforme au standard Faurecia
Présentation des résultats	Faire apparaître également des résultats comparatifs entre les sous-ensembles	N.A	Un comparatif entre deux sous-ensembles doit être possible	Améliorer la présentation des résultats: mettre toujours les comparatifs sur un même graphique	La comparaison entre 2 solutions doit être visible sur un même graphique	N.A	Mettre des icônes illustrant les sens des indicateurs ACV.

Figure 35. La synthèse des recommandations d'amélioration d'EcoT émanant des participants en prévision de son intégration dans le processus de conception

En conclusion de ce test, les participants, qui ne connaissaient pas l'ACV auparavant, ont manifesté leur intérêt à propos de l'intégration de cette méthode dans leurs pratiques, souhaitant en apprendre davantage sur la relation entre les produits et les impacts qu'ils génèrent sur l'environnement.

III. Test d'intégration

III.1. Protocole du test

Cette troisième partie de l'expérimentation est destinée à établir l'aptitude d'EcoT à rendre l'ACV opérationnelle pour les concepteurs, tout en favorisant son intégration dans le processus de conception de l'entreprise. Le déroulement de ce troisième test est décrit en Figure 36.

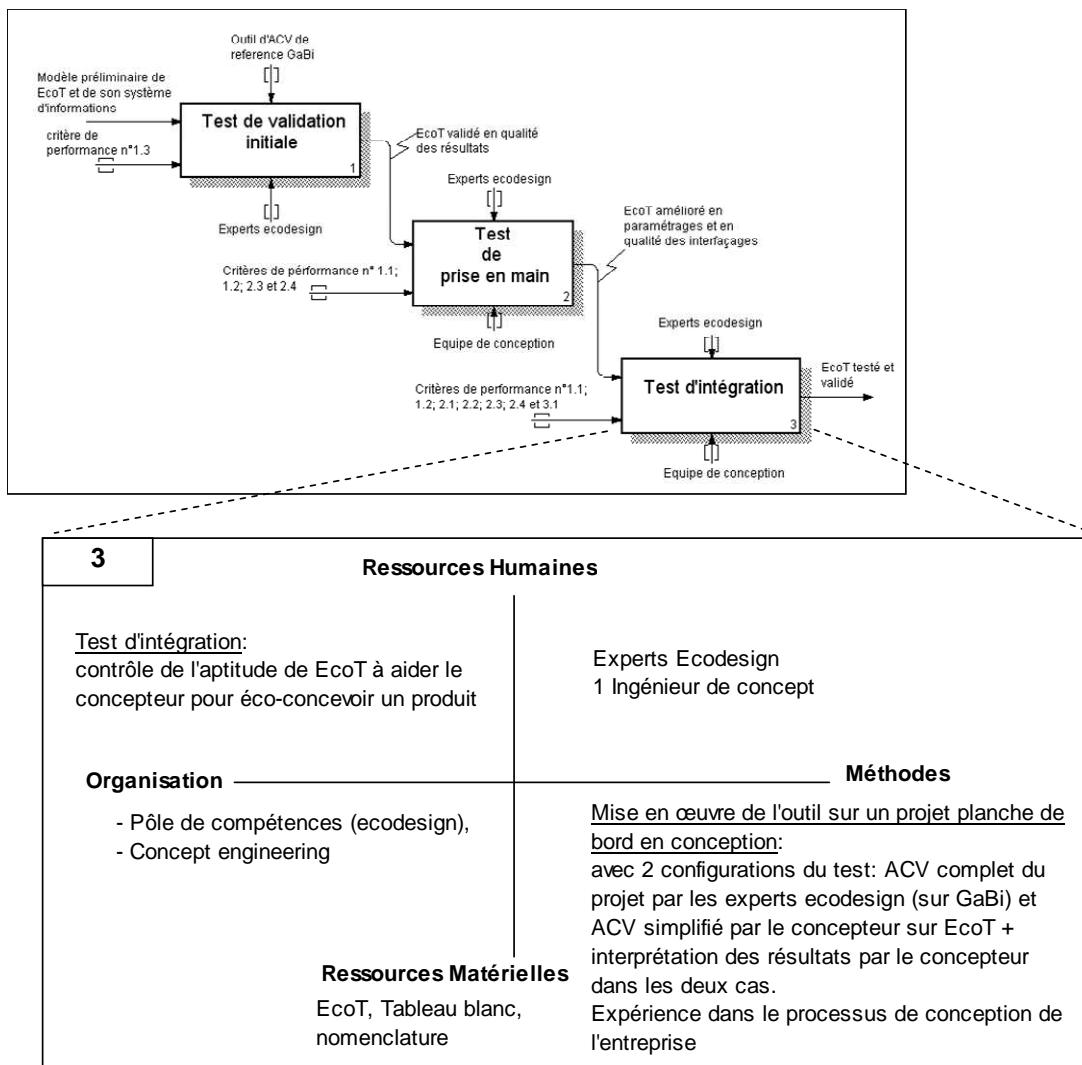


Figure 36. Protocole du test d'intégration de EcoT dans le processus de conception de Faurecia

III.2. Déroulement du test

Ce troisième test diffère principalement du test précédent en termes de méthode. Le test de prise en main est réalisé en dehors du processus de conception de l'entreprise, tandis que le test d'intégration est réalisé sur un projet planche de bord en cours de conception chez Faurecia, piloté par un ingénieur de Concept.

Ce test a été également conduit dans le cadre d'un workshop²⁸ précédé d'une formation de sensibilisation de 2 heures sur l'ACV et l'éco-conception, à titre obligatoire pour l'équipe du Concept engineering (et bien entendu pour le pilote du projet) du centre R&D de Hagenbach et à titre facultatif pour les équipes en provenance d'autres services.

A l'issue de cette formation, le pilote du projet a participé intégralement dans la partie pratique du workshop (Figure 37), en travaillant avec les experts ecodesign sur le thème : « comment l'usage des outils à base d'ACV pourrait aider les concepteurs dans l'évaluation de performance environnementale des produits, en termes :

- d'évaluation des impacts d'un produit sur l'environnement,
- de choix de solutions de concept plus respectueux de l'environnement.



Figure 37. La conceptrice (au milieu) en train de réaliser une ACV simplifiée de son projet sur EcoT

Pour ce faire, les experts ecodesign ont proposé à la conceptrice deux méthodes différentes:

²⁸ Déroulement dans les locaux de Faurecia Interior system, centre R&D de Hagenbach (Allemagne)

Chapitre 7.

- La première méthode est basée sur la pratique traditionnelle²⁹ où les experts ecodesign réalisent une ACV complète du projet et la conceptrice interprète les résultats de l'étude;

- La deuxième méthode correspond à la nouvelle organisation induite par EcoT. Dans cette configuration³⁰, la conceptrice réalise une ACV simplifiée basée sur une catégorisation spécifique des planches de bord et interprète les résultats obtenus ;

Elles ont été expérimentées au cours de l'atelier de 2 jours sur un projet « planche de bord » en conception³¹ selon les modalités suivantes :

- *Le contenu chronologique de l'expérimentation de la première méthode :*
 - Description de la méthodologie ACV : Présentation succincte de nos hypothèses et nos périmètres de modélisation ACV des produits Faurecia (0,5 heure).
 - Illustration de la méthodologie dans le cas d'étude ACV de la planche de bord du véhicule actuel (de référence), (0,5 heure);
 - Etude ACV (par les experts ecodesign) de 4 propositions de concepts de planche pour le nouveau modèle du véhicule (environ 15 heures de travail de préparation) et présentation des résultats à la conceptrice (0,5 heure).
 - Interprétation des résultats et un scénario de choix de concept, selon un processus guidé par des exemples d'axes stratégiques d'éco-conception (design for light weight parts, intégration of functions, design for recycling, etc...), (0,5 heure)
 - Recueil du point de vue de la conceptrice sur les principaux intérêts de l'application directe des résultats d'ACV dans l'univers de la conception de produits chez Faurecia (0,5 heure).
- *Le contenu chronologie de l'expérimentation de la deuxième méthode :*
 - Formation approfondie de la conceptrice sur les fonctionnalités et l'usage de EcoT (0,5 heure),
 - ACV simplifiée sur EcoT des 4 propositions de concept de planche pour le nouveau véhicule par la conceptrice (environ 1,5 heures),

²⁹ Correspond à la stratégie d'intégration « hub and spoke » où EcoT serait uniquement des interfaces liant les experts ecodesign à l'équipe de conception.

³⁰ Correspond à la stratégie d'intégration « hybrid » qui a été choisie pour concevoir l'architecture de l'outil EcoT développé, afin de permettre des ACV simplifiées par « famille de produits ».

³¹ Projet de renouvellement de véhicule. Bien qu'il soit souhaitable de fournir des renseignements techniques détaillés sur ce projet, nous sommes dans l'obligation de censurer ces informations pour la raison de la haute confidentialité du projet par l'entreprise.

Chapitre 7.

- Interprétation par la conceptrice des résultats d'évaluation, et discussion avec les experts ecodesign autour d'un scénario de choix de concept et du positionnement des impacts par rapport aux références par classe environnementale des concepts (0,5 heure),
- Recueil du point de vue de la conceptrice sur les intérêts de la mise en œuvre de EcoT dans les projets de conception (0,5 heure),
- Clôture du workshop par une discussion et une évaluation à chaud des deux séances (ACV et EcoT) par la conceptrice. Cette séance de débriefing est réalisée autour d'un questionnaire support des critères de performances mesurables à ce stade, pour tester nos hypothèses sur l'aptitude de EcoT à simplifier et à intégrer l'ACV en conception (0,5 heure).

III.3. Résultats du test d'intégration de EcoT

Les premières informations qu'on peut tirer de cette expérimentation sont des mesures temporelles. Outre les fonctionnalités, les paramétrages et les interfaçages de l'outil, le facteur temps est un critère non négligeable qui suscite la motivation des utilisateurs. Le gain de temps avec l'outil EcoT est suffisamment important (7 fois moins de temps qu'en ACV exhaustive) pour valider son aptitude à être « temporellement » gérable et utilisable dans le processus de conception (le concepteur testeur de l'outil a stipulé une disponibilité moyenne de 2 heures d'un ingénieur de concept par projet, pour réaliser cette nouvelle tâche). Les mesures de temps réalisées lors de cette expérimentation sur les deux méthodes ACV/GaBi et EcoT sont résumées dans le Tableau 30.

2. Duration of the full LCA by the expert → 4 concepts	
Action	Duration (mn)
Collect the required data from BOM (expert LCA)	8h
Model the project in GaBi (expert LCA)	7h
Evaluate impacts (GaBi)	10min
Full LCA results interpretation (the design team)	30 min
Total duration of an env. evaluation with GaBi (full LCA).	15h 40 min
1. Duration of the use of EcoT by the design team → 4 concepts	
Action	Duration (mn)
Prepare the required data	20 min
Lunch EcoT	5 min
The users compute the required data	65 min (all the 4 concepts counted)
EcoT treats the recorded information	≈ 30 min/ 4 concepts
The users interpret the results	30 min discussion
Total duration of an env. evaluation with EcoT	150 min (2h 30 min)

Tableau 30. Récapitulatif des temps nécessaires pour la réalisation de l'évaluation environnementale du projet suivant les deux méthodes ACV/GaBi et ACV simplifié/EcoT

Chapitre 7.

Par ailleurs, sur le plan méthodologique, le nouveau projet a servi de support à l'exploitation des deux méthodes, c'est-à-dire l'ACV classique conduite sous GaBi (Figure 36) et l'ACV simplifiée par famille de produits avec EcoT (Figure 37). Les quatre variantes de nouveaux concepts ont été évaluées avec les deux approches.

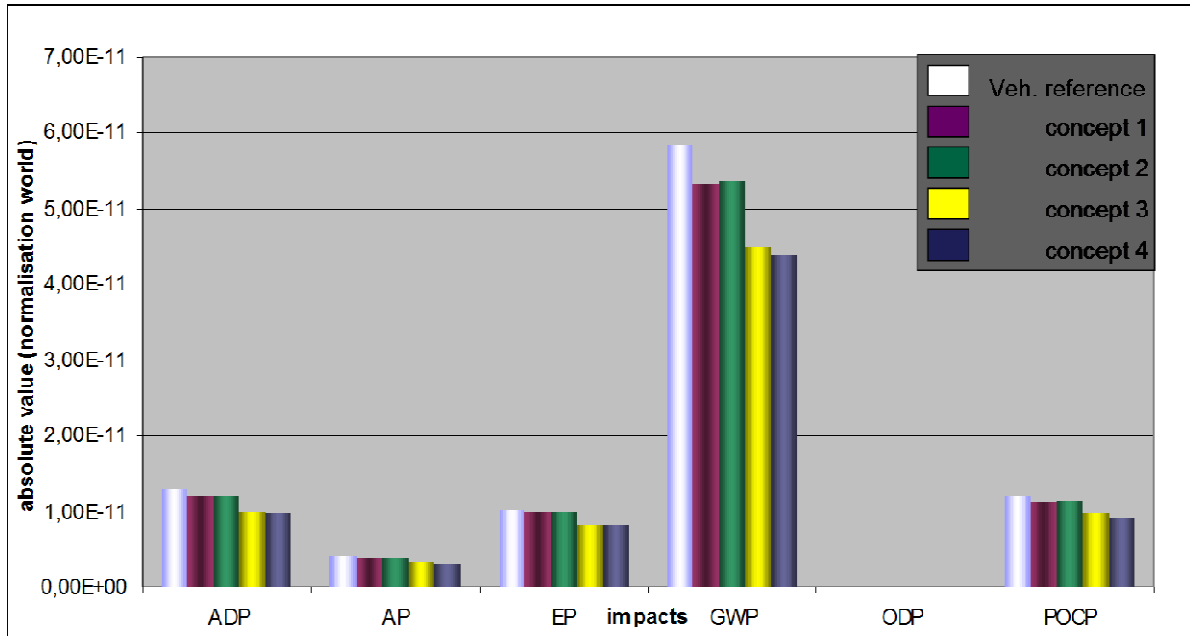


Figure 38. Profils environnementaux fournis par les ACV (GaBi) des 4 nouveaux concepts de la planche de bord du nouveau véhicule au regard de celui de la planche de bord du véhicule de référence. Ces ACV ont été réalisés par les experts ecodesign.

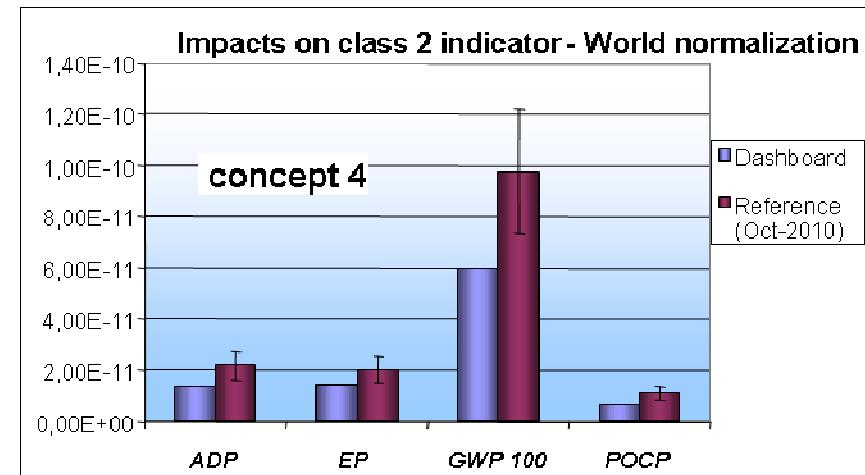
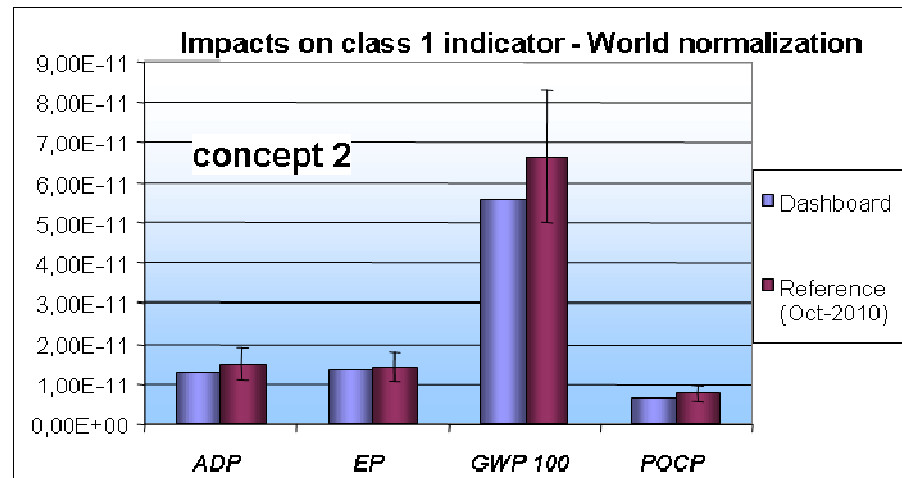
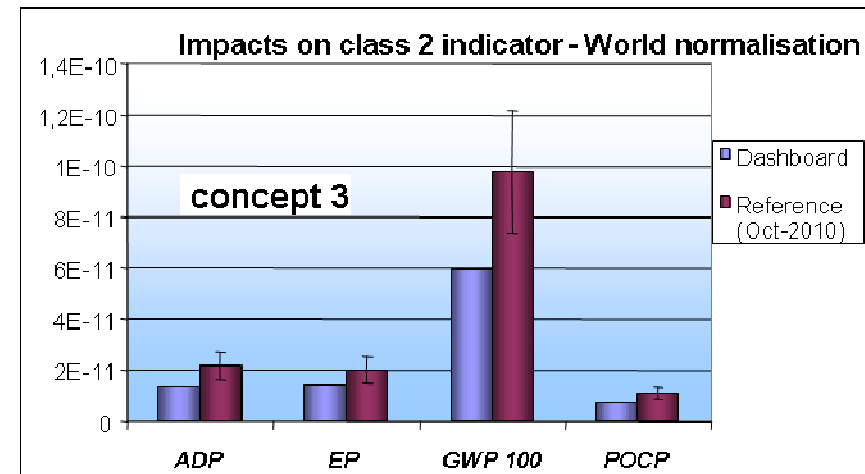
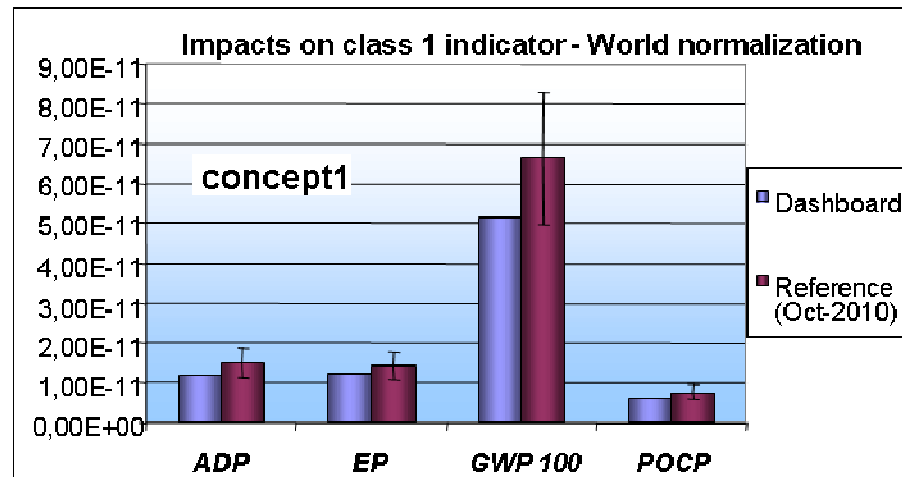


Figure 39. Profils environnementaux obtenus par l'EcoT des 4 nouveaux concepts, réalisées par le concepteur. Ici, on voit apparaître une affectation deux à deux des concepts dans la classe 1 et 2 de la famille des planches de bord.

Chapitre 7.

Au cours de cette expérience, la conceptrice a interprété ces résultats de différentes manières. Les résultats fournis par GaBi ont été appréciés par la conceptrice, car la présentation offre une vision globale et comparative des différents concepts sur une même vue. L'interprétation de ces résultats restait néanmoins délicate et qualitative, car les échelles fournies par l'ACV n'ont pas été « décryptables » pour la conceptrice, sans l'aide d'un expert Eco design.

D'autre part, les résultats d'EcoT permettent moins facilement une comparaison entre les concepts car les résultats des différents concepts n'apparaissent pas sur un même graphe. En effet, dans EcoT, les 4 solutions ne sont pas comparées entre elles mais par rapport à leurs classes environnementales. Les résultats d'évaluation ont montré que les 4 concepts en question se positionnent dans deux classes différentes : les concepts 1 et 2 se situent dans la classe 1 (dans laquelle se situe également la planche de bord du véhicule actuel de référence, tandis que les concepts 3 et 4 dans la classe 2, Figure 39). Les résultats obtenus au cours de cette expérience impliquent que 2 parmi les 4 propositions de concept du nouveau produit proposent une remontée en gamme de prestation. Du côté de l'outil EcoT, cette remontée en gamme est notable au niveau du positionnement dans les classes environnementales (selon les descripteurs produits en Tableau 24). Par conséquent, l'interprétation des résultats d'EcoT, ainsi que le choix environnemental qui en découle se fait au regard du positionnement de chaque concept dans sa classe. Ce qui suppose, par exemple, qu'un choix d'éco-conception entre le concept 1 et 4 n'est pas judicieux car ces produits n'offrent pas le même niveau de prestation. Cette philosophie de présentation des résultats de EcoT constitue une marque de son aptitude à s'aligner avec un autre critère de la conception chez Faurecia : le niveau de prestation d'un produit.

A la fin de la séance, la conceptrice a évalué l'opérationnalité de l'outil EcoT en conception des produits chez Faurecia, par le biais d'une fiche d'évaluation que nous avons élaboré au préalable pour mesurer la validité de nos hypothèses sur l'opérationnalisation de l'ACV en conception des produits. Le résultat de ces évaluations d'EcoT par le concepteur est consultable en annexe E et en annexe F de ce document.

En synthèse, la conceptrice a découvert qu'une analyse quantitative des résultats est possible avec EcoT, car les échelles d'éloignement/proximité (Figure 40) fournies par l'outil sont compréhensibles. A l'issue de cette expérimentation, la conceptrice a également approuvé la compatibilité de l'approche utilisée par EcoT avec le processus de conception de Faurecia. Cette appréciation favorable au regard de l'objectif de notre travail de recherche a été donnée par la conceptrice, dans la mesure où le contenu d'un dossier de réponse à un

Chapitre 7.

appel d'offre de constructeur (RFQ³²), ainsi que toute prise de décision en conception est basée sur le positionnement du nouveau produit par rapport aux générations précédentes sur le segment du véhicule visé. En rapport avec cette procédure de prise de décision, un axe d'amélioration a été soulevé par la conceptrice. Il consiste en une proposition d'établir un lien entre le positionnement environnemental des produits dans les classes de EcoT, et les segments de véhicules potentiellement équipés par Faurecia. L'hypothèse du concepteur dans cette proposition est que si on procède de cette manière, le traitement des résultats fournis par EcoT serait totalement en phase avec le processus de traitement des autres critères de prise de décision en conception.

³² Request for Quotation

Chapitre 7.

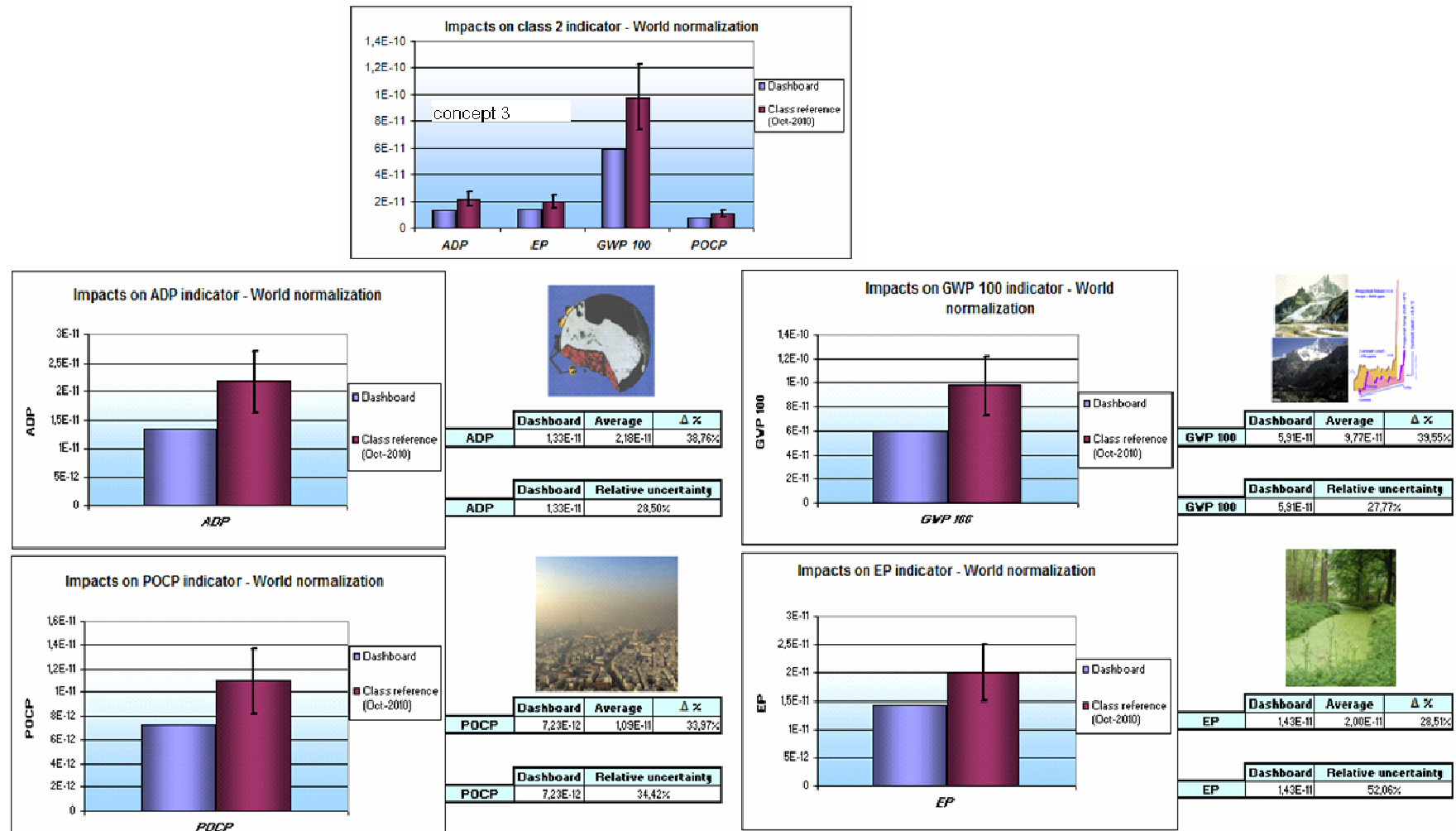


Figure 40. Lecture détaillé des résultats d'EcoT (exemple du concept 3) et mesure de l'ampleur des impacts environnementaux par le principe éloignement/proximité ($\Delta\%$) d'un produit par rapport aux références environnementales par classe (barycentres environnementaux)

IV. Vers l'intégration d'EcoT dans le processus de conception des produits automobiles

IV.1. Le « plan de validation » en phase de pré transfert de EcoT dans le processus de conception de Faurecia

Comme toute procédure d'introduction d'une nouvelle méthode dans l'organisation de l'entreprise, d'une matière ou d'un procédé innovant dans le système de production, les formalités d'acceptation et d'intégration de EcoT doit s'inscrire dans le processus qualité de l'entreprise. Notre travail de recherche-action a été conduit sous forme d'un projet d'innovation au sein de l'entreprise, visant la création de l'outil EcoT. Tout projet d'innovation suit le processus d'innovation de l'entreprise, comme indiqué par la Figure 2. Nous nous intéressons ainsi à la phase « Projet » du processus d'innovation, qui correspond, dans notre cas, à la phase de développement et d'expérimentation d'EcoT. Un « plan de validation » est à disposition de chaque responsable d'un projet dès le début de la phase « Projet ». Quand un projet arrive au jalon de passage en phase de « Transfert de l'innovation » (cf. Figure 2), le plan de validation dûment complété est à présenter devant un comité d'innovation pour signature. Le « plan de validation » est un ensemble de documents composé de trois fiches que nous définissons ci-dessous, avec les éléments qui y sont figurés, concernant le cas d'EcoT:

- La fiche de définition du produit: dans cette rubrique, le démonstrateur de l'outil EcoT est présenté en mettant en évidence : les entrants/sortants de l'outil, les fonctionnalités de base, la procédure de traitement des données et les hypothèses techniques associées (approximations, conditions de marche de l'outil, de remplissage des formats de saisie...). La fiche de définition du produit est un document classé confidentiel par l'entreprise.
- La fiche de validation du produit : est un document basé sur le principe de l'AMDE produit, dans lequel le contrôle, voire l'élimination des risques majeurs pouvant nuire à la qualité d'usage/résultats, et à la mise en œuvre de EcoT en conception ont été analysés (Tableau 31).

Chapitre 7.

Test group	Testings	Risk	Description	Procedure or specification	Requirement / Expected Result	Comments for Measurement	OK / NOK
LCA realization on GaBi	Uncertainties	The uncertainties on impacts evaluation made on GaBi is unknown	No calculated uncertainties on LCA software	EcoT Guideline "How to manage an LCA within GaBi"	Must be done	To be done by Ecodesign experts	OK
Database improvement	Deviation test EcoT Vs. GaBi (EcoT initial validation)	Gap non acceptable between LCA software reference (GaBi) and results obtained in EcoT on unitary datas	The gap between EcoT & GaBi on unitary evaluation must be < 5% on each indicator	EcoT Database improvement guide	Gap < 5%	To be done by Ecodesign experts. Evaluation on the whole range of data usable on the evaluated material, process and products	OK
Simplified LCA realization on EcoT		Gap non acceptable between LCA software results and EcoT results on a full product	The gap between EcoT & GaBi on a full product evaluation is too high.	We assume a maximum targeted gap of 30%	Gap < 30%		OK
Tool user	EcoT implementation tests (handling and integration tests)	Unnecessary outputs (graphical & numerical)	There is too many outputs in EcoT, which don't allow a decision making	User feedback	Outputs must be clear	Feedback from R&D team Méru	OK
		Not used by the design team	Targeted people are not using the tool	XX	Ecodesign PoC should encourage the use of the tool	Used in PPDR, to be pushed in acquisition	OK
		Use too much time	The necessary time to perform a LCA within EcoT is too long	User feedback	1h30 to 2h15	Feedback from CE HGB	OK
		Modified by unauthorized person	The tool must not be modified by unauthorized person	XX	None	Locked with password	OK

Tableau 31. Extrait du contenu d'une fiche de validation de produit pour EcoT.

- La fiche de validation de la procédure : est un document basé sur le principe de l'AMDE processus, dans lequel le contrôle, voire l'élimination des risques majeurs pouvant empêcher le fonctionnement correct de EcoT et /ou pouvant rendre EcoT matériellement incompatible au sein de l'entreprise ont été analysés (Tableau 32)

RISK	Criteria	Expected value	Measured value	OK / NOK
Error in software design (structure + tool)	EcoT tool design specifications	N.A	NA	OK
Wrong data evaluated on GaBi	Data quality, LCA scope statement	Done in Process/activity tuning		OK
Error in polynomial interpolation	Cross checking with GaBi results	Gap between GaBi & EcoT < 5% on each parameterized function	Gap between GaBi & EcoT < 5% on each parameterized function	OK
Error in data input within database	Cross checking with GaBi results			OK
No Save	Results storage	File saved with correct reference for possible further use	File saved & stored for archiving	OK
Wrong data selected or data input	Data selection & input; mandatory fields	Limited errors thanks to poka yoke rules; edit functions	XXXX	OK
Wrong sort done	Procedure failed in MDI/ADI completing, and/or the sorting file	Limited errors by using dedicated procedure	XXXX	OK
Wrong BOM or BOM version used	Product data quality	not linked with EcoT procedure, but concern users	XXXX	OK
Program error	Bugs during the tool running	Debug realised after the tool handling test	XXXX	OK
Need too much time	The tool use timing	< 1h30 to 2h15 max	Relative to each user	ok

Tableau 32. Extrait du contenu d'une fiche de validation de procédure pour EcoT

La procédure de contrôle et de signature d'un plan de validation est indiqué dans l'organigramme de l'annexe H .

La signature du plan de validation d'EcoT a été accordée par le comité et témoigne l'acceptation de l'outil EcoT par l'entreprise (cf. annexe). Une procédure de modification du processus de l'entreprise (par un projet de mise en place d'un nouveau jalon spécifique à EcoT) a été entamée à l'issu des tests réalisés avec l'équipe de conception (tests de prise en main et d'intégration dans le protocole expérimental) et de la signature du plan de validation. Cette prise de décision marque le début de l'intégration de l'outil EcoT dans les pratiques de l'entreprise, au moins en ce qui concerne l'intégration de l'évaluation environnementale systémique.

IV.2. La validité des hypothèses posées sur la pertinence de l'approche EcoT à opérationnaliser l'ACV en conception

La présentation et l'acceptation de notre proposition EcoT au sein de Faurecia Interior System est un témoin de l'intérêt que Faurecia et, plus globalement l'industrie de l'automobile manifeste dans un engagement vers une véritable intégration de l'environnement dans ses activités. Toutefois, la pertinence de la nouvelle approche d'intégration de l'ACV en conception par EcoT nécessite de démontrer la validité de nos hypothèses posées en Chapitre 3. Dans ce paragraphe, nous vérifions le statut de ces hypothèses de EcoT, à l'issue des expérimentations réalisées. (Tableau 33)

Chapitre 7.

Hypothèses de EcoT	Fonctions attendues	Critères d'appréciation	Niveaux	Acceptation/ tolérance	résultats de mesure (performances)
H1	1.1) permettre une évaluation quantitative et systémique adapté au design	visuel	Echelle de 0 à 5 (très mauvais à excellent)	> 2	2 à 4
		objectifs et stratégies	Echelle de 0 à 5 (très mauvais(e) à excellent(e))	> 2	3 à 5
		prise en main	Echelle de 0 à 5 (très mauvais(e) à excellent(e))	> 2	2 à 4
		vocabulaire	Echelle de 0 à 5 (très mauvais(e) à excellent(e))	> 2	3 à 4
		présentation des résultats	quantitative sur le cycle de vie	0	OK
	1.2) réduire la complexité de l'ACV	temps d'usage	1h à 2h de temps	< 2h15min / projet	2h30
		flexibilité en données d'entrées	Echelle de 0 à 5 (très mauvais(e) à excellent(e))	> 2	1 à 3
		appropriation	Echelle de 0 à 5 (très mauvais(e) à excellent(e))	> 2	3 à 4
		interprétation des résultats	Echelle de 0 à 5 (très mauvais(e) à excellent(e))	> 2	2 à 4
	1.3) fournir des résultats de qualité comparable à l'ACV	justesse	±10% de déviation entre les résultats de l'ACV simplifié et l'ACV exhaustive	< 30%	≤ 10%
H2	2.1) permettre facilement une autonomie de l'utilisateur	objectifs et stratégies	Echelle de 0 à 5 (très mauvais(e) à excellent(e))	> 2	3 à 5
		nombre de critères env.	approche moins multicritère	0	4 critères/classe environnementale
		appropriation	Echelle de 0 à 5 (très mauvais(e) à excellent(e))	> 2	3 à 4
	2.2) aider au choix environnementaux	interprétation des résultats	Echelle de 0 à 5 (très mauvais(e) à excellent(e))	> 2	2-4

Chapitre 7.

	2.3) détecter les erreurs dues à l'utilisateur	verrous et alertes	Echelle de 0 à 5 (très mauvais(e) à excellent(e)	> 2	1-3
	2.4) inciter la confiance de l'utilisateur	usage et résultats	Echelle de 0 à 5 (très mauvais(e) à excellent(e))	> 2	4
H3	3.1) être un moyen d'apprentissage organisationnel	motivation des utilisateurs	NA		confirmée (réponses aux questionnaires en annexes)
		qualité perçue de l'outil	NA		confirmée
		interactivité	NA		confirmée
		compréhension multidisciplinaire	NA		confirmée
		intérêts d'usage	NA		confirmée
	3.2) générer du changement dans l'organisation industrielle	procédure d'intégration	plan de validation plan de transfert	NA	non confirmée

Tableau 33. Statut de la validité des hypothèses mesurées pour démontrer la performance de la solution EcoT et de son système d'informations pour intégrer l'ACV en conception chez Faurecia

IV.3. Apports et limites du travail de recherche

IV.3.1. Contribution méthodologique de l'usage des ACV chez Faurecia

Une méthodologie d'application de l'ACV sur des produits d'intérieurs automobiles a été développée au cours des travaux de recherche réalisés chez Faurecia. L'établissement d'un cadre spécifique de réalisation des ACV (verrouillage du périmètre et des hypothèses de la modélisation, de l'unité fonctionnelle) par famille de produits nous a permis d'obtenir un premier principe de rationalisation de la complexité de l'ACV et de pouvoir l'adapter ainsi au contexte des produits et des activités de l'entreprise. En vertu de ce premier principe, il devient alors possible d'établir une relation directe entre les grandeurs classiques de la conception du produit (poids, surface, quantité de matière...) et les impacts environnementaux correspondantes. Cet aspect constitue notre second principe de la simplification de l'ACV, qui est utilisé pour proposer aux concepteurs un moyen cognitif d'évaluation des impacts des produits en conception : les fonctions d'approximation des impacts.

Par ailleurs, la réalisation d'une série d'ACV basé sur « l'échantillonnage statistique des variabilités » au sein d'une famille de produits a permis de:

- catégoriser les variantes de produits de la famille selon la nature et l'ampleur de leurs impacts environnementaux ;
- identifier les points chauds : les impacts les plus notables et le(s) étape(s) le(s) plus critique(s) du cycle de vie de ces produits.

Le cas d'étude ACV a été initié sur la famille des « planches de bord ». Le potentiel des résultats obtenus a été exploité pour imaginer un moyen prometteur pour faciliter la présentation des résultats d'ACV aux concepteurs, en ne leur fournissant que des informations utiles et adaptées à leur besoin (ACV comparative) pour réaliser des choix de concepts. Ces aspects constituent notre troisième principe de la simplification de l'ACV : la typologie environnementale en famille de produits.

L'originalité de l'outil EcoT repose sur la mise en oeuvre de nos trois principes de simplification pour rendre l'ACV opérationnel pour les concepteurs. L'outil EcoT constitue une méthodologie d'aide à la conception environnementale des produits, tout en étant un moyen d'apprentissage de l'équipe de conception autour de la dimension « environnement ».

IV.3.2. Perspectives d'évolution vers une organisation interne éco-concevante

La mise en place d'une nouvelle démarche d'éco-conception par la mise en œuvre d'EcoT par l'équipe de conception sous entend une création et une migration progressive de connaissances environnementales au sein de l'organisation. Cela induit par la suite une transformation de l'organisation actuelle vers une organisation apprenante sur le plan environnemental.

D'après [Le Pochat 2005] , le phénomène de création de connaissances dans une organisation industrielle peut être observée, selon le modèle de Nonaka et Takeushi [Nonaka et Takeuchi 1995] qui repose:

- d'une part sur la distinction entre deux types de connaissances : des connaissances tacites et des connaissances explicites,
- d'autre part sur leur interaction structurellement inhérente : ils ne peuvent pas être mutuellement exclusives ; toute connaissance explicite est en partie construite sur une composante tacite [Gray 2001] .

Ce modèle de Nonaka et Takeushi identifie quatre modes de conversion des connaissances (cf. annexe G ,[Lopez 2002]) qui sont activés lors de l'interaction entre connaissances tacites et connaissances explicites, à la fois au niveau individuel et au niveau collectif [Nonaka et Takeuchi 1995] . Ces quatre modes constituent selon eux le moteur du processus global de création de connaissances.

Le résultat de notre travail de recherche et les expérimentations réalisées jusqu'à ce jour en entreprise ne permettent pas encore de bien appréhender l'évolution de connaissances environnementales induite par l'intégration de EcoT dans l'organisation de Faurecia. Il nous est toutefois possible de projeter une trajectoire de l'évolution des connaissances au niveau opérationnel, tacite et stratégique de l'entreprise vue comme une association de composantes organisationnelles [Livian 2001] : (Tableau 34)

	Opérationnel	Tacite	Stratégique
Ressources humaines	Réduction de temps Diminution des besoins en compétences	Optimisation des charges de travail et favorisation des échanges entre les experts ecodesign et l'équipe de conception	Modification progressive de la perception de la dimension « environnement » au sein du groupe Faurecia: contrainte → critère → valeur
Ressources Matérielles	Intégration d'un nouvel applicatif : EcoT	Modification des produits : optimisation de la performance environnementale	Adaptation de la méthodologie d'EcoT à un nouvel applicatif pour autres unités (divisions)
Structure	Délocaliser les lieux de création des règles d'éco-conception	Formalisation des règles créées : guideline d'éco-conception	Structure de référence pour les autres unités (divisions)

Règles	Systématisation de l'évaluation environnementale	Modifications des procédures dans le processus de conception	Homologation des autres unités (divisions) sur les procédures formalisées.
--------	--	--	--

Tableau 34. Evolution de l'organisation de Faurecia induite par l'implantation d'EcoT dans le processus de conception.

IV.3.3. Limites des résultats du travail de recherche

L'outil EcoT a été développé et a été testé au sein de « Faurecia Interior System » selon les modalités décrites dans le protocole expérimental. Durant le développement du premier applicatif de l'outil, et de sa mise à l'épreuve, nous pensons avoir bénéficié de l'aide et de la participation des personnes motivées et partantes pour cette nouvelle approche au sein de l'entreprise. Cela a pu favoriser par la suite l'acceptation de notre proposition, ainsi que l'amorçage des formalités de l'intégration de l'outil dans le processus de l'entreprise. Deux questions fondamentales restent toutefois posées sur les plans technique et méthodologique du devenir de cet outil.

Sur le plan technique, l'application de nos 3 principes de simplification dans EcoT a permis de rendre l'ACV opérationnelle par les concepteurs, au prix d'une perte de flexibilité au niveau du choix des hypothèses, de l'unité fonctionnelle et du périmètre de modélisation. La définition et la pose de ces éléments sont toutefois vitales pour le sens et la confiance qu'on peut accorder à une étude ACV. Cependant, ils peuvent être définis différemment, d'un praticien à un autre. Cette variabilité a été accordée dans le standard ISO 14040, dès lors qu'il serait nécessaire d'adapter le choix des hypothèses et le périmètre de la modélisation en fonction de la situation dans laquelle il faut réaliser une étude (objectifs, disponibilité des données, situation géographique...). Considérons la standardisation de la méthode de création d'un EcoT au niveau des constructeurs et équipementiers automobiles. L'influence de la variabilité de l'ACV devient un facteur très important à ce moment, car les hypothèses et les périmètres pris en compte seront certainement différents d'un constructeur à un autre, et à plus forte raison entre un constructeur et un équipementier. Dans l'hypothèse où la communauté du secteur automobile arriverait à un consensus sur la définition du périmètre à prendre en compte, pour la modélisation d'un composant bien défini, il sera nécessaire de reconstruire un outil EcoT répondant aux nouvelles fonctionnalités requises.

Sur le plan méthodologique, est-ce que l'effet de EcoT permettra de changer les pratiques habituelles des industriels, en considérant effectivement l'environnement comme tous les autres critères actuellement gérés en conception ? La réponse reste délicate car comme nous l'avons déjà indiqué dans les chapitres antérieurs, la dimension «environnement », aussi multicritère qu'elle soit ne peut représenter qu'un seul critère parmi ceux à gérer en phase de conception. Ainsi, l'influence de la concurrence avec les autres critères du cahier des charges des constructeurs automobiles est déterminante et le critère

Chapitre 7.

« coût » reste un fort challenge. Les décisions d'éco-conception doivent donc s'analyser dans le contexte où il ne suffit pas de concevoir un produit plus respectueux de l'environnement, mais que le gain environnemental soit en phase avec les autres objectifs, voire des obligations contradictoires.

CONCLUSION GENERALE

Opérationnalisation de l'analyse de cycle de vie en conception

L'inexistence d'une approche méthodologique opérationnelle pour réaliser des évaluations environnementales dans le processus de conception de produits, nous a motivé à nous engager dans ce travail de recherche pour défier ce challenge. Après avoir détaillé notre démarche de création de la solution EcoT, ainsi que les différentes étapes de sa mise à l'épreuve, les résultats ont démontré la capacité de cet outil pour permettre aux concepteurs de procéder à des évaluations environnementales multicritères. Plus précisément, les nouveaux résultats présentés ont montré qu'il est possible d'offrir à l'équipe de conception un outil simplifié, qui demande à la fois moins de temps et moins d'énergie à l'équipe de conception qu'une ACV complète, tout en conservant la justesse, en termes de qualité des résultats, par rapport à une ACV complète. Toutefois, les méthodes de simplification proposées dans cette étude ne sont possibles et valides que dans un cadre bien défini d'un champ standardisé de l'espace produit. C'est aussi cette condition qui permet la création d'un système de référence dans lequel il est effectivement possible de comparer différentes solutions, parce que l'équipe de conception est certain que les conditions de modélisation (même si ces dernières se trouvent dans une boîte noire pour eux), sont en effet identiques. Plus précisément, EcoT a été conçu pour être utilisé sur un espace produit limité à la catégorie de produits spécifiques considérés au sein de l'entreprise. Les forces et les faiblesses de l'outil résultent de cette définition des catégories de produits identifiées à partir de l'espace existant des produits d'une famille.

Le potentiel de l'outil réside déjà dans le fait qu'il permet une évaluation quantitative avec des résultats similaires à ceux fournis par une ACV complète, 7 fois plus rapidement qu'un logiciel d'ACV existant sur le marché.

Une autre force de la solution EcoT est qu'il intègre des données primaires, concernant les procédés propres à l'entreprise. Des données réelles relatives aux procédés réels sont ainsi utilisées par EcoT, ce qui présente un bénéfice supplémentaire par rapport aux bases de données génériques qu'on exploite dans les logiciels d'ACV commercialisés.

La combinaison de nos trois principes de simplification de l'ACV et l'adaptation de la modélisation ACV au cas spécifique d'une entreprise fait que cet outil est un élément méthodologique « spécifique » et implique que son transfert à une autre entreprise exige un processus identique d'appropriation et de normalisation.

Enfin, il est également démontré que le concept de création des classes environnementales, par le biais de la typologie en familles de produits rend plus facile pour les concepteurs l'analyse des résultats d'ACV. Nous avons pu mesurer l'efficacité de ces références par classe dans la simulation d'un projet « planche de bord » en conception à l'occasion du test d'intégration mené par une conceptrice, dans le cadre d'un renouvellement de véhicule.

Opérationnalisation de l'analyse de cycle de vie en conception

Deux inconvénients de l'outil EcoT peuvent être toutefois relevés. Concernant son incapacité à répondre aux situations d'innovation radicale, il faut élargir les références de l'environnement par catégorie de produit au fur et à mesure de leur évolution. De même il est nécessaire de maintenir une base de données complète des procédés / matériaux. En effet, en cas d'innovation radicale, d'abord les nouveaux procédés et les matériaux utilisés doivent être créés dans la base de données. Deuxièmement, les références pertinentes aux nouvelles technologies doit être également créées d'une manière procédurale valide, car on ne pourra pas comparer ces nouveaux arrivants à ceux fabriqués avec les procédés traditionnels : les limites des systèmes peuvent être complètement différentes. La validité permanente de EcoT exige donc que ses références et ses bases de données soient régulièrement maintenues.

Bien que toute solution présente des avantages et inconvénients, les résultats de thèse obtenus paraissent plutôt prometteurs, car le test effectué par les experts éco-conception (validation initiale) a techniquement démontré la robustesse des fonctionnalités de l'outil EcoT. Par ailleurs, cette première version de EcoT consacré à la famille des planches de bord a également été testée dans le cadre de 2 tests utilisateurs effectués chez Faurecia.

Le premier test, dans le cadre d'une « prise en main » a été réalisé avec un groupe de sept représentants de l'équipe engineering du centre R&D de Méru. Cela a permis de montrer à cette équipe de conception comment utiliser EcoT et leur a permis de l'appliquer à des études de cas simples. Pendant l'essai, la capacité du groupe à simuler des sous-ensembles de planche de bord sur EcoT a été évaluée positivement.

Après ce test, diverses modifications ont été apportées afin de préparer la seconde version de l'EcoT pour un second test sur un projet de planche de bord en conception, réalisée par une conceptrice dans le centre R&D de Hagenbach.

Après le second test utilisateur, la société a décidé de modifier le processus de conception en créant un supplément de jalon « EcoT » à la fin de la phase de conception architecturale (avant de proposer un concept du nouveau produit au client). Cela marque l'acceptation par l'entreprise de l'intégration de l'ACV dans son processus de conception par le biais de l'outil EcoT.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ADEME 2008, Etat des lieux de la valorisation des matériaux issus du traitement des véhicules hors d'usage, Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par RDC-Environnement et Bio Intelligence Service, Septembre 2008.
- [2] ADEME 2010, Troisième édition du colloque "Produits verts : affichage environnemental" 8 juin 2010, CAP 15, Paris XVème, www2.ademe.fr.
- [3] Andriankaja H, Bertoluci G, Millet D, « An Environmental Typology per Products Range Used as a Streamlining Strategy for setting up the LCA within the Design Team", IDMME 2010 Bordeaux, International conference.
- [4] Andriankaja H, Bertoluci G., Millet D., Developing a robust system of environmental tools (RSET) to improve eco design practice in automotive sector, DFMLC, IDETC/CIE 09, San Diego CA, 2009.
- [5] Ayres RU, Life cycle analysis: a critique, Resources Conservation and Recycling Volume 14, Issues 3-4, September 1995, Pages 199-223. Life Cycle Management.
- [6] Bala A. and al, Simplified tools for global warming potential evaluation: when 'good enough' is best, Int J Life Cycle Assess (2010) 15:489–498.
- [7] Baumann H, Boons F et al, "Mapping the green product development field: engineering, policy and business perspectives", Journal of Cleaner Production, Volume 10, 2002, pp 409-425.
- [8] Bertoluci G, Millet D, Functional product enrichment and supply chain disorganisation: two barriers for sustainable design, International Journal of Product Development, volume 7, Number 1-2 / 2009, pp 149 – 169.
- [9] Bhandar, G. S, Hauschild, M. and McAlloone, T. (2003), Implementing life cycle assessment in product development, Environmental Progress, 22: 255–267.
- [10] Bras B, Incorporating Environmental Issues in Product Design and Realization, Published in Industry and Environment, Special Issue on Product Design and the Environment, United Nations Environment Programme Industry and Environment (UNEP/IE), Vol. 20, No. 1-2 (double issue), 1997.
- [11] Bretz R, SETAC LCA Workgroup: Data Availability and Data Quality, Int J LCA 3, 121-123 (1998).
- [12] Brezet, H., Van Hemel, C. (1997) Ecodesign: a promising approach to sustainable production and consumption. United Nations Publication, UNEP, Paris.
- [13] CCE 2007, Bruxelles, communication de la commission au conseil et au parlement européen, résultats du réexamen de la stratégie communautaire de réduction des émissions de CO2 des voitures et véhicules commerciaux légers.

- [14] CCE 2009, Bruxelles, rapport de la commission au conseil, au parlement européen, au comité économique et social européen et au comité des régions concernant la mise en oeuvre de la directive 2000/53/ce relative aux véhicules hors d'usage pour la période 2005-2008.
- [15] Chanaron J.J, Life Cycle Assessment Practices: Benchmarking Selected European Automobile Manufacturers, *Int. Journal of Life Cycle Management* 2,3 (2007), pp 290-311.
- [16] Maudet-Charbuillet C, Proposition d'outils et démarches pour l'intégration de filières de recyclage de matières plastiques dans la supply chain automobile, Thèse de doctorat de l'ENSAM, 2009.
- [17] Chen J. L, (2002), Green evolution rules and ideality laws for green innovative design of products. CARE INNOVATION 2002, Vienna, Austria.
- [18] Ciechanowski P, Malinowski L and al, DFX Platform for life-cycle aspects analysis, "Complex Systems Concurrent Engineering", Edition Springer London 2007, ISBN: 978-1-84628-976-7, pages 283-290.
- [19] Clermont P., Geneste L et al (2002), « Le retour d'expérience : un processus socio-technique », 1er Colloque GCCGI, Vers l'articulation entre compétences et connaissances, Nantes, France.
- [20] Collado-Ruiz D. and al, Comparing LCA results out of competing products: developing reference ranges from a product family approach, *Journal of Cleaner Production* 18, 355–364, 2010.
- [21] Commoner, B. (1997), the Relation between Industrial and Ecological System, *J. of Cleaner Prod.*, 5 (1-2): 125-. 129.
- [22] Coppens C, Le Coq M &al, Evaluating and improving the recovery aptitude of an automobile function: the PSA Approach recycling methodology, *International Journal of Vehicle Design*, January 2002, Vol 29 n°4, p 307- 316.
- [23] Cox M. A. A., Cox T. F., *Multidimensional scaling*, Springer Berlin Heidelberg, pages 315-347, copyright 2008
- [24] Curzons A and al, Fast Life Cycle Assessment of Synthetic Chemistry (FLASCTM) Tool, *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(4), 272-280 (2007).
- [25] Dagher A.: Contribution à l'intégration des préférences clients en conception de produits : Application au design de formes, thèse de doctorat Ecole Centrale Nantes, vol. 237 pages, 2008.

- [26] De Bruijn, Hofman, Pollution prevention and industrial transformation: Evoking structural changes within companies, *Journal of Cleaner Production* 8 (2000) 215–223.
- [27] De Haan P, Peters A and al, Reducing energy consumption in road transport through hybrid vehicles: investigation of rebound effects, and possible effects of tax rebates, *Journal of Cleaner Production* 15 (2007) 1076-1084.
- [28] Décision No 1753/2000/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 22 juin 2000 établissant un programme de surveillance de la moyenne des émissions spécifiques de CO₂ dues aux véhicules particuliers neufs.
- [29] Dewulf W, Duflou J., simplifying LCA using indicator approaches, CIRP seminar on LCE, Copenhagen Denmark, 2003.
- [30] Dewulf W., A proactive approach to ecodesign: framework and tools, PhD thesis, Katholieke universiteit Leuven, 2003.
- [31] Di Lucia L, Nilsson L.J, Transport biofuels in the European Union: The state of play, *Transport Policy* 14 (2007) 533–543.
- [32] 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.
- [33] Directive 2006/121/EC of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006 amending Council Directive 67/548/EEC on the approximation of laws, regulations and administrative provisions relating to the classification, packaging and labelling of dangerous substances in order to adapt it to Regulation (EC) No 1907/2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) and establishing a European Chemicals Agency.
- [34] Directive 2008/33/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 March 2008 amending Directive 2000/53/EC on end-of-life vehicles, as regards the implementing powers conferred on the Commission.
- [35] Directive n° 2004-42/CE du 21/04/04 relative à la réduction des émissions de composés organiques volatils dues à l'utilisation de solvants organiques dans certains vernis et peintures et dans les produits de retouche de véhicules.
- [36] Directive n°2003/30/CE du PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 8 mai 2003 visant à promouvoir l'utilisation de biocarburants ou autres carburants renouvelables dans les transports.

- [37] Eberle R, Franze H.A, Modelling the use phase of passenger cars in LCI, SAE engineers, inc, 1998.
- [38] Eberle R., Methodik zur ganzheitlichen Bilanzierung im Automobilbau (Methodology for Life Cycle Assessment in the Automotive Design) PhD thesis at Technical University of Berlin, Department of Transport and Applied Mechanics, 2000.
- [39] Fargnoli M., Sakao T, Coordinating eco design methods in early stages of industrial product design, International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing, vol.14,N°2,2008 (available in internet).
- [40] FIEV 2008, Guide de déploiement du règlement REACH dans l'industrie automobile, 2ème version, avril 2008, disponible sur internet au www.fiev.fr.
- [41] Finkbeiner M & al, Application of Life Cycle Assessment for the Environmental Certificate of the Mercedes-Benz S-Class, Int J LCA 11 (4) 240 – 246 (2006).
- [42] Fitch P.E, Cooper J.S, Life Cycle Energy Analysis as a Method for Material Selection, Journal of mechanical design, ASME 2004.
- [43] Gerrard J, Kandlikar M, Is European end-of-life vehicle legislation living up to expectations? Assessing the impact of the ELV Directive on 'green' innovation and vehicle recovery, Journal of Cleaner Production 15 (2007) 17-27.
- [44] Goedkoop M, Heijungs R, Huijbregts M and al., ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level, First edition, Report I: Characterisation, 6 January 2009.
- [45] Gonzales B and al, A fuzzy logic approach for the impact assessment in LCA, Resources, Conservation and Recycling, 37(1), 61-79 (2002)
- [46] Graedel TE, Allenby B R (1998): Industrial Ecology and the Automobile, New Jersey. Prentice-Hall Inc.
- [47] Graedel, T. E., Streamlined life-cycle assessment, New Jersey: Prentice-Hall, Inc, 1998.
- [48] Gray, P. H. (2001). "A problem-solving perspective on knowledge management practices" Decision Support Systems (31), pp87-102.
- [49] Guay T and al, Non-governmental Organizations, Shareholder Activism, and Socially Responsible Investments: Ethical, Strategic, and Governance Implications, Journal of Business Ethics 52: 125–139, 2004.
- [50] Guinée et al, LCA - An operational guide to the ISO-standards - Part 2a: Guide (Final report, May 2001), site web: cml.leiden.edu.

- [51] Gutierrez E, Adenso-Diaz B, Visualisation of LCA environmental impacts of electrical and electronic products using multidimensional scaling, *International Journal of Product Lifecycle Management - Vol. 4, No.1/2/3* pp. 166 – 185, 2009
- [52] Gutschling S, Winter R, progress report of the application group automotive 2009/2010, published by: ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie (Electrical and Electronic Manufacturers' Association), Electronic Components and Systems Division Lyoner Straße 9 60528 Frankfurt am Main, Germany, December 2009.
- [53] Hauschild M and al, From Life Cycle Assessment to Sustainable Production: Status and Perspectives, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 54, Issue 2, 2005, Pages 1-21.
- [54] Hauschild M.Z. and al. "Design for Environment - Do We Get the Focus Right?" - *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. - 2004.
- [55] Heeres R.R, Vermeulen W.J.V and al, Eco-industrial park initiatives in the USA and the Netherlands: first lessons, *Journal of Cleaner Production* 12 (2004) 985–995.
- [56] Hemel V, Eco Design empirically explored - Design for Environment in Dutch small and medium sized enterprises, PhD Thesis, Delft University of Technology, 1998.
- [57] Hoschorner E, Finnveden G (2003), Evaluation of Two Simplified Life Cycle Assessment Methods. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(3), 119-128.
- [58] Huang G. Q, Mak K. L, the DFX shell: a generic framework for developing design for X tools, *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 13, No. 3, pp. 271-280, 1997.
- [59] International Reference Life Cycle Data System (ILCD): Main guidance document for all application and scope situations, 2008.
- [60] ISO/DIS 140XX (40-44). "Environmental management", LCA – réf. ISO/TC 207/SC5.
- [61] ISO/TR 14062 : 2002, Management environnemental -- Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit.
- [62] Jacobsen N. B, Exploring mechanisms for mobilising industrial sustainability models across different industrial locations *International Journal of Environmental Technology and Management*, Issue: Volume 10, Number 3-4 / 2009, Pages: 442 – 457.
- [63] Jacqueson L, Intégration de l'environnement en entreprise : proposition d'un outil de pilotage du processus de création de connaissances environnementales, Thèse de doctorat de l'ENSAM, 2002.

- [64] Jacqueson L, Millet D, Aoussat A., Integration of the environment in product design by a learning process: proposal for a piloting tool, *Int. Journal of Environment and Pollution*, vol.19 pages 317-335, 2003
- [65] Janin M.: Démarche d'éco-conception en entreprise, un enjeu : construire la cohérence entre outils et processus- Thèse de doctorat à l'ENSAM de Chambéry – Avril 2000, N°2000-10
- [66] Jänsch J, Birkhofer H, Imparting design methods with the strategies of experts, *Proceedings of the 16th International Conference on Engineering Design*, 2007 Paris. Glasgow: Design Society, 269-270.
- [67] Jarratt, T. A. W, Eckert Claudia, Weeks R and Clarkson P. J. (2003), Environmental legislation as a driver of design. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Engineering Design (ICED'03)*, 19-21 August 2003, Stockholm, Sweden.
- [68] Jolliet O, Saadé M, Crettaz P, *Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan*, Edition Presses polytechniques et Universitaires Romandes, pp 242, 2005.
- [69] Jones E, *Eco-Innovation: tools to facilitate early-stage workshops*, PhD Thesis, Brunel University, 2003.
- [70] Jones, E., Harrison D, (2000). Investing the use of TRIZ in Eco-innovation. *TRIZCON 2000*, Altshuller Institute.
- [71] Kaïla S, Hyvarinen E., Integrating Design for Environment into the product design of switching platforms, *Proceedings of International Symposium on Electronics and Environment*, Issue 6-8 may 1996, pages 213-217.
- [72] Karlsson M. *Green concurrent engineering: assuring environmental performance in product development*. Dissertation, Lund University 1997.
- [73] Keoleian G.A, Kar K, Elucidating complex design and management tradeoffs through life cycle design: air intake manifold demonstration project, *Journal of Cleaner Production*, Volume 11, Issue 1, February 2003, Pages 61-77.
- [74] Kim J H. and al., "Economic and environmental assessment of remanufacturing in the automotive industry, 15th CIRP international conference on life cycle engineering, LCE 2008
- [75] Knight P., Jenkins J.O., Adapting and Applying eco-design techniques: practitioners' perspective, *Journal of Cleaner Production*, Volume 17, 2009, pp 549-558.
- [76] Koffler C., Krinke S., Volkswagen slimLCI: a procedure for streamlined inventory modeling within life cycle assessment of vehicles, *Int. Journal Vehicle Design*, vol. 46, N°2, 2008.

- [77] Konz R, the End-of-Life Vehicle (ELV) Directive: the Road to Responsible Disposal, 18 Minn. J. Int'l L. 431 (2009).
- [78] Krinke S, Boßdorf-Zimmer B, D Goldmann, The VW Sicon Process: Eco-efficient solution for future end-of-life vehicle treatment, 13th CIRP International Conference on LCE, Leuven 2006.
- [79] Le Borgne R, De l'usage des analyses de cycle de vie dans l'industrie automobile, Thèse de doctorat de l'ENSAM, 1998.
- [80] Le Borgne R., Feuillard P., Analyse de cycle de vie, application dans l'industrie automobile, technique de l'ingénieur, traité environnement, 10 pages, 1997.
- [81] Le Pochat S, Bertoluci G and al, integrating ecodesign by conducting changes in SMEs, Journal of Cleaner Production 15 (2007) 671-680.
- [82] Le Pochat S.: Intégration de l'éco-conception dans les PME: Proposition d'une méthode d'appropriation de savoir-faire pour la conception environnementale des produits. Thèse de doctorat à l'ENSAM de Paris – N° 2005-21, novembre 2005.
- [83] Legardeur J. (2001). Méthodes et outils pour l'innovation produit/process. Le cas de l'intégration des matériaux composites SMC. Thèse de doctorat, Laboratoire 3S, INPG, Grenoble.
- [84] Leroy Y, Développement d'une méthodologie de fiabilisation des prises de décisions environnementales dans le cadre d'analyses de cycle de vie basée sur l'analyse et la gestion des incertitudes sur les données d'inventaires, Thèse de doctorat à l'ENSAM de Chambéry, 2009.
- [85] Lim S.R, Park J. M, Environmental indicators for communication of life cycle impact assessment results and their applications, Journal of Environmental Management, Volume 90, Issue 11, August 2009, Pages 3305-3312.
- [86] Lindahl M, Engineering designers' experience of design for environment methods and tools - Requirement definitions from an interview study, Journal of Cleaner Production 14 (2006) 487-496.
- [87] Lindeman U, Hessling T et al (2001). "Applicable methods for sustainable development for Small and Medium-sized companies"; EcoDesign 2001, 2nd International Symposium on environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokyo.
- [88] Livian, Y-F. (2001). Organisation : théories et pratiques, Dunod.
- [89] Lofthouse V, Ecodesign tools for designers: defining the requirements, Journal of Cleaner Production 14 (2006) 1386-1395.

- [90] Lopez, R., Gardoni, M., Tollenaere, M. (2002). « Retour d'expérience sur la création de connaissances et la compétence collective – Approche appliquée au cas de l'entreprise PECHINEY à St Jean de Maurienne », 1er Colloque GCCGI, Vers l'articulation entre compétences et connaissances, Nantes.
- [91] Louis S., Wendel A. (2001), Integration of Environment within the Product Process development at Volvo car Corporation, Volvo car corporation.
- [92] Luttrupp C., Lagerstedt J.: Eco Design and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development - Journal of Cleaner Production 14 (2006) 1396-1408, publication Elsevier.
- [93] Masui K, Miyazaki N, "Current Status of Environmental Accounting in Japan", Nobuyuki, newsletter environmentally conscious products ECP Newsletter 2000, 6 June 2000.
- [94] Millet D, Bistagnino L, Camous R, Aoussat A, Etat des lieux des outils méthodologiques environnementaux : proposition d'une nouvelle classification basée sur les niveaux de transformation de l'entreprise, 4ème Congrès International de Génie Industriel, Marseille, France, juin 2001.
- [95] Millet D. & al, Intégration de l'environnement en conception: l'entreprise et le développement durable, Hermes science publications, Edition Lavoisier 2003.
- [96] Millet D. & al., Does the potential of the use of LCA match the design team needs? Journal of cleaner production, 15 (2007), pages 335 - 346.
- [97] Muñoz I. & al. "Using LCA to assess eco-design in the automotive sector: case study of a polyolefin door panel", IJLCA 11 (5) 323-334. (2006).
- [98] Nielsen P.H., Wenzel H.: Integration of environmental aspects in product development: a stepwise procedure based on quantitative life cycle assessment, Journal of Cleaner Production 10 (2002).
- [99] Nonaka I, Takeuchi H, The Knowledge Creating Company: How Japanese Companies create the dynasties of innovation, Oxford University Press, ISBN 0-19-509269-4, 1995.
- [100] O'Hare J, Eco-innovation tools for the early stages: an industry-based investigation of tool customisation and introduction, PhD thesis at the University of Bath, Department of Mechanical Engineering, April 2010.
- [101] OECD 2000, Synthesis Report of the OECD project on EST (Environmentally Sustainable Transport) presented on occasion of the International EST Conference, 4th to 6th October 2000 in Vienna, Austria.

- [102] Oldenburg K.U, Geiser K. Pollution prevention and ... or industrial ecology? *Journal of Cleaner Production* 1997, 5(1-2):103–8.
- [103] Olsthoorn, X., Tyteca, D. Wehrmeyer, W. (2000), "Environmental indicators for business: a review of the literature and standardisation methods", *Journal of Cleaner Production* Vol.9 No. 5, pp. 453-463.
- [104] Ölundh G, Modernising ecodesign for innovative solutions, Doctoral thesis at the Department of Machine Design, Royal Institute of Technology, SE-100 44 Stockholm, 2006.
- [105] Orsato R.J, Wells P, the Automobile Industry & Sustainability, *Journal of Cleaner Production* 15 (2007) 989-993.
- [106] Orsato, Den Hond and al, The political ecology of automobile recycling in Europe. *Organization Studies Journal* 2002: 23(4):639-65.
- [107] Pauli G, The blue Economy: 10 years, 100 innovations, 100 million jobs, Report to the club of Rome, Published by Paradigm Publications, Taos, New Mexico, USA 2010.
- [108] Pierini M, F Schiavone, From Life Cycle Assessment to Systematic Integration of Eco-Design Criteria inside Product Development Process: Experience at a First Tier Automotive Supplier, *Proceeding of LCE -13th CIRP conference*, Leuven 2006.
- [109] Puri P, Compston P and al., Life cycle assessment of Australian automotive door skins, *Int J Life Cycle Assess* (2009) 14:420–428.
- [110] Rebitzer G, Buxmann K, The role and implementation of LCA within life cycle management at Alcan, *Journal of Cleaner Production* 13 (2005) 1327-1335.
- [111] Regulation (EC) 53/2000 of The European Parliament And Of The Council of 18 September 2000 related to end of life vehicles *Official Journal of the European Union* n°269 of 21/10/2000, page 34.
- [112] Regulation (EC) No 715/2007 of The European Parliament And Of The Council of 20 June 2007 on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information - *Official Journal of the European Union*.
- [113] Reyes T., L'éco-conception dans les PME: les mécanismes du cheval de Troie méthodologique et du choix des trajectoires comme vecteurs d'intégration de l'environnement en conception. Thèse de doctorat à l'université du Var- Laboratoire Lismma de Supmeca, 2007.

- [114] Ritthoff M., Rohn H. & al (2002), Calculating MIPS: Resource Productivity of Products and Services (27): Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy at the Science Centre North Rhine-Westphalia.
- [115] Rohde-Brandenburger K, Obernolte J (2002): Einfluß des Fahrzeuggewichts auf den Kraftstoffverbrauch, oder die Antwort auf die Frage: Wieviel Kraftstoff kosten 100 kg Mehrgewicht. EGPT Fahrzeugtechnik, Volkswagen AG, Wolfsburg, Germany.
- [116] Sakao T, A QFD-centred design methodology for environmentally conscious product design, International Journal of Production research, 2007, vol. 45, no 18-19, pp. 4143-4162.
- [117] Santos-Reyes D.E, Lawlor-Wright T, (2001) "A design for the environment methodology to support an environmental management system", Integrated Manufacturing Systems, Vol. 12 Issue 5, pp.323 – 332.
- [118] Sarkis J, Gonzalez-Torre P and al, Stakeholder pressure and the adoption of environmental practices: The mediating effect of training, Journal of Operations Management 28 (2010) 163–176.
- [119] Schiffleitner A. & al., ProdTect – Life Cycle Design and Concurrent Engineering in the Automotive Industry – FISITA 2008.
- [120] Schmidt W.P. & al, Life Cycle Assessment of Lightweight and End-of-Life Scenarios for Generic Compact Class Passenger Vehicles, Int. J LCA 9 (6) 405 – 416 ,2004.
- [121] Schmidt W.P, Taylor A, "Ford of Europe's Product Sustainability Index", 13th CIRP International conference on life cycle engineering proceedings of LCE, Leuven 2006.
- [122] Schweimer G.W., Levin M., Life cycle inventory for the Golf A4, VW AG Wolfsburg – University of Kassel, internet publication 2009.
- [123] Smink C. K, Vehicle recycling regulations: lessons from Denmark, Journal of Cleaner Production 15 (2007) 1135-1146.
- [124] Sousa I., Wallace D., Product classification to support approximate life-cycle assessment of design concepts, Technological Forecasting & Social Change 73 (2006) 228–249, 2006.
- [125] Steen B, A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS), Chalmers University of Technology, Technical Environmental Planning, 1999.
- [126] Stuart .A. , Sommerville R.M., A review of life cycle design challenges, Int J Environ Conscious Design Manufacturing 7 (1998) (1), pp. 43–57.

- [127] Sullivan J.L., Costic M.M., and Han W. 1998. Automotive life cycle assessment: overview, metrics, and examples. In Design and manufacture for the environment. Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa., SP-1342, pp. 93–110.
- [128] Sutherland J, Gunter K & al, a global perspective on the environmental challenges facing the automotive industry: state-of-the-art and directions for the future, Int. J. Vehicle Design, Vol. 35, Nos. 1/2, 2004.
- [129] Tam E.K.L, Challenges in using environmental indicators for measuring sustainability practices, J. Environ. Eng. Science 1: 417–425 (2002), Published on the NRC Research Press Web site at <http://jees.nrc.ca/>.
- [130] Thiriez A, Gutowski T., "An Environmental Analysis of Injection Molding," ISEE, pp.195-200, Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2006.
- [131] Tischner U, Schmincke E and al (2000): How to do Ecodesign? A guide for environmentally and economically sound design, German Federal Environmental Agency, Berlin.
- [132] Tischner U., Charter M., Sustainable product design In Sustainable Solutions; developing products and services for the future, 2001 (Charter M. and Tischner U., Greenleaf Publishing, Sheffield, UK).
- [133] Todd J.A., Curran M.A, Streamlined Life-Cycle Assessment, Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), July 99.
- [134] Tomiyama T, Umeda Y, Wallace D, A Holistic Approach to Life-cycle Design, Life Cycle Networks Proceedings of the 4th International Seminar on Life Cycle Network, 1997.
- [135] Tonnelier P, Proposition d'une démarche d'intégration d'une nouvelle dimension en conception: application à la dimension recyclage chez un constructeur automobile, Thèse de doctorat de l'ENSAM, 2002.
- [136] Tukker A., Ellen G.J and al (2000), Eco-design: Strategies for dissemination to SMEs. Report EUR 19740 EN, ESTO, IPTS, Seville, Spain.
- [137] Veshagh A, Li Wei, Survey of eco design and manufacturing in automotive SMEs, 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Leuven 2006.
- [138] Wanyama W, Ertas A, Life -cycle engineering: issues, tools and research, Int. J. Computer Integrated Manufacturing, 2003, VOL. 16, NO. 4–5, 307–316.
- [139] Wenzel H., Hauschild M.Z., Environmental assessment of products, Methodology, tools and case studies in product development, Kluwer Academic Publishers, 2001.

Opérationnalisation de l'analyse de cycle de vie en conception

- [140] Wimmer W., Züst R., Lee K.M. "Eco-design implementation: a systematic guidance on integrating environmental considerations into product development", – ref: W55 2004, Springer edition 2004.
- [141] Womack J.P, Jones D.T, Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation, New York, NY: Free Press, Simon & Schuster, Inc., 1996, Second Edition 2003.
- [142] Zah R, Hischier R and al, Curaua fibers in the automobile industry e a sustainability assessment, Journal of Cleaner Production 15 (2007) 1032-1040.

DOCUMENTS ANNEXES

A. Bilan de réalisation des objectifs fixés par la directive ELV

(Absence de communication de résultats de L'Irlande, Italie, Malte, Roumanie, Slovaquie), concernant la mise en œuvre de la directive ELV.

Etats membres	Objectifs fixés par la directive VHU en 2006	
	Réutilisation/recyclage de 80%	Réutilisation/valorisation de 85%
Allemagne	Atteinte	Atteinte
Autriche	Atteinte	Atteinte
Belgique	Atteinte	Atteinte
Bulgarie	Atteinte	Atteinte
Chypre	Atteinte	Atteinte
Danemark	Atteinte	non atteinte
Espagne	non atteinte	presque atteinte
Estonie	Atteinte	non atteinte
Finlande	Atteinte	non atteinte
France	presque atteinte	non atteinte
Grèce	Atteinte	non atteinte
Hongrie	Atteinte	non atteinte
Lettonie	Atteinte	Atteinte
Lituanie	Atteinte	Atteinte
Luxembourg	Atteinte	Atteinte
Pays-Bas	Atteinte	Atteinte
Pologne	Atteinte	Atteinte
Portugal	Atteinte	Atteinte
Slovaquie	Atteinte	non atteinte
Suède	Atteinte	Atteinte
République Tchèque	presque atteinte	non atteinte
Royaume-Uni	Atteinte	non atteinte

B. ressources consommables impliquées dans les procédés sur le cycle de vie des produits Faurecia.

Ressources consommables	Modélisation	Banque de données (datasets)	Date
Energie électrique	EU-25 Power grid mix	PE International	2002
Energie thermique	EU-25 Thermal energy from natural gas	ELCD/PE International	2002
Air comprimé	Compressed air 7 bar (high power consumption); Compressed air 7 bar (low power consumption);	PE International	2002
Gas Oil	EU-15 Diesel at refinery	ELCD/PE International	2003
Essence	EU-15 Gasoline (regular) at refinery	ELCD/PE International	2003
Lubrifiant	EU-15 Lubricants at refinery	PE International	2003
Kérosène	EU-15 Kerosene at refinery	ELCD/PE International	2003
Mazout	EU-15 Fuel oil heavy at refinery	ELCD/PE International	2003
Colle	TPU Glue (polyurethane based)	PE International	2002
Eau distillée	Water deionised	PE international	2005

C. Modélisation des activités/procédés sur le cycle de vie : sources et qualité des données

Phases du cycle de vie	Procédés		Modélisation	Banque de données (datasets)	Année	Niveaux de flux (Inputs/Outputs) et origines
Matières premières	Familles matières	variantes				
	polypropylène copolymère	P/E	Polypropylene granulate mix	PE International	2006	Tous les flux contributifs sont enregistrés. Répartition des origines des flux (en moyenne) : 50% littérature, 20% calculés, 20% estimés, 5% mesurés et 5% non déclarés.
	Polypropylène – EPDM	PP-EPDM	Polypropylene-EPDM-granulate mix	PE International		
	Polypropylène (PP) chargée talc (D)	PP-MD10	Polypropylene granulate (PP) ; Talcum powder (filler)	ELCD/Plastics Europe (PP) ; PE International (talcum)	2005	
		PP-MD15				
		PP-MD20				
	Polypropylène copolymère (P/E) chargée talc (D)	P/E-MD15			2006	
		P/E-MD20				
		P/E-TD40				
	Polypropylène (PP) chargée fibres de verre ((L) GF)	PP-(L) GF20	Polypropylene granulate (PP) ;	ELCD/PlasticsEurope (PP)	2006	
PP-(L) GF30		Glass fibres (GF)	PE International (GF)	2005		
Polypropylène ³³ chargée fibres naturelles : chanvre (HF), lin (flax)	PP-HF20	Polypropylene granulate (PP) ;	ELCD/PlasticsEurope (PP) ; PE International (natural fibres)	2005		
	PP-flax50	Hemp fibres, flax fibres		2006		
Polyamides	PA6	Nylon 6 granulate (PA6) ;	ELCD/PlasticsEurope (PA6 ; PA6.6) ;	2005		

³³ Nouvelles matières récemment validées et commencées à être intégrées dans les nouveaux projets en développement.

Opérationnalisation de l'analyse de cycle de vie en conception

		PA6.6	Nylon 6.6 granulate (PA6.6) ;	PE International (GF)	2006
		PA6-GF20	Glass fibres (GF)		
		PA6-GF50			
	Styréniques	ABS	Acrylonitrile-butadiene-styrene granulate (ABS);	ELCD/PlasticsEurope	2005
		PC-ABS	Polycarbonate granulate (PC) ;		
		ABS-PA	Nylon 6 granulate (PA6)		
	Autres polymères	PVC	Polyvinylchloride powder ; Polyvinylchloride sheet	BUWAL (PVC powder) ; ELCD/PlasticsEurope (PVC sheet)	1996 2005
		PU foam (65% polyol+ 35% isocyanate)	Polyether polyol ; Toluene Diisocyanate	ELCD/PlasticsEurope	2005
		TPO foil (thermoplastic olefin): 52% PP-EPDM min + 48% textile max.	Polypropylene-EPDM-granulate mix (PP-EPDM); Polyethylene terephthalate fibre (textile)	PE International	2006
	Cuir et textile	Cuir de vache	Leather coated	PE International	2006
		Fibres de polyéthylène téréphthalate	Polyethylene terephthalate fibre (textile)		
	Peinture	Peinture polyuréthane	Industrial paint, 60% in solvent	PE International	2006
	Métal	Acier	Steel cold roll	PE International	2006
Logistique amont	Modes de transport				
	Routier	Truck trailer 34-40t total cap. / 27t payload, Euro4.	ELCD/PE International	2005	

Opérationnalisation de l'analyse de cycle de vie en conception

	Aérien	Airplane jet-cargo (average)					
	Ferroviaire	Rail transport cargo (average)					
	Maritime	Container ship/approx 27500dwt - ocean					
	Procédés de fabrication						
Production	Moulage par injection	Spécifique	Injection moulding 1600T (1 and 2 mould cavities); Injection moulding 800T (1 and 2 moulds cavities).	Faurecia Interior Industry; Littérature [Thiriez et al.2006]	2009	Inputs : <i>Flux économique</i> : matière première <i>Flux élémentaires</i> : consommables des procédés (énergie électrique, énergie thermique, air comprimé, substances intermédiaires) 100% calculés Outputs : Flux économique : produit <i>Flux élémentaires</i> : déchets solides (calculés), et émissions physico-chimiques des procédés (facteurs d'émission CO2, NO2, PPM, SO2, COV, DEHP), 100% issus de la littérature.	
		générique	Injection moulding (unspecified)	PE international ; Littérature [Thiriez et al.2006]	2009		
	Thermoformage (générique)		Thermoforming (general)	PE international ; Littérature [Thiriez et al.2006]	2009		
	Thermogainage (Spécifique)		Thermocovering process (1 and 2 moulds cavities)	Faurecia Interior Industry; Littérature [Thiriez et al.2006]	2009		
	Gainage manuel (générique)		Treatment cutting and sewing (unspecified)	PE International	2006		Tous les flux contributifs sont enregistrés. Répartition des origines des flux: 40% mesurés, 40% estimés, 20% non déclarés.
	Rotomoulage ou slush (Spécifique)		Slush moulding	Faurecia Interior Industry; Littérature [Thiriez et al.2006]	2009		
	Moussage (Spécifique)		Foaming process	Faurecia Interior Industry; Littérature [Thiriez et al.2006]	2009		
	Soufflage (générique)		Blow moulding process	PE international ; Littérature [Thiriez et al.2006]	2009		

Opérationnalisation de l'analyse de cycle de vie en conception

					de la littérature.	
	Estampage (générique)		Steel sheet stamping and bending (5% loss)	PE International	2006	<i>Flux économiques</i> : matière première (I) et produit (O) <i>Flux élémentaires</i> : consommables: énergie électrique, air, lubrifiant (I) et déchets (O) ; origines : 100% mesurés.
	Affichage (générique)		Press bounding 5% loss (PET fabrics)			
	Peinture (spécifique)		En attente de données			
	Assemblages	spécifiques	Vibration welding	Faurecia Interior Industry	2009	<i>Flux élémentaires</i> : consommables : énergie électrique, air (I). Origine: 100% mesurés.
			Ultrason welding (1 and 2 sonotrodes)	Faurecia Interior Industry	2009	
			Infrared welding	Faurecia Interior Industry	2009	
générique		Steel sheet (1mm) MAG welding	PE International	2006	<i>Flux élémentaires</i> : consommables : énergie électrique, air (I). Origine: 100% mesurés	
Utilisation	Motorisation du véhicule					
	Essence	Automotive part consumption : 150000 km mileage (gasoline car) ; 200000 km (diesel car)	Faurecia Interior Industry ; Faurecia Automotive Seating (Stadthagen)	2009	Inputs : Flux économique : composant ; <i>Flux élémentaires</i> : consommation en carburant imputé au composant (FRC [Eberle et Franze 1998] ; FRC=0,4 pour la motorisation essence et 0,3 pour le diesel) Outputs : <i>Flux économique</i> : composant en fin de vie ; <i>Flux élémentaires</i> : émissions à l'échappement (allocation par des facteurs d'émission : NEDC, NREL) : CH ₄ , CO, CO ₂ , N ₂ O, NO _x , PPM (particules), COV.	
	Diesel					
Scenarii						
Fin de vie	Landfill	Disposal, plastics mixture, 15% water	Ecoinvent (waste management)	2000	Tous les flux contributifs sont enregistrés. Origines non déclarés	

Opérationnalisation de l'analyse de cycle de vie en conception

	Incinération		Plastic mixture in municipal waste incinerator	ELCD/PE International	2005	Tous les flux contributifs sont enregistrés. Répartition des origines des flux: 60% littérature, 20% calculés, 10% mesurés, 5% estimés, 5% non déclarés
	recyclage	Matières plastiques	Fragmentation and delamination; Sink-floating (sorting technology from ASR); Heating _regranulating	Modèles de process créés à partir des données de WIPAG; Galoo plastics	2010	<i>Flux économiques</i> :RBA (Input) et matières secondaires (Output) ; <i>Flux élémentaires</i> : consommables (I) (énergie électrique, air comprimé) et déchets (O). Origines : 100% calculés.
		acier	Steel billet (electric furnace)	PE international	2005	Tous les flux contributifs sont enregistrés. Répartition des origines des flux: 50% littérature, 20% calculés, 10% mesurés, 10% estimés, 10% non déclarés
	EU_2010	spécifique	Combinaison des scénarios de fin de vie élémentaires (x% landfill, y% incinération, z% recyclage)		2010	-
	EU_2015	spécifique	Combinaison des scénarios de fin de vie élémentaires (x'% landfill, y'% incinération, z'% recyclage)		2010	-

D. Fiche d'évaluation du test de prise en main de EcoT

Experimenter (s)	Participant:	
	Quality / department:	
Workshop1 subject	Site:	
	Date:	
Criteria	Score	Observations/Recommendations
Easiness to handle		
Visualization (I/O interfaces)		
Vocabulary		
The tool objective and strategy understanding		
Exhaustiveness feeling in EcoT use and the results		

Results	Part 1	Part 2	Part 3	Part 4	Part 5	Part 6	Part 7
Experimental criteria measured	Appreciations						
Easiness to handle	3	3	3	3	4	2	4
Visual aspects (interfaces)	4	3	4	4	3	2	3
Vocabulary	4	3	3	4	3	3	3
The tool objective and strategy	4	3	5	4	5	5	5
Time	3	2	3	3	3	3	3
Appropriation	Not evaluated	3	4	3	4	4	4
Results interpretation easiness	3	3	3	3	2	3	4
Flexibility (in data input need)	2	3	2	2	3	1	2

E. Fiche d'évaluation à chaud du test d'intégration de EcoT

Appreciation criteria about the usage of EcoT and its ability to help the design team		
EcoD member :	Participant	Séverine Boulbes
HA, AG, MB	Quality/Service	Concept Engineering
Project	Site :	Hagenbach
	Date :	17/12/2010
Appreciation criteria	Score	Observation(s)
Input flexibility (the tool ability to work and give results with the available data)	3	To update the tool with the new CE BOM; To add comments to well know which part or version of concept is evaluated
Appropriation (the tool give impression to the user that it is easy to memorise the tool objective and strategy)	4	Revoir les termes de description produits dans les classes/typo (vocabulaires)
Interpretation (understandable and exploitable results)	3	Good graph presentation for all versions or only one picture; Criteria explained with logo, easy to interpret → help to memorize (HA)
Comprehension (The tool objective and strategie are clear)	4	Yes!
The tool reactivity in the case of non respecting of the procedure (The warning sent to the user or used by EcoT to stop the procedure when a serious problem occurs during the manip.)	3	
Sufficiency (satisfaction in the tool use and its results)	4	Good tool and results of concepts to be evaluated. Recommend another study when the BOM will be well defined.

NB: The appreciation criteria is qualified from 0 to 5 by the participants, according to the following scale:

Scale	appreciation	scale	appreciation
0	very bad	3	correct
1	bad	4	good
2	acceptable	5	excelent

Appreciation criteria about the simplification of LCA by EcoT and the product life cycle covered:

How do you judge the manner that EcoT uses for calculating the environmental impacts? Are the hot spots and the critical life cycle phase easy to identify with EcoT?

Completely identified.

Very good : always logo linked to the hot spots;

The multicriteria decision is often difficult to well manage, all the more in the case of new complex dimension integration, such as « environment ». An approach has been developed and implanted in EcoT to overcome this issue, by limiting the number of criteria to the “hot spots” (variable on each considered product family). According to you, what are the advantage and the inconvenient of this approach in terms of results exploitation?

Bon niveau de « vulgarisation » de l'ACV → adapté au public ;

Avantage : aide à la décision sur un objectif fixé par les experts ecodesign et argumentation forte pour accompagner 1 proposition finale RFQ.

Inconvénient : En cas de 2 ou plusieurs concepts environnementalement similaires (pas d'écart significatifs et voisins de la référence par classe) → risque d'indécision

Adapter les termes/ vocabulaire des concepteurs descripteurs produits par

F. Fiche d'évaluation à froid du test d'intégration de EcoT

Questions d'ordre général sur l'appréciation d'EcoT par les concepteurs

Vous avez utilisé EcoT sur un projet. Quelle importance accordez-vous à l'outil EcoT, selon les aspects suivants :

a) Visualisation des interfaces

inutile peu interessant interessant très interessant

b) Contrôle des risques d'erreurs

inutile peu interessant interessant très interessant

c) Temps de calcul

inutile peu interessant interessant très interessant

d) Temps de saisie des données

inutile peu interessant interessant très interessant

e) Flexibilité en entrée

inutile peu interessant interessant très interessant

Opérationnalisation de l'analyse de cycle de vie en conception

f) Présentation des résultats

inutile peu intéressant intéressant très intéressant

g) Autre (s), que vous précisez et jugez également (en commentaires).

Commentaires :

b) Contrôle des risques d'erreur :

Je ne comprends pas bien cet aspect. Je ne me souviens pas avoir été arrêtée dans la saisie des données (pare-feu,... ?). Peut-être à améliorer.

c) +d) les temps de saisie de données et de calcul sont un critère très important. J'estime que la somme des 2 ne doit pas dépasser 2 heures.

f) La présentation des résultats est très importante car c'est la base de la communication.

Quel est selon vous le principal atout d'EcoT ?

Outil convivial, facilement utilisable en phase acquisition, car basé sur la

Quel est son principal défaut ?

Pas de défaut majeur.

Donnez votre impression générale à propos de l'outil et de son intégration dans votre métier.

Outil très intéressant, permettant d'ajouter un nouveau critère de caractérisation d'un concept.

En phase acquisition, il nous permettra de comparer les différents concepts d'un point de vue environnemental. Dans un premier temps, je considère que c'est aussi une nouvelle approche marketing.

Vos suggestions d'améliorations :

Couplage des outputs /positionnement des segments de véhicules.

En conclusion :

- Vous utiliserez l'outil EcoT car il fournit des réponses utiles à votre activité

Opérationnalisation de l'analyse de cycle de vie en conception

Vous avez besoin d'une aide régulière/accompagnement pour pouvoir utiliser EcoT dans votre activité

1- Il faut prévoir une formation de base pour présentation de l'outil et de son utilisation.

2- Après calcul, prévoir une séance d'analyse avec le PoC (au moins dans les premiers temps d'utilisation).

vous avez besoin d'une formation plus approfondie pour pouvoir utiliser EcoT dans votre activité

vous n'utiliserez pas l'outil EcoT.

G. Description des quatre modes de conversion des connaissances (Nonaka 1996, Lopez 2002)

Mode de conversion des connaissances	Types de connaissance en jeu et sens de conversion	Description du mode	Moyens mis en oeuvre	Déclencheur
Socialisation	tacites → tacites	Du savoir tacite individuel au savoir tacite collectif. Dans cette notion il y a à la fois l'idée d'un transfert de compétence d'un individu à un autre ou à un groupe, mais également une modification de cette compétence dans le transfert grâce à l'interaction. L'apprentissage, l'intégration au sens courant de ce terme, correspond très concrètement à ce concept de socialisation.	Partage sur le lieu de travail, apprentissage. Interaction forte par proximité géographique.	Construction d'un champ d'interactions (pouvant prendre la forme, au tout début, d'un projet pilote).
Externalisation	tacites → explicites	Du savoir tacite collectif au savoir explicite Des pratiques considérées comme efficaces sont explicitées dans un discours formalisé (forcément dans une certaine limite). Les savoirs sont rendus conscients en les explicitant Cette étape se traduit par l'élaboration de modèles cognitifs communs, favorables à la coordination.	Métaphores, concepts, hypothèses, modèles, analogies. Discours formalisé.	Dialogue porteur de sens et réflexion collective.
Combinaison	explicites → explicites	Des savoirs explicites aux données existantes dans l'organisation (et à l'extérieur) en vue de la création de connaissances nouvelles. Agrégation en une vision systémique de connaissances explicites éparpillées.	Langage commun. Notes d'information, cours, ... Par le biais d'un langage commun et de mécanismes de communication variés, les connaissances explicites de certains individus sont rapprochées, combinées pour produire par induction, déduction des connaissances nouvelles	Mise en réseau : de la nouvelle connaissance créée ; des connaissances détenues dans d'autres parties de l'organisation.
Internalisation	explicites → tacites	Du savoir explicite au savoir tacite à un niveau plus élevé (l'organisation apprenante). Intériorisation par l'individu. Par répétition on enracine la connaissance explicite dans des séquences pouvant atteindre le réflexe automatique en adaptant le schéma aux conditions spécifiques d'exécutions. Cette intériorisation s'accompagne de gains d'efficacité pour l'acteur. C'est une interprétation individualisée de compétences communes, préalablement codifiées. Cette étape inclut deux dimensions : une dimension de transmission qui suppose la codification et une dimension d'application qui nécessite une réinterprétation par la création de compétences utiles.	Répétition d'expériences, mise en application dans des projets. automatisation des pratiques. Codification, procédures, indicateurs d'activité.	Apprentissage « en faisant ».

H. Procédure de contrôle et de signature d'un plan de validation

