A l'interface de l'ingénierie et de l'analyse environnementale, fédération pour une éco-conception proactive

Maud Rio

▶ **To cite this version:**

Maud Rio. A l'interface de l'ingénierie et de l'analyse environnementale, fédération pour une éco-conception proactive. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université de Technologie de Troyes, 2012. Français. NNT : 1496022597u . tel-00765007v1

HAL Id: tel-00765007

https://theses.hal.science/tel-00765007v1

Submitted on 13 Dec 2012 (v1), last revised 14 Dec 2012 (v2)

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 de l'UTT

Université de Technologie de Troyes

Institut Charles Delaunay

Centre de Recherche et d'Etude Interdisciplinaire sur le Développement Durable

THESE

- Version provisoire -

Présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR

de

L'UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE TROYES

Spécialité Développement Durable

PAR

Maud Rio

A l'interface de l'ingénierie et de l'analyse environnementale : fédération pour une éco-conception proactive

---

Soutenue publiquement le 7 décembre 2012 devant le jury :

Mr. B. Eynard, Enseignant Chercheur à l'UTC	Président du jury
Mr. D. Brissaud, Professeur des Universités à l'INP-Grenoble	Rapporteur
Mr. E. Caillaud, Professeur des Universités à l'Université de Strasbourg	Rapporteur
Mr. J-P Theret, Expert Conception pour l'environnement, Dassault Systèmes	Examinateur
Mr. Ch. Longet, Expert énergie et environnement, Parkeon	Examinateur
Mr. L. Roucoules, Professeur des Universités aux Arts et Métiers ParisTech	Directeur de thèse
Mme. T. Reyes, Maître de Conférences à l'UTT	co-directrice de thèse

At the interface of engineering and environmental analysis : federation for proactive eco-design.

Abstract : Observing how is performed eco-design in industry shows that environmental experts are facing some difficulties to share data with multi-domain product designers tools : technical limitations regarding standards, lack of modularity and flexibility, semantical loss associate to the data, etc. Therefore, this research contribution is to propose a method to build dynamic information exchanges between environmental experts and product designers activities involved along the design process, based on federation using Model Driven Engineering. The method is composed of two complementary parts : creating the environmental tools models to implement the company library and supporting the eco-design process deployment regarding the global environmental strategy and tactic. The proposal has been tested on two industrial case studies : in the companies Parkeon and Quiksilver. The experimentations results shows that the method is adapted to industries and confers three properties : (1) the adaptation to the various eco-design contexts encountered during the design process (2) the capacity for the environmental expert to use any available informations produced by other designers (keeping the data semantic) and (3) the capacity for the environmental expert to give back to designers an adapted answer to help them reiterate their respective choice. This research contributes to build a constant proactivity along the design process between designers and environmental expert. They are better supported to follow the environmental tactic and strategy of the company.

Key words : Eco-design, Model Driven Engineering, Collaborative engineering

Résumé : Malgré le développement rapide d'outils et de méthodes appropriés, la pratique de l'éco-conception reste difficile en industrie. En particulier par le manque de dynamisme et de flexibilité des échanges d'informations entre les concepteurs multi-métier et l'expert environnement durant le processus de conception. Ainsi, ces recherches proposent une méthode leur permettant d'améliorer l'interopérabilité de leurs outils en utilisant la fédération fondée sur l'approche d'Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM). La méthode se décline en une étape de création de modèles associés aux outils des concepteurs et de l'expert environnement, et en une étape d'utilisation des modèles pour déployer le processus de conception suivant la tactique définie par les chefs de département. La proposition a été expérimentée sur deux cas d'études des entreprises Parkeon et Quiksilver. Les résultats des expérimentations montrent que la méthode est applicable au milieu industriel et confère trois propriétés : (1) la capacité de s'adapter aux différents contextes que nécessite la pratique de l'éco-conception (2) l'échange dynamique des données disponibles entre les concepteurs et l'expert environnement et (3) la capacité de l'expert environnement à répondre de manière adaptée aux concepteurs afin qu'ils réitèrent leurs choix en faveur de la composante environnementale. Enfin, la méthode contribue à construire une pro-activité des métiers durant le processus de conception. Cette dynamique facilite l'application de la tactique et de la stratégie environnementale.

Mots clés : Ecoconception, Ingénierie Dirigée par les Modèles, Ingénierie collaborative

Remerciements

Je remercie sincèrement Benoît Eynard d'avoir présidé ma soutenance de thèse au coeur de la Champagne. Je remercie Emmanuel Caillaud et Daniel Brissaud de m'avoir donné cet honneur que de rapporter mes travaux de thèse et de les avoir enrichi sur des points précis qui ont soulevé de nouvelles perspectives à mes recherches. Je remercie Jean-Pierre Theret d'avoir examiné mes travaux en apportant la vision du développeur industriel appartenant à ce grand groupe industriel. Je remercie Christian Longet pour sa confiance et son entrain dans le projet du début jusqu'aux devenir et pour la grande qualité et pertinence de ses réflexions qui m'ont permis de toucher les besoins des concepteurs de Parkeon dans la problématique environnementale.

Je remercie mes chers directeurs Tatiana Reyes et Lionel Roucoules pour leurs qualités aussi bien professionnelles que personnelles, qui s'accompagnent d'une grande générosité et disponibilité. Cette confiance qui m'a été offerte a été d'une étonnante efficacité dans la construction et le suivit de mon travail de recherche. Entre un retour d'Australie et un nouveau chemin vers les terres australes, j'ai découverts des équipes de recherche composées d'enseignants-chercheurs passionnés par leur travail et qui m'ont donné de beaux exemples à suivre, à la fois en recherche et en enseignement.

Je tiens donc également à remercier les deux équipes de recherches de l'UTT et des Arts et Métiers ParisTech qui ont été probablement bien plus que ce qu'ils pensent avoir été pour moi : des collègues, des sources d'inspirations, des "agitateurs de conscience", des amis sportifs, des hôtes formidables, etc.

Je remercie la communauté dynamique du réseau d'Eco-conception de Systèmes Durables (Eco-SD) et Dominique Millet pour m'avoir ouvert les portes si généreusement et pour avoir créé ce terreau fertile en éco-conception composé d'enseignant-chercheurs, d'industriels et de doctorants. C'est une réelle chance pour les doctorants d'avoir ce tremplin pour échanger sur nos recherches, nous fédérer et monter des projets ensemble.

Je remercie les autres membres du projet ANR Convergence : Peggy Zwolinski, Nicolas Buclet, Eunika Mercier-Laurent, Carine Bedoya, Jean-Claude Guillemin et bien sûr Romain Allais et Feng Zhang pour chaque moments que nous avons passés ensemble et chaque échanges que nous avons eus dans nos réunions de travail.

Et je remercie spécifiquement Romain, Lucie, Ben, Marion, Bertrand, Natalia, Miriam, Jawad, Guillaume, Rony, Medhi, Zeineb, Amir, Benji, Gwenolé, Tof, Matthieu, Rouding, Fadel et tout les autres que j'ai omis de citer pour conserver un peu de place pour dire en trois mots tout l'amour que j'ai pour mes amis et ma famille. Et longue vie au rugby qui m'a fait un si bel homme !

Table des matières

1 Introduction générale **21**

2 Positionnement scientifique de la recherche **31**
2.1 L'éco-conception pour les industriels 32
2.1.1 Constatation de changements globaux des éco-systèmes à l'émergence du concept du développement durable 32
2.1.2 Vers la pratique de l'éco-conception 34
2.1.3 Positionnement vis-à-vis de l'éco-conception 41
2.2 Les systèmes complexes d'ingénierie 44
2.2.1 L'activité de conception : des concepts aux produits finaux 44
2.2.2 Diversité des approches collaboratives existantes en conception et systèmes d'information associés 52
2.3 Synthèse du positionnement de recherche et énoncé de la problématique . . 64

3 Etat de l'Art **67**
3.1 Intégration de la dimension environnementale en conception 68
3.1.1 La "pensée" cycle de vie : une notion centrale dans la prise en compte de l'environnement 69
3.1.2 Les phases du cycle de vie : opportunités et limites 73
3.1.3 L'intégration de la connaissance environnementale : complémentarité entre les expertises *locale* et *globale* 74
3.2 Contextes évolutifs de l'analyse environnementale en conception 81
3.2.1 Catégories de critères contextuels pour la classification des méthodes et outils d'analyse environnementale 83
3.2.2 Cadre *global/local* pour l'étude des interactions entre outils de conception classique et d'analyse environnementale 88
3.2.3 Synthèse : contextes évolutifs de l'analyse environnementale en conception 90
3.3 Solutions d'interopérabilité entre les outils de conception et d'analyse environnementale 91
3.3.1 Echanges d'informations entre les outils de conception et d'analyse environnementale 92
3.3.2 Le Système d'Information et les échanges de données actuels en conception de produits avec prise en compte des critères environnementaux 98

3.3.3 Synthèse de la section relative aux solutions d'interopérabilité entre les outils de conception et d'analyse environnementale 105
3.4 Verrous à lever pour intégrer efficacement la dimension environnementale en conception 110

4 Proposition **113**
4.1 Propriétés de la proposition 114
4.1.1 Périmètre 114
4.1.2 Propriétés de la proposition 115
4.2 Mise en oeuvre de la proposition de thèse 120
4.2.1 Développement en Spirale de la méthode FESTivE 120
4.2.2 Méthode FESTivE : création de la bibliothèque de modèles associés aux outils de conception et d'analyse environnementale 122
4.2.3 Méthode FESTivE : utilisation des modèles pour le déploiement du processus de conception 131
4.2.4 Support de mise en oeuvre de la proposition 132

5 Expérimentations et validations **137**
5.1 Expérimentation n°1 : mise en place d'un Système d'Information pour augmenter la capacité d'éco-conception 140
5.1.1 Objectif 140
5.1.2 Cadre industriel et protocole d'expérimentation 140
5.1.3 Analyse de la situation initiale et mise en place du projet NTR . . 149
5.1.4 Construction du prototype et des maquettes expérimentales 156
5.1.5 Validation des apports conceptuels et technologiques 172
5.1.6 Validation des objectifs O1, O2 et O3 184
5.2 Expérimentation n°2 : démarche globale environnementale de mise en place du développement durable dans l'entreprise 190
5.2.1 Objectif 190
5.2.2 Cadre industriel de l'expérimentation 190
5.2.3 Analyse de la situation initiale et modélisation des processus 193
5.2.4 Co-construction et retours d'expériences sur la proposition d'amélioration des échanges au niveau opérationnel (O4) 195
5.2.5 Co-construction et retours d'expériences sur le déploiement de la proposition en cohérence avec les niveaux stratégique et tactique de l'entreprise (O5) 205
5.3 Synthèse des résultats apportés par les expérimentations 212
5.3.1 Validation de la proposition dans le contexte opérationnel du processus de conception 212
5.3.2 Illustration de la proposition dans une démarche environnementale globale d'entreprise 213

6 Conclusions et perspectives **215**
6.1 Conclusion 215
6.2 Perspectives 221

6.2.1 Plan de validation des travaux . . . 221
6.2.2 Eco-conception en phase amont . . . 222
6.2.3 Capitalisation et suivi des données et des transformations dans le temps . . . 223
6.2.4 L'éco-conception de systèmes durables . . . 225

A Annexe du document **241**
A.1 Annexe sur le concept du développement durable . . . 242
A.2 Annexe : norme XPE 01-005 sur les produits mécaniques . . . 246
A.3 Annexe : exemple de mise en correspondance d'outils de conception et d'analyse environnementale . . . 250
A.4 Annexe : Illustration d'un modèle d'activité en UML . . . 258
A.5 Annexe : questionnaire d'enquêtes . . . 260
A.6 Annexe : informations sur les outils utilisés en tant que maquette dans le cas d'étude n°2 . . . 263
A.7 Annexe : Précisions sur le code généré relatif aux transformations réalisées dans le cadre du prototype NTR . . . 264
A.8 Annexe : Questions posées et réponses des métiers intervenant lors du projet NTR pour les expérimentations . . . 267
A.9 Annexe : Illustration de la cartographie des activités de Quiksilver . . . 271
A.10 Annexe : Diagrammes de classe du prototype NTR . . . 274
A.11 Annexe : Fluctuation de la valeur extra-financière et financière du capital immatériel de l'entreprise . . . 278

Liste des tableaux

2.1 Exemple de description d'activités . . . 49
2.2 Comparaison des notions de coordination, coopération et collaboration suivant [Lu et al.(2007)] . . . 50
2.3 Capacités standards des outils PLM, d'après le site commercial d'une agence de consultant en solutions de PLM . . . 61
2.4 Hypothèses relatives au positionnement de la recherche, regroupant les fonctions présentées dans ce chapitre . . . 65

3.1 Augmentation remarquable des articles scientifiques traitant de "*ecodesign methods*" . . . 82

4.1 Caractérisation des *transformations de connaissances* fondées sur des cartes de correspondances différentes. . . . 127

5.1 Objectifs du démonstrateur fondés sur le cas d'étude de *Parkeon* . . . 140
5.2 Présentation des personnes impliquées pour l'expérimentation dans l'entreprise Parkeon, et outil support utilisé lors du projet NTR . . . 144
5.3 Liste des outils ayant fait l'objet de maquettes pour les expérimentations . 148
5.4 Bilan des actions environnementales menées au début du projet NTR . . . 150
5.5 Exemples de critères et objectifs environnementaux du projet NTR . . . 155
5.6 Etape 1 du protocole d'application du prototype : difficultés rencontrées lors de la modélisation du diagramme d'activité . . . 160
5.7 Spécification des diagrammes de classe créés par les activités en jeu dans le projet NTR . . . 162
5.8 Etape 2 du protocole d'application du prototype : difficultés rencontrées lors de la modélisation des méta-modèles . . . 164
5.9 Etape 3 du protocole d'application du prototype : difficultés et avantages de l'étape de création des modèles . . . 165
5.10 Etape 4 du protocole d'application du prototype : avantages et inconvénients de l'établissement des cartes de correspondances . . . 168
5.11 Illustration de chaque type de transformation établi dans le cadre du projet NTR . . . 170
5.12 Etape 5 du protocole d'application du prototype : avantages et inconvénients lors du codage des transformations . . . 171
5.13 Critères d'expérimentation de la proposition sur le projet NTR en fonction des objectifs de la proposition . . . 174

5.14 Illustrations après application de la méthode sur le projet NTR 177
5.15 Avantages et réticences concernant la proposition de la part des concepteurs mécaniques CAO et choix des technologies 178
5.16 Avantages et réticences concernant la proposition de la part de l'informaticien, administrateur CAO 180
5.17 Avantages et réticences concernant la proposition de la part de l'expert environnement 182
5.18 Présentation des personnes impliquées pour l'expérimentation dans l'entreprise Quiksilver, notamment dans les phases d'enquêtes 192
5.19 Facteurs de variations des indicateurs tactiques suite à l'application des préconisations du niveau opérationnel 208

A.1 Moyens énoncés pour contribuer à l'amélioration du bien-être des populations humaines préconisées dans le rapport Brundtland [Brundtland(1987)], d'après [Buclet(2011b)] 245
A.2 Capitaux immatériels définis dans le Thésaurus Bercy [Fustec et al.(2011)] 279

Table des figures

1.1 Vers une approche “de bas-en haut” des travaux de recherche contribuant au niveau métier de l’opérationnel dans une perspective de déploiement global de l’environnement en entreprise . . . 22
1.2 ARC diagramme : domaines de la recherche et domaine de contribution d’après [Blessing et Chakrabarti(2009)]. . . . 27
1.3 Synergie des domaines de recherche des laboratoires de l’UTT et des Arts et Métiers ParisTech impliqués dans la recherche . . . 28

2.1 Forts changements dans l’activité humaine depuis les débuts de l’ère industrielle . . . 32
2.2 Changements globaux des éco-systèmes sous l’action des activités de l’Homme depuis les débuts de l’ère industrielle. . . . 34
2.3 Moteurs pour la pratique de l’éco-conception en industrie . . . 40
2.4 Grandes phases d’un processus de conception retenues pour nos recherches 48
2.5 Positionnement de la recherche : problématique et hypothèses de recherche 66

3.1 Première partie de l’état de l’art : positionnement sur la première hypothèse de recherche . . . 68
3.2 Vision du cycle de vie pour les commerciaux . . . 70
3.3 Vision du cycle de vie du point de vue de l’analyse fonctionnelle . . . 70
3.4 Courbes des coûts investis et coûts réels, en fonction de taux de connaissances associées au produit et des phases du cycle de vie, par extrapolation des travaux de [Reyes(2007)], [Dewulf(2003)], [Tichkiewitch et Riel(2010)] . 73
3.5 Connaissances environnementales acquises par 143 étudiants selon le profil de formation suivie à l’UTT entre 2006 et 2009. . . . 77
3.6 Moyen d’acquisition de connaissances environnementales en entreprise, selon l’enquête réalisée en 2009 sur 143 étudiants de l’UTT. . . . 79
3.7 Deuxième partie de l’état de l’art : positionnement sur la deuxième hypothèse de recherche . . . 81
3.8 Représentation des méthodes DFX au cours du cycle de vie du produit, coût engagé et retour sur investissement, d’après [Niemann et al.(2009)]. . 85
3.9 Représentation des méthodes DTX au cours du cycle de vie du produit, coût engagé et retour sur investissement, adaptée de [Niemann et al.(2009)]. 85
3.10 Description de catégories de critères contextuels d’une situation de conception au niveau opérationnel . . . 87

3.11 Vue de l'esprit de l'existant : organisation locale - globale des outils et méthodes d'ingénierie "classique" et "environnementale" 89
3.12 Troisième partie de l'état de l'art : positionnement sur la troisième hypothèse de recherche 91
3.13 Schématisation des différents niveaux d'échelles : du monde des échanges physiques au monde des échanges virtuels 93
3.14 Modèle pyramidal classique représentant la hiérarchie des modèles 94
3.15 Comparaison entre l'interopérabilité type intégrative, unificatrice et fédérative, adaptée de [Paviot(2010)] 95
3.16 Complémentarité des approches d'interopérabilité, d'après [Iraqi et al.(2011)] 96
3.17 Interopérabilité entre les outils de CAO, de PLM et l'outil d'ACV : aspects positifs et négatifs, opportunités de l'étude 102
3.18 Interopérabilité de la plateforme Environmental Data Workbench (EDW) [Theret et al.(2011)], intégrant les outils de PLM, CAD, LCA (etc.) : aspects positifs et négatifs, opportunités de l'étude 104
3.19 Relations entre les outils métier, les données d'import et d'export et l'espace de partage et de collaboration des données 107
3.20 Verrous à lever pour l'intégration de la dimension environnementale pendant le processus de conception des produits (niveau opérationnel) 110

4.1 Localisation de la proposition, à l'interface des activités métier intervenant au cours du processus de conception d'après la Fig. 3.11 114
4.2 Propriété n°1 de la proposition : adaptation à la variabilité contextuelle . . 116
4.3 Propriété n°2 de la proposition : échange des données disponibles nécessaires à l'activité environnementale et capacité d'y répondre d'une manière adaptée 117
4.4 Propriété n°3 de la proposition : lier les paramètres environnementaux aux paramètres des concepteurs 118
4.5 Méthode de développement des transformations aux interfaces en Spirale, d'après [Boehm(1988)] 121
4.6 Exemple d'un diagramme de processus en UML 124
4.7 Exemple simplifié d'un diagramme d'activité UML comprenant plusieurs activités, dont l'activité d'analyse environnementale 124
4.8 Exemple simplifié d'un diagramme de classe en UML associé à l'activité de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) 125
4.9 Illustration d'une carte de correspondances de type Allocation (MOF et langage ATL) 128
4.10 Illustration d'une transformation basée sur une carte de correspondance de type *base de donnée* (MOF, langage ATL) 128
4.11 Illustration d'une transformation basée sur une carte de correspondances de type *opération* (MOF, langage ATL) 130
4.12 Légendes utilisées dans le type de maquettes présenté Fig. 4.14 132
4.13 Exemple de résultats d'enquête sous forme d'une maquette 133
4.14 Schéma du processus général de réalisation des projets au sein de la Quiksilver Initiative 134

5.1 Plan du chapitre 4 : expérimentations et validations . . . 137
5.2 Citypal, objet d'étude . . . 141
5.3 Illustration des dessins ou concepts (design) réalisés dans le cadre du démonstrateur du projet NTR Parkeon . . . 142
5.4 Chronologie du projet NTR et de l'expérimentation menée avec Parkeon . 143
5.5 Présentation générale des phases de collecte d'informations auprès des services de Parkeon pendant le durée du projet . . . 145
5.6 Illustration de la partie technique et la partie pratique du démonstrateur et des tests respectifs réalisés . . . 146
5.7 Protocole en cinq étapes déployé pour réaliser le prototype dans le cadre du projet NTR . . . 147
5.8 Outils utilisés pendant le processus de conception dans lequel s'inscrit le projet NTR, chez Parkeon . . . 152
5.9 Outils utilisés pendant le processus de conception qui est organisé suivant les niveaux *local vs. global* . . . 153
5.10 Struture générale et simplifiée du SI de Parkeon, relatif à la gestion des données produit, à l'époque des enquêtes . . . 153
5.11 Outil interne d'ACV simplifiée, semi-qualitative - quantitative, développé par l'ingénieur environnement . . . 157
5.12 Processus de conception déployé lors du projet NTR, formalisé sous la forme d'un diagramme d'activité UML . . . 159
5.13 Diagramme de classe représentant les données de sortie de l'activité du service logistique et achat. . . . 163
5.14 Exemple de méta-modèle instancié avec les données réelles . . . 165
5.15 Exemple d'équivalences de termes entre la base de données matériaux associées aux outils de choix des matériaux et les outils d'analyse environnementale . . . 167
5.16 Exemple de cartes de correspondances entre plusieurs modèles. . . . 167
5.17 Canevas des transformations à coder, du prototype réalisé dans le projet NTR . . . 169
5.18 Illustration par copies d'écran des maquettes réalisées sur l'outil CES (à gauche) et EcoTransIT (à droite) . . . 172
5.19 Illustration par copies d'écran des maquettes réalisées sur l'outil SimaPro . 173
5.20 Illustration par copies d'écran des maquettes réalisées sur l'outil CAO (ici SolidWorks disposant du module *Sustainability*) . . . 173
5.21 Réactivité *vs.* pro-activité . . . 186
5.22 Paramètres : temps par échange ; taux d'informations formalisées ; intégration des informations, avant et après la proposition . . . 187
5.23 Conséquences sur la pro-activité à partir des paramètres temps, réactivité et intégration des informations, avant et après la proposition . . . 188
5.24 Chronologie du cas d'étude réalisé dans l'entreprise Quiksilver . . . 191
5.25 Exemple d'éléments de la cartographie issue de l'enquête effectuée au sein de Quiksilver, ANR *Convergence*, ici : présentation de l'activité du designer 194
5.26 Activité du designer, implémentée par l'ajout de supports ou d'interaction avec l'activité d'analyse environnementale (en vert) . . . 197

5.27 Exemple 1 : illustration des liens possibles entre l'activité des designers et l'activité d'analyse environnementale . . . 198
5.28 Illustration des liens possibles entre l'activité des designers et l'activité d'analyse environnementale . . . 199
5.29 Proposition de fédération entre les activités de la technicienne de collection et l'activité d'analyse environnementale . . . 201
5.30 Illustration des cartes de correspondances possibles entre les données de l'activité artistique du graphiste et l'activité d'analyse environnementale . 203
5.31 Colonne vertébrale de la proposition dans le cadre du projet ANR *Convergence* (travaux collectifs) . . . 206
5.32 Exemple de chaînage des indicateurs entre les niveaux stratégiques, tactiques et opérationnels . . . 210

6.1 Seconde perspective issue des résultats de l'enquête lors du projet NTR . . 223

A.1 Intégration de l'éco-conception dans les pratiques classiques : les cinq étapes et leur support respectif . . . 247
A.2 Outils spécifiques Environnement et outils classiques en fonction des aspects environnementaux considérés . . . 249
A.3 Comparaisons basées sur des articles bibliographiques d'outils pour la prise en compte de l'environnement dans les phases du processus de conception. 250
A.4 Exemple d'ébauche de modèle d'activité en UML, suite à l'enquête (support : questionnaire 4.2.4, appliqué à la société Quiksilver), dans le cadre de l'ANR Convergence . . . 259
A.5 Exemple d'helpers utilisés pour définir la transformation permettant le calcul de la masse . . . 265
A.6 Illustration d'une règle de calcul établie dans le cadre du projet NTR. . . . 265
A.7 Illustration d'une règle de calcul établie dans le cadre du projet NTR . . . 266
A.8 Présentation du dossier de restitution de la cartographie issue de l'enquête effectuée au sein de Quiksilver, ANR *Convergence* . . . 271
A.9 Exemple d'éléments de la cartographie issue de l'enquête effectuée au sein de Quiksilver, ANR *Convergence* . . . 272
A.10 Exemple d'éléments de la cartographie issue de l'enquête effectuée au sein de Quiksilver, ANR *Convergence* . . . 273
A.11 Exemple de méta-modèle des données de sortie de l'activité de CAO 274
A.12 Exemple de méta-modèle des données de sortie de l'activité de choix des matériaux . . . 275
A.13 Exemple de méta-modèle des données de sortie de la logistique 275
A.14 Exemple de méta-modèle des données d'entrée de l'activité d'analyse environnementale de type Analyse du Cycle de Vie [ISO(2006)] 276
A.15 Exemple de méta-modèle des données de sortie de l'activité d'analyse environnementale de type Analyse du Cycle de Vie [ISO(2006)] 277
A.16 Arborescence des critères vis-à-vis du Capital Humain 280
A.17 Apport de la thèse sur les indicateurs du Capital Humain 281
A.18 Arborescence des critères vis-à-vis du Capital Organisationnel 282

A.19 Apport de la thèse sur les indicateurs du Capital Organisationnel 283
A.20 Arborescence des critères vis-à-vis du Capital Informatique (évaluation d'une application) 284
A.21 Apport de la thèse sur les indicateurs du Capital Informatique 285
A.22 Arborescence des critères vis-à-vis du Capital Savoir (évaluation par segment) 286
A.23 Apport de la thèse sur les indicateurs du Capital Savoir 287
A.24 Arborescence des critères vis-à-vis du Capital naturel. 288

Glossaire

activité	Association d'un métier (une personne ayant des connaissances techniques) et l'utilisation d'outils ou de méthodes relatives à ce métier	48
ACV	Analyse du Cycle de Vie	71
API	*Domaine informatique*, pour *Application Programming Interface*, une interface de programmation fournie par un programme informatique. Ensemble de fonctions, procédures ou classes mises à disposition par une bibliothèque logicielle, un système d'exploitation ou un service. *L'API permet par exemple d'extraire des informations contenues dans un fichier au format propriétaire et de les exporter dans un langage lisible par une autre application.*	99
ATL	Atlas Transformation Language	97
BOM	Bill Of Material, nomenclature produit	100
CAD	Computer Aided Design, conception assistée par ordinateur	69
CAM	Computer Aided Management, management assisté par ordinateur	69
cartes de correspondances	*Domaine informatique*, définition de la transformation entre méta-modèle(s) source(s) et méta-modèle(s) cible(s)	115
CDC	Cahier Des Charges	210
concepteur	Terme général d'un métier de la conception, de toutes expertises confondues	113
connaissance	Interprétation d'une information par un humain, dans un contexte donné	57

directive	*Texte de loi*, lie tout Etat membre destinataire quant au résultat à atteindre, tout en laissant aux instances nationales la compétence quant à la forme et aux moyens	34
donnée	Description des plus élémentaires d'une réalité	57
DTE	*Design To Environment*, concevoir pour atteindre un objectif d'éco-efficacité des produits	82
dynamique	S'adapte aux changements au cours du temps pour assurer les échanges entre les entités du système (par exemple, échanges d'informations)	113
EMF	Eclipse Modeling Framework	97
ERP	Enterprise Ressource Planning	71
ET	Espace Technique	94
Evolutif	Appliqué aux contextes de mise en oeuvre de l'éco-conception, caractère changeant, sensible aux changements dans les contextes	113
FESTivE	*Federate EcodeSign Tools modEls*, méthode développée dans ces travaux de recherche, permettant de fédérer les outils d'analyse environnementale avec les outils des concepteurs.	113
fédération	*Domaine informatique*, type d'interopérabilité n'utilisant aucun format commun, basée sur un ajustement dynamique (utilisation d'une seule et même ontologie ou méta-méta-modèle)	113
global	Niveau transversal permettant la gestion des impacts collatéraux des différents choix effectués par les différents métiers du niveau *local*, au cours du processus de conception	113
ICV	Inventaire du Cycle de Vie, ensemble des données de modélisation du cycle de vie du produit. Sert à la réalisation d'un ACV.	100
IDM	*Domaine informatique*, Ingénierie dirigée par les modèles, issue de l'évolution de l'ingénierie dirigée par les objets ; définition de relations et méthodes entre les méta-modèles	94
information	Une donnée (ou ensemble de données) qui a du sens	57
informatique	Traitements automatiques d'informations	92

interopérabilité	Capacité de deux systèmes à échanger des informations et à les utiliser	95
Knowledge Management	Système d'initiatives, de méthodes et d'outils destinés à créer un flux optimal des connaissances pour le succès de tous les participants [Mercier-Laurent(2011)]	58, 69
LCC	Life Cycle Cost	179
local	Niveau d'action de chaque activité métier ne nécessitant pour opérer au cours du processus de conception, qu'un cahier des charges et ayant pour objectif de générer un ou des choix (par exemple de conception).	113
maquette	Utilisé en informatique, simule le fonctionnement du logiciel avec des données fictives pour tests rapides de fonctionnement ; fonctionne souvent sur un outil logiciel différent de celui qui sera utilisé	132
MDA	Model Driven Architecture	94
MDE	Model Driven Engineering	94
modèle	Abstraction de la réalité visant à en permettre la compréhension.	92
MOF	Meta Object Facility, pyramide de méta-modélisation	94
méta-modèle	*Domaine informatique*, modèle du modèle, définissant la structure, le langage du modèle	92
OMG	Object Management Group	92
ontologie	*Domaine informatique*, du grec *ontologos* ensemble structuré de concepts relatifs à un domaine ; spécification explicite d'une conceptualisation [Paviot(2010)]	94
PDM	Product Data Management, management des données produit	69
PEP	Profils Environnementaux des Produits	98
PLM	*Product Lifecycle Management*, approche transversale pour créer, gérer, disséminer des informations aux différents services de l'entreprise, ou aux partenaires associés (les ingénieurs, marketing, achat, logistique, production, après vente, etc.)	71

Pro-activité	Capacité d'anticiper les besoins d'une tierce personne et de pouvoir y répondre le plus efficacement possible	185
prototype	Utilisé en informatique, version incomplète ou intermédiaire d'un logiciel pour tester l'utilisabilité du produit auprès des utilisateurs ; utilise des données et outils logiciels réels de l'entreprise ; le programme fonctionne mais est non optimisé	133
règlement	*Texte de loi*, d'application immédiate (publié au journal officiel de l'Union européenne)	34
Réactivité	Capacité à répondre rapidement et d'une manière adaptée à un stimulus	185
Spirale	Méthode de développement de type Agile, fondée sur des cycles itératifs courts, centrée sur l'utilisateur	113, 120
sémantique	*Domaine informatique*, représentation mentale d'une chose ; le domaine sémantique est l'activité ou la discipline dans laquelle un mot est utilisé avec un sens donné [Paviot(2010)]	92
UML	Unified Modeling Language	92
web sémantique	*Domaine informatique*, associe les techniques de l'analyse statistique, du traitement de la langue, de la modélisation de connaissances et celles de l'apprentissage automatique [Mercier-Laurent(2011)]	59
XML	Extensible Markup Language, *langage texte avec des balises*	94

Chapitre 1

Introduction générale

"*Notre civilisation se détruit parce qu'elle s'est conçue comme devant transgresser toutes les limites dans tous les domaines*"
Dominique Bourg, 2007

L'homme du XXe siècle naît dans un monde paradoxal. De toutes les époques du monde, jamais autant d'objets techniques, d'énergie, de capacités de mouvements et de connexions n'ont été aussi présents sur terre. Les modes de vie dominants des sociétés occidentales tentent de renforcer l'idée que l'être humain se réalise en consommant : émancipation de l'être par la consommation [Debord(1996), Baudrillard(1996), Klein(2003)]. Au même moment, des crises multiples apparaissent à tous les niveaux de la société et des sociétés (crise économique, crise environnementale, crise sociale, crise politique, etc.) [Bourg(2011), Latouche(2001)]. Chaque rapport d'évaluation du climat du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) fait l'objet d'un résumé technique et d'un résumé à l'attention des décideurs, qui ne laisse aucun doute sur le basculement climatique que notre civilisation est en train de générer. Ces crises ne sont que la partie immergée de l'iceberg [Tanuro(2012)]. Les valeurs dominantes de notre société et le modèle économique qui soutient notre stratégie énergétique, ne semblent pas viables pour les prochaines décennies vis-à-vis du milieu naturel qui supporte notre existence [Jancovici et Grandjean(2007)].

Cette dichotomie entre ce que nous *savons* et ce que nous *faisons* renvoie à la *complexité* des crises actuelles, par nature inter-corrélées. "Ainsi, plus nous devenons indépendants, plus nous devenons dépendants du monde extérieur : c'est le problème même de la société moderne qui croit au contraire s'émanciper du monde extérieur en le dominant" [Morin(2007)]. Et il serait vain de croire qu'il existerait quelque part une solution complexe au problème complexe [Morin(2005)]. Notre salut se situerait plutôt à travers notre capacité à penser d'une manière systémique et à agir dans plusieurs directions [Rosnay(1977)].

La consommation renvoie à la conception et à la production. En quoi et comment nos modes de production doivent être remis en question ? Elle renvoie également à celle des consommateurs. Pouvons-nous faire évoluer le statut de consommateur, en consom'ac-

teur ? Lutter contre le *mythe de l'abondance* [Ariès(2011)] ? Il existe des voies pour que cette société de crises aille vers une *société sobre et désirable* [Bourg et Papaux(2010)], en passant par le concept du **développement durable**[1], de **l'entreprise responsable** et de **l'éco-conception**. **C'est sur le terrain de l'éco-conception pour les industriels, que se positionnent nos recherches.**

Depuis l'introduction du *développement durable* dans la société [Brundtland(1987)], **l'industriel intègre petit à petit dans ses pratiques la dimension environnementale** pour répondre aux législations en vigueur. Au sens large, la prise en compte de l'environnement est l'anticipation à toutes les phases du cycle[2] des différents impacts potentiels causant des dommages sur les écosystèmes. Les dommages les plus connus sont le phénomène de basculement climatique[3] et la diminution de la couche d'ozone. Les différents niveaux opérationnels de l'entreprise en sont impactés (schématisé sur la Fig 1.1). Le niveau stratégique concerne les dirigeants. Le niveau tactique concerne les chefs de service ou de département. Enfin, le niveau métier concerne toutes les expertises intervenant sur des aspects techniques du produit pendant son processus de conception. C'est sur ce dernier niveau que nos travaux de recherche entendent apporter une contribution. Nous faisons l'hypothèse que la stratégie et la tactique de l'entreprise s'inscrivent dans une perspective globale de prise en compte de l'environnement. *Dès lors, comment aider la déclinaison de la tactique et de la stratégie au niveau des métiers de la conception ?*

FIGURE 1.1 – Vers une approche "de bas-en haut" des travaux de recherche contribuant au niveau métier de l'opérationnel dans une perspective de déploiement global de l'environnement en entreprise

1. Le terme original anglais de "Sustainable Development" [Brundtland(1987)] est traduit par *développement durable* ou *développement soutenable* en français.

2. Par exemple, la phase d'utilisation (consommation d'énergie, de matière première) ; la phase de fin de vie (recyclage, filières de valorisation), etc.

3. [Tanuro(2012)] montre que l'expression "changement climatique" est mal choisie car "elle suggère une modification progressive, analogue à celle que la Terre a pu connaître au long de sa longue histoire". Or, la situation que nous vivons est différente, car elle ne suit pas les mêmes étapes et est beaucoup plus brutale. L'auteur propose donc d'utiliser les terme de "basculement climatique".

La prise en compte de la dimension environnementale au niveau des métiers de la conception

Il existe autant de mises en oeuvre de l'éco-conception qu'il existe de niveaux d'approche et de contextes (échelles, niveaux dans l'entreprise, domaines technologiques, produits, etc.). Ces travaux se positionnent au niveau des métiers opérationnels. Nous aborderons donc la **notion d'éco-conception du point de vue du concepteur et de ce que cela implique dans sa pratique (organisation, outillage, connaissance)**. La dimension environnementale s'ajoute au triptyque *qualité-coût-délais*.

De nos jours, "la conception est une activité liée à un contexte donné, impliquant des artefacts, des personnes, des outils, des processus, des organisations. Chacune de ces facettes implique une discipline spécifique, qui a ses propres méthodes de recherche et ses propres paradigmes et hypothèses fondamentales" [Blessing et Chakrabarti(2009)]. L'objectif de la conception en entreprise est de concevoir un produit en générant un ensemble de documents et de modèles nécessaires à son développement, à partir d'un besoin, d'une idée de produit, de technologies, tout en satisfaisant l'ensemble des parties prenantes et les contraintes connexes. De plus, l'activité de conception nécessite la prise en compte de différents niveaux temporels. Elle doit se projeter dans chacune des phases du cycle du futur produit. Concevoir un produit relève d'un ensemble de suppositions. En quelque sorte, c'est parier sur l'avenir [Simon(1981)]. L'introduction d'un nouveau produit sur le marché a des conséquences difficilement prévisibles. La fin de vie du produit, par exemple, dépend fortement du contexte social, des structures de valorisation en place au moment où cet objet devra être retraité, et est à la merci du détenteur de cet objet. Au niveau des molécules chimiques, nous avons des difficultés à modéliser leur interaction dans les milieux naturels (l'effet *cocktail* bien connu des pharmaciens) [Nghiem(2010)]. Et [Pahl et Beitz(1996)] d'affirmer que la conception impacte à peu près toutes les sphères de la vie humaine. La conception est donc une activité collaborative multi-contraintes soutenue par un Système d'Information (SI) suffisamment complexe pour que le tout puisse être qualifié de complexe. Nous utiliserons le terme de *système complexe d'ingénierie*.

Dans ce contexte, l'éco-conception trouve sa place dans l'ingénierie collaborative du cycle de vie. Cela nécessite en outre une approche systémique. L'objectif est de modéliser l'ensemble des phases du cycle du produit (de l'extraction des matières premières à la remise en circulation de ces flux) afin de prévoir et donc de limiter les impacts potentiels sur l'homme et sur l'environnement en utilisant une batterie d'indicateurs différents.

Dès lors, "**comment permettre aux concepteurs de collaborer efficacement, par des échanges d'informations et de connaissances supportés et intégrés d'une manière adaptée, avec le métier d'expert environnement, quel que soit le contexte du projet de conception ?**"

Cette question nous amène à nous positionner sur trois hypothèses. Tout d'abord, *la dimension environnementale est a intégrer au coeur des activités métiers intervenant dans le processus de conception*. Ensuite, *il est nécessaire de s'adapter aux contextes évolutifs de la prise en compte de la dimension environnementale*. Enfin, *le Système d'Information doit pouvoir gérer les échanges d'informations spécifiques entre l'activité d'analyse environnementale et les autres activités métier*.

Situation actuelle présentée dans l'état de l'art

A un niveau d'analyse générale, nous constatons que les concepteurs sont plus souvent réactifs que pro-actifs pendant le processus de conception, malgré les outils et méthodes collaboratives qui existent et se développent. Nous définissons la pro-activité comme la capacité d'anticiper les besoins d'une tierce personne et de pouvoir y répondre le plus efficacement possible. Alors que chaque concepteur intervenant au cours du processus de conception a un rôle d'expertise complémentaire aux autres (connaissances et outils), ce manque d'anticipation et cette réactivité, freinent l'intégration des critères que chacun défend dans les prises de décision et en particulier le critère environnement.

Concernant notre première hypothèse, l'observation des situations industrielles et l'étude de la littérature scientifique montrent que l'intégration de l'environnement doit avoir lieu en continu et au plus tôt pendant le processus de conception. Dans les faits, elle arrive bien souvent tardivement [Dewulf(2003)]. Ce retard a de nombreuses causes, notamment celles relatives aux triptyques *outils-données-connaissances* :

- un manque de données disponibles sur le produit (surtout dans les phases amont du processus) et un manque de moyen pour les obtenir.
- un manque de connaissances : l'absence de personnel formé freine la collaboration entre les différents experts métiers.
- un manque d'outillage adapté : les outils d'éco-conception sont trop compliqués, spécifiques ou mal adaptés pour les concepteurs non experts.

Or, une prise en compte trop tardive de la dimension environnementale lors du processus de conception engendre pour un même coût de conception une incapacité à innover radicalement [Tyl(2011)]. Le changement n'est qu'incrémental [Millet(2003)]. Ainsi, au niveau opérationnel, l'éco-conception devient synonyme de contrainte forte et est source de tension entre les concepteurs et l'expert environnement (s'il en existe un). D'autant plus qu'un manque de connaissance environnementale partagée peut jouer à la défaveur de ce dernier. Les parties prenantes intervenant au cours du processus ne partagent pas toujours la même définition du cycle de vie du produit [Brissaud et al.(2006)]. Cette notion est pourtant centrale. Pour éviter les conflits, des actions peuvent être menées au niveau transversal ou *global* de l'expert environnement, ainsi qu'au niveau *local* du concepteur.

Notre seconde hypothèse, nous amène à considérer plus finement le contexte dans lequel est réalisée l'analyse environnementale au cours du processus de conception. Ce contexte est changeant. Le déploiement des outils et méthodes d'éco-conception devrait pouvoir s'adapter aux changements et être utilisés de manière complémentaire entre le niveau local et global.

Ceci nous amène à considérer notre troisième hypothèse. Les échanges d'informations entre l'activité d'analyse environnementale et les autres activités métier ne sont pas toujours supportés de manière efficace par les systèmes informatiques. Or, l'analyse environnementale demande de compiler au plus tôt les données sur le produit relatives aux choix de tous les concepteurs. Les problèmes d'interopérabilité [4] entre les outils supportants les activités métier limitent considérablement les échanges de données relatives au produit. Pourtant nous constatons que des solutions d'interopérabilités moins présentes

4. En informatique, l'interopérabilité est la capacité de deux systèmes à échanger des informations et à les utiliser.

sur le marché permettent d'améliorer ces échanges.

Ces solutions informatiques nous permettraient-elles d'atteindre un certain idéal de ce que nous imaginons comme facilitant la pratique de l'éco-conception au niveau des métiers ? A quel idéal faisons-nous référence ?

Situation idéale : un processus de conception favorisant la pro-activité pour intégrer la dimension environnementale ?

Une condition nécessaire à la conception de produits éco-conçus en industrie ne serait-elle pas la capacité de pro-activité des acteurs intervenant dans le processus de conception ?

Les concepteurs seraient *pro-actifs* s'ils avaient la capacité d'échanger des informations avec l'expert environnement de manière dynamique et cohérente avec ses besoins. Ce dernier aurait la capacité de leur répondre de manière adaptée à leur expertise respective et de déployer les outils d'analyse environnementale selon les contextes qui s'offriraient à lui. Dans cet idéal, un pilotage de la prise en compte des aspects environnementaux, reliant le niveau stratégique au niveau opérationnel, définirait les méthodes adaptées pour répondre aux objectifs, en fonction des ressources internes au processus. Ainsi, méthodes et outils environnementaux seraient choisis en fonction du contexte, le tout dans un système cohérent avec la stratégie globale environnementale de l'entreprise.

Verrous contextuel, technique et d'intégration

En réalité, un certain nombre de contraintes s'opposent à l'incarnation de cet idéal. Notre analyse de l'existant nous amènera à considérer trois verrous majeurs : le verrou *contextuel*, le verrou *technique* et le verrou *d'intégration*.

1. **Le verrou contextuel** est lié à l'absence d'une bibliothèque de modèles d'outils permettant de prendre en compte la dimension environnementale selon des critères contextuels.
2. **Le verrou technique** est relatif à l'incapacité du système d'information et des outils utilisés par les industriels à s'adapter aux contextes variés que nécessite l'éco-conception.
3. **Le verrou d'intégration** est inhérent à la confusion existante entre les deux niveaux *local* et *global*, à la rupture sémantique et à la rupture de relation de causalité entre les paramètres de conception *locaux* et les paramètres environnementaux *globaux*.

Ces trois verrous majeurs sur lesquels nous positionnerons le reste des travaux présentés dans cette thèse, contraignent aujourd'hui le processus de conception en le rendant réactif et peu adapté à une intégration effective de la dimension environnementale en conception.

L'**objectif** de cette recherche est donc de lever ces trois verrous.

L'**hypothèse** principale est que l'interopérabilité de type fédérative[5], supportée par l'Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM), confère des propriétés pertinentes pour répondre à cet objectif.

5. [Paviot(2010)] introduit trois types d'interopérabilité : l'intégration, l'unification et la fédération.

Proposition

Notre **proposition** est de connecter dynamiquement les activités des concepteurs avec les activités d'analyses environnementales (outils et connaissances) en développant des transformations de modèles entre les activités des concepteurs et de l'expert environnement [Rio et al.(2011a), Rio et al.(2012a)]. Le critère de validation étant *in fine* la capacité ou non des concepteurs à concevoir d'une manière pro-active les produits. Pour ce faire, ces travaux proposent la **méthode FESTivE** déclinée en deux temps : le temps de création des modèles associés aux outils et des modèles de transformations des informations échangées entre les outils ; le temps d'utilisation des modèles d'outils afin de déployer un processus de conception favorable à l'intégration de la dimension environnementale (*ie.* dans lequel les concepteurs sont pro-actifs). Nous verrons que cette proposition confère trois propriétés fondamentales permettant de lever les verrous d'intégration, contextuel et technique [Rio(2012), Rio et al.(2012b), Rio et al.(2011b), Rio et al.(2010)].

Méthodologie de recherche développée pour mener ces travaux : expérimentations

Ce travail a été mené suivant *a Design Research Method (DRM)* qui a deux principaux objectifs selon [Blessing et Chakrabarti(2009)] : "*the formulation and validation of models and theories about the phenomenon of design, and the development and validation of support founded on these models and theories, in order to improve design practice, including education, and its outcomes*". Cet objectif d'amélioration d'une situation existante nécessite de décrire (ou modéliser) la situation actuelle (un système réactif), de modéliser notre idéal (un système pro-actif), et de définir un support qui a la capacité de changer la situation existante en situation idéale. Evaluer ce support consiste dès lors à mesurer l'écart entre l'idéal et la réalité une fois ce support utilisé, et ce en utilisant des indicateurs pertinents. Nous avons appliqué cette démarche dans deux cas d'études industrielles. Nos expérimentations ont été réalisées dans les entreprises Parkeon et Quiksilver.

Expérimentations de la proposition

Le premier cas d'étude montre que la proposition de recherche, à travers l'application de la méthode FESTivE, confère trois propriétés fondamentales. Ces propriétés permettent de lever les trois verrous identifiés à l'issue de l'état de l'art. Ce cas d'étude montre également que la méthode FESTivE que nous proposons est adaptée au milieu industriel et est utilisable par les concepteurs.

La seconde expérimentation met en évidence la complémentarité de deux systèmes collaboratifs favorisée par l'application de notre proposition. La collaboration est améliorée dans un cas par les échanges rapides et routiniers, dans l'autre cas par les échanges spécifiques et dynamiques. Enfin, cette expérimentation montre que la proposition (dont l'application de la méthode FESTivE) peut s'inscrire dans une démarche environnementale globale d'entreprise. Dans cette organisation, le niveau des métiers de concepteur entretient des liens cohérents et dynamiques avec les niveaux tactiques et stratégiques [Zhang et al.(submited)].

Domaines de la recherche

Représenté selon la *Design Research Method* [Blessing et Chakrabarti(2009)], le diagramme *Area of Relevance and Contribution - ARC diagram* (*cf.* Fig. 1.2), les travaux s'inscrivent dans le domaine de recherche en conception. Ce domaine peut être vu comme intégrant la recherche en éco-conception, qui elle-même contient la recherche en Analyse du Cycle de Vie.

L'originalité de ces travaux est de *contribuer* à améliorer la collaboration en conception vis-à-vis de l'intégration de la dimension environnementale, en faisant appel au domaine informatique, d'Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM, en développant des modèles de transformation d'informations).

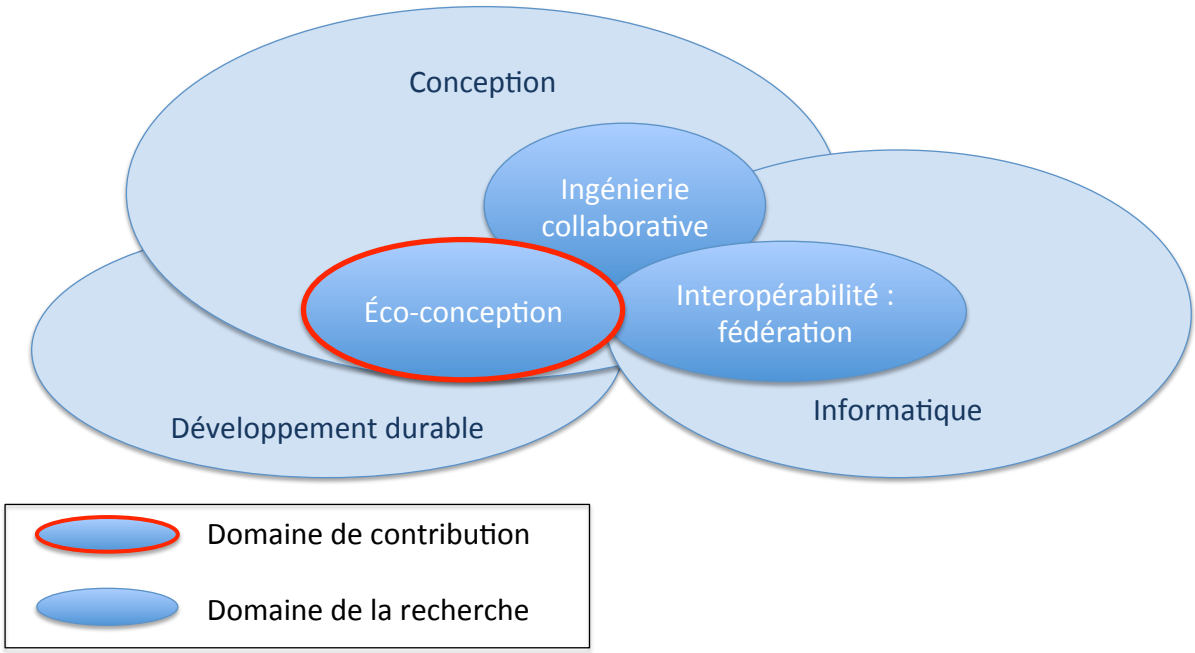


FIGURE 1.2 – ARC diagramme : domaines de la recherche et domaine de contribution d'après [Blessing et Chakrabarti(2009)].

Illustrés par la Fig. 1.3, nos travaux ont été réalisés en co-direction entre les laboratoires du Centre de Recherches et d'Etudes Interdisciplinaires sur le Développement Durable (CREIDD) de l'UTT et du Laboratoire des Sciences des Informations et des Systèmes (LSIS) des Arts et Métiers ParisTech à Aix en Provence, appartenant à deux communautés de recherche complémentaires. Le CREIDD se positionne sur les thématiques de l'éco-conception et de l'écologie industrielle. Le LSIS est plus centré sur le domaine de l'ingénierie collaborative, avec une composante informatique.

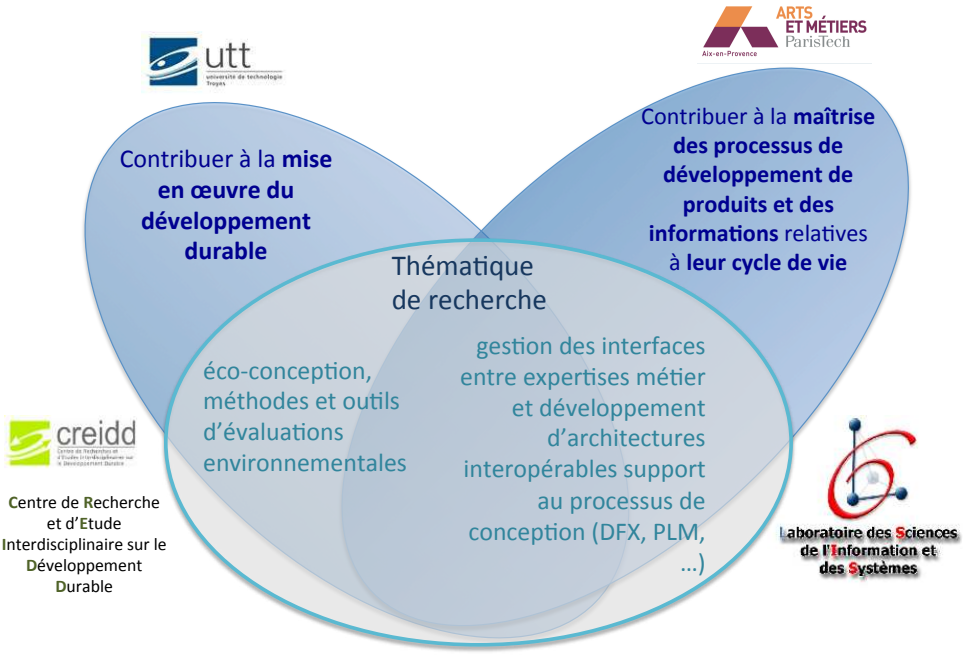


FIGURE 1.3 – Synergie des domaines de recherche des laboratoires de l'UTT et des Arts et Métiers ParisTech impliqués dans la recherche

Structuration du manuscrit

Ce manuscrit est scindé en cinq chapitres : introduction ; positionnement scientifique ; état de l'art ; proposition ; expérimentations et validation.

Le **chapitre deux** définit le positionnement scientifique de la thèse en soulignant les fonctions, ou hypothèses, permettant la mise en oeuvre pro-active par les concepteurs de l'éco-conception. Notre problématique de recherche consiste à nous demander *comment permettre aux concepteurs de collaborer d'une manière pro-active avec le métier d'expert environnement. Cette collaboration permettrait des échanges d'informations et de connaissances, supportés et intégrés d'une manière adaptée quelque soit le contexte du projet de conception.* Notre position est donc bien de nous intégrer au coeur du système d'ingénierie existant. Nous analyserons notamment les travaux réalisés dans cette discipline pour y intégrer d'autres domaines que l'environnement.

Le **chapitre trois** présentera l'état de l'art suivant les hypothèses définies par notre positionnement scientifique. Cette analyse de l'existant nous fera converger vers les trois verrous majeurs que nos recherches cherchent à lever : le verrou contextuel, le verrou technique et le verrou d'intégration.

Le **chapitre quatre** formulera une proposition pour répondre à la problématique en levant les trois verrous. Cette proposition est composée d'une méthode déclinée sur une partie création et une partie pratique : la méthode FESTivE. Sa mise en oeuvre apporte des modifications au système existant, afin qu'il confère trois propriétés fondamentales faisant lever ces verrous.

Le **chapitre cinq** aura pour objectif d'expérimenter sous deux cas d'étude la proposition. Puis de la valider par l'expérience et par l'exemple d'une approche "de bas-en haut".

Les deux expérimentations conduites sont fondées sur les cas d'étude industriels réalisés dans les entreprises *Parkeon* et *Quiksilver*. Ce chapitre nous amènera à conclure sur les apports opérationnels au niveau des métiers de la conception de notre proposition. Nous verrons que la proposition a la capacité d'entretenir des liens cohérents avec les niveaux stratégiques et tactiques de l'entreprise. Elle participe ainsi à une démarche globale de déploiement de la prise en compte de l'environnement en entreprise.

Enfin, nous présenterons un ensemble de perspectives de recherches envisageables à court et moyen termes, afin de déployer ces recherches dans d'autres travaux.

Chapitre 2

Positionnement scientifique de la recherche

"Celui qui voit un problème et qui ne fait rien fait partie du problème"
Gandhi

Ce chapitre a pour objet de positionner nos recherches dans le contexte scientifique actuel. Nous introduirons la montée du concept d'éco-conception à travers l'évolution de notre société, qui, entraînée dans un mode de consommation non viable à long terme, est amenée à concevoir différemment ses produits. Cela nous amènera à nous positionner au coeur des systèmes complexes d'ingénierie. Nous formulerons trois hypothèses principales sur lesquelles nous fonderons nos travaux. Ces hypothèses permettent aux concepteurs de collaborer efficacement par des échanges d'informations et de connaissances. Ces échanges sont supportés et intégrés de manière adaptée avec le métier d'expert environnement et ce quel que soit le contexte du projet de conception.

Ce positionnement vis-à-vis de la pratique de l'éco-conception dans l'ingénierie, guidera notre analyse de l'existant au chapitre suivant.

2.1 L'éco-conception pour les industriels

2.1.1 Constatation de changements globaux des éco-systèmes à l'émergence du concept du développement durable

De la fin du XVIIIe siècle, avec la création de la machine à vapeur, à aujourd'hui, l'essor du capitalisme industriel a permis de créer les fondements de notre société industrielle. Nous constatons ces dernières décennies [Rockström et al.(2009)] que les forts changements générés dans l'activité humaine s'accompagnent de changements globaux des éco-systèmes. Les courbes des flux consommés de matières et d'énergie présentées par [Steffen et al.(2004)] à travers des exemples proches de notre quotidien (objets, produits, services, etc., *cf.* Fig. 2.1), enregistrent toutes une variation quasiment similaire : une croissance suivant une courbe d'évolution de type exponentielle [1].

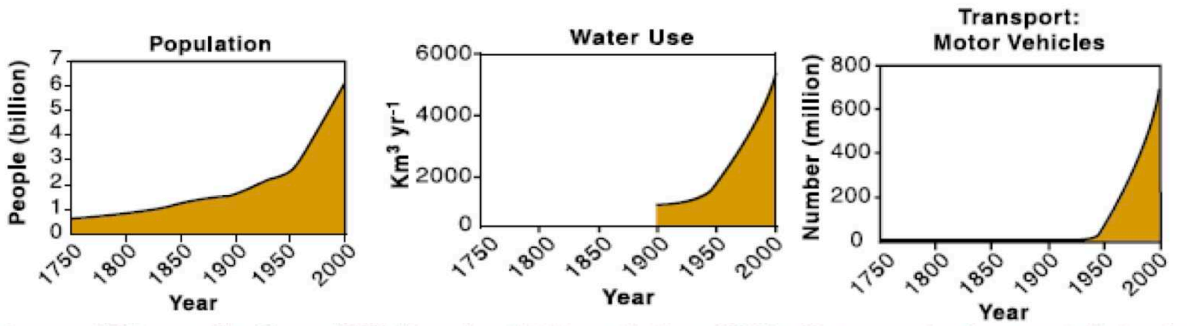


FIGURE 2.1 – Forts changements dans l'activité humaine depuis les débuts de l'ère industrielle

Augmentation exponentielle des activités et des flux supportants ces activités, depuis une soixantaine d'années, d'après le résumé de "*The Global Change and Earth System*" [Steffen et al.(2004)]

Plusieurs types de conception coexistent en industrie, notamment la conception en phase avec le paradigme néolibéral dominant : l'obsolescence programmée pour un renouvellement rapide des produits. En réponse à une certaine idée de la consommation des ménages, les fabricants ont développé depuis le début du XXe siècle, une stratégie combinée de réduction de la durée d'utilisation des produits [2] et d'un *marketing* adapté pour

1. Cette croissance vertigineuse des biens consommés par la population humaine ne signifie pas en revanche qu'ils sont accessibles par tous. L'écart des richesses se creuse aussi bien entre les pays du monde, qu'au coeur des nations [Cohen(1997), Passet(2000)].

2. Nous faisons la distinction entre la durée du cycle de vie et la durée d'utilisation du produit. Le cycle de vie du produit se termine par l'élimination physique du produit en tant qu'objet. Le produit

commercialiser le produit [3]. Les techniques commerciales actuelles utilisent des messages publicitaires [4], essayant de faire croire aux consommateurs qui veulent bien l'entendre, qu'il est nécessaire de suivre les évolutions des *tendances* et de la *mode*, qu'eux-même par leur acte d'achat contribuent à créer. Au milieu des années 1950, les changements de technologie accélèrent ces phénomènes d'obsolescence, des appareils électriques notamment [Bony(2006)]. Cette période marque également un nouveau cycle historique des économies de consommation [5]. Il suffit aujourd'hui d'observer le renouvellement des produits de la marque Quiksilver (cas d'étude présenté au chapitre 5.2) pour se rendre compte que nous avons frénétiquement perduré dans cette voie, bien qu'elle s'accompagne de modes de consommation alternatifs de plus en plus forts. [Lipovetsky(2003)] parle d'une société "hyper-matérialiste", étape supplémentaire de la marchandisation moderne des besoins et orchestrée par une logique désinstitutionnalisée, subjective et émotionnelle [6]. Certaines marques ne font quasiment pas de publicité sur leur produits mais cherchent plutôt à véhiculer un *style de vie* autour d'événements par exemple.

En conséquence de ces hausses de biens consommés, [Steffen et al.(2004)] constate de forts changements induits globalement sur les éco-systèmes (*cf.* Fig. 2.2). Aujourd'hui, un pan entier de la recherche en éco-conception développe des outils de mesure d'impacts à l'échelle du produit (par exemple [Tukker et Jansen(2006)]).

Ces changements globaux inquiètent de plus en plus les scientifiques qui mettent en garde les décideurs politiques. Nous constatons d'ailleurs la montée du concept du *développement durable* ces dernières décennies.

Emergence du concept du développement durable

Il est difficile de n'avoir jamais entendu le terme de **développement durable** tant il est médiatisé. Connu d'après le *rapport Brundtland* comme "développement qui assure la satisfaction des besoins essentiels des membres des générations actuelles, et tout particulièrement des plus démunis d'entre eux, tout en sauvegardant la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins" [Brundtland(1987)], il est souvent décliné en trois sphères qui sont l'environnement, le social et l'économie. Son interprétation fait néanmoins l'objet de nombreuses controverses. [Bourg(2007)] montre que *notre civilisation doit faire face à deux grands déséquilibres : la répartition inégale de la richesse planétaire et un changement global en matière d'environnement.* Comme l'explique [Buclet(2011b)] le rap-

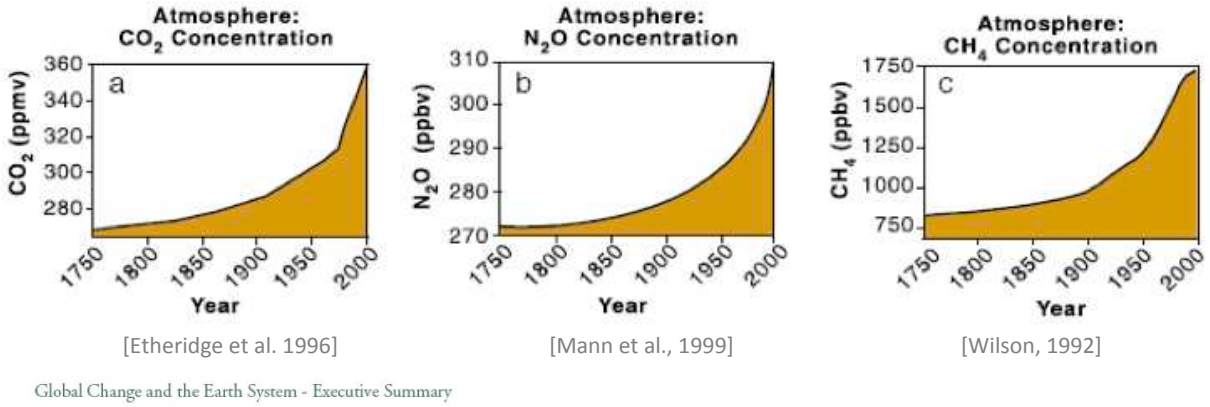
inutilisable, car cassé ou obsolète, s'il ne subit pas de réparation lui permettant de recommencer un nouveau cycle, est considéré comme à la fin de sa phase d'utilisation, mais pas de son cycle de vie. Dès lors, la "durée de vie" souvent affichée par les producteur n'est pas une durée de vie, mais une durée d'utilisation.

3. Jusqu'aux années 1880 avant la naissance des "grandes marques", les produits étaient "anonymes" [Lipovetsky(2003)].

4. Le neuro-marketing est d'ailleurs apparu récemment. L'objectif est de se servir des mécanismes de neurosciences pour favoriser l'achat du produit. Les supports publicitaires à panneaux roulants ou numériques, sont d'ailleurs fondés sur des résultats de sciences cognitives et comportementales. L'oeil humain est attiré par le mouvement, faisant que même si la source provient d'un côté du champ de vision, le cerveau cherche à analyser le message provenant de cette source.

5. L'après-guerre est marquée par une croissance économique forte, une élévation du niveau de productivité du travail et par une régulation "fordienne" de l'économie.

6. Nous voulons des objets "à vivre".



[Etheridge et al. 1996] [Mann et al., 1999] [Wilson, 1992]

Global Change and the Earth System - Executive Summary

FIGURE 2.2 – Changements globaux des éco-systèmes sous l'action des activités de l'Homme depuis les débuts de l'ère industrielle.

D'après le résumé de "*The Global Change and Earth System*" [Steffen et al.(2004)]

port Brundtland "n'est lui-même que le descendant d'une réflexion de plusieurs décennies, tant en matière de nécessité de protection de l'environnement qu'en ce qui concerne les inégalités dans le monde". Comme cela est présenté dans l'annexe A.1, il rappelle que la montée de ce concept et les termes employés ont eu lieu bien avant la publication de ce rapport. Il montre que ce "concept lui-même poursuit sa mutation insuffisamment stabilisée dans l'esprit des acteurs pour constituer un repère commun apte à une coordination efficace" [Buclet(2011b)].

Les fondements de ce concept justifient le positionnement de ces travaux de thèse. Nous faisons par là même référence à ce qu'il accompagne en terme de changement (notamment législatif) au niveau des Etats, et, par ricochet, au niveau des industriels.

2.1.2 Vers la pratique de l'éco-conception

L'évolution de la **prise de conscience en matière environnementale à l'échelle internationale**, s'est accompagnée en Europe par l'application des **directive**s européennes et des **règlement**s. Ils ont permis aux industriels de se familiariser avec ce concept. Surtout, ils ont favorisé l'émergence de la pratique de l'éco-conception. Maintenant, cette pratique constitue une obligation pour les entreprises, amenées parfois à dépasser l'aspect strictement réglementaire de la prise en compte de l'environnement.

2.1.2.1 Règlements et directives relatifs à l'environnement

Une **directive** *lie tout Etat membre destinataire quant au résultat à atteindre, tout en laissant aux instances nationales la compétence quant à la forme et aux moyens*[7]. Dans le cas des directives, les règles fixées par les institutions de l'Union Européenne sont transposées en droit national, parfois via des actes législatifs ou règlementaires.

Dans les années 1970 sont transposées les premières directives qui ont initié chez les industriels une réflexion sur les conséquences environnementales de leur produits. Ce fut

7. Article 288 du traité sur le fonctionnement de l'Union européenne.

le cas de la directive de 1975 (75/442/CEE) relative aux déchets, ou encore la directive de 1999 (1999/31/CE) concernant leur mise en décharge. La directive 2009/125/CE, relative aux produits liés à l'énergie (refonte de 2005) vise ainsi "à atteindre un niveau élevé de protection de l'environnement en réduisant l'impact potentiel sur l'environnement des produits liés à l'énergie, ce qui bénéficiera en définitive aux consommateurs et autres utilisateurs finaux". Elle rappelle que "l'amélioration de l'efficacité des produits sur le plan énergétique et sur celui de l'utilisation des ressources contribue à la sécurité d'approvisionnement énergétique et à la baisse de la demande de ressources naturelles, conditions préalables à une activité économique saine et donc au développement durable".

Dans un monde qui consomme de plus en plus de produits électriques et électroniques, la directive *DEEE*[8] a eu des conséquences non négligeables pour les fabricants de ces équipements. Cette directive responsabilise le fabriquant quant à la fin de vie de ses produits. Elle impose entre autre une collecte sélective, des traitements et autres formes de valorisation des DEEE. Par suite, la directive *RoHS*[9] limite l'utilisation de certaines substances dangereuses problématiques en fin de vie dans les équipements électriques et électroniques, comme le plomb, le mercure, le cadmium. Ces directives ont conduit les concepteurs à appliquer des méthodes de conception pour la fin de vie, voire à initier une démarche d'éco-conception et a fortement contribué au développement des "profils environnementaux" des produits (PEP). Ces derniers sont relatifs à l'affichage environnemental. En France, l'affichage environnemental est issu du Grenelle de l'environnement et est assez préoccupant pour les industriels (*cf.* référentiel de bonnes pratiques développé par l'Afnor : AFNOR BP X30-323-0). Sa mise en oeuvre a été considérablement retardée car elle soulève de nombreuses difficultés, notamment dans les analyses environnementales et sur la capacité des consommateurs non experts à comprendre et interpréter les analyses affichées.

La création de l'ERP pour *European Recycling Plateform* en 2002, marque un tournant dans l'application de la DEEE, puisqu'elle apporte une solution pratique pour que les industriels puissent effectivement la mettre en oeuvre.

Dans la même dynamique, nous pouvons citer l'exemple du secteur de l'automobile. Le constructeur d'un véhicule ou l'importateur professionnel d'un véhicule dans un État membre est concerné par la directive n° 2000/53/CE du 18/09/00 relative aux véhicules hors d'usage[10]. Elle fixe des exigences en matière de taux de recyclage et de valorisation (85% à 95%, du poids moyen par véhicule) et de limitations de certaines substances dangereuses dans les véhicules.

Autres outils législatifs, les **règlements** sont obligatoires dès leur publication. C'est le cas de la règlementation *REACH*[11] *pour Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals* qui limite et interdit l'utilisation de certaines substances chimiques dans l'industrie. Il remplace une quarantaine de directives européennes et de règlements existant depuis 1967. Il contraint directement les fabricants, les importateurs et les utilisa-

8. La Directive relative aux Equipements Electriques et Electroniques est la directive n°2002/96/CE du 27/01/03.

9. La RoHs est la directives n° 2011/65/UE du 08/06/11.

10. Entre 8 et 9 millions de tonnes de déchets sont produits chaque année par les véhicules hors d'usage dans la Communauté européenne (chiffres de 2000, relatifs à la directives VHU)

11. REACH est le règlement européen n°1907/2006 CE

teurs des substances chimiques répertoriées comme matière première dans la constitution des produits. Ils doivent les inventorier et prouver leur innocuité pour les humains et les éco-systèmes. Ce qui implique la réalisation d'études environnementales.

2.1.2.2 Conséquences pour les industriels

Nous allons résumer dans les trois paragraphes suivants, trois facettes de ces directives et règlements pour les industriels : une responsabilité élargie en tant que producteurs de déchets, une transparence dans les composants utilisés et une démarche d'éco-conception suggérée.

Une responsabilité élargie en tant que producteurs de déchets : la directive *REP*[12] pour Responsabilité Elargie des Producteurs responsabilise[13] les producteurs sur l'ensemble du cycle de vie des emballages[14] qu'ils conçoivent. .

Cette directive souligne que "les analyses du cycle de vie doivent être achevées dans les plus brefs délais afin de justifier l'adoption d'une hiérarchie précise entre les emballages réutilisables, les emballages recyclables et les emballages valorisables" [15]. Ce qui correspond à une démarche d'éco-conception. L'annexe II, concernant les "exigences essentielles portant sur la composition et le caractère réutilisable et valorisable (notamment recyclable) des emballages", peut s'apparenter à des lignes directrices pour éco-concevoir ces emballages. Comme l'illustre l'exigence suivante : "l'emballage sera fabriqué de manière à limiter son volume et son poids au minimum nécessaire pour assurer le niveau requis de sécurité, d'hygiène et d'acceptabilité aussi bien pour le produit emballé que pour le consommateur" (Annexe II [INERIS(1994)]).

Une plus grande transparence des composants utilisés par l'industriel : Avec REACH notamment, des moyens sont déployés par les producteurs et les importateurs de substances. L'objectif est d'éviter que ses conséquences ne représentent un coût trop important pour eux[16]. Avec REACH les substances chimiques ou certains composants doivent être traçabilisés, ce qui favorise un dialogue *fournisseurs-utilisateurs*,

12. REP est la Directive 2005/20/CE du 9 mars 2005, qui concerne tous types d'emballages et les tous types de déchets d'emballages mis sur le marché.

13. Nous pouvons noter que considérant "essentiel que tous les acteurs intervenant dans la production, l'utilisation, l'importation et la distribution des emballages et des produits emballés prennent davantage conscience de la place des emballages dans la production de déchets, et que, conformément au principe du "pollueur-payeur", ils acceptent d'en assumer la responsabilité, que l'élaboration et l'application des mesures prévues par la présente directive devraient comporter et exiger, le cas échéant, l'étroite collaboration de tous les partenaires dans un esprit de responsabilité commune"

14. D'après le code de l'environnement, un emballage est "tout objet, quelle que soit la nature des matériaux dont il est constitué, destiné à contenir et à protéger des marchandises, à permettre leur manutention et leur acheminement du producteur au consommateur ou à l'utilisateur, et à assurer leur présentation" (Article R543-43).

15. Site officiel de l'INERIS : http ://www.ineris.fr/aida/ ?q=consult_doc/consultation/2.250.190.28.-8.4489, Août 2012

16. Les coûts sont relatifs à l'analyse et les redevances des pré-enregistrements, au niveau de l'investissement humain déployé par l'industriel, mais aussi vis-à-vis de la confidentialité (renseignement des compositions chimiques exactes). Pour les industriels en aval, REACH peut entraîner des problèmes d'approvisionnement de produits plus ou moins stratégiques, suivant le monopole d'un fournisseur, engageant

voire pérennise leurs relations. Une connaissance plus approfondie de la constitution des sous-produits achetés permet à l'utilisateur de réaliser des analyses d'impacts environnementales. Nombreuses sont les analyses qui ne peuvent en effet aboutir par manque d'accès aux données relatives aux fournisseurs.

Une démarche d'éco-conception suggérée : la notion d'éco-conception apparaît plus clairement dans la directive n° 2009/125/CE du 21/10/09 "établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'éco-conception applicables aux produits liés à l'énergie" [17]. Face à la disparité entre les législations ou les mesures administratives adoptées par les Etats membres en matière d'éco-conception, cette directive a pour but d'harmoniser les exigences d'éco-conception applicables à tout produit significatif lié à l'énergie. Cette directive définit en ces termes, que "l'éco-conception des produits est un axe essentiel de la stratégie communautaire sur la politique intégrée des produits. En tant qu'approche préventive, visant à optimiser les performances environnementales des produits tout en conservant leur qualité d'usage, elle présente des opportunités nouvelles et réelles pour le fabricant, le consommateur et la société dans son ensemble". Elle rappelle également qu'il "convient d'agir au cours de la phase de conception du produit lié à l'énergie, puisqu'il s'avère que la pollution causée durant le cycle de vie d'un produit est déterminée à ce stade, et que la plupart des coûts associés sont engagés pendant cette phase".

La troisième partie de cette directive présente les exigences applicables au fabricant des produits concernés. Ce dernier doit s'approprier les techniques d'éco-conception, afin de :

- procéder à une évaluation environnementale tout au long du cycle de vie du produit qu'il fabrique et établir si possible le profil écologique ;
- proposer des améliorations de conception en terme de performances environnementales du produit.

Le fabricant doit aussi pouvoir **garantir la conformité de ses produits**, en présentant un dossier de documentation technique (Article 8). Ce dossier contient les résultats des "études d'évaluation de l'impact environnemental du produit effectuées par le fabricant et/ou des références à des ouvrages spécialisés ou à des études de cas d'évaluation de l'impact sur l'environnement utilisés par le fabricant pour évaluer, documenter et déterminer les solutions envisageables pour la conception du produit".

En résumé, l'industriel doit apporter des preuves de la conformité de ses produits. Ce qui nécessite pour lui la mise en place de méthodes et outils pour développer l'éco-conception de manière conforme. Par conséquent, les normes environnementales représentent une aide non négligeable pour les industriels. Elles permettent d'accompagner une démarche volontaire cadrée et certifiée.

par la même une vulnérabilité face à la fluctuation des prix et une incertitude sur l'autorisation de certains produits en cours de développement.

17. Refonte de la directive 2005/32/CE du Parlement européen et du Conseil du 6 juillet 2005.

2.1.2.3 Le management environnemental orienté produit

Les normes vis-à-vis du développement durable : l'approche de la norme ISO 26000 se veut une démarche globale pour accompagner l'entreprise dans l'intégration du développement durable en considérant ses trois piliers [ISO(2010)]. Pour chaque pilier, plusieurs exigences sont définies, ainsi que des lignes directrices pour les atteindre. Cette démarche aide à la fois l'industriel à définir une stratégie d'entreprise au niveau global, tout en déclinant ses actions aux niveaux "site" et "produit". Elle fonctionne suivant une logique d'amélioration continue (Plan-Do-Check-Act).

Les approches orientées "produit" sont cadrées dans les normes 14062, puis 14006, l'ISO 14020. Puis la série des normes ISO 14040 & 14044 : *Management environnemental - Analyse du Cycle de Vie : principes et cadre & exigences et lignes directrices* [ISO(2006)] donne des principes d'application. En outre, ces normes permettent de partager un référentiel commun, notamment au travers des définitions fondamentales dans le management environnemental. Par exemple, les aspects environnementaux sont les "élément des activités, produits ou services d'un organisme, susceptible d'interactions avec l'environnement" [ISO(2004)]. Et l'environnement est défini comme le "milieu dans lequel un organisme fonctionne, incluant l'air, l'eau, la terre, les ressources naturelles, la flore, la faune, les êtres humains et leurs interrelations [Note : dans ce contexte], le milieu s'étend de l'intérieur de l'organisme au système global" [ISO(2004)]. Ensuite, la norme ISO/TR 14062 :2002 (F) [ISO(2002)] définit l'impact environnemental par "toute modification de l'environnement, négative ou bénéfique, résultant totalement ou partiellement des activités, produits ou services d'un organisme".Ces impacts sont utilisés comme indicateurs de mesures dans certaines méthodes d'analyses environnementales utilisées par les industriels. Cette norme pédagogique (TR pour *Technical Report*) accompagne de manière pratique l'industriel dans sa démarche d'éco-conception. Enfin, de manière complémentaire, la norme NF X30-264, qui est en cours de validation, émane de l'initiative française pour l'aide à la mise en place d'une démarche d'éco-conception.

La norme spécifique aux produits mécaniques : l'XPE 01-005 [ISO(2009)] se positionne au niveau intermédiaire entre le management relatif à la stratégie d'éco-conception et le niveau opérationnel de l'activité des concepteurs. La démarche de la norme consiste à analyser quels sont les aspects environnementaux sur lesquels il est judicieux d'agir, puis propose des outils pour les métiers de la conception. Un résumé du fonctionnement général de la norme et de ses exigences est placé en annexe A.2. Plusieurs points sont remarquables, notamment la mise en correspondance d'outils environnementaux avec les outils classiques utilisés par les concepteurs. La norme propose également des indicateurs de suivi liés à des lignes directrices pour les concepteurs de différentes expertises (conception mécanique, matériaux). Ces deux points permettent de lier la stratégie déterminée par les aspects environnementaux prioritaires à l'activité des concepteurs.

2.1.2.4 Limites des normes

Ces normes relatives au *Système de Management Environnemental* (SME) au niveau produit définissent le cadre de mise en place d'une démarche d'éco-conception : définition des termes, démarche générale, exigences à atteindre. Les exigences sont suffisamment générales pour couvrir des secteurs différents. De fait, les lignes directrices seront nombreuses pour embrasser au mieux cette diversité de contextes industriels et pour qu'une part d'entre elles soient réellement interprétées. Aux industriels ensuite de définir une stratégie adaptée et de la mettre en pratique au niveau des métiers, par un choix d'outils qui ne sera pas toujours aisé à faire. De plus, nous verrons que plusieurs auteurs montrent que ces normes peinent aujourd'hui à décliner de manière dynamique les enjeux relatifs à cette intégration dans les niveaux stratégiques, tactiques et des métiers de l'opérationnel.

Ainsi [Reyes(2007)] met en évidence quatre déficiences majeures des approches SME : *l'omission de certains impacts environnementaux liés au produit*; *la variabilité des interprétations des lignes directrices en fonction des acteurs*; *le manque de description stratégique (définition des résultats à atteindre mais pas du "chemin" à suivre)*; *l'adéquation pour les PME/PMI*. Ces déficiences se comblent petit à petit, à mesure que les recherches et les pratiques évoluent. [Ammenberg et Sundin(2005)] montrait par exemple le manque de vision *cycle de vie* de ces approches. Et depuis 2011, l'approche orientée "site" cadrée par l'ISO 14001 [ISO(2004)] a évolué vers l'ISO 14006, permettant aux entreprises d'intégrer l'éco-conception au sein d'autres systèmes de management [ISO(2011)]. Autre exemple, concernant la précision des indicateurs liés aux trois piliers du développement durable pour les industriels, le Global Reporting Initiative (GRI [18]) [GRI(2000 2011)] travaille avec eux sur un référentiel d'indicateurs plus adapté.

La définition de la stratégie environnementale à suivre peut aussi s'inspirer d'approches différentes, comme celle du *Backasting* défendue par *The Natural Step* [19].
[Robèrt et al.(2002)] propose un *Framework for Strategic Sustainable Development* (FSSD) fondé sur le Backasting. Il offre un cadre "formant un double entonnoir" avec différents niveaux structurels (système, succès, stratégique, opérationnel, outillage). Les travaux de [Robèrt et al.(2002)] déterminent des principes fondateurs pour élaborer une stratégie d'entreprise cohérente et globale et pour permettre une adéquation entre les besoins des industriels et les outils à déployer [20]. Divers travaux sont élaborés dans cette approche de Backasting. Nous pouvons citer également les travaux de [Hallstedt(2008)], [Ny(2009)], [Hallstedt et al.(2010)] [Byggeth et al.(2007)]). Ainsi, [Ny et al.(2006)] définit des "Sustainability Principles", appelés SPs sur lesquels devrait se fonder le pilotage de la stratégie

18. Le GRI a été créé en 1997 et travaille notamment en association avec le PNUE pour développer les directives applicables dans le développement durable.

19. The Natural Step, http ://www.naturalstep.org/, Août 2012

20. [Byggeth et Hochschorner(2006)] présente une enquête sur 15 outils ayant pour objectif d'analyser leur capacité à faire des compromis, notamment entre les critères sociaux ou environnementaux. Les résultats montrent que 9 de ces 15 outils permettaient une évaluation quantitative ou qualitative afin de faire un compromis, mais comportant des lacunes en matière de stratégie. En effet, pour qu'un compromis soit possible, il faut que l'évaluation prenne en compte l'ensemble du cycle de vie et permette d'élaborer un plan stratégique vers une situation plus soutenable. Sinon, il en résultera des prises de décisions stratégiquement dangereuses comportant des risques concomitants, notamment en terme d'investissement. L'auteur propose alors de compléter ces 9 supports par un outil de planification stratégique pour un développement soutenable (MSPD).

de l'entreprise pour être soutenable. Cependant, pour certains auteurs, les principes du FSSD sont des conditions nécessaires mais non suffisantes à la mise en pratique d'une stratégie d'entreprise soutenable. [Buclet(2011b)] définit de nouveaux principes d'actions plus *sociétaux* que les principes environnementaux définis par ces auteurs. Il propose une gouvernance basée les principes de *capabilité*, de *proximité* et de *démocratie participative*.

2.1.2.5 L'éco-conception en pratique : synthèse des moteurs internes et externes

Ainsi les industriels sont contraints par la règlementation et par la pression sociale (face à la question du réchauffement climatique), mais également par la pression exercée par la clientèle [21] sur leur activité. [Reyes(2007)] caractérise ces pressions comme des moteurs externes à l'entreprise (*cf.* Fig. 2.3).

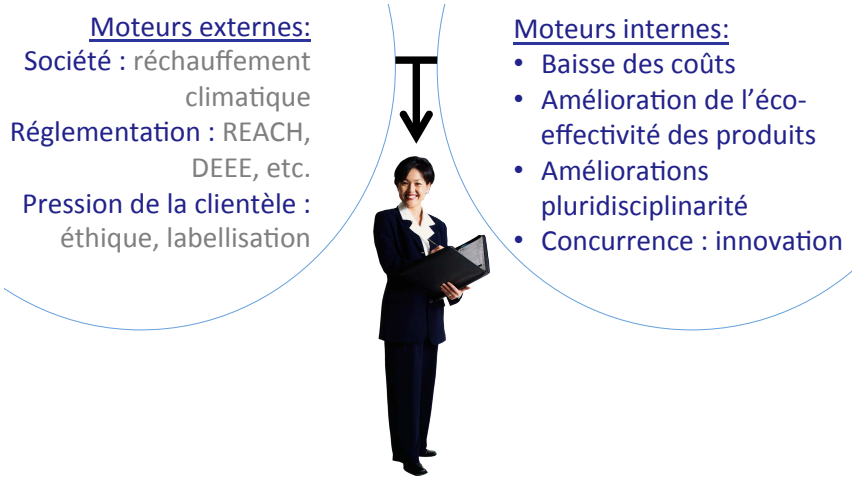


FIGURE 2.3 – Moteurs pour la pratique de l'éco-conception en industrie d'après [Reyes(2007)]

Une démarche d'éco-conception s'accompagne également de moteurs internes qui sont sans doute de nature plus motivante pour les industriels : l'amélioration de la qualité des produits, la motivation du personnel à l'origine d'initiatives, un atout face à la concurrence, une **amélioration de la collaboration et de la communication entre les services** et surtout, une **baisse des coûts** [Reyes(2007)].

Pour se convaincre du dernier point, la Chambre de Commerce et de l'Industrie (CCI) de Saint-Etienne a publié en 2008 un rapport [Berneman et al.(2009)] sur le retour économique des industriels [22] suite à une démarche d'éco-conception. Non seulement la baisse significative d'impacts sur l'environnement s'accompagne de profits sur les ventes de produits [23], mais elle s'accompagne également d'une **augmentation de la créativité du**

21. La clientèle peut attendre une labellisation spécifique des produits, mettre à jour un problème lié à l'éthique du personnel employé, etc.

22. Cette enquête s'est effectuée sur un échantillon de 30 entreprises réparties en France et au Québec

23. La marge bénéficiaire est positive dans la majorité des cas et seulement pour une minorité d'entreprises (moins de 10% sur l'échantillon des 30 entreprises) les ventes sont maintenues sans réduction des coûts.

personnel en interne, ainsi que d'une amélioration de la notoriété et de l'image de l'entreprise [Plouffe et al.(2011)]. Or, ce sont des facteurs qui renforcent également la motivation du personnel. L'ensemble constitue un **puissant vecteur d'innovation**.

Les industriels sont donc soumis à un ensemble de moteurs internes et externes, les invitant à mettre en place une stratégie de management environnemental, approche "site" et "produit", le problème est que ces approches peinent à être des démarches globale de mise en oeuvre du développement durable. La mise en oeuvre de l'éco-conception des produits devrait s'adresser en priorité aux concepteurs, intervenant au niveau opérationnel, en créant des liens cohérent avec la stratégie de l'entreprise.

2.1.3 Positionnement vis-à-vis de l'éco-conception

2.1.3.1 Pratique de l'éco-conception en cohérence avec la stratégie de l'entreprise

Stratégie et développement durable : d'après [Robèrt et al.(2002)], pour être soutenable l'entreprise doit développer une stratégie inscrite dans une perspective systémique de développement durable, combinant des outils et méthodes complémentaires. La stratégie doit être construite suivant cinq niveaux hiérarchiques vérifiant : les principes *constitutifs* du système (socio-environnementaux, etc.) ; les principes garantissant l'obtention de *résultats* favorables planifiés ; les principes pour que le *processus* atteigne ces résultats ; des *actions mesurables et concrètes* ; et enfin, des *outils appropriés* pour la mise en pratique de ces actions et permettant de mesurer le statut du système à un moment *(t)*.

[Baumann et al.(2002)] en étudiant plus de 650 articles en lien avec la dimension environnementale[24] montre qu'il y a trop peu de correspondance entre les intentions et la réalité stratégiques de l'entreprise en matière environnementale. Les approches *top-down* et *bottom-up* n'arrivent pas à se rejoindre en matière de *business*. Les auteurs s'étonnent notamment du manque de recherches réalisées dans une perspective plus large que le processus produit : par exemple, en prenant en compte l'entreprise étendue (dont la stratégie peut dépendre de son territoire). Ils insistent sur la nécessité d'adopter une perspective systémique. D'autant plus que lier les perspectives de l'entreprise à celles du territoire (ou d'autres périmètres d'action), est un levier intéressant du développement de projets environnementaux d'ampleur plus vaste et drainant plus de moyens.

Une tactique appropriée : [Zhang et Zwolinski(2012)] montre qu'au niveau du management de l'entreprise, il existe peu de méthodes croisant d'une manière systémique

24. Les articles étudiées présentent plus de 150 méthodes et outils couvrant les domaines de l'ingénierie, du management et de la législation

toutes les activités impactées par l'utilisation des outils environnementaux. Si la dimension environnementale touche l'ensemble des sphères de l'entreprise, les méthodes de management doivent dépasser la vision purement "ingénierie" en prenant en compte la contribution potentielle de tous les autres services supports (logistique, production, innovation, marketing, etc.). Les auteurs définissent ainsi deux axes d'éco-activités devant communiquer pour croiser leurs besoins : celui contribuant à la performance globale de l'entreprise et celui contribuant aux besoins en matière d'éco-conception à travers chacune des phases du cycle de vie du produit.

Le niveau stratégique combiné au niveau tactique : nécessite la mise en correspondance des indicateurs des différents niveaux, notamment pour pouvoir juger des bénéfices des méthodes engagées par l'entreprise, comme le souligne [Herva et al.(2011)]. Cette publication catégorise les indicateurs environnementaux de processus et de produits en indicateurs : de flux d'énergie et de matériaux, à dimension territoriale, d'analyse du cycle de vie et de risques environnementaux. L'entreprise ne mesure pas ses bénéfices à l'aide d'indicateurs environnementaux. Il faut donc au niveau de l'organe décisionnel de l'entreprise, une autre batterie d'indicateurs harmonisés sur les calculs d'actifs, notamment de nature extra-financière. Le thesaurus Bercy, par exemple [Fustec et al.(2011)], présenté plus en détail section 5.3.2, fournit un référentiel de mesure du capital immatériel des entreprises.

L'intégration du développement durable d'une manière cohérente dans les niveaux stratégiques, tactiques et opérationnels de l'entreprise, est l'enjeu du projet de l'ANR *Convergence* que nous présenterons au chapitre 5.2 lors de la seconde expérimentation conduite dans nos travaux de recherche.

L'application au niveau opérationnel : du niveau tactique qui définit les outils ou méthodes environnementaux à déployer pour répondre à la stratégie [25] concerne l'activité de conception. Nous avons vu par exemple que la norme [ISO(2009)] (annexe A.2) propose une mise en correspondance d'outils traitant des aspects environnementaux avec les outils de conception utilisés par les concepteurs pour couvrir plusieurs aspects du produits définis comme prioritaires par la tactique. Les données pouvant être échangées au niveau des outils ne sont en revanche pas explicités de manière précises. Il n'est pas non plus précisé quel type de système d'information pourrait permettre de lier ces outils, afin de générer les documents spécifiés dans la norme.

2.1.3.2 Objectifs des travaux en matière d'éco-conception

[Mercier-Laurent(2011)] introduit la notion **d'e-co-innovation** : "avec un e- comme écologique, respectant les écosystèmes, économique, éducative, éthique et électronique ; co- comme collaborative, basée sur les connaissances actuelles mais aussi les anciennes, facilitant une convergence d'intelligences, concrète, commercialisable et permettant la création de nouvelles compagnies à partir des idées nées dans cet environnement. Elle est le résultat d'une intelligence collective pouvant s'exercer aussi à distance grâce à la

25. [Baumann et al.(2002)] montre notamment que l'organisation et le système de management sont plus importants que l'existence d'outils.

La pratique de l'éco-conception nécessite l'intégration des paramètres environnementaux issus de la tactique et en lien avec la stratégie de l'entreprise, dans les activités des concepteurs par les outils et les connaissances qu'ils manipulent.
Questions : Comment améliorer les échanges d'informations entre les outils différents aux formats différents ? Comment faciliter la communication entre les concepteurs ayant des connaissances différentes ?

technologie". Cette définition montre que l'éco-conception a trait aux valeurs de la société (à l'intelligence collective, par l'éducation notamment) et étend son périmètre d'action au niveau du système industriel. [Millet(2003)] positionne les différents concepts impliqués dans l'éco-conception en fonction du niveau d'intégration de l'éco-conception des produits. Il définit trois niveaux ou degrés de réductions d'impacts visés : *faible* (local), *moyen* (filière produit) et *fort* (écosystème industriel). Ces niveaux correspondent respectivement à *l'éco-conception partielle, l'éco-conception classique* et *l'éco-conception innovante*. Ce troisième niveau se situe dans le champ de ce que [Brezet et van Hemel(1997)] définit comme *l'innovation système*. Il nécessite l'investissement de l'ensemble de la société vers un changement culturel permettant d'atteindre une certaine "durabilité" de la société.

Dans nos travaux, nous pensons que si la pratique de l'éco-conception devait seulement aider les industriels à répondre aux pressions internes et externes auxquelles ils sont soumis, cela reviendrait à ajouter de nouvelles contraintes en conception. Dans ce cas, pourquoi ne pas simplement employer le terme de *conception* ? La pratique de la conception évolue avec la société et l'environnement naturel qui la supporte, rajoutant depuis des décennies de nouvelles contraintes plus ou moins importantes.

Idéalement, la conception pourrait être vecteur de changement dans la société. C'est en cela qu'engager une démarche d'éco-conception innovante au sens de [Millet(2003)], consisterait à anticiper les normes et règlements pour participer à la construction d'une société plus soutenable. Nous pensons que cette capacité d'anticipation des industriels peut être facilitée par le développement d'outils et méthodes pour pratiquer la conception (incluant l'éco-conception). C'est pour cette raison que nous donnons comme objectif à nos recherche de faciliter l'appropriation et la mise en oeuvre de ces méthodes et outils.

Objectif des recherches en matière d'éco-conception : faciliter l'appropriation et la mise en oeuvre des méthodes et outils permettant de prendre en compte la dimension environnementale en conception

Conclusion sur le positionnement vis-à-vis de l'éco-conception

En conclusion de cette première section, nous avons constaté que l'éco-conception concerne aujourd'hui les industriels, motivés et contraints à la fois par un ensemble de

facteurs qui les poussent à adopter une démarche environnementale, dans une perspective de développement durable. Malgré les outils existants, cette démarche peine à mettre en cohérence ses niveaux "site" et "produit" pour engager une démarche systémique où la stratégie, la tactique et le niveau opérationnel fonctionnent en synergie.

Nous donnons donc comme objectif général à nos recherches de faciliter l'appropriation et la mise en oeuvre des méthodes et outils d'éco-conception par les concepteurs. Cet objectif s'inscrit dans une démarche globale d'intégration du paramètre environnement au niveau opérationnel des métiers de l'entreprise, en cohérence avec sa stratégie et sa tactique.

Nous allons donc nous concentrer dans cette deuxième section sur le contexte spécifique des concepteurs impliqués dans le processus de conception des produits pour nous y positionner : les systèmes complexes d'ingénierie. Pour chacune des facettes de la dimension environnementale abordées précédemment, nous allons formuler des fonctions qui nous semblent essentielles à vérifier pour répondre à notre objectif général.

2.2 Les systèmes complexes d'ingénierie

Le dictionnaire Larousse[26] donne la définition de l'ingénierie comme le nom féminin de l'ingénieur (engineering), qui signifie au sens large "l'étude d'un projet industriel sous tous ses aspects (techniques, économiques, financiers, monétaires et sociaux) et qui nécessite un travail de synthèse coordonnant les travaux de plusieurs équipes de spécialistes". Pour leur part, [Blessing et Chakrabarti(2009)] définit la conception "*as a complex, multi-faceted phenomenon, involving : people, a developing product, a process involving a multitude of activities and procedures ; a wide variety of knowledge, tools and methods ; an organization ; as well as a micro-economic and macro-economic context*". Cette définition ouvre à de nombreuses notions qui sont reliées à des domaines de recherche à part entière. Pour restreindre ces champs d'investigation, rappelons que nous avons positionné nos recherches au niveau opérationnel à l'échelle des métiers impliqués dans le processus de conception. C'est-à-dire dans la sphère applicative de la tactique définie par les chefs de département ou de service. Nous chercherons donc dans cette section à apporter une vision schématique de l'activité de conception, telle qu'elle se pratique aujourd'hui sous trois angles : **les concepts fondamentaux de l'activité de conception pour les métiers, les différentes approches collaboratives qui la structurent et le système d'information qui l'innerve**.

Cette lecture nous fera converger vers plusieurs fonctions principales, que ce cadre doit remplir afin que la dimension environnementale puisse s'y intégrer.

2.2.1 L'activité de conception : des concepts aux produits finaux

2.2.1.1 Le processus de conception

Le processus de conception dans l'entreprise est le lieu de naissance du produit, donc l'élément clé pour y intégrer la dimension environnementale.

26. Définition donnée par le dictionnaire Larousse en ligne (Larousse.fr), site de la société Edition Larousse, 2012.

Venant du latin *procedere* qui signifie *progresser*, le dictionnaire Larousse[27] définit le processus comme "un enchaînement ordonné de faits ou de phénomènes, répondant à un certain schéma et aboutissant à quelque chose". Le processus a pour synonyme *le développement*, le *déroulement*, *la suite*, ou encore, *l'évolution*, *l'avancement*, *la montée*, dans l'idée de *procédé*, de *technique*, et de *progrès*. Associée à la notion d'ingénierie, *l'ingénierie des processus* vise à concevoir et optimiser l'organisation des activités en jeu dans un projet industriel, évoluant au sein de l'environnement complexe et changeant, afin d'atteindre les objectifs fixés. Chaque étape du processus correspond à un état du produit.

Les nombreuses définitions du mot "conception" dépendent beaucoup de la culture et du milieu d'origine des auteurs [Blessing et Chakrabarti(2009)]. La *conception* et le *développement* "sont parfois utilisés comme synonymes et parfois utilisés pour définir les étapes différentes du processus global de conception et développement" [ISO(2002)]. C'est ce que nous constatons avec les différentes définitions de ces deux termes donnés par des auteurs différents. Ainsi, la notion de développement d'un produit ou service au sens normatif, est introduite comme un "ensemble de processus qui transforme les exigences en caractéristiques spécifiées ou en spécification d'un produit, d'un processus ou d'un système" [ISO(2002)]. [Théroude(2002)] enrichie cette définition en y ajoutant les notions d'activité mises en oeuvre et d'objectifs à atteindre *dans le cadre d'une stratégie données*. Pour sa part, [Ulrich et Eppinger(2003)] décrit la conception comme "*the set of activities beginning with the perception of a market opportunity and ending in the production, sale and delivery of a product*". Pour [Ertas et Jones(1996)], la notion de *besoin* remplace celle *d'opportunité de marché*. Pour [Ullman(2003)], le processus de conception est une des étapes du développement du produit et arrive après la phase de *specification definition* et de *conceptual design*, permettant tout simplement de passer du concept au produit.

Comme nous avons vu dans la première section de ce chapitre, l'opportunité et le besoin, sont des notions dépendantes de la stratégie de l'entreprise vis-à-vis de son contexte et de ses évolutions. Au niveau des métiers, ces définitions couplées aux ambitions de l'éco-conception convergent vers l'idée générale que le processus de conception est bien ce qui amène *in fine* à la naissance d'un produit éco-conçu sur le marché.

Complexité du processus de conception : activités, personnes, outils, méthodes

[Hubka et Eder(1996)] met en avant le caractère *créatif* de la conception : "*intuitive, iterative, recursive, opportunistic, innovative, ingenious, unpredictable, refined, striking, novel, reflective, searching for elegance, beauty, etc.*". Pour ces auteurs, il n'y pas de problème de conception suffisamment simple pour être au même niveau mental que les humains. [Blessing et Chakrabarti(2009)] souligne cette complexité par l'étendue du déploiement des problèmes de conception. Ils peuvent en effet avoir comme finalité aussi bien un produit matériel (une trottinette, un avion) qu'un produit virtuel (un logiciel informatique, un service), ainsi que toutes les autres combinaisons possibles (approche produit - service d'un produit mécatronique).

Le processus de conception ne va pas uniquement se fonder sur la spécification des

27. Définition donnée par le dictionnaire Larousse en ligne (Larousse.fr), site de la société Edition Larousse, 2012.

objectifs de toutes les parties prenantes, mais également sur l'ensemble des **connaissances** liées à chacune des **phases du cycle de vie** des produits. Cela implique que pour être à même de concevoir, "*designers have to draw on knowledge from areas as diverse as physics, chemistry, mathematics, engineering sciences, ergonomics, aesthetics, psychology and sociology, as well as on methods and tools to support the application of this knowledge*" [Blessing et Chakrabarti(2009)].

De plus, chaque conception de produit, et donc **chaque processus déployé, est un projet unique**, aboutissant à un produit ou service qui ne sera pas exactement ce qui était prévu et qui dépendra fortement du **contexte** (sociétal, environnemental, etc.) dans lequel l'utilisateur évoluera. "*The tools, methods, resources and context in which the project takes place will differ ; and the knowledge and experience of the team members is growing all the time*"[Blessing et Chakrabarti(2009)].

Au delà des étapes que confère le processus de conception,
nous voyons apparaître les notions **d'activités** impliquant des **personnes**,
des expertises, ainsi que des **outils** des **méthodes**,
le tout fortement lié à des **contextes évolutifs**.
Il s'agit dès à présent de **décrire d'une manière plus précise**
la systémique de ce processus de conception.

Fonction relative au contexte
Nécessité de pouvoir s'adapter aux contextes évolutifs.

2.2.1.2 Un processus multi-étapes, approche séquentielle

De nombreux auteurs se sont exercés à comparer les phases du processus de conception selon les définitions données par un ensemble d'auteurs. [Scaravetti(2004)] compare par exemple, dix processus de conception issus ou adaptés de processus industriels, normatifs ainsi que de processus académiques. Nous pouvons également citer l'étude comparative de [Howard et al.(2008)] apportant une réflexion plus poussée sur les phases amont des processus. Notre objectif n'est pas de comparer d'une manière exhaustive les modèles de processus existants dans la littérature. D'ailleurs [Hubka et Eder(1996)] explique que le processus de conception peut être réalisé de manière systématique, méthodique et structurée, mais aussi tout à fait intuitivement sans aucune structure apparente. Cette apparente contradiction est en réalité tout l'inverse. La structure peut être utilisée pour supporter une étape intuitive et créative. Aussi, nous n'allons définir que les grandes étapes et les jalons incontournables d'un modèle de processus "type". Il sera fortement simplifié et construit sur l'étude des modèles existants en industrie d'une manière souvent moins formelle. Ce modèle simplifié de processus nous aidera : (a) à *positionner les outils et méthodes d'analyse environnementale* dans cette partie et (b) à *modéliser le processus de conception dans nos expériences* (cas d'étude industriels). Dans les phases amont du processus de conception, la prise en compte des aspects environnementaux a le plus de

liberté pour améliorer le produit (*cf.* Fig. 3.4). La phase de prospection, d'identification des "besoins[28]" notamment, avant la définition des objectifs, est fondamentale pour se positionner vis-à-vis de la dimension environnementale.

Parmi les modèles les plus cités, nous nous positionnerons sur :

- Le modèle d'Ullman, à travers les phases de "*identify needs and plan for the design process, develop engineering specification, develop concept and develop product*" [Ullman(2003)].
- Et surtout l'approche de conception "systématique" de [Pahl et Beitz(1996)] (à l'origine de 1977), décrivant le processus de conception suivant les phases de "*clarifying the task, conceptual design, embodiment design, detail design*".

D'après la comparaison des séquences inhérentes à chaque processus des auteurs étudiés, leur découpage en phases étant assez semblable. Chaque phase se termine par des choix et des décisions. Et notamment, deux jalons sont communs : le *cahier des charges fonctionnel* et le *dossier de définition* du produit. La conception préliminaire n'englobe pas toujours les même phases, comme la recherche de concept, la conception architecturale, ou encore la spécification technique [Scaravetti(2004)].

Pour les modélisations de nos processus, nous définirons donc les phases suivantes et les jalons suivants, illustrés par la Fig. 2.4 :

- la **phase amont** du processus correspond à une certaine expression du besoin, ou étape de spécification, clarification ou encore faisabilité, aboutissant à la définition du cahier des charges fonctionnel comme premier jalon
- la **phase d'avant projet**, de conception préliminaire, permettant d'un manière itérative de retenir les concepts pertinents, et aboutissant aux spécifications techniques (comme second jalon)
- la **phase finale** de conception détaillée et de qualification du produit, aboutissant au dossier de définition, qui est la documentation décrivant le système technique (jalon décisionnel pour lancement en production). Les topologies et éléments de dimensionnement, ainsi que les prototypes, sont définis au cours de cette phase d'une manière itérative.

Ce modèle du processus en étapes et en jalons est une vue simplifiée du processus qui nous servira de repère pour y intégrer la dimension environnementale.

Fonction permettant de caractériser le processus de conception
- Existence de grandes phases, notamment dans les phases amont. **- Existence de jalons, où il faut se positionner vis-à-vis de la dimension environnementale. Sinon auto-exclusion de la dimension environnementale du processus, et pas ou peu d'action où les effets sont les plus importants.** **- Le processus de conception est itératif.**

28. Définir ce que sont les besoins, doit aller dans le sens d'une réflexion de changement de paradigme consumériste vers des modes de production et consommation plus soutenable. Une réflexion sur la fonctionnalité du produit à travers de ses phases du cycle de vie peut s'avérer essentielle : **mobilisation des flux de matière et d'énergie** *vs.* **service rendu à la société** dans toutes les phases du cycle de vie.

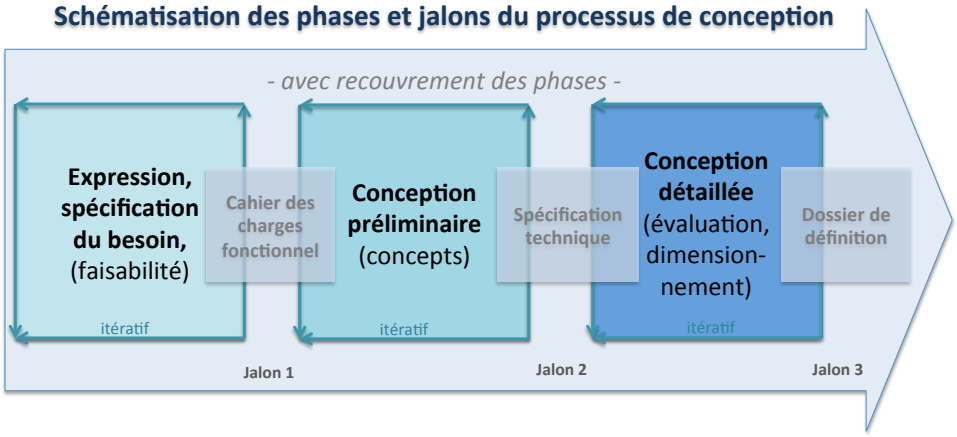


FIGURE 2.4 – Grandes phases d'un processus de conception retenues pour nos recherches

2.2.1.3 Un processus multi-activités d'échanges de données

Rappelons qu'au sens normatif environnemental[29], le processus est "l'ensemble d'activités corrélées ou interactives qui transforme des éléments d'entrée en élément de sortie" [ISO(2002)]. **Un des enjeux du processus de conception est donc de faire circuler les éléments d'entrée et de sortie entre les activités métier en jeu**. Ces *éléments* peuvent être aussi bien des données formatées dans des outils logiciels que des informations transmises par des personnes ou des outils supports dédiés situés dans un contexte donné.

L'**activité** correspond à l'action d'une personne, un exercice, en vue d'atteindre une finalité. L'activité en conception correspond à *une subdivision du processus de conception, fondé sur la résolution de problème par l'Homme*. Dans l'expression des modèles de processus, l'activité peut être cachée (inhérente au nom d'une étape par exemple), récurrente (associée à une séquence) ou indépendante. A chaque étape du processus de conception interviennent des compétences différentes pour résoudre les problèmes posés, c'est-à-dire, des *métiers* (designer, ingénieur matériaux, concepteur, etc.). Nous définirons l'**activité** comme l'**association d'un métier** (une **personne** ayant des **connaissances techniques**) et l'utilisation d'**outils ou de méthodes** relatives à ce métier (*cf.* Tableau 2.1).

La **connaissance technique**, nourrie de savoirs et savoirs-faire à caractère empirique ou expérimental, est intrinsèque à la personne. On demande à l'ingénieur d'être "créatif" et de savoir "innover". Pour Bufardi et al. dans [Bernard et Tichkiewitch(2008)], la connaissance se décrit par : *"information worked out eventually influenced by tacit experiences, ideas, insights, values and judgments of involved experts so as to enable making decisions, solving problems, taking actions, etc."*. La connaissance technique porte en elle la **dimension itérative des processus de conception**. En effet, la motivation de mobiliser ses connaissances dans une activité de conception n'existe pas pour son seul contenu, mais pour l'obtention d'un résultat. Ce qui associe un résultat à une expérience, où la **méthode**

29. ISO/TR 14062 (2002) sur le management environnemental–Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit

TABLE 2.1 – Exemple de description d'activités

Activité de ...	**Description**
l'ingénieur en *calcul de structure*	*Connaissances* : comportement des matériaux *Savoir-faire :* modélisation des structures *Outil-support :* de discrétisation EF, calcul, modeleur
l'ingénieur *environnement* axé "produit"	*Connaissances* : environnement, impacts, ingénierie *Savoir-faire :* analyse d'impacts environnementaux *Outil-support :* outils d'analyses environnementales (entre autres)

mise en oeuvre sera jugée en terme d'efficacité par rapport à l'itération précédente, ou à un projet antérieur (gains de temps, de facilité de mise en oeuvre, etc.) et de tout autre élément contextuel de l'expérience. Venant du grec ancien *methodos*, la méthode traduit l'idée de suivi, de recherche d'un chemin (*meta*), d'un moyen (*odos*), moyen pouvant être un outil métier. **L'activité est donc accompagnée de méthodes et ses outils de mise en oeuvre**.

Ainsi le processus de conception est multi-activités, multi-métiers (multi-connaissances, multi-savoir-faire), multi-méthodes et multi-outils. Il y a donc nécessité de partage : de collaboration à la fois au niveau des outils (modèles qu'ils véhiculent) et des connaissances métier (communication).

Fonction permettant de caractériser le contexte du processus de conception
- multi outils, et multi méthodes et multi connaissances et multi savoir faire : nécessité de partage, amenant à l'idée de collaboration (entre connaissances et outils)

2.2.1.4 Le processus de conception comme système collaboratif

La collaboration relève d'une activité de travail collaboratif entre les parties prenantes, au sens large, intervenant durant le processus de conception des produits. Les bases latines *com* et *laborare* du mot "collaboration" signifient étymologiquement "travailler ensemble".

Bien que les notions auxquelles ces termes font appel soient assez proches, la collaboration se distingue de la coopération et de la coordination sur plusieurs points résumés dans le tableaux 2.2 [Lu et al.(2007)].

Pour sa part, le système[30] est "un ensemble intégré d'éléments (personnels, produits, processus) connectés et reliés entre eux, en vue de satisfaire un ou plusieurs objectifs définis". [Luzeaux et Ruault(2008)] montre que "les points importants de cette définition [du système] sont l'existence de composantes élémentaires (...) (matérielle, logicielle, virtuelle, humaine, etc.) et de relations entre elles". Il ajoute que "tant les biologistes (Altan,

30. Le système au sens donné par la norme ISO/IEC 15288 (2002) à la suite de l'ISO 9000 (2000).

TABLE 2.2 – Comparaison des notions de coordination, coopération et collaboration suivant [Lu et al.(2007)]

	Parties prenantes	**Ressources**	**Objectifs**	**Structure des activités**
Coordination	Communautés larges	Limitées, échangées	Multiples, en concurrence	Prédéfinie, même niveau hiérarchique, échanges unidirectionnels
Coopération	Groupes de tailles moyennes	Limitées, partagées	Multiples, privés	Prédéfinie, hiérarchie transversale, échanges bi-directionnels
Collaboration	Petites équipes	Partagées, complémentaires	Individuels et collectifs	Indéfinie, pas de niveaux hiérarchiques, échanges multi-directionnels

Bertalanffy, de Rosnay), les épistémologues (Le Moigne), les économistes (Lescoune, Passet), les conseillers en management d'entreprise (Donnadieu, Yatchinovsky) que les sociologues (Morin) s'accordent à dire que l'accent doit être mis sur **les relations unissant les éléments d'un système autant que sur ces éléments eux-mêmes**." La notion **d'intégration** des parties dans le tout est donc une notion centrale.

En résumé, les propriétés globales du processus de conception, de par son caractère systémique, dépendent plus des relations de collaboration entre les activités que de la nature des activités en tant que telles. **Notre étude de la conception doit donc plus se focaliser sur l'interaction entre les activités plutôt que sur les activités en tant que telles**.

La systémique **appliquée au niveau des chefs de services** est "une organisation souple où rien n'est figé". Les idées peuvent être mises en place rapidement avec *souplesse et flexibilité*. Les concepteurs ont une *connaissance minimale* des orientations globales pour pouvoir apporter leurs idées. Le tout est organisé dans "les logiques de **coopération et d'entraide** qui facilitent les réactions, les interactions, et les rétroactions face aux fluctuations de l'environnement", c'est-à-dire face aux **variabilités contextuelles** [Luzeaux et Ruault(2008)].

Fonction relative au contexte (première fonction)
Pouvoir s'adapter à la variabilité des contextes des processus de conception.

Nécessité d'avoir recours à une vision systémique pour intégrer la dimension environnementale

Pour intégrer cette discipline nouvelle liée à *l'analyse environnementale* nous devons développer le caractère *transdisciplinaire* du processus de conception, à ne pas confondre avec l'interdisciplinarité. Comme l'explique [Morin(1990)], le développement des sciences montre que l'interdisciplinarité a plutôt eu pour effet la recherche du contrôle des disciplines. L'intégration de l'environnement au travers des autres disciplines nécessaires au développement de la vie du produit, nécessite une *unification transdisciplinaire* (comme ce fut le cas avec les travaux de Newton, Maxwell ou De Broglie par exemple). Mais comme le souligne [Morin(1990)], "les principes transdisciplinaires fondamentaux de la science, la mathématisation, la formalisation, sont précisément ceux qui ont permis de développer le cloisonnement disciplinaire". Pour faire communiquer des disciplines différentes, les scientifiques ont formalisé et discretisé le réel en éléments "simples" (héritage des travaux de Descartes), emportant une part importante des facettes du réel. Or, ce sont ces facettes éliminées dans cette modélisation simplificatrice qui nous empêchent aujourd'hui de prendre en compte la dimension infiniment plus riche et plus complexe, de la collaboration entre les sciences de l'ingénierie et les sciences de l'environnement.

La formalisation de ce qui a trait à la dimension environnementale amène à la question du **savoir** relatif à cette dimension. Le savoir "absolu" en conception et en environnement existe-t-il ? "Fait pour être stocké dans des banques informationnelles et computé par des instances anonymes et supérieures aux individus ?". Ou alors, le savoir est-il à entendre dans le sens de la tradition grecque classique jusqu'à l'ère des Lumières et jusqu'à la fin du XIXème siècle, comme "fait pour être compris, pensé, réfléchi" [Morin(1990)] ?

Nos travaux se positionnent plutôt sur cette deuxième hypothèse. Par conséquent, nous pensons que l'intégration de la dimension environnementale dans la complexité du processus de conception doit être abordée de manière systémique.

La collaboration entre les disciplines intervenant au cours du processus de conception ne pourra jamais être dictée par un savoir exclusif optimisant l'intégration de chaque paramètre relevant des disciplines dans l'activité de chacun. Par contre, **la construction de ce savoir transdisciplinaire se construit petit à petit et évoluera par la réflexion conjointe de toutes les activités en jeu au cours du processus de conception. Les variabilités contextuelles sont telles que le système doit adapter et faire grandir sa connaissance aux interfaces des activités des concepteurs**.

Fonction relative à l'évolution du contexte
Pouvoir s'adapter à l'évolution du savoir, à l'évolution des activités.

Dans cette section nous avons caractérisé le processus de conception par plusieurs fonctions essentielles pour situer le positionnement de nos travaux de recherche. En particulier,

le caractère collaboratif du processus de conception que nous avons identifié, nous amène dans la section suivante à explorer les approches collaboratives existantes en ingénierie, pour faire collaborer les différents métiers intervenant au cours du processus de conception.

2.2.2 Diversité des approches collaboratives existantes en conception et systèmes d'information associés

Dans ce contexte collaboratif et complexe de l'ingénierie se sont développées des théories et applications pratiques portant sur les notions d'ingénierie collaborative, de conception intégrée, ou encore d'ingénierie du cycle de vie. L'objectif depuis le milieu du XXième siècle est de réduire les temps de développement des produits industriels. L'industriel veut produire plus[31], avec moins, dans des processus et des produits de plus en plus complexes. L'industriel cherche à avoir la maîtrise de ses processus (du moins leurs conditions de mise en oeuvre [ISO(2002)]). Ces processus sont contraints par les triptyques qualité-coût-délais, auquel nous rajoutons la dimension environnementale. Cela entraîne une quantité impressionnante de données et de connaissances pluri-disciplinaires. Pour y faire face, l'industriel s'appuie de plus en plus sur les nouvelles technologies de l'information et de la communication, qui elles aussi demandent à être maîtrisées [Panchetti(2009)].

2.2.2.1 Approches collaboratives dans le processus de conception produit

L'approche séquentielle

Comme l'explique [Simon(1981)], un système est complexe s'il est fait d'un grand nombre d'éléments qui entretiennent ensemble de nombreuses interactions. Nous pouvons alors décomposer chaque sous-système en éléments encore plus petits, afin qu'ils soient suffisamment indépendants pour être plus facilement manipulables. Comme l'explique et l'emploie [Oosterman(2001)] ces principes sont utilisés dans les processus d'ingénierie afin de créer des modèles et de fonder des théories. C'est le cas de l'approche séquentielle.

Pour les adeptes de la pensée systémique ([Morin(2005)], Moles, De Rosnay), décomposer chaque sous-système en sous-sous-systèmes afin d'en réduire la dépendance et de pouvoir en optimiser les flux qu'ils échangent, peut mener à des impasses de plusieurs ordres, en particulier les problèmes d'intégration. Dès lors, l'idée de l'ingénierie simultanée, appelée *concurrent engineering* en anglais, est de résoudre en parallèle les sous-problèmes afin de résoudre plus rapidement le problème global.

31. En accord avec le paradigme dominant actuel : pour "répondre de plus en plus aux attentes des utilisateurs", "suivre au mieux l'évolution des tendances des utilisateurs".

Concurrent engineering et ingénierie collaborative

[Winner et al.(1988)] est souvent cité comme le précurseur de la conception concourante[32], suivi de près par [Solhenius(1992)]. Le *concurrent engineering*[33] est fondé sur deux concepts :

1. L'ensemble des éléments des phases du cycle de vie du produit doivent être pris en compte dès les phases amonts du processus.
2. Pour ce faire les activités nécessaires doivent être déployées de manière simultanée.

Pour [Tichkiewitch et Riel(2010)] [Riel et al.(2010)] la conception intégrée ajoute la connaissance métier des parties prenantes à ces principes. L'idée générale est que des personnes de compétences et de services différents de l'entreprise, puissent travailler en même temps sur un même projet, afin de couvrir l'ensemble du cycle de vie du produit, autour des considérations de coût-qualité-délais-fin de vie, et des demandes de l'utilisateur [Tichkiewitch et Brissaud(2004)]. Le processus émerge petit à petit, par intégration successive des contraintes des parties prenantes. Pour ce faire [Tichkiewitch et Riel(2010)] montre que les cinq points suivants doivent être vérifiés. Nous complétons par ce que cela signifierait s'il s'agissait de la composante environnementale :

1. Avoir **accès à l'ensemble des informations** concernant le produit à **n'importe quel moment** du processus.

   Pour la composante environnementale : les données structurelles du produit, la nomenclature, les fournisseurs, la localisation des marchandises, les procédés de transformation, les modes d'assemblage, la localisation des usines de production et d'assemblage, des données sur les utilisateurs, les services après-vente, les points de collecte, etc. Ces données proviennent des différents service : R&D, achat, logistique, marketing, après-vente, etc. **Difficultés associées :** liées à l'échange et la capacité d'utilisation de données différentes (format par exemple) dans l'outil d'analyse environnementale, et liées à la dimension temporelle (comment fournir "en temps réel" les données).

2. Avoir la **capacité matérielle et organisationnelle** de réaliser sa propre activité, relative à **son métier**.

   Pour la composante environnementale : disposer des outils métiers et des connaissances spécifiques à l'activité d'analyse environnementale, au sein d'un service permettant la collaboration avec l'ensemble des métiers liés directement à la dimension environnementale. **Difficultés associées :** critères de choix des outils d'analyses environnementales (contexte, budget, etc.), considération de l'activité

32. [Winner et al.(1988)] donne en 1988 la définition de *Concurrent Engineering (CE)* comme *"a systematic approach to the integrated, concurrent design of products and their related processes, including manufacture and support. This approach is intended to cause the developers, from the outset, to consider all elements of the product life cycle from conception through disposal, including quality, cost, schedule, and user requirements".*

33. Selon les auteurs, les termes *integrated design*, *simultaneous design* ou *parallel design*, sont utilisés dans le sens de *concurrent engineering*, en y ajoutant certaines composantes.

d'analyse environnementale dans l'organisation des services.

3. Disposer d'une **vue spécifique métier** sur le produit, dans son **propre langage**. **Pour l'expert environnement :** disposer d'une vue adaptée à son environnement numérique et relative à l'ensemble des métiers qui génèrent des choix impactants la dimension environnementale ; **Difficultés associées :** disposer d'outils permettant de visualiser ces vues métiers.

4. Avoir accès à un **mécanisme de "traduction"** pour comprendre les autres métiers. **Pour la composante environnementale :** moyens de traduction entre les paramètres de conception des métiers et les paramètres environnementaux qu'ils influencent ; **Difficultés associées :** traduire en conservant la sémantique liée à une donnée dans un domaine donné. Déterminer le support adéquat donnant accès à ces traductions et gérant les aspects syntaxiques des langages formalisés dans les différents logiciels.

5. Etre capable de **proposer ses contraintes aux autres** au cours du processus, en la proposant aussitôt qu'elle est disponible et qu'elle est justifiable : approche *au juste besoin*. L'espace de solutions est donc petit à petit conditionné par ces contraintes qui peuvent être validées et justifiées avant et après le processus de conception.
   Pour la composante environnementale : un support adéquat permettant à l'expert environnement de proposer au métier auquel il s'adresse la contrainte environnementale "traduite" dans le langage du métier. **Difficultés associées :** construire des supports permettant d'échanger ces contraintes d'une manière rapide de l'expert environnement vers les autres métiers.

Un ensemble de **méthodes de coordination** ont été développées depuis la fin des années 1990 pour répondre à certains des cinq précédents points. Par exemple :

- Les travaux sur les flux d'informations ("information workflow") permettant d'optimiser le délais d'exécution du processus, par l'optimisation du degré de parallélisme et d'intégration lors de la planification du processus de conception (voir les travaux présentés dans [Eversheim et Schulten(1999)]).
- Les travaux contribuant à l'amélioration de la communication et de la coordination entre les concepteurs pendant le processus de conception, en définissant des modèles de coordinations (des systèmes de coordination comme : *Mapped parameters or features, joint parameters or features, data coherency*)
  [Tichkiewitch et Brissaud(2000)], pour la prise en compte des données de l'ensemble du cycle de vie du produit [Tichkiewitch et Brissaud(2002)].
- Les travaux sur la modélisation des contraintes en conception. [Yvars(2009)] définit notamment un "CoCSP" pour la résolution de satisfaction de contrainte en milieu collaboratif.

[Riel et al.(2010)] introduit le *Collaborative Integrated Design* qui dépasse largement l'ingénierie concourante. Son objectif est de supporter une réelle collaboration entre les

acteurs de la conception, amenant la prise de décision collective : au travers du **partage des idées, des données, des connaissances**.

Fonctions relatives à l'ingénierie collaborative
- Mise à disposition des informations concernant tous les aspects du cycle de vie du produit au moment où elles sont disponibles **- Evolution propre du métier d'analyse environnementale parmi les autres métiers : disposer d'outils et de connaissances métiers spécifiques, considération de la place de cette activité en conception** **- Nécessité de vues produit relatives aux domaines des parties prenantes** **- Existence de mécanismes de traduction entre les données relatives aux différents métiers dont les choix influencent l'analyse environnementale** **- Nécessité d'un support pour proposer les contraintes environnementales** **- Co-construction de connaissances entre les métiers et l'expert environnement** **- Echange des données relatives à l'ensemble du cycle de vie du produit**

Ingénierie du cycle de vie : Life Cycle Engineering (LCE)

Le LCE est une approche d'analyse conjointe de coût, de faisabilité technique et environnementale, dans une perspective de cycle de vie du produit. L'analyse de coût est supportée par les méthodes de Life Cycle Costing (LCC), l'analyse environnementale par les méthodes d'Analyse du Cycle de Vie[34] (ACV ou LCA en anglais) et la faisabilité technique est assurée par les méthodes d'ingénierie de type *Product Structure Assessment* (ProSA). Les impacts collatéraux des différents choix pris séparément par les métiers impliqués peuvent être comptabilisés grâce au caractère transversal et global des outils de LCC, ACV et ProSA.

Par rapport à notre problématique de recherche, la question est de comprendre comment les échanges d'informations vis-à-vis des paramètres coûts, environnement, faisabilité sont réalisés entre ce niveau d'analyse transversal et le niveau local des métiers de la conception. Car même pour réaliser uniquement des bilans financiers, environnementaux ou techniques, l'utilisation des outils d'ACV, de LCC et ProSA nécessite un nombre important de données métier. Pour le cas de l'analyse environnementale, la dernière étape de l'ACV (*cf.* pour une revue détaillée de ses développements [Finnveden et al.(2009)]), préconise des améliorations à apporter au produit. Ces préconisations s'adressent aux métiers de la conception du niveau local. La mise en oeuvre de ces préconisations nécessite le déploiement d'une myriade d'outils dans différents contextes du métier impliqué. Ces contextes sont en plus différents d'une industrie à une autre. [Knight et Jenkins(2008)] mentionne en effet la diversité des configurations de mise en oeuvre des analyses du cycle de vie soutenant la pratique de l'éco-conception, en fonction des contextes industriels.

34. L'ACV prend en compte l'ensemble du cycle de vie, contrairement à un bon nombre d'outils d'évaluation environnementale disponibles, comme l'empreinte écologique *(Ecological Footprint)*, le *MFA (Material Flow Analysis ou Accounting)*, *l'EMS (Environmental Management System)* ou encore le *SFA (Substance Flow Analysis)* [Leroy(2009)].

En matière d'environnement, il serait donc réducteur de présenter l'ingénierie du cycle de vie comme utilisant simplement l'ACV comme outil d'analyse environnemental. En conclusion, notre problématique de recherche s'inscrit donc bien dans le champ de l'environnement couvert par l'ingénierie du cycle de vie, mais n'est pas restreinte à la seule utilisation de l'ACV.

Fonctions relatives à l'ingénierie collaborative du cycle de vie
- Nécessité d'une vision à la fois "métier local" et transversale ou "globale"
- Outils d'analyse environnementale transversale de type ACV
- Nécessité d'explorer d'autres outils d'analyse du cycle de vie ?

L'importance de la dimension humaine en collaboration

L'ingénierie collaborative peut se définir comme **l'application des sciences de la collaboration à l'ingénierie**. [Lu et al.(2007)] définit l'**objectif** de cette discipline comme moyen permettant aux *"engineers and engineering companies to work more effectively with all stakeholders in achieving rational agreements and performing collaborative actions across various cultural, disciplinary, geographic, and temporal boundaries"*. Ils proposent les éléments clés fondamentaux de l'ingénierie collaborative. La théorie se base sur les modèles et techniques de quatre approches : *collaborative behavior, social construction, collective rationality and joint negotiation.* Ils ajoutent que pour garantir la compétitivité de l'entreprise l'ingénierie collaborative doit évoluer "*from a black art practiced by the few to a rigorous discipline understood by the many*". Pour ces auteurs, le développement de cette discipline souffre du fait que la collaboration relève des **sciences sociales**, subissant les réticences de certains auteurs qui pensent (encore) que si on ne peut pas apporter *une preuve complète mathématique de l'existence, de l'unicité, de la stabilité et de la convergence des propriétés de la collaboration, alors la recherche en ingénierie collaborative n'aurait aucune substance intellectuelle*–critique que [Lu et al.(2007)] réfute en argumentant que les modèles mathématiques seuls ne sont pas appropriés à l'étude de la dynamique socio-technique, et que l'inexistence d'un modèle mathématique à un moment donné, n'implique pas l'inexistence du caractère sérieux ou systématique du sujet étudié. Et ils soulignent que **l'intérêt de la prise de décision dans un processus collaboratif, est qu'il est plus "riche" que le résultat d'une équation "multi-contrainte"**

Le point de vue de [Morin(2005)] est intéressant pour expliquer la **cause des réticences** vis-à-vis des "sciences collaboratives". Il montre qu'à l'origine "la science occidentale s'est fondée sur **l'élimination positiviste du sujet à partir de l'idée que les objets, existant indépendamment du sujet, pouvaient être observés et expliqués en tant que tels**." Et d'ajouter que "l'idée d'un univers de faits objectifs, purgés de tous jugements de valeurs, de toutes déformations subjectives, grâce à la méthode expérimentale et aux procédures de vérification, **a permis le développement prodigieux de la science moderne**." Le problème est que depuis quelques dizaines d'années, **deux brèches sont apparues** dans le cadre épistémologique de la science classique : la "brèche microphysique [qui] révéla l'interdépendance du sujet et de l'objet, [ce qui implique par la même]

l'insertion de l'aléa dans la connaissance, (...) l'irruption de la contradiction logique dans la description empirique" et la brèche dite "macro-physique", celle qui a unifié "en une même entité les concepts jusqu'alors absolument hétérogènes d'espace et de temps". Or, comme nous l'avons vu, la collaboration au sein du processus d'ingénierie est par nature **transdisciplinaire** et porte en lui l'idée de **système**. Ainsi la **science collaborative**, faisant partie de l'ingénierie collaborative, est une science qui repose sur le paradigme de la **systémique**, qui, selon [Morin(2005)] "permet à la fois de **concevoir l'unité de la science et la différenciation des sciences**, non seulement selon la nature matérielle de leur objet, mais aussi, selon les types et les complexités des phénomènes d'association/organisation". En résumé, le système qu'étudient les sciences collaboratives est "un *tout* qui ne se réduit pas à la *somme* de ses parties constitutives".

Fonctions relatives à l'ingénierie collaborative du cycle de vie
- Nécessité de prendre en compte l'aspect social de la collaboration (par exemple les sciences cognitives, la psychologie du travail) **- Positionnement de la recherche dans un système, approche systémique de la prise en compte de la dimension environnementale**

Dans cette sous section nous avons mis en lumière plusieurs fonctions relatives à l'ingénierie collaborative du cycle de vie. Il s'agit dès à présent d'explorer comment ces fonctions sont soutenues par le système d'information existant.

2.2.2.2 Systèmes de gestion d'informations et de connaissances associés à l'ingénierie collaborative du cycle de vie

Données, informations, connaissances

Introduisons tout d'abord les notions de connaissances, informations et données en prenant l'image de l'échelle de la compréhension [Gandon(2001)] par l'approche *bottom-up*. La **donnée** est une description des plus élémentaires d'une réalité, prise en tant que telle, elle ne dépend pas d'un contexte spécifique. [Mercier-Laurent(2011)] caractérise une donnée comme "un ensemble de symboles, codifiable, facilement transférable d'une machine à une autre". D'autres auteurs rajoute que *la donnée est le résultat d'une perception d'un signal ou d'un signe* (travaux de [Miled(2011)]). Alors que l'**information** est une donnée située dans un contexte, exprimée ou "véhiculée" dans un format ou une structure : "une donnée (ou ensemble de données) qui a du sens" (par exemple [Drucker(2000)]). A distinguer de la donnée et de l'information, la **connaissance** est intrinsèque à la personne qui la possède. En accord avec la définition retenue par [Miled(2011)], "la connaissance est l'interprétation d'une information par un humain, dans un contexte donné". Nous voyons apparaître les notions de *connaissance explicite*, comme connaissance codifiée transmise dans un langage structuré et propice à la communication, et de *connaissance tacite*, comme éléments cognitifs des individus, représentation du fonctionnement du monde, regroupant les compétences innées, acquises et le savoir-faire, difficilement transférable car non verbalisée, intuitive et non articulée. [Polanyi(1966)]. Le premier type de connaissance fait

référence à un "monde objectif" que l'on peut acquérir dans les livres par exemple, sous la forme d'écrit ou de représentation graphique, alors que le second est profondément subjectif. **Il apparaît donc que ce sont plutôt les connaissances explicites qui pourront faire l'objet d'un partage, en utilisant des modèles appropriés, pour aider la collaboration entre les métiers de la conception et de l'expert environnement.**

Le système d'information et le système de gestion des connaissances

Le Système d'Information est lié à la notion de *gestion*, puisqu'il permet en théorie de rendre possible l'application de la stratégie de l'entreprise par l'ensemble des services et des activités métier du niveau opérationnel. D'ailleurs, historiquement (fin du XXème siècle), le modèle pyramidal des SI était fondé sur la structure hiérarchique de l'entreprise.

Par définition, le *Système d'Information (SI)* s'appuie sur des moyens informatiques, électroniques (matériels, logiciels), et humains, pour organiser (regrouper, classifier, capitaliser, etc.) et diffuser de l'information, assurant donc, une certaine partie de la communication dans l'entreprise entre les différents métiers. Or, comme nous l'avons vu, ces métiers ont leurs propres connaissances et savoir-faire, imposant à l'entreprise la mise en place d'une gestion des connaissances, afin qu'elle soit propice à la création et au partage de connaissances internes. [Nonaka et Takeuchi(1995)] montre sur l'exemple des entreprises japonaises que la capacité d'apprentissage de leur organisation leur confère une compétitivité à long terme. La valeur immatérielle du "savoir" est d'ailleurs comptée comme actif pouvant être comptabilisée dans la valeur d'une entreprise[35].

Les méthodes **Knowledge Management** (KM) sont ainsi utilisées en complémentarité au SI. Selon la norme [ISO(2002)] le management des informations et des données *permet la collecte, les échanges (organismes internes, externes). Il permet également la prise de décision et fournit une crédibilité des résultats d'évaluation d'impacts environnementaux en permettant la traçabilité de la qualité des données.* C'est une activité qui nécessite l'utilisation de logiciels de gestion de données et de formats de données ouverts et reconnus. [Bassi(1998)] définit le *Knowledge Management*, comme "*a process of creating, capturing and using knowledges to enhance organisational performance*". C'est ce que [Mercier-Laurent(2011)] présente comme "système d'initiatives, de méthodes et d'outils destinés à créer un flux optimal des connaissances pour le succès de tous les participants", qui sont liés au cycle de vie de la connaissance. Compte-tenu de la complexité de la conception et de la multidisciplinarité des concepteurs, les approches de KM sont donc cruciales pour aider les industriels à innover. [Xu et al.(2010)] propose par exemple un modèles de connaissance combinant le contenu et le contexte du modèle, dans une vision systémique.

L'approche de [Grundstein(2006)] vise à concilier *l'approche technologique* du KM (répondant à une demande de "solutions fondées sur les technologies de l'information et de la communication (TIC)") à l'approche *managériale* du KM (intégrant les "connaissances en tant que ressources contribuant à la mise en oeuvre d'une vision stratégique de l'entreprise"), et ce, en prenant en compte les personnes (modèle construit sur des données empiriques). Ils introduisent le *Modèle Global de Knowledge Management* pour

35. L'observatoire de l'immatériel (www.observatoire-immateriel.com), propose en effet aux entreprises d'évaluer les dix actifs immatériels suivant : le capital client, marques, organisationnel, humain, technologique, actionnaires, fournisseur/partenaire, système d'information, sociétal et naturel.

l'entreprise (MGKME) positionnant le KM comme étant : "le management des activités et des processus destinés à amplifier l'utilisation et la création des connaissances au sein d'une organisation, selon deux finalités complémentaires fortement intriquées, une finalité patrimoniale et une finalité d'innovation durable, finalités sous-tendues par leurs dimensions économiques et stratégiques, organisationnelles, socioculturelles, technologiques". Ainsi, ce modèle global consiste à passer par quatre processus : *le processus de localisation* (identifier, localiser, caractériser, cartographier, estimer et hiérarchiser), *le processus d'actualisation* (évaluer, mettre à jour, standardiser et enrichir), *le processus de valorisation* (accéder, diffuser, partager, exploiter, combiner et créer) et *le processus de préservation* (acquérir, modéliser, formaliser et conserver, en encourageant le transfert de type *maître-apprentis*)" les connaissances "cruciales".

Ces processus inhérents au modèle de [Grundstein(2006)] montrent plusieurs points que nous retenons pour permettre le cycle de vie de la connaissance relative aux métiers de la conception, dont l'analyse environnementale. Ces fonctions sont cohérentes avec celles identifiées précédemment, notamment la nécessité d'avoir recours à une approche systémique, en mettant les métiers au centre des processus.

fonctions relatives au cycle de vie de la connaissance
- Aider à cartographier les connaissances à l'environnement **- Permettre la représentation explicite des connaissances (externalisation) permettant également la réutilisation par d'autres métiers** **- Rendre accessible les connaissances cruciales, au bon moment et à la bonne personne** **- Permettre une mise à jour et un enrichissement des connaissances au cours des projets (évolution des connaissances entre les métiers des concepteurs et de l'expert environnement ; adaptation aux changements), validée par les activités expertes (outils et métier expert dans le domaine)**

Représentation des connaissances

En informatique, les ontologies peuvent être utilisées pour représenter les connaissances et raisonner sur ces connaissances. Une ontologie, au sens où nous l'abordons est un ensemble de concepts (pouvant avoir plusieurs sens thématiques) structurés entre eux par des liens. Les ontologies ont également d'autres objectifs, notamment la réutilisation de connaissances (création de bases de connaissances réutilisables dans un domaine et contexte précis), ou encore, pour associer de l'information aux règles d'inférence[36], permettant d'extraire des connaissances pertinentes lors de la recherche d'information (domaine du **web sémantique**). Plusieurs langages se sont développés pour faciliter la représentation des informations et des liens entre ces informations (par exemple l'XML, RDF, etc.). Il existe ensuite un certain nombre d'approches dédiées à la gestion des connaissances, permettant par exemple d'acquérir la connaissance des experts, de la capitaliser et de faciliter sa réutilisation (par exemple *CommonFADS*, *REX* etc.). D'autres

36. Les règles d'inférence en logique sont utilisées pour construire une déduction ou une démonstration, par une suite de règles.

approches sont fondées sur les systèmes multi-agents (SMA)[37], proposant de nombreux outils permettant la gestion des connaissances.
Cette présentation succincte de certains concepts de base de la gestion du système de connaissance en entreprise montre que de nombreux outils et méthodes existent pour assurer les cycles de vie des connaissances en entreprise dans un contexte collaboratif, multi-métier. Cela nous a dès lors permis d'identifier certaines fonctions, nécessaires à la gestion du cycle de vie des connaissances environnementales. Il s'agit dès à présent d'étudier la manière dont sont gérées les informations au niveau du Système d'Information de l'entreprise pour identifier le contexte supportant les échanges d'informations entre l'activité d'analyse environnementale et les activités des autres métiers intervenant lors du processus de conception, nécessaires à la collaboration.

Gestion actuelle (PLM, PDM) des données en entreprise

En théorie, les plateformes PLM (Product Lifecycle Management) proposent une gestion des données tout au long de la chaîne de processus du produit et sur l'ensemble de son cycle de vie[38]. D'après [Debaecker(2004)], le PLM peut être vu en tant que système qui "touche les hommes, les processus ; l'organisation et les applications du système d'information". Il recouvre "les fonctions de création des données produit (CAO, documents) et est centré sur leur *gestion* (gestion des données techniques, gestion documentaire), leur partage et validation (outils collaboratifs et d'automatisation des processus (*workflows*). Il s'étend à l'usine numérique et la gestion des portefeuilles de projets ou produits."

L'objectif du PLM est de *mettre en oeuvre des solutions notamment progiciels* aidant les équipes pluridisciplinaires, internes ou externes, à mieux concevoir un produit ou un procédé. Le sens de l'assertion "mieux concevoir", est ici, d'aider les concepteurs à traiter plusieurs objectifs en même temps : la réduction des délais et des coûts, la standardisation et l'amélioration de la qualité du produit [Debaecker(2004)]. Et l'auteur d'ajouter que le mot "management doit être pris au sens large, comme l'est en français le mot *système* dans système de Gestion des Données Techniques. Il concerne l'ensemble des aspects de l'entreprise : système d'information, mais aussi organisation de l'entreprise, organisation du produit et des documents (structure produit, plan de classement des documents...), processus, hommes : cultures techniques, compétences, aptitude au changement".

D'après le site commercial de consultant en solutions PLM[39], les possibilités offertes par les outils PLM (tableau 2.3) sont aussi larges que la capitalisation de l'information et les savoir-faire, l'automatisation des processus, tout en réduisant le temps

37. Système composé d'un ensemble d'agents au moins partiellement autonomes (robot, personne physique, processus), situés dans un environnement particulier et interagissant selon certaines relations

38. Les principaux éditeurs de PLM sont aujourd'hui : Dassault Systèmes avec l'outil Enovia (http ://www.3ds.com/, site commercial de Dassault, solution de PLM, outil Enovia, Juillet 2010), Siemens avec l'outil Teamcenter (http ://www.plm.automation.siemens.com/fr, site commercial de Siemens, PLM, outil Teamcenter, Juillet 2010), PTC avec les outils PDS (systèmes de développement de produits) et Windchill (http ://www.ptc.com/, site commercial de PTC, Juillet 2010).

39. http ://www.cimdata.com/, commercial website, PLM consulting

TABLE 2.3 – Capacités standards des outils PLM, d'après le site commercial d'une agence de consultant en solutions de PLM
Retranscrit tel quel (*cf.* critiques dans le texte)

Capacités des outils PLM	**Descriptifs**
Contrôler et piloter les informations Produit / Projet / Procédé	Pour tous les acteurs ; Au sein des principaux S.I. ; Autour de fonctionnalités PDM : - Gestion du contenu, traçabilité et historique - Gestion Documentaire - Gestion de la Structure produit - Gestion des cycles de vie et processus - Gestion des modifications - Gestion de projet - Gestion de la configuration - Lien avec d'autres SI
Gestion des contenus pour les applications MCAD, ECAD, Logiciels et Documentaire :	- Gestion de projet - Gestion des bibliothèques - Gestion des vues structurées (avec documents attachés) - Gestion des cycles de vie (En Etude, Officiel, Annulé...) - Révision et Itération - Permet la visualisation des objets 2D et 3D - Gestion et contrôle des flux d'informations (Workflow)
Permettre la collaboration	- Gestion d'espaces partagés - Gestion des équipes et des ressources - Gestion des droits d'accès - Recherche globale - Gestion des impacts (Cas d'emploi)
Gestion des programmes et des projets :	- Plan projet et suivi de l'exécution projet - Gestion du portefeuille d'affaire (Portfolio management)
Gestion des configurations produits	- Configurations produits et documentaires - Configurations de référence et applicabilité (Baselines, Effectivity) - Gestion des nomenclatures (As design, As Build, bAs Maintain...)
Gestion des modifications :	- Analyse des impacts - Exécution et contrôle - Gestion des processus de modifications
Gestion des approvisionnements et composants	Classification

de développement des produits et en homogénéisant les méthodes de développement des produits, en permettant notamment le traitement par lots de tâches quotidiennes [40].

En réalité, concernant la dimension environnementale, il n'est pas tout à fait juste d'affirmer qu'un PLM permet d'effectuer *des analyses d'impacts* (*cf.* Tableau 2.3). Nous verrons que dans certains cas, les systèmes PLM facilitent l'échange d'informations entre les outils métiers et l'outil d'analyse environnementale, mais ce dernier nécessite bien le pilotage d'un expert en environnement (ne serait-ce que pour "analyser" les résultats). [Wijk(2011)] montre également que les systèmes PLM ne permettent pas de donner en temps réel le retour d'informations (de la plateforme commune vers les métiers).

40. http ://www.ptc.com/, site commercial de PTC, Juillet 2010.

Limites des plateformes PLM : en se référent au tableau 2.3, les plateformes PLM couvrent théoriquement l'ensemble du processus de développement des produits. Plusieurs travaux de recherche en montrent pourtant les limites. [Wijk(2011)] fait état de plusieurs ruptures fondamentales. D'un point de vue opérationnel, il note une inadéquation entre les capacités des outils PLM et ce qu'en font vraiment les acteurs de la conception. La réussite d'une collaboration ne tient pas uniquement à fournir des structures organisationnelles gérant par exemple des espaces partagés ou des droits d'accès aux ressources, mais bien de prendre aussi en compte sa complexité "sociale". D'autre part, l'auteur montre que les capacités d'interopérabilités sont encore peu traitées par les plateformes PLM.

Ainsi, les méthodes d'ingénierie simultanée, intégrée et collaborative se heurtent dans la pratique aux ruptures fondamentales des plateformes PLM. Ces ruptures nous permettent d'identifier plusieurs fonctions à prendre en compte pour le partage des informations liées à l'environnement, pour compléter les manques identifiés dans les systèmes PLM.

fonctions relatives au système d'information
- Prise en compte du retour d'informations en temps réel
- Développement de l'interopérabilité entre les outils métier
- Prise en compte des aspects sociaux de la collaboration
- Adéquation entre les possibilités offertes par le PLM et l'exploitation qu'en font les acteurs
- Harmonisation les pratiques inter-entreprises

La maquette numérique

La maquette numérique correspond au patrimoine numérique du produit : un *ensemble configuré de pièces 3D enrichies par des objets techniques (plan, rapports, etc.) issus de l'activité de conception du produit*, ou encore, *une simulation numérique réaliste du produit et de son environnement, permettant son analyse spatiale, fonctionnelle, tout au long de son processus de développement.*

La maquette numérique est composée d'une *structure produit* (permettant aux parties prenantes d'interagir avec elle (via un portail d'accès par exemple), et de plusieurs *bases de données de stockage* (par exemple des bases de données thématiques : calculs issus de l'activité de simulation mécanique, définition géométrique, données issues de la technologie, etc.). L'ensemble de la maquette numérique est supporté et géré par un système de gestion de données techniques (SGDT : ensemble d'outils informatiques pour la gestion des données techniques liées à un projet de conception), nommé PDM en anglais.

La maquette se construit à partir des données issues de la conception directe ou inversée. Il est possible de partir d'une pièce existante physiquement, de la numériser et la charger. Pour être exploitées dans diverses applications, les différentes données contenues dans la maquette numérique doivent être traduites sous différents modèles. La maquette numérique comporte donc : des représentations multiples sous différents modèles, plusieurs résolutions pour un même modèle et des restitutions multiples. Ce sont différentes manières de percevoir ou de rendre perceptible un modèle par acteur métier.

L'environnement de la maquette numérique consiste en *(1) un modeleur CAO*, permettant de modifier et de créer des pièces [41] ; *(2) un système de gestion de données techniques, ou PDM*, permettant de stocker la position relative de chaque pièce, de sécuriser la perte potentielle de pièces (sauvegardes), de gérer leur évolution et de gérer plusieurs configurations de pièces ou variantes de pièces ; *(3) des outils visualiseurs, ou "viewers"*, permettant de visualiser en partie ou en totalité le fichier métier sans avoir le logiciel métier qui a permis de le créer, d'affecter les images à chaque pièce constitutive et d'animer les pièces, c'est-à-dire de faire de la cinématique.

fonctions relatives au système d'information
- Implémenter la maquette numérique par les modèles spécifiques à l'analyse environnementale **- Utiliser des *viewers* pour visualiser les fichiers métiers sans avoir le logiciel métier qui l'a généré (par exemple un outil d'analyse environnementale)**

Au fur et à mesure que le processus de conception avance dans le temps, différents découpages de la maquette sont opérés : un découpage fonctionnel en début de projet (pendant l'analyse de concepts, *structuration As Designed*), jusqu'au découpage du produit pour la fabrication (vers les usines de production, avec gamme d'assemblage du produit, *structuration As Planned*), en passant par des structurations en *vue Layer : system, specialist*, pour visualiser la structure spécifique liée à un métier (par exemple le système hydraulique ou pneumatique dans un avion). C'est ce qui constitue la mise en pratique de la multi-vue.

La maquette numérique permet de modéliser bien plus que les pièces. Elle permet notamment la préparation du montage/désassemblage [42], l'utilisation de modèles cinématiques, dynamiques, modéliser les incompatibilités et interférences entre deux pièces , la modélisation de lieux, d'aménagement du poste de travail, la définition de gamme de contrôles, de représenter le produit d'une manière esthétique lors des préventes, d'étudier la compatibilité de deux produits en même temps, ou l'accessibilité de l'appareil [43], de fournir en documentation technique, comme la certification environnementale, la maintenance, ou encore la notice d'utilisation.

41. La base de donnée géométrique par exemple est composée de milliers de pièces, constituées de plusieurs modèles CAO, c'est la raison pour laquelle, la visualisation d'un modèle total CAO se fait avec des modèles allégés.

42. Elle utilise des outils permettant la modélisation de l'outillage, avec des mannequins numériques et des modèles de comportements.

43. Pour un avion par exemple, cela permet de vérifier la compatibilité de l'appareil aux éléments du parc de l'aéroport.

2.3 Synthèse du positionnement de recherche et énoncé de la problématique

Dans ce chapitre nous avons présenté le contexte industriel actuel, issu de l'évolution des principales ères industrielles des sociétés industrielles actuelles. Ce contexte est marqué par un paradigme de consommation dominant devant évoluer pour être compatible avec la notion de développement durable au sens où nous l'entendons. Pour contribuer à l'évolution de ces modes de production et de consommation, nous avons vu que **la prise en compte de l'environnement dans les pratiques des industriels est relativement nouvelle. Elle se décline au niveau du processus de conception des produits par** *l'éco-conception*. L'idéal de nos travaux de recherche est de contribuer à l'amélioration des pratiques d'éco-conception en accord avec une tactique et une stratégie globale de l'entreprise proposant une alternative au paradigme de production et de consommation actuel dominant. Nous avons alors centré notre analyse sur le contexte de l'ingénierie actuel, au travers du processus de conception, des activités et métiers en jeu, et du système d'information et de gestion de la connaissance qui le supporte.

Cette analyse de la pratique de l'éco-conception dans le contexte des systèmes complexes d'ingénierie nous amène à formuler notre problématique de recherche :

Problématique de recherche

"**Comment permettre aux concepteurs de collaborer efficacement, par des échanges d'informations et de connaissances, supportés et intégrés d'une manière adaptée, avec le métier d'expert environnement, quelque soit le contexte du projet de conception ?**"

Hypothèses de recherche

L'analyse du contexte a mis en lumière plusieurs fonctions basiques que nous pensons nécessaires à la prise en compte de la dimension environnementale en conception. Ces fonctions sont synthétisées dans le Tableau 2.4.

En ordonnant ces fonctions (*cf.* Tableau 2.4) nous pouvons voir apparaître les trois hypothèses principales qui guideront nos travaux dans les chapitres suivants :

1. **Hypothèse 1** : la dimension environnementale doit être intégrée au coeur des activités des métiers intervenant dans le processus de conception.
2. **Hypothèse 2** : il est nécessaire de pouvoir s'adapter aux contextes évolutifs de la prise en compte de la dimension environnementale en conception.
3. **Hypothèse 3** : le système d'information doit pouvoir gérer les échanges d'informations spécifiques entre l'activité d'analyse environnementale et les autres activités métier.

La Fig. 3.20 résume les hypothèses et la problématique de ces recherches.

Le chapitre suivant porte une analyse plus fine de l'état de l'art relatif aux différents éléments de la problématique. Ceci affinera alors les verrous restant pour atteindre l'idéal.

TABLE 2.4 – Hypothèses relatives au positionnement de la recherche, regroupant les fonctions présentées dans ce chapitre

Première hypothèse de recherche : intégrer la dimension environnementale dans les autres métiers intervenant en conception :
- Intégration du paramètre environnemental au coeur des autres paramètres de conception - Mécanismes de traduction entre les données relatives aux différents métiers dont les choix influencent l'analyse environnementale. - Nécessité de prendre en compte l'aspect social de la collaboration (par exemple les sciences cognitives, la psychologie du travail.) - Co-construction de connaissances entre les métiers et l'expert environnement. - Aider à cartographier les connaissances liées à la dimension environnementale. - Permettre la représentation explicite des connaissances (externalisation) permettant également la réutilisation par d'autres métiers. - Rendre accessible les connaissances cruciales, au bon moment et à la bonne personne. - Harmoniser les pratiques inter-entreprises.
Deuxième hypothèse de recherche : nécessité de pouvoir s'adapter à des contextes évolutifs de l'analyse environnementale en conception :
- Contexte du processus de conception : *itératif, existence de grandes phases, de jalons* - Contexte collaboratif : *multi-outil, multi-métier, multi-connaissances et multi-savoir faire* - Contexte de l'activité métier : *évolution du savoir, des connaissances et des outils* - Nécessité d'une vision à la fois "métier local" et transversale ou "globale" - Permettre une mise à jour et un enrichissement des connaissances au fur et à mesure des projets (évolution des connaissances entre les métiers des concepteurs et de l'expert environnement ; adaptation aux changements) validée par les activités expertes (outils et métier expert dans le domaine)
Troisième hypothèse de recherche : permettre une gestion des échanges d'informations entre l'activité environnementale et les autres activités pendant le processus de conception :
- Positionner la recherche dans un système, approche systémique. - Disposer des informations concernant tous les aspects du cycle de vie du produit au moment où elles sont disponibles. - Vues produit nécessaires relatives aux domaines des parties prenantes. - Utilisation de *viewers* pour visualiser les fichiers métiers sans avoir le logiciel métier qui l'a généré (par exemple sans l'outil d'analyse environnementale). - Nécessite un support pour proposer les contraintes environnementales. - Echange des données relatives à l'ensemble du cycle de vie du produit. - Pouvoir s'adapter à des outils environnementaux d'autre types que l'ACV. - Retour d'informations à prendre en compte en temps réel. - Rendre accessible les connaissances cruciales, au bon moment et à la bonne personne. - Permettre la mise à jour des connaissances et des outils au fur et à mesure. - Développer l'interopérabilité entre les outils métiers (dont les outils environnementaux). - Adéquation entre les possibilités offertes par le PLM et l'exploitation par les acteurs. - Implémenter la maquette numérique par les modèles spécifiques à l'analyse environnementale.

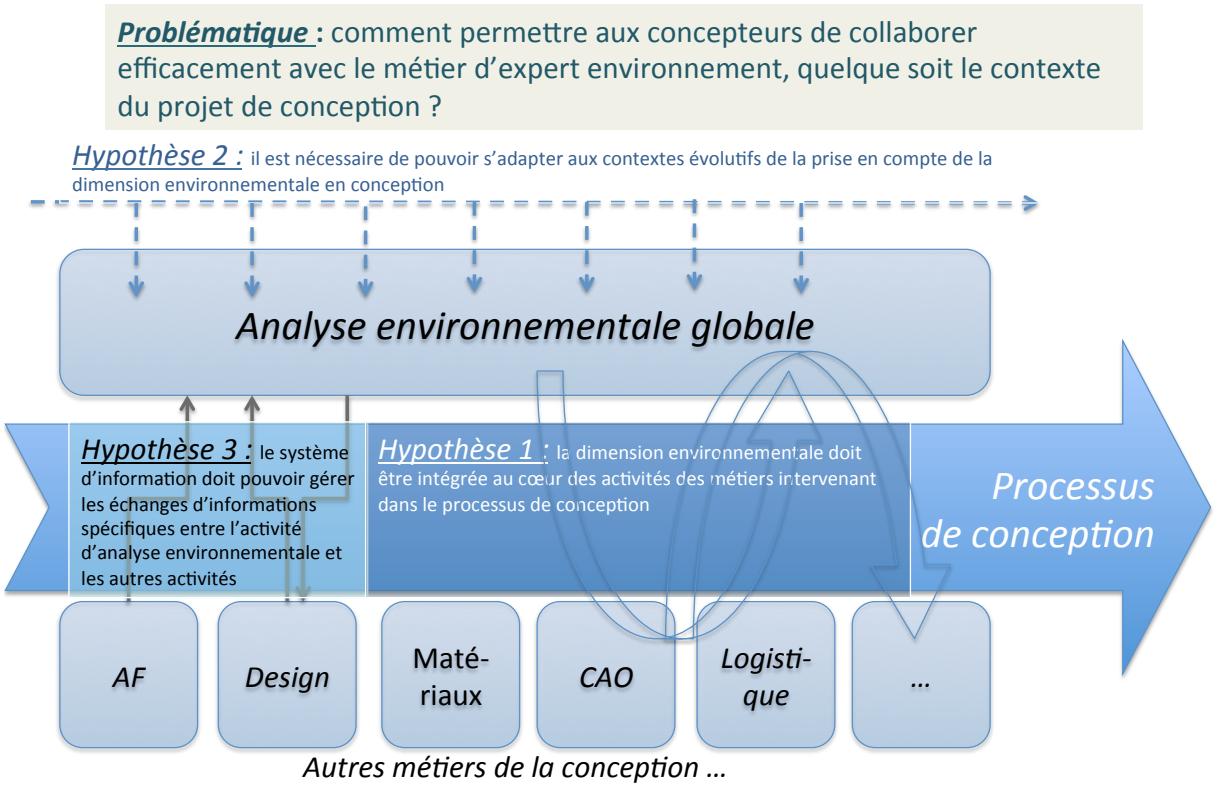


FIGURE 2.5 – Positionnement de la recherche : problématique et hypothèses de recherche

Chapitre 3

Etat de l'Art

"*La science s'effectue non pas par accumulation des connaissances, mais par la transformation des principes organisant la connaissance*"
Thomas Kuhn

Introduction du chapitre état de l'Art

Le premier chapitre a identifié trois hypothèses de recherche qui guideront notre analyse de l'existant présentée dans ce chapitre :

- **Section 1** : relative à l'intégration de la dimension environnementale en conception (*hypothèse 1*) ;
- **Section 2** : relative aux contextes évolutifs de l'analyse environnementale en conception (*hypothèse 2*) ;
- **Section 3** : relative aux solutions d'interopérabilitées des outils de conception et d'analyse environnementale (*hypothèse 3*).

Ces analyses de l'existant nous feront converger vers **trois verrous**, que nous chercherons à lever en formulant une proposition au chapitre 4.1.

3.1 Intégration de la dimension environnementale en conception

Cette section a pour objectif d'explorer la première hypothèse formulée au chapitre précédent (*cf.* Fig. 3.1). Nous allons donc nous intéresser à "l'intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit" défini ici au sens normatif [ISO(2002)] appelée aussi "conception pour l'environnement, éco-conception", ou encore, "partie environnementale de la gestion responsable des produits".

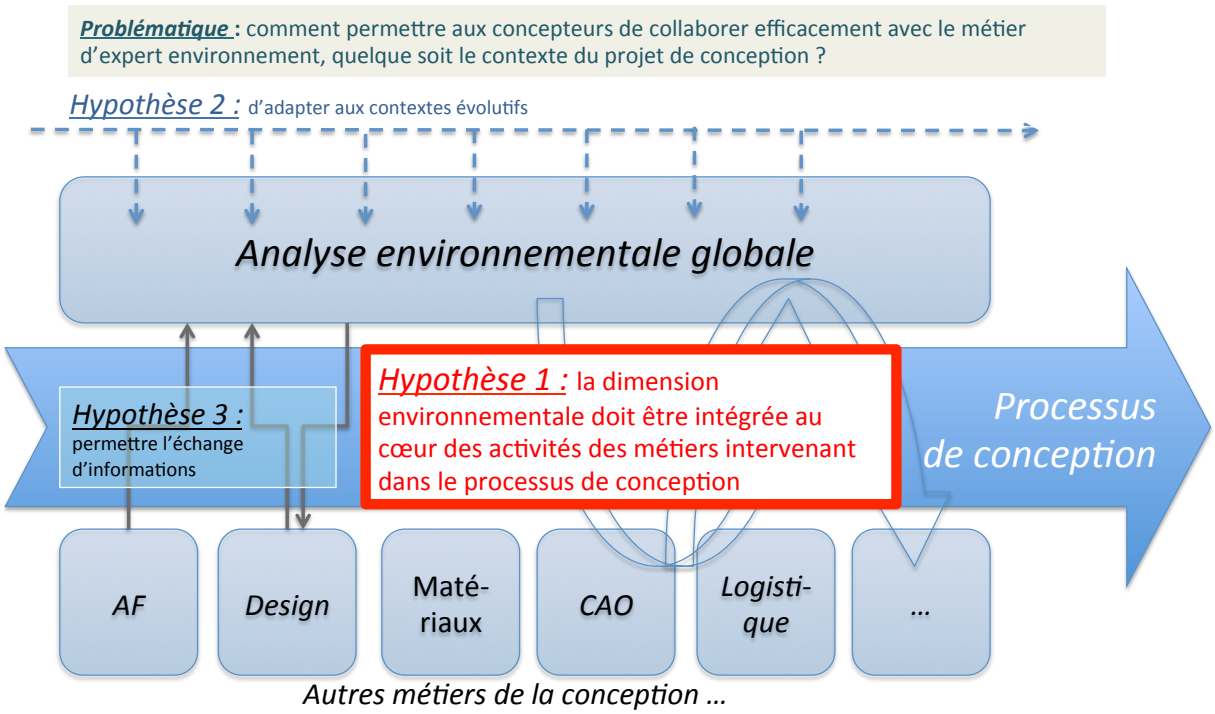


FIGURE 3.1 – Première partie de l'état de l'art : positionnement sur la première hypothèse de recherche

A première vue, le processus de conception est par nature propice à l'intégration d'une nouvelle activité puisque c'est un système collaboratif multi-métier impliquant des domaines divers. Cependant l'environnement est un domaine transversal. Notamment du fait que le "cycle de vie" est une notion maîtresse de la dimension environnementale en conception. Certains la comparent à la qualité, illustrant par là même la nécessité d'avoir un outillage transversal aux activités des parties prenantes[1], dépassant largement le périmètre de l'entreprise et d'avoir une intégration minimale dans chaque activité (connaissances, outils). C'est-à-dire d'avoir conjointement une action *locale* et une action *globale* (*ie.* transversale).

Pour mieux comprendre les tenants et aboutissants de l'intégration de l'environnement en conception, nous étudierons dans cette section les **opportunités et limites** :

1. Les parties prenantes sont l'ensemble des acteurs intervenant dans la processus de conception des produits. Ces acteurs font partie des services opérationnels de l'entreprise, liés au produit : R&D, production, Marketing, fournisseurs, ventes, logistique, distribution, SAV, etc.

– de la **prise en compte du cycle de vie** en conception ;
– des **phases du processus de conception** pour que la prise en compte de l'ensemble du cycle de vie (au sens de l'expertise environnementale), puisse générer le maximum de changement ;
– de **l'intégration de la connaissances environnementale** dans les activités impliquées au cours du processus de conception.

3.1.1 La "pensée" cycle de vie : une notion centrale dans la prise en compte de l'environnement

Il existe plusieurs visions différentes fondées sur la notion de "cycle de vie" qui ne sont pas nécessairement partagées par l'expert environnement. Nous en présenterons quatre. La première, utilisée surtout par le marketing considère le cycle de vie en cinq phases : *introduction, expansion, maturité, saturation et déclin*. C'est une vision stratégico-économique du produit. La seconde vision, utilisée au sens des concepteurs comprend les phases depuis *la conception jusqu'à la fin de vie du produit*. C'est une vision fonctionnelle du produit. La troisième est une vision de gestion du cycle de vie du produit utilisée par le chef de projet. Et la quatrième vision du cycle de vie abordée est propre à l'expertise environnementale.

Le cycle de vie au regard du marketing ne prend en compte que la période où le produit est présent sur le marché [Brissaud et al.(2006)]. Les impacts liés à sa production et la gestion de sa fin de vie sont donc exclus. Comme l'indique la Fig. 3.2 de gauche, il manque à cette interprétation du cycle de vie les phases de recherche et d'abandon que [Brissaud et al.(2006)] propose de rajouter (Fig. de droite) pour une meilleure intégration de la dimension environnementale.

Le cycle de vie au regard de l'équipe de concepteurs (*cf.* Fig. 3.3) prend en compte les fonctionnalités requises pour satisfaire l'ensemble des utilisateurs du produit (les concepteurs, les constructeurs, les utilisateurs, les recycleurs, etc.). Le concepteur entend donc par cycle de vie : *la conception, la production, l'assemblage, l'utilisation et, de plus en plus, la phase de recyclage*[2] [Brissaud et al.(2006), Niemann et al.(2009)]. Ces étapes sont parfois regroupées en trois phases : BOL (*Beginning Of Life*), MOL (*Middle of Life*) et EOL (*End of Life*). La phase BOL comprend notamment le processus de conception et de production. D'après [Kiritis D(2003)] les informations circulent entre les métiers dans la phase de BOL, grâce notamment aux systèmes **CAD**, **CAM**, **PDM** et **Knowledge Management**, utilisés très largement par les industriels et partagés avec leurs fournisseurs. En revanche, dans et entre les autres phases, la circulation est soit très difficile (entre BOL et EOL par exemple), soit quasiment inexistante.

Un certain nombre de facteurs sont pris en compte au travers des modélisations du cycle de vie du point de vue fonctionnel, par exemple : l'aptitude à l'usage, la fiabi-

2. Nous pourrions rajouter une liste non exhaustive de phases telles que : la conception, la production, l'assemblage, la manipulation, l'emballage, la logistique, la distribution, l'utilisation des consommateurs, la maintenance, le service après vente, la collecte en fin de vie, les traitements de fin de vie (élimination, recyclage, seconde vie, etc.).

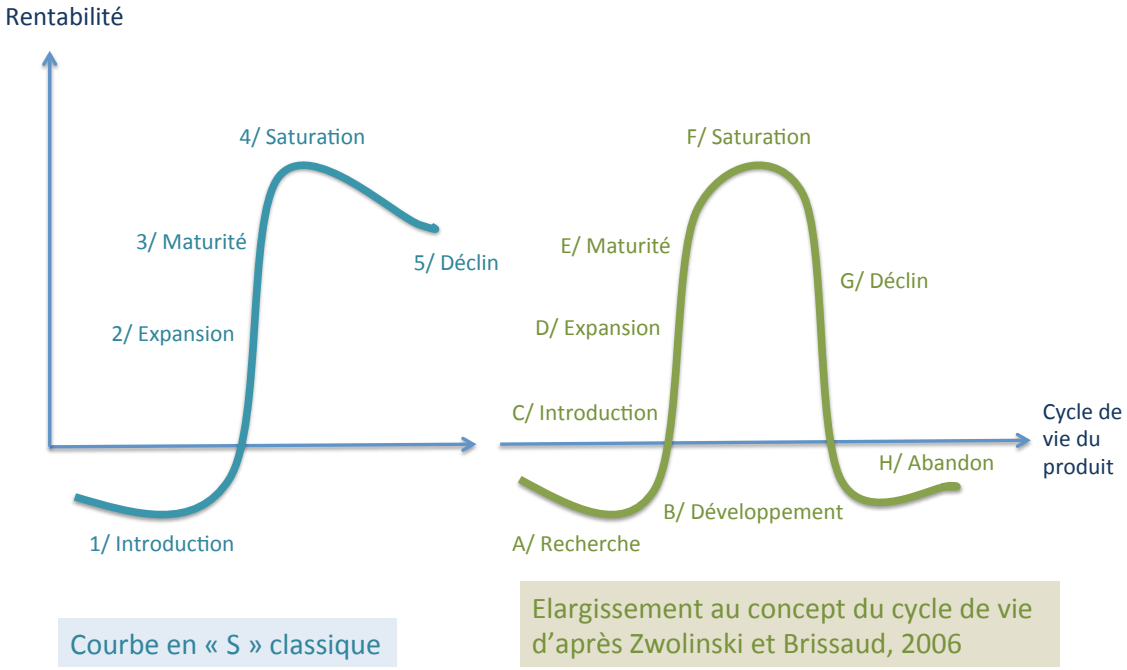


FIGURE 3.2 – Vision du cycle de vie pour les commerciaux améliorée par [Brissaud et al.(2006)]

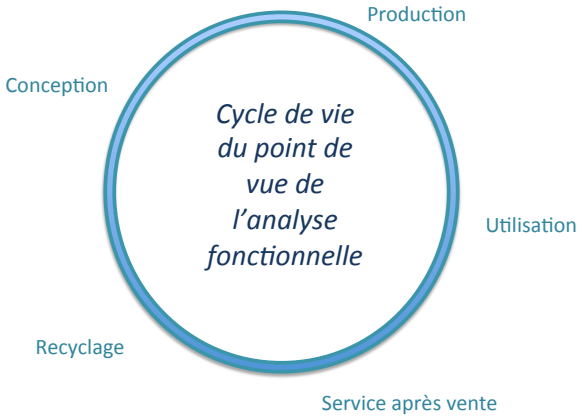


FIGURE 3.3 – Vision du cycle de vie du point de vue de l'analyse fonctionnelle

lité/disponibilité, la facilité de maintenance/capacité d'entretien, la facilité de mise à jour, la sécurité et responsabilité vis-à-vis du produit.

Le management orienté cycle de vie du produit est une approche sur la gestion de la donnée produit, souvent supportée par les systèmes **PLM**. Comme les systèmes PLM échangent des informations avec les systèmes d'Enterprise Ressource Planning, **ERP**, ils accompagnent une vision du cycle de vie qui s'inscrit dans une approche de gestion, d'analyse et de contrôle de toutes les données dans l'entreprise liées au cycle de vie du produit [Gao et al.(2003)]. Le chef de projet aidé par ces outils de gestion a pour objectifs de réduire l'écart entre la conception mécanique et la production, la prise en compte le plus tôt possible des contingences liées à l'évolution du produit, d'augmenter la fréquence/cadence de la définition de nouveaux produits, de gérer les ressources et de contrôler les flux d'informations avec la chaîne de production.

Le cycle de vie au regard de l'expertise environnementale : s'inscrit dans une approche de *management* environnemental (parmi l'évaluation des risques, l'évaluation de la performance environnementale, l'audit environnemental et l'étude de l'impact environnemental) qui repose sur *l'analyse du cycle de vie du produit* dans le but de réduire les impacts potentiels négatifs du produit généré dans l'environnement naturel. L'**ACV** (pour Analyse du Cycle de Vie) est une méthode quantitative multi-critères d'évaluation des impacts environnementaux potentiels d'un système (produit, procédé, service) (*cf.* [Grisel et Osset(2008)]), dont les principes d'application sont présentés dans les normes ISO 14040 & 44[3]. Le système est étudié à chaque phase de son cycle de vie, décrites par : "phases consécutives et liées d'un système de produits de l'acquisition des matières premières ou de la génération des ressources naturelles à l'élimination finale" [ISO(2002)], soit du berceau à la tombe, ou *Cradle to grave* en anglais, ou du berceau au berceau (objectif visé par certains auteurs) *Cradle to Cradle*, [McDonough et Braungart(2002)]. Moyennant une définition du périmètre d'étude, le produit est pris en compte avec tous les autres éléments qui interviennent lors des phases de son cycle de vie. Ainsi, seront comptabilisés les emballages, les flux nécessaires au fonctionnement des infrastructures, le transport, ainsi que les flux annexes nécessaires lors de la phase d'utilisation, les pièces d'entretien, la publicité, etc. Ces éléments réunis sont plus impactants que le produit en tant que tel.

Par conséquent, la méthode d'ACV nécessite d'avoir une vision transversale et unifiée par le pilotage d'un expert, car "les *impacts environnementaux potentiels* sont des expressions relatives dans la mesure où ils sont liés à l'unité fonctionnelle d'un système de produits (par exemple l'utilisation des ressources et les conséquences environnementales des émissions) tout au long du cycle de vie d'un produit" [ISO(2006)]. A ce niveau *transversal, global,* l'évaluation environnementale fait l'objet d'un calcul quantitatif d'inventaires de flux, une évaluation des impacts qui en découle. Puis sont formulées des recommandations et propositions d'alternatives destinées aux activités métier *locales* pour améliorer la performance environnementale du produit. La démarche générale garantie à la fois un calcul scientifique, tout en évitant par son caractère multi-étapes du cycle de vie et multi-critères

3. Début de la procédure normalisée en 1997 pour la norme ISO 14040 :1997.

(plusieurs indicateurs d'impacts environnementaux) d'éventuels transferts de pollution.

Enfin, les outils de mise en oeuvre de la méthode l'ACV sont l'objet de développements actuels : sur une meilleure prise en compte des *effets rebonds*, des ACV dynamiques, des ACV conséquentielles, etc. [Hochschorner et Finnveden(2003)]. [Reap et al.(2008)] préconise notamment le développement de modèles de données standardisés, relatifs à l'élaboration des Inventaires du Cycle de Vie, afin d'améliorer la disponibilité et la qualité des données qui affectent considérablement les résultats des ACV.

Risques de problème d'intégration de la dimension environnementale dus à la diversité des cycles de vie

Nous constatons donc que ces quatre visions du cycle de vie peuvent être utilisées à trois niveaux différents : *le niveau entreprise* (basé sur le concept marketing du cycle de vie du produit), *le niveau transversal du projet* (où deux visions s'affrontent : la vision de gestion du cycle de vie par les chefs de projet et celle de l'expert environnement) et *le niveau de l'expertise locale* (basé sur l'analyse fonctionnelle pour les concepteurs).

Ces différentes interprétations possibles, dans une situation de collaboration, signifient que des conflits entre les métiers et l'expertise environnementale peuvent apparaitre, réduisant les chances d'intégration de la dimension environnementale en conception. Pour les éviter, [Brissaud et al.(2006)] préconise de *distinguer le cycle de vie du produit, pouvant être de durée très courte, à ceux de l'industrie, pouvant durer des dizaines d'années*, puis, d'*identifier à qui s'adresse le cycle de vie. Les intérêts de l'analyse, et donc les objectifs, ne sont en effet pas les mêmes pour un consommateur que pour un industriel.* Puis, au niveau des activités métier *locales*, pour que la prise en compte des paramètres environnementaux soit efficace, elle doit être établie dans le sens relatif à la vision du cycle de vie de l'expert environnement. **Cela nécessite qu'un travail d'intégration entre les paramètres métier maîtrisés localement et les conséquences environnementales de ces paramètres, soit réalisée. Ainsi la vision du métier local ne rentrera pas en contradiction avec la vision environnementale.**

Au niveau *transversal*, l'intégration de la dimension environnementale en conception nécessite une cohérence entre la gestion du cycle de vie du produit réalisée par le chef de produit et la vision du cycle de vie relative à l'expertise environnementale. [Brissaud et al.(2006)] préconise de *définir les indicateurs utilisés à chaque phases en fonction des objectifs stratégiques (par exemple pour satisfaire le couple marketing/fabrication).* Jean Batiste Puyou (société de consulting en éco-conception EVEA©) insiste sur la nécessité d'utiliser les outils d'analyse environnementale au niveau *global* et en lien avec les autres services de l'entreprise : "les outils dont nous disposons actuellement font plus de l'éco-validation d'un projet bien avancé, que de l'aide à l'EC [Eco-Conception], au fil du projet. Ils sont donc plus du ressort du chef de projet que du concepteur. D'autant plus que l'EC étant un concept global, il faut que ces outils sachent dialoguer avec les ERP pour la gestion des coûts, mais qu'ils soient aussi accessibles par des services tels que le marketing ou la logistique qui ont leur mot à dire en la matière"[Le (2010)]. Nous nous intéresserons plus précisément sur les liens entre les niveaux des métiers et les niveaux tactique et stratégique nécessaires à maintenir la cohérence de cette approche globale en entreprise.

3.1.2 Les phases du cycle de vie : opportunités et limites

La Fig.3.4 présente des courbes de coûts investis et coûts réels, en fonction de taux de connaissances associées au produit et des phases du cycle de vie. De nombreux auteurs ont décrit des courbes aux valeurs sensiblement similaires soit suivant les phases de conception [Reyes(2007)], [Dewulf(2003)], soit [Tichkiewitch et Riel(2010)] suivant l'ensemble du cycle de vie. L'intérêt de la Fig.3.4 est de comprendre les tendances d'évolution du coût et de la connaissance du produit, dans une perspective globale du cycle de vie du produit.

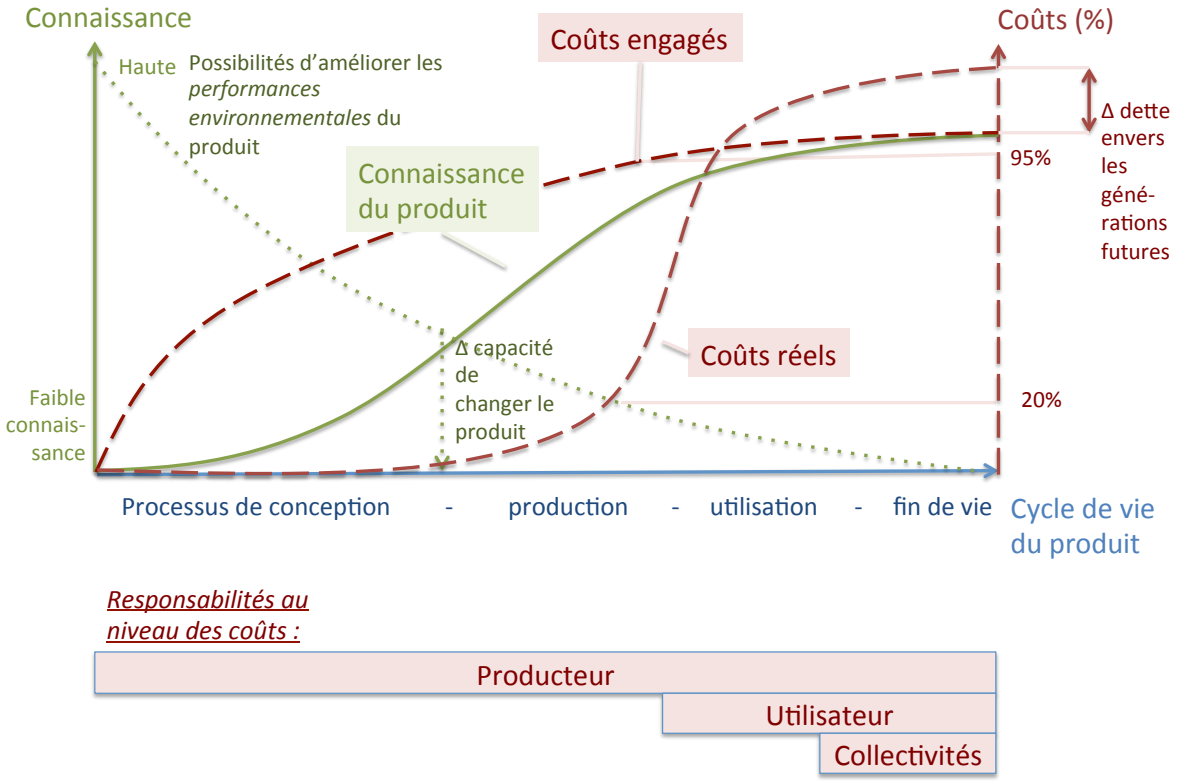


FIGURE 3.4 – Courbes des coûts investis et coûts réels, en fonction de taux de connaissances associées au produit et des phases du cycle de vie, par extrapolation des travaux de [Reyes(2007)], [Dewulf(2003)], [Tichkiewitch et Riel(2010)]

Contrairement à la vision des auteurs cités précédemment, sur la Fig. 3.4, la courbe d'évolution des coûts ne tangente pas sur la barre des 100% en fin de vie, mais légèrement au-dessus. Car la fin de vie du produit ne signifie pas que ses effets ne continuent pas d'engager des coûts sur plusieurs années. Par exemple, le coût de retraitement d'un produit contenant des particules hautement radioactives s'échelonne sur plusieurs générations. Autrement dit, la fin de vie laisse une empreinte, une dette envers les générations futures. Cette dette est en lien avec la *facture entropique de l'âge industriel*. [Rifkin(2012)] la définit comme étant toute l'énergie dépensée des 200 années au travers du charbon, du pétrole

et du gaz naturel pour propulser notre mode de vie industriel (période de la première et seconde révolution industrielle).

Considérons les trois points suivant en réponse à la lecture de la Fig. 3.4 :

- Il est assez logique que **la connaissance du produit** augmente au fur et à mesure de sa conception. La connaissance totale du produit, peut être atteinte en fin de vie du "produit rendant les services associés". Car le produit et ses fonctions associées ne sont que des suppositions sur ce à quoi il va vraiment servir et la façon dont il va réellement finir sa vie. Suivant le type de produit les phases d'utilisation et de fin de vie, seront plus ou moins longues et plus ou moins sensibles, aux variations du contexte dans lesquelles elles se situent [4].
- **Les possibilités d'améliorer les performances environnementales du produit** décroissent au fur et à mesure de son cycle de vie. Ce sont dans les phases amont du processus de conception que les capacités d'amélioration [5] sont les plus élevées.
- **Les coûts engagés** sont décalés par rapport aux **coûts réels**. Certains auteurs estiment à 95% les coûts engagés en fin de production pour des coûts réels de 20%. Bien que le producteur soit obligé devant la loi d'étendre sa responsabilité jusqu'à la fin de vie du produit, certaines dépenses à venir sont encore bien souvent minimisées. Dans ce cas, l'utilisateur et les collectivités rajoutent des investissements. La différence restant à charge (notamment dans le cas d'impacts environnementaux à inertie longue) constitue la dette générée envers les générations futures.

L'intégration de la dimension environnementale doit donc avoir lieu en continu pendant le processus de conception et au plus tôt dans les phases amont. Cela aura pour double effet de réduire les impacts environnementaux négatifs générés par le produit jusqu'à sa fin de vie, et de réduire les coûts futurs restant à la charge des industriels, des particuliers et de la collectivité. Donc la stratégie de réduction des coûts globaux ne rentre pas en contradiction avec la stratégie de réduction des impacts environnementaux. Au contraire, l'une peut favoriser l'autre.

3.1.3 L'intégration de la connaissance environnementale : complémentarité entre les expertises *locale* et *globale*

Connaissances variées de l'expert environnement

D'après [Millet(2003)], la confrontation entre "l'expertise en environnement, l'expertise en conception, et les aspects stratégiques doit correspondre à un terreau fertile pour les apprentissages croisés (émergence de nouvelles connaissances se produisant lorsque chaque catégorie d'acteurs est capable à la fois de présenter à ses interlocuteurs son savoir

4. Pour modéliser ces contextes, les ACV conséquencielles sont utilisées pour modéliser la projection du produit dans un contexte futur (par exemple le contexte énergétique de la France en 2050) ; les ACV dynamiques sont utilisées pour modéliser la dynamique d'un flux à un instant t, selon une loi de comportement d'un flux (émission polluante par exemple).

5. Nous définissons un *aspect environnemental* par un "élément des activités, produits ou services d'un organisme, susceptible d'interactions avec l'environnement" [ISO(2002)]. Un *impact environnemental* correspond pour sa part à "toute modification de l'environnement, négative ou bénéfique, résultant totalement ou partiellement des activités, produits ou services d'un organisme"[ISO(2002)].

de manière compréhensible et d'accepter de modifier ses acquis pour prendre en compte les aspects du nouveau domaine)". Les auteurs de [Millet et al.(2007)] insistent sur le besoin d'avoir un expert environnement. Car il donne de la *légitimité* et de la *crédibilité* à la dimension environnementale auprès de l'équipe de concepteurs : capacité à répondre à une question technique, à réaliser une analyse scientifique, à l'aide d'un savoir-faire et l'utilisation d'outils adaptés. **L'expert environnement développe deux catégories de connaissances qui s'enrichissent mutuellement** :

1. **Connaissances relatives à son expertise propre :** il a la capacité de piloter les analyses environnementales au niveau transversal. Sa grande rigueur d'analyse lui permet méticuleusement d'analyser l'ensemble des données liées à un produit, de le modéliser, de critiquer les résultats et de les interpréter. Par exemple, l'expert maitrisant l'outil d'ACV, comprend l'ensemble des méthodes de calculs d'impacts [6] associés aux outils d'ACV ; maîtrise la signification des impacts potentiels ou impacts de dommages ; maîtrise les bases de données liées au logiciel ; est à jour sur l'évolution des méthodes, etc.
2. **Connaissances relatives aux autres métiers avec qui il collabore :** elles varient en fonction du contexte du projet (*cf.* section 3.2.1). Par exemple, en phases amont du processus (expression et spécification du besoin) l'expert environnement participe à l'analyse fonctionnelle du produit et développe des connaissances minimales dans ce domaine pour pouvoir collaborer avec les experts en analyse fonctionnelle. Puis, en conception préliminaire, il réalise des analyses à la demande des experts en matériaux, technologies, designers (etc.) et répond spécifiquement à la problématique de chacun pour favoriser l'émergence des concepts les moins impactants.

D'après notre analyse précédente (*cf.* résumé des hypothèses de recherche tableau 2.4), pour qu'un lien soit établi entre les paramètres de différentes expertises, une des conditions nécessaires est qu'un minimum de connaissance de chaque expert soit partagée. Mais étant donnée la forte implication de l'expert environnement dans les choix de conception du produit, la question est de savoir comment peut-il faire le lien entre ses connaissances et celle des experts intervenant dans les activités du processus de conception ? C'est-à-dire, **comment faire le lien entre les paramètres environnementaux et les paramètres de conception relatifs aux différents experts métier avec qui il est amené à collaborer.**

L'analyse de [Ilgin et Gupta(2010)], portant sur plus de 540 publications scientifiques de référence dans le domaine de la conception "consciente" vis-à-vis de l'environnement ainsi que de la production et du désassemblage, abonde dans le sens de cette connaissance minimale, notamment au travers du rôle de l'entreprise de former ses employés, et celui de l'enseignement supérieur dans la formation initiale des étudiants : "*firms must educate their employees in environmental aspects of manufacturing to increase their competitive edge. Moreover, ECM (Environmentally Conscious Manufacturing) principles should be incorporated into engineering curriculums at universities*". Ce minimum de connaissances

6. Ces calculs peuvent dépendre aussi bien de la chimie, de la biologie, de l'étude de la faune et de la flore, que des mathématiques, des statistiques, de la physique ou de la climatologie.

concerne tous les acteurs de la conception. **Les autres métiers de la conception doivent aussi partager un minimum de connaissance en environnement afin d'établir des liens entre les paramètres environnementaux et leur paramètres propres**. Nous avons donc réalisé une enquête auprès d'étudiants en dernier cycle d'école d'ingénieur afin d'évaluer les connaissances environnementales minimales acquises par les ingénieurs, pouvant les aider à collaborer avec l'expertise environnementale.

Enquête sur l'état des connaissances environnementales à l'UTT

Nous avons mené une enquête au sein de l'Université de Technologie de Troyes (en 2009), sur une fraction de 143 étudiants représentant chaque catégorie de formation, d'une manière proportionnelle au taux d'inscrits, sauf pour les étudiants de master IMEDD (Ingénierie et Management de l'Environnement et du Développement Durable) qui par rapport à leur nombre ont répondu massivement. Cette enquête s'est réalisée d'une manière anonyme et libre par intranet, via un questionnaire.

La première partie de l'enquête sonde le **taux d'acquisitions de connaissances environnementales au sein de l'école d'ingénieurs**. Sur la Fig. 3.5, les taux cumulés montrent que 53% des étudiants sondés (toutes filières confondues) n'ont acquis aucune connaissance en environnement lors de leur cursus d'ingénieur ou de master (autre qu'IMEDD) à l'UTT. Ces chiffres sont légèrement sous-évalués par le fort taux de participation des étudiants en master IMEDD. Si la filière formant des ingénieurs spécialisés en matériaux enregistre un fort taux d'acquisition de connaissance environnementale, ce n'est pas le cas en conception de systèmes mécaniques (73% des futurs ingénieurs en conception de systèmes mécaniques n'ont aucune connaissance en matière d'environnement), et encore moins en systèmes industriels (+ 2%). Ces étudiants ont pourtant à leur disposition un nombre important d'enseignements abordant la dimension environnementale sans rien qui les en prive, puisque le système organisationnel des Universités de Technologie, permet à l'étudiant de "construire à la carte" le profil de formation qu'il souhaite avoir.

La seconde partie de l'enquête sonde le **taux de réinvestissement de ces connaissances environnementales lors des stages de mi-parcours et de fin de cursus, lors des cours, lors des projets et dans la sphère privée**. Les résultats montrent que seulement 8% des étudiants formés n'ont jamais réinvesti ces connaissances. 21% se sont servi de ces connaissances lors d'un projet de travail. 16% se sont servi de ces connaissances lors de leurs stages en entreprise (deux fois 6 mois).

La troisième partie de l'enquête se centre sur l'expérience des étudiants lors de leurs stages en entreprise, et vise à identifier **leur positionnement vis-à-vis de l'environnement dans l'entreprise**. Les résultats de l'enquête montrent que pendant leur stage :

- 4% des étudiants n'ont pas pu identifier de service lié à l'environnement ;
- dans 1/3 des cas le responsable environnement appartenait au service Qualité Sécurité Environnement de l'entreprise ; dans 17% des cas, au service Recherche et Développement (en lien direct avec les futurs ingénieurs en conception) ;

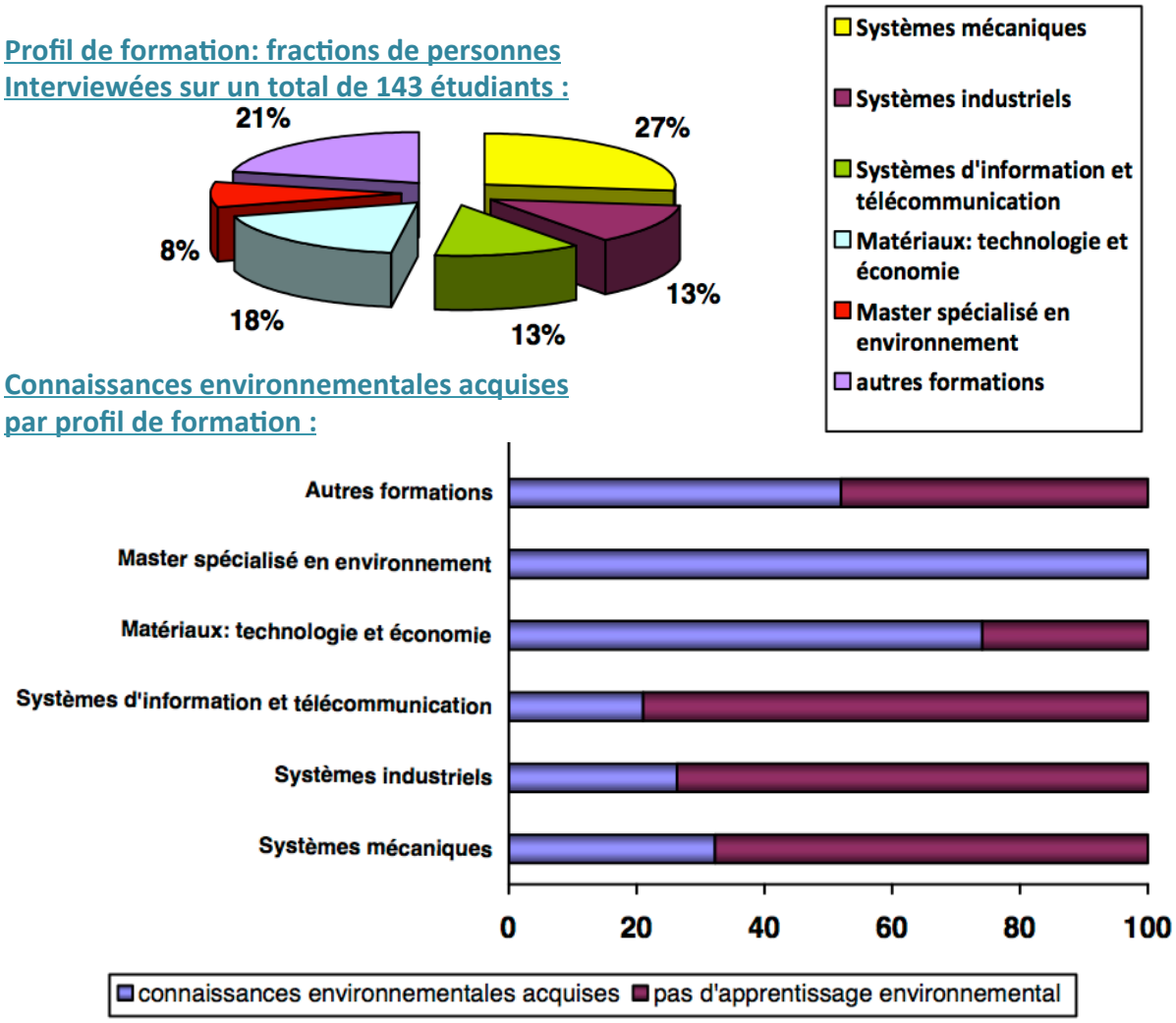


FIGURE 3.5 – Connaissances environnementales acquises par 143 étudiants selon le profil de formation suivie à l'UTT entre 2006 et 2009.
Selon l'enquête réalisée en 2009 sur 143 étudiants répartis proportionnellement selon le type de formation proposée à l'UTT (sauf pour le master spécialisé en environnement).

– la moitié des étudiants n'ont eu aucune relation avec le responsable environnement de l'entreprise. L'autre moitié des étudiants est divisée entre un quart d'étudiants ayant échangé de manière peu fréquente des informations avec le responsable environnement de l'entreprise, et un quart de manière fréquente ;
– 53% des étudiants ont déclaré avoir reçu des informations concernant l'environnement.

Parmi les étudiants sondés ayant reçu des informations liées à l'environnement lors de leur stage, la Fig. 3.6 montre que le moyen de diffusion des informations reste largement les interventions en interne et la consultation de fascicule ou d'ouvrages internes à l'entreprise. Les entretiens personnalisés représentent environ 10% des cas. Si le contact direct est assez souvent utilisé (entretien, formation interne), il n'en reste pas moins un moyen qui demande des ressources importantes en terme de temps et de personnel à l'entreprise. Le logiciel est parfois utilisé, ce qui a pu être le cas d'une manière indirecte si l'étudiant devait utiliser un logiciel demandant de prendre en compte la dimension environnementale (par exemple l'utilisation du module "Sustainability" du logiciel de CAO *SolidWorks* de Dassault Systèmes ©).

La dernière partie de l'enquête s'intéressait à la **motivation des étudiants vis-à-vis de leur contribution à la réduction des impacts liés à l'industrie sur l'environnement**. Les 3/4 des étudiants sondés sont *très* ou *assez motivés* pour intervenir dans leur vie professionnelle pour limiter les impacts sur l'environnement de leur entreprise. Enfin, à la question *votre expérience de stage en entreprise vous a-t-elle découragée par rapport aux mesures à prendre vis-à-vis de l'environnement pour limiter les impacts des industriels*, 45% des étudiants répondent qu'au contraire, ils ont été encouragés par cette expérience.

Conclusion de cette enquête

Malgré les limites de cette enquête (étudiants uniquement de l'UTT, enseignement supérieur disposant d'un large choix de cours en environnement, du fait du centre de recherche interdisciplinaire sur le développement durable (CREIDD) et d'un master spécialisé en écologie industrielle et en éco-conception), nous constatons qu'une fraction de jeunes ingénieurs arrivant sur le marché en 2009 partagent un minimum de connaissances environnementales (dans 50% des cas pour les ingénieurs UTT). D'autre part, les entreprises proposent des formations environnementales à leurs salariés, en utilisant une assez grande variété de supports. Enfin, les 3/4 des étudiants sondés se sentent tout à fait motivés à prendre en compte la dimension environnementale dans leur future carrière.

Trois critères d'amélioration de l'intégration de la dimension environnementale en conception sont donc en partie présents : (1) connaissances minimales environnementales, (2) apprentissage et mode de diffusion des paramètres environnementaux en entreprise (supports différents) et (3) motivation des employés vis-à-vis des aspects environnementaux à prendre en compte en conception. Nous pouvons imaginer que la connaissance environnementale enseignée ira en s'accentuant, puisque les écoles et universités doivent proposer des enseignements relatifs au "développement durable".

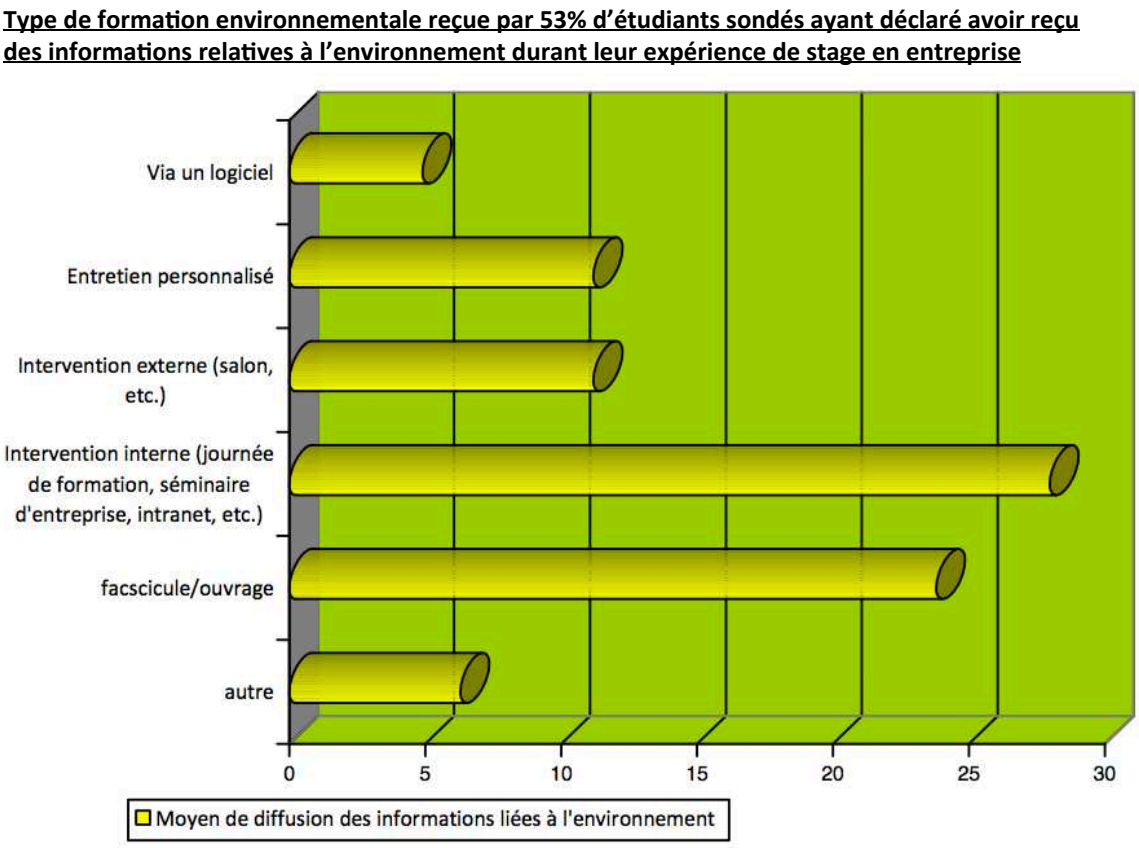


FIGURE 3.6 – Moyen d'acquisition de connaissances environnementales en entreprise, selon l'enquête réalisée en 2009 sur 143 étudiants de l'UTT.

Ces résultats représentent 53% des sondés, puisque 47% des sondés ont déclaré n'avoir reçu aucune formation liée à l'environnement durant leur stage en entreprise.

Synthèse de la section relative à l'intégration de la dimension environnementale en conception

Rappelons que la problématique de nos recherches est de *formuler une proposition afin de permettre aux concepteurs de collaborer efficacement, par des échanges d'informations et de connaissances, supportés et intégrés d'une manière adaptée, avec le métier d'expert environnement, quelque soit le contexte du projet de conception.* En réponse à la première hypothèse émise (Tableau 2.4), nous avons constaté que **l'intégration environnementale doit avoir lieu en continu et au plus tôt pendant le processus de conception**. Cela suppose une implication des parties prenantes.

En effet, la notion de cycle de vie est une notion centrale en éco-conception et elle n'est pas partagée par toutes les parties prenantes. Pour éviter les conflits entre plusieurs visions différentes qui nuiraient à l'intégration de la dimension environnementale, nous distinguons deux niveaux d'actions. **Au niveau *global*, la gestion du cycle de vie du produit réalisée par le chef de projet et la vision du cycle de vie relative à la dimension environnementale doivent être cohérentes.** Cette négociation d'approche commune de gestion du cycle de vie est favorisée par le fait que la stratégie de réduction des coûts globaux ne rentre pas en contradiction avec la stratégie de réduction des impacts environnementaux. **Au niveau *local*, un travail d'intégration entre les paramètres métier maîtrisés localement et les conséquences environnementales de ces paramètres doit être réalisée.** Une formation environnementale minimale pour l'ensemble des parties prenantes, favorise le **partage d'un minimum de connaissances environnementales dans chaque activité locale** (par exemple pour les jeunes ingénieurs de R&D). Cette connaissances minimale peut être acquise par des supports différents, parfois présents en entreprise. Elle favorise la motivation des concepteurs à la prise en compte de l'environnement au coeur de leur métier. Et surtout, elle **facilite l'établissement d'un lien de cause à effet entre les paramètres environnementaux et les paramètres de conception que le concepteur maîtrise localement.**

3.2 Contextes évolutifs de l'analyse environnementale en conception

Après avoir abordé la question de l'intégration de l'environnement en conception sous l'angle de la connaissance minimale à partager, nous pouvons considérer les méthodes et outils supportant la prise en compte de l'environnement au cours du processus de conception. Nous verrons que leur utilisation peut être guidée par la définition et l'utilisation de critères contextuels. En effet, la seconde hypothèse prise pour répondre à notre problématique est que notre proposition devrait s'adapter aux contextes évolutifs de l'analyse environnementale en conception (*cf.* Fig. 3.7). Nous allons donc étudier plus finement les contextes des activités dans lesquels sont réalisées les analyses environnementales.

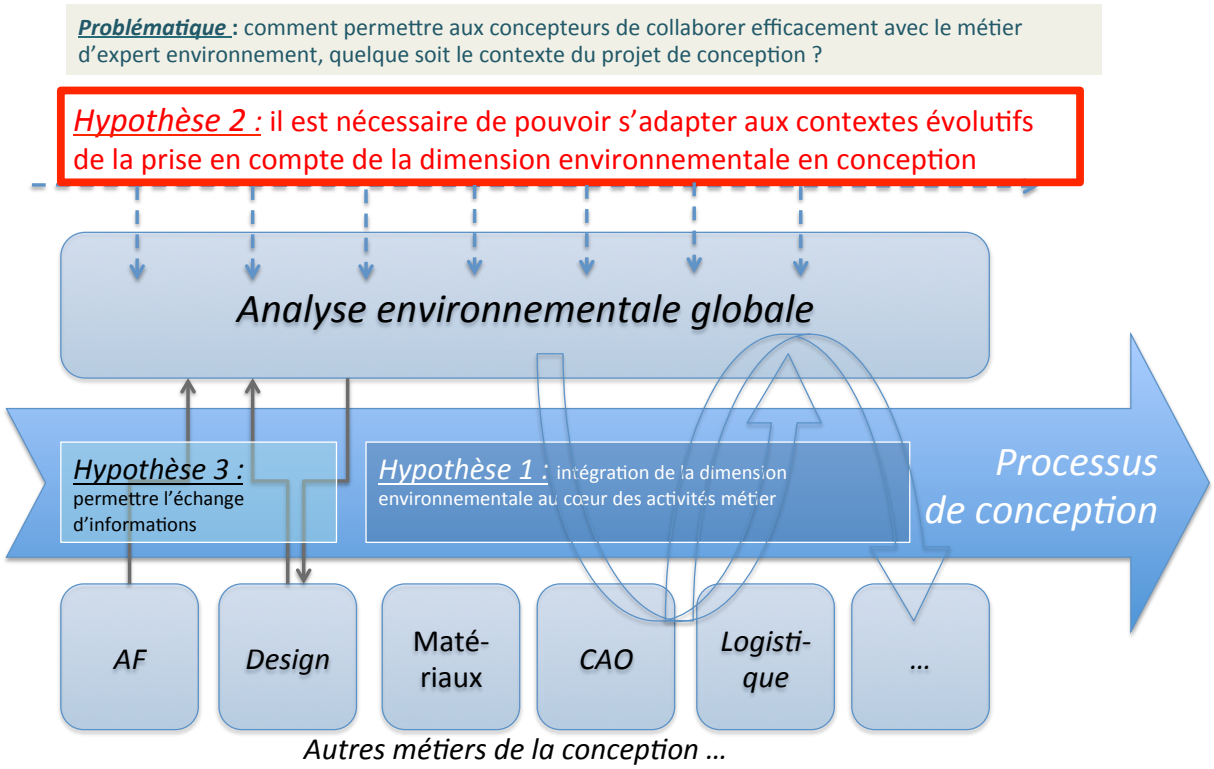


FIGURE 3.7 – Deuxième partie de l'état de l'art : positionnement sur la deuxième hypothèse de recherche

Montée exponentielle du nombre de méthodes "d'éco-conception"

Le nombre de méthodes dédiées à l'éco-conception (au sens large) enregistre une hausse de progression exponentielle depuis les 20 dernières années, illustrée par le tableau 3.1. Le tableau présente une fraction du nombre de publications relatives à des méthodes d'éco-conception, entre 1990 et 2010 [7].

TABLE 3.1 – Augmentation remarquable des articles scientifiques traitant de "*ecodesign methods*"
Recherche effectuée sur Science Direct en novembre 2011 [Rio et al.(2012a)]

Années	jusqu'à 1993	1994-1999	2000-2005	2006-2011
Nombre de publications	8	23	89	317

Le mot-clé "*Ecodesign method*" utilisé dans cette étude, est restrictif par rapport à l'ensemble des méthodes et outils qui *favorisent*, d'une manière ou d'une autre l'émergence de produits conçus en limitant les impacts du produit sur l'ensemble des phases de son cycle de vie. Il faudrait prendre en compte pour être plus juste, l'ensemble du champ lexical "d'outil - méthodes - supports - méthodologies", associé aux domaines de l'éco-conception (inclus-exclus, liées, etc.), comme l'éco-innovation, la reconception, l'adaptation, etc.

Principes de base sur l'utilisation d'un outil en conception

[Baumann et al.(2002)] montre que les outils d'éco-conception se développent en grand nombre sans qu'il n'y ait vraiment de recherche sur l'amélioration des outils existants, notamment en terme d'usage. Pour qu'un outil soit utilisé en conception, il faut que plusieurs éléments soient réunis : l'outil doit être compréhensible, facile à utiliser, les données nécessaires à son utilisation doivent être présentes, son utilisation ne doit pas dépasser le temps que l'on peut y consacrer, les résultats qu'il fournit doivent pouvoir être exploitables tout de suite et correspondent bien aux objectifs. De plus, les outils de *Design To Environment* (**DTE**) doivent être utilisables tout au long du processus de conception, en étant intégrés aux outils de conception existant et doivent pouvoir prendre en compte l'ensemble du cycle de vie des produits [Lindahl(2005)]. Les outils de DTE doivent également correspondre aux utilisateurs (manière de travailler, culture, savoir-faire, etc.) [Vicky(2006)].

Le fort développement des outils et méthodes supportant l'éco-conception ainsi que les nombreux facteurs à prendre en compte pour garantir leurs utilisations adaptées, au cours du processus de conception, montrent que les contextes d'utilisation de ces supports sont variés, nombreux et évolutifs (varient dans le temps). Ce constat implique de définir des critères, permettant de classer les outils et méthodes par contextes.

7. Recherche effectuée sur Science Direct, en utilisant le mot clé : *ecodesign methods*

3.2.1 Catégories de critères contextuels pour la classification des méthodes et outils d'analyse environnementale

Classifications des outils d'éco-conception

Plusieurs auteurs proposent des classifications d'outils suivant des critères variés, en voici quelques exemples :

- classification des outils selon le critère *d'intégration* : [Millet(2003)] montre par exemple trois degrés d'intégration de l'éco-conception : faible et locale (éco-conception partielle), moyenne en filière produit (éco-conception classique), forte relevant de l'écosystème industriel (éco-conception innovante).
- classification des outils selon le critère *d'expertise de l'utilisateur* : plusieurs auteurs font la distinction entre les outils relevant d'une expertise métier environnementale propre et les outils simplifiés, à la disposition des concepteurs relevant d'autres expertises (ingénieur : matériaux, mécaniques, calcul de structure, production, etc.) [Millet et al.(2007)]. L'outil d'ACV par exemple, est un outil métier ; d'autres auteurs parlent d'outils *sophistiqués vs. simples* [Unger et al.(2008)]. La norme [ISO(2009)] pour l'intégration de l'environnement en conception de produits mécaniques présente une liste d'outils en annexe de la norme. Cette liste classe les outils environnementaux par domaines d'expertise des concepteurs (choix des matériaux par exemple, en lien avec leurs outils métiers).
- classification des outils selon le critère *de phases d'utilisation et données manipulées* : [Millet(2003)] propose par exemple une classification relative aux données nécessaires, critères environnementaux (catégories d'impacts par exemple), des nombres de phases du cycle de vie, de l'exploitabilité en conception, du temps d'apprentissage.
  [Navarro et al.(2005)] défini les fonctions et la forme du système dans lequel l'expert environnement intervient (*the ecodesigner system*) à travers 7 grandes activités, qui suivent les grandes étapes du processus de conception classique. Ils proposent ensuite plusieurs classifications de ces outils, et notamment en fonction de ces étapes.
  [Kota et Chakrabarti(2007)] définit des outils de DTE adaptés aux phases amont et aux phases de conception détaillées (*outils globaux*). Ils proposent également des *outils spécifiques* à une étape du cycle de vie du produit. Et montrent la nécessité d'avoir recours également à une batterie d'outils complémentaires durant le développement du produit, pour *accompagner la démarche des concepteurs* : les informer (normes, etc.), les former (checklistes, exemples, etc.), les aider à critiquer (outils d'analyse d'incertitudes) et capitaliser les expériences passées.
- classification des outils selon *les catégories différentes* : [Baumann et al.(2002)] propose par exemple les "*frameworks, checklists and guidelines, rating and ranking tools, analytical tools, software and expert systems, organising tools*".
- classification des outils selon *des objectifs* : d'évaluation quantitative ou qualitative, d'amélioration, stratégique, sensibilisation, ou de communication, d'après [Janin(2000)]. [Reyes(2007)] propose les catégories suivantes : évaluation de l'impact environnemental, préconisation, organisationnel, stratégique, sensibilisation et communication.

Nous pourrions en présenter bien d'autres issues de la littérature scientifique, ce qui montre la diversité des classements existants et probablement ceux à venir.

Classification des outils et méthodes selon les phases du processus de conception

Dans cette sous-section nous présentons deux exemples issus de la littérature de classifications d'outils suivant deux critères contextuels :

1. Les phases du processus de conception : faisant référence à la Fig. 2.4, avec parfois l'ajout d'étapes supplémentaires, suivant les auteurs ;
2. Le critère "coût" dans le premier exemple , le critère de "niveau d'utilisation de l'outil" dans le second exemple (document placé en annexe A.3).

Dans ce premier exemple nous présentons le classement des outils et méthodes relatifs aux concepts de Design For X (DFX) et Design To X (DTX) suivant les phases du processus de conception et le critère "coût", selon [Niemann et al.(2009)]. Nous faisons la distinction entre les concepts de DFX, *concevoir pour "faciliter" une activité*, et les concepts de DTE, *concevoir pour "atteindre" un objectif.*

En effet, les méthodes "métier" DFX, *Design For Recycling, Disassembly*, se concentrent sur une étape du cycle de vie ou sur un aspect du produit. Pour [Baumann et al.(2002)] les approches DFX correspondent à la catégorie d'outils "Framework", qui sont souvent accompagnés de "*toolkits*". Elles sont associées à une vision de l'éco-conception restreinte, du moins qui ne fait pas sortir tout le potentiel de la démarche si elles sont utilisées seules. Car elles "découpent" les éléments à prendre en compte dans une démarche classique d'éco-conception. En complémentarité à cette approche, le *Design To Environment (DTE), sustainability*, rajoute une dimension transversale ou *transdisciplinaire* en matière "environnementale". Le savoir déployé dans l'approche DTE n'est ni compartimenté dans les activités de type DFX, ni entre les activités (interdisciplinaire). Il est *compris, pensé, réfléchi et stimulé* par l'ensemble des *métiers* intervenant dans le processus de conception.

D'après [Niemann et al.(2009)], la Fig. 3.8 présente les dépenses et gains relatifs au déploiement des méthodes DFX au cours du cycle de vie du produit :

- La phase de conception nécessite des investissements successifs pour faciliter les activités de *fabrication, désassemblage, recyclage, assemblage, tests, qualité, coûts (etc.)*
- Ce coût investi est compensé lorsqu'ont effectivement lieu les phases du cycle de vie du produit : *lors de la fabrication, des assemblages et essais, de l'utilisation et de la fin de vie.*

Or, nous avons vu section 3.1.2, sur la Fig.3.4, que les coûts réels dépassent la plupart du temps les coûts prévus, et restent à charge des consommateurs ou de la collectivité (ce que nous avons appelé la "dette envers les générations futures"). Une des raisons de ces différences, est l'incapacité des concepteurs à pouvoir déployer une stratégie d'éco-conception efficace en utilisant uniquement des outils de type DFX, sans avoir recours à la vision transversale.

C'est la raison pour laquelle la Fig. 3.9 présente une sommation de l'investissement et les gains relatifs au déploiement complémentaire d'une approche DTE et des approches DFX. L'investissement initial pendant le processus de conception pour couvrir l'approche DTE est supérieur, mais permet de réduire plus efficacement les coûts relatifs aux autres phases. Par conséquent, la "dette cumulée envers les générations futures" serait réduite.

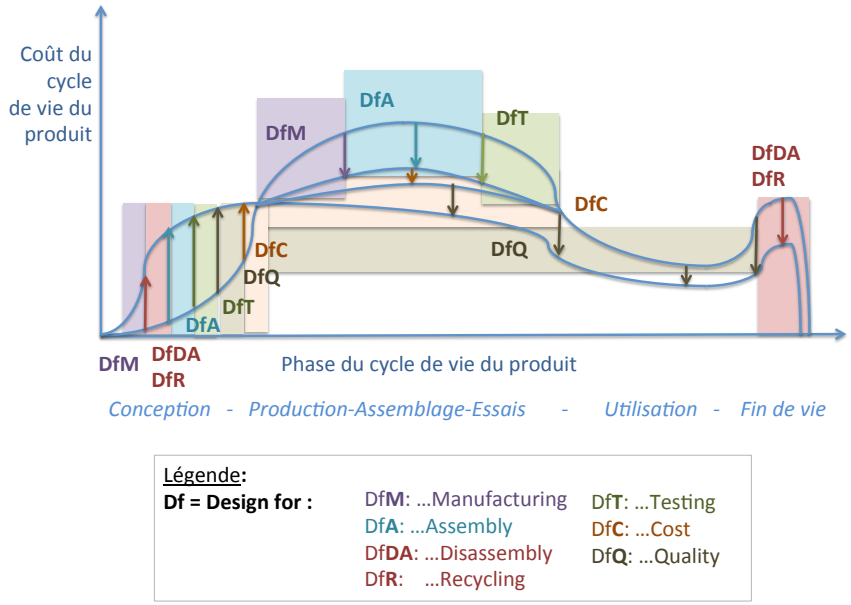


FIGURE 3.8 – Représentation des méthodes DFX au cours du cycle de vie du produit, coût engagé et retour sur investissement, d'après [Niemann et al.(2009)].
Les flèches montantes sont les coûts engagés (durant la phase de conception) et les flèches descendantes sont les retours sur investissement (jusqu'à l'élimination du produit).

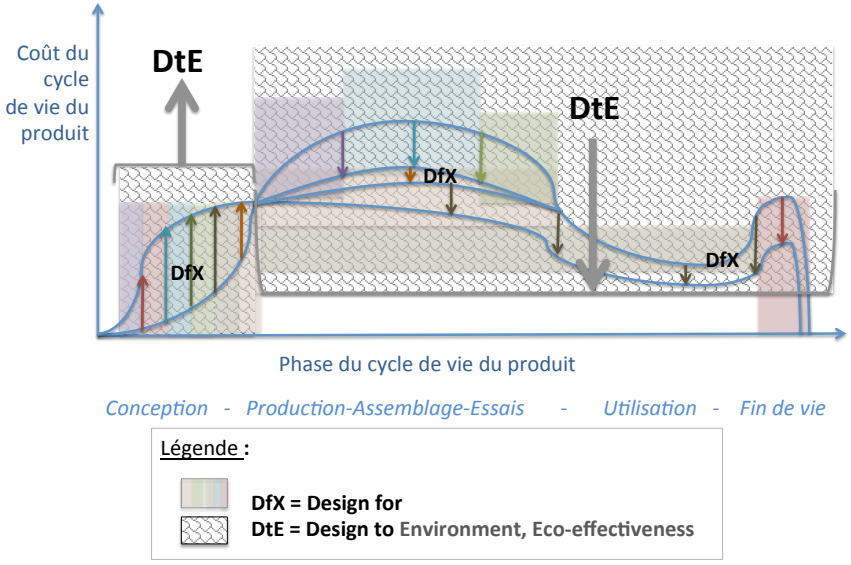


FIGURE 3.9 – Représentation des méthodes DTX au cours du cycle de vie du produit, coût engagé et retour sur investissement, adaptée de [Niemann et al.(2009)].
Les flèches montantes sont les coûts engagés (durant la phase de conception) et les flèches descendantes sont les retours sur investissement (jusqu'à l'élimination du produit). L'approche DTE permettrait en théorie d'améliorer la prise en compte des aspects environnementaux et de réduire l'écart entre les coûts prévus et les coûts réels.

Deuxième exemple de classification en fonction des phases du processus de conception : l'annexe A.3 présente le classement d'une liste d'outils définis par les trois résultats de recherche [Navarro et al.(2005), Kota et Chakrabarti(2007), ISO(2009)] suivant deux critères contextuels :

1. Les phases du processus de conception : faisant référence à la Fig. 2.4, avec parfois l'ajout d'étapes supplémentaires, suivant les auteurs ;
2. Le niveau d'utilisation de l'outil : management et opérationnel.

Les classements d'outils et méthodes issus de ces recherches peuvent être facilement mis en correspondance avec les outils de conception utilisés à ces étapes du processus de conception.

De nombreux autres exemples de classifications peuvent être pris dans la littérature. **Ces différents classements existants montrent que la classification d'outils et méthodes pour pratiquer l'éco-conception est possible, dès lors que les critères de classement, ou** *critères contextuels* **sont choisis par les métiers de la conception** (concepteurs, chef de projet, chef de produit, expert environnement, etc.).

Catégories de critères contextuels

Les industriels peuvent être aidés à définir les critères contextuels leur permettant d'identifier les supports à l'éco-conception adéquats par rapport aux contextes de leurs projets par une liste de catégories de critères à passer en revue. **La Fig. 3.10 propose des catégories de critères contextuels selon les niveaux stratégiques, tactiques et opérationnels de l'entreprise. Le niveau opérationnel est divisé par les niveaux méthode et technique.**

Au niveau méthode, nous proposons les catégories de critères liées aux :
- métiers impliqués (outils et connaissances) ;
- phases du processus de conception impliqué ;
- type de produit, de technologie ;
- type de données nécessaires (en entrée) et données de sortie, exprimées suivant des indicateurs spécifiques : maturité des données, complétude, etc.
- connaissances requises ;
- temps disponible ;

Au niveau technique, nous proposons les catégories de critères liées aux :
- contextes matériels (performance des outils informatiques, accessibilité de l'outil) ;
- caractéristiques du système d'information en place (type de gestion des informations, facilité d'extractions de données d'entrée pour l'utilisation d'un outil, implémentabilité, etc.) ;
- solutions d'interoperabilité entre les outils (possibilités d'échanges d'informations entre deux outils différents) ;
- développements spécifiques par domaine (capitalisés sur des expériences antérieures, par exemple un module, une base de données propre à un domaine (technologie, matériaux, etc.))

	Niveau Contextuel	Description du contexte
Stratégique	**Organe directionnel**	- Objectifs exprimés par les capitaux (business plan); - Indicateurs pour les managers;
Tactique	**Managers**	- Type de conception (DTX, DFX, etc.); - Choix des méthodes, du temps alloué, des personnes ressources, des plans de formation, etc.
Opérationnel	**Niveau « méthode »**	- **Métiers impliqués** (outil et connaissance); - **Phase du processus** de conception impliqué; - **Type de produit, technologie**; - Type de **données** nécessaires (input) et données de sorties (output), exprimées suivant des indicateurs spécifiques, **maturité** des données, etc.; - **Connaissances** requises; - **Temps** disponible;
	Niveau « technique »	- Contexte **matériel** (performance des outils informatiques); - Caractéristique du **système d'information** en place; - Solutions d'**interopérabilité** entre les outils (intégration, fédération, unification); - **Développement spécifique** (capitalisé sur expérience); - Autres contextes techniques.

FIGURE 3.10 – Description de catégories de critères contextuels d'une situation de conception au niveau opérationnel

Suivant la spécificité de l'entreprise, de nouveaux éléments de contexte peuvent être ajoutés.

Cette revue bibliographique des différents outils traitant de la dimension environnementale montre que : (a) ces outils peuvent être choisis selon un ensemble de critères contextuels pour être déployés tout au long du processus de conception et (b) ils *peuvent* être mis en correspondance avec les outils de conception utilisés par les concepteurs (comme l'illustre l'annexe A.3), selon les critères contextuels définis par les parties prenantes et l'expert environnement.

Des critères contextuels dont les effets sont difficiles à évaluer

Ces classements par critères contextuels aident l'expert environnement à choisir les outils nécessaires au fur et à mesure du déploiement du processus de conception vis-à-vis de la dimension environnementale, tout en restant au plus proche du contexte d'ingénierie dans lequel le projet s'inscrit. Le classement permet également à l'expert environnement d'identifier des outils adaptés aux activités *locales* des concepteurs, pour améliorer la collaboration entre leurs activités et la sienne.

[Lindahl(2006)] montre la nécessité d'avoir un dialogue entre les parties prenantes, à la fois les utilisateurs de l'outil et le chef de projet, afin de déterminer les critères relatifs à l'utilisation des outils d'analyse environnementale. Car certains critères sont très influençant et particulièrement difficiles à évaluer. Par exemple, les critères liés aux aspects

socio-cognitifs des utilisateurs. Il faudrait pour les appréhender, se poser la question de "quel est un bon outil d'éco-conception ?" et "comment peut-il être caractérisé ?". Les travaux de [Vallet et al.(2010)] par exemple, étudient conjointement le processus et des résultats d'un côté et les aspects cognitifs et sociaux de la pratique de l'éco-conception de l'autre côté, à travers l'expertise des utilisateurs. Ils montrent notamment que l'utilisateur doit être clairement en phase avec l'outil qu'on lui propose et suivre un objectif précis.

D'autre part, les classements devraient prendre en compte la difficulté d'outiller les phases amont du processus de conception [Mougenot(2008)], notamment par leur caractère moins formel. [Vallet et al.(2009)] montre l'importance de l'utilisation conjointe d'outils qualitatifs et d'outils quantitatifs dans la pratique de l'écoconception. Comme le montre [Millet et al.(2007)], les phases amont sont propices à l'"(eco)innovation". [Tyl(2011)] développe notamment un outil spécifique d'éco-innovation (ecoASIT), étudié et comparé avec d'autres outils de stimulation de la créativité et de générations d'idées, prenant en compte la dimension environnementale [Tyl et al.(2010)]. Les critères de classements doivent donc couvrir aussi bien les aspects techniques que les aspects socio-cognitifs. Bien qu'il soit plus difficiles d'évaluer les effets de ces derniers, leur prise en compte est parfois déterminante.

En résumé, pour juger de la pertinence de la correspondance d'outils *de conception classique / d'analyse environnementale* **dans un objectif d'intégration de l'environnement en conception, il faudrait pouvoir réaliser une étude socio-cognitive sur l'usage, pour chaque "couple" d'outils, tout en prenant en compte l'ensemble des** *aspects contextuels les plus déterminants selon les circonstances* **de la mise en pratique des outils.**

3.2.2 Cadre *global/local* pour l'étude des interactions entre outils de conception classique et d'analyse environnementale

L'objectif de ce cadre *local/global* est de poser une structure permettant d'étudier plus finement la synchronisation possible des outils et méthodes utilisés par les métiers en conception "classique" avec ceux permettant la prise en compte de la dimension environnementale (disponibles pour les industriels), afin d'en permettre une meilleur co-existence. La définition de ce cadre nous fera converger vers les besoins aux interfaces de ces deux catégories d'outils métier entre le niveau *global* et le niveau *local*, pour améliorer les interactions possibles. Ce cadre n'est pas une proposition nouvelle mais une vue de l'esprit, une lecture de l'existant.

Sur le plan *global*, se distinguent les *méthodes* d'ingénierie "environnementales" : par exemple l'analyse du cycle de vie des produits, de celles d'ingénierie "classique" de type ingénierie concourante, collaborative (etc.). A ces méthodes du niveau *global* sont associés des outils. Les outils d'ingénierie "environnementale" : par exemple d'analyse du cycle de vie des produits, ainsi que les outils d'ingénierie "classique" : comme les outils de gestion du cycle de vie du produit (PLM).

Sur le plan *local*, se distinguent des *méthodes* d'ingénierie "environnementales", par exemple les approches DFX (avec X pour faciliter le recyclage, le démantèlement, etc.), de celles d'ingénierie "classique" DFX (avec X pour faciliter la fabrication, l'assemblage, la maintenance, etc.). A ces méthodes du niveau *local* sont associés des outils. Les outils

d'ingénierie "environnementale" (lignes directrices, check-listes, bases de données, etc.), ainsi que les outils d'ingénierie dite "classique" (de type CAO pour les ingénieurs en mécanique, de choix de matériaux, etc. suivant tous les métiers présents en conception).

Le schéma 3.11 illustre l'organisation possible *local/global* des méthodes et outils associés tout au long du processus de conception. Le niveau management s'appuie sur les méthodes, alors que le niveau strictement "opérationnel" s'appuie sur les outils. Ces outils sont mis en oeuvre au sein de l'activité métier, ou experte dédiée. Par exemple, l'outil global environnemental d'ACV est utilisé par un ingénieur environnement, expert dans le domaine. De même les activités locales sont composées d'un concepteur expert du domaine : ingénieur mécaniques utilisant la CAO, ingénieur matériaux, designer, ingénieur en calcul de structure, etc. Ces activités et les outils métier sont différents selon le contexte de chaque entreprise.

Dans ce cadre, les niveaux *locaux* et *globaux* contiennent donc chacun des "bibliothèques" d'outils, ordonnés par des critères contextuels définis par les métiers et experts environnement. Nous faisons l'hypothèse que les travaux améliorant la pratique des outils d'éco-conception actuels et futurs permettront de faire évoluer ces bibliothèques, tournées vers les besoins de l'utilisateur (connaissance, interaction, etc.).

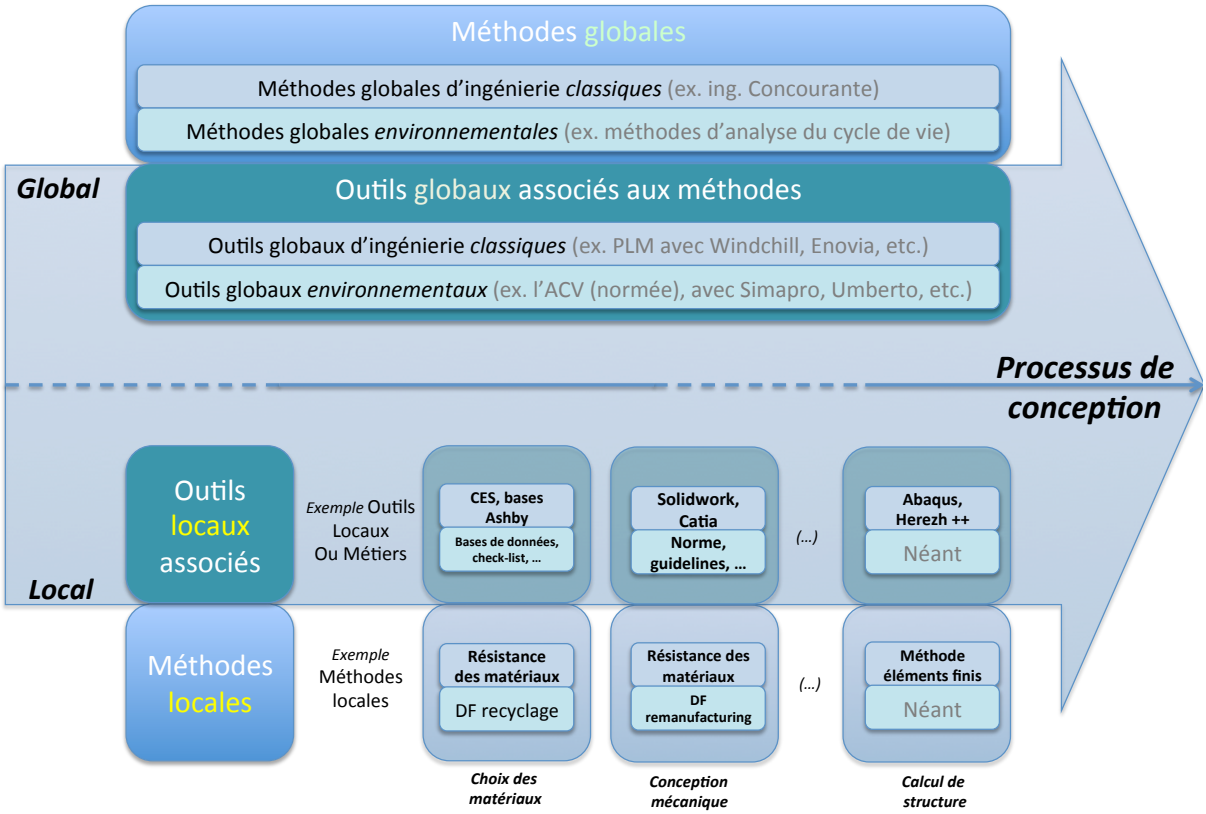


FIGURE 3.11 – Vue de l'esprit de l'existant : organisation locale - globale des outils et méthodes d'ingénierie "classique" et "environnementale"

Interaction entre les outils *locaux–globaux*

Ce cadre *local/global* couplé aux bibliothèques de modèles d'outils *locaux* et *globaux* en fonction de chaque catégorie, ordonnés par critères contextuels, permet d'identifier les interactions possibles entre les outils *locaux* et *globaux* tout au long du processus de conception. Dès lors, plusieurs questions se posent :

1. **Comment techniquement mettre en relation des outils fondamentalement différents** fondés sur des sémantiques différentes ?
2. **Comment faire correspondre les différents indicateurs utilisés par les différents outils entre eux**. [Herva et al.(2011)] montre par exemple que deux indicateurs de même nom peuvent être basés sur deux calculs différents, ou ne pas prendre en compte les mêmes paramètres (ex. : les indicateurs des différentes méthodes de calcul de l'ACV) ?
3. **Comment mettre en correspondance les paramètres environnementaux des outils environnementaux avec les paramètres gérés par les outils d'une autre activité**, problème d'intégration aux interfaces des deux activités métier ?

3.2.3 Synthèse : contextes évolutifs de l'analyse environnementale en conception

Nous avons pu constater que l'éco-conception est marquée par un fort développement de ses méthodes et outils, pouvant être définis par un nombre important de critères contextuels mettant en correspondance des outils d'analyse environnementale avec les outils "classiques" utilisés par les concepteurs. Ces observations abondent dans le sens de la seconde hypothèse formulée pour répondre à notre problématique (Tableau 2.4) : la capacité à s'adapter aux contextes évolutifs de l'analyse environnementale au cours du processus de conception. Pour ce faire, **nous retenons le cadre** *local–global* **permettant de faire la distinction entre le niveau transversal (cycle de vie) de l'expert environnement et du chef de produit et le niveau des différents métiers déployés au cours du processus de conception.** Identifier séparément ces deux niveaux, favorise une meilleure gestion du cycle de vie au niveau global et l'intégration des paramètres environnementaux au niveau local (troisième hypothèse explorée à la section précédente). **Dans ce cadre** *local/global* **sont créées des bibliothèques d'outils, ordonnés par des critères contextuels** définis par les parties prenantes du processus de conception. Les critères des bibliothèques d'outils évoluent en fonction des retours issus de la pratique des outils par les métiers (socio-cognitifs, ergonomie, qualité, etc.). Par suite, l'intérêt du cadre est **de favoriser les échanges entre les outils** *locaux* **et** *globaux* pour concevoir des produits innovants et éco-efficaces (DTE, DT*eco-effectiveness*). Cela suppose **d'étudier précisément la capacité de deux outils différents à échanger des informations différentes et à les utiliser, que nous abordons dans la section suivante.**

3.3 Solutions d'interopérabilité entre les outils de conception et d'analyse environnementale

Reprenons la première des trois questions posées à l'issue de la section précédente pour améliorer les interactions entre les outils *locaux et globaux* au cours du processus de conception. Cette question est liée à la capacité de deux outils à échanger et à utiliser les informations échangées. Nous parlerons alors d'outils interopérables [Paviot(2010)]. Mais comme nous l'avons vu, les outils *locaux* et *globaux* sont des outils indépendants, manipulant des données différentes. De plus, ils ne suivent pas les mêmes évolutions. Notamment, les outils d'analyse environnementale sont en pleine expansion. De même que les connaissances dans le domaine de l'éco-conception n'ont pas encore atteint un degré de maturité équivalent à d'autres domaines impliqués dans le processus de conception (la mécanique par exemple).

Répondre à cette question correspond donc à explorer les moyens techniques existants pouvant supporter ces échanges d'informations spécifiques (troisième hypothèse que nous avons formulé *cf.* Fig. 3.12). Pour ce faire, nous étudierons plusieurs cas d'interopérabilité entre les outils supportant l'analyse environnementale et des outils de conception. Ils illustreront les approches d'intégration, d'unification et de fédération d'outils.

Nous verrons que la solution retenue pour la proposition est l'approche fédérative.

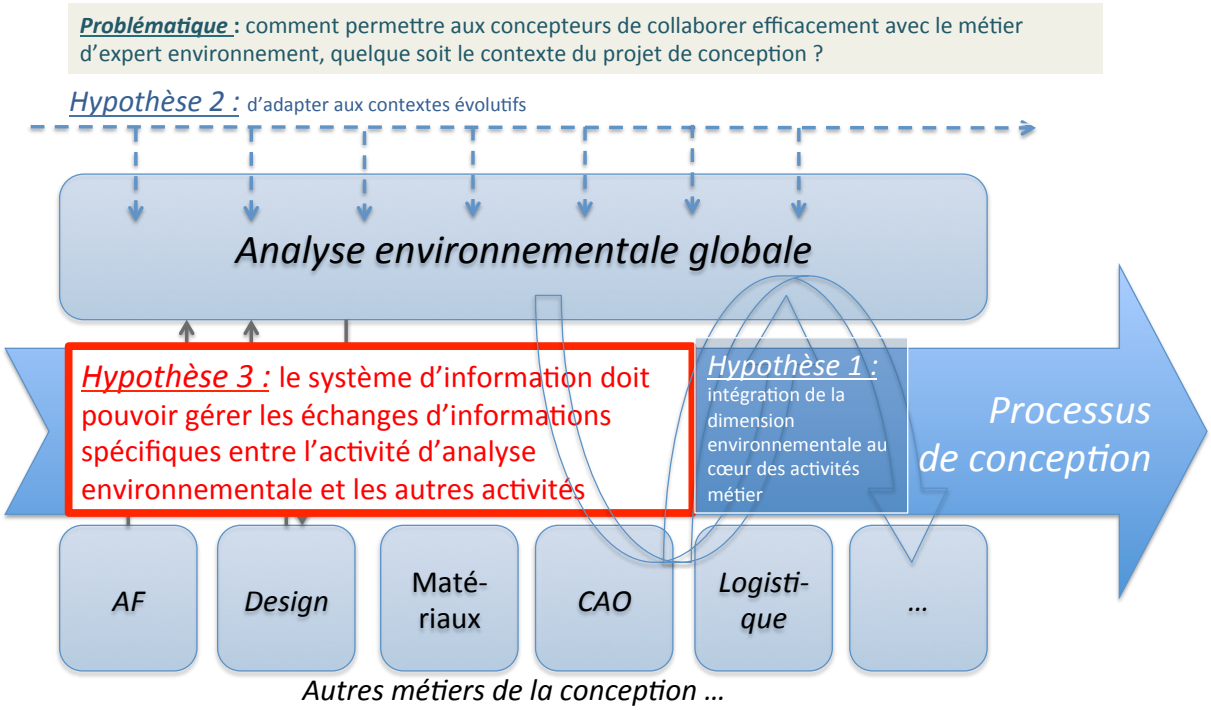


FIGURE 3.12 – Troisième partie de l'état de l'art : positionnement sur la troisième hypothèse de recherche

3.3.1 Echanges d'informations entre les outils de conception et d'analyse environnementale

3.3.1.1 Introduction aux modèles

Nous nous plaçons dans cette partie à l'échelle du modèle, sous-jacent à l'outil numérique utilisé par les parties prenantes. Sur la Fig. 3.13 sont représentés quatre niveaux consécutifs. Le premier niveau (supérieur) est le niveau de la collaboration entre personnes physiques (ou métiers). Elles interagissent et communiquent physiquement et verbalement, en échangeant des données oralement ou via des supports physiques (dossiers, cahiers, etc.). Le second niveau est celui du Travail Coopératif Assisté par Ordinateur (TCAO) [8]. A l'aide de représentations propres à l'environnement numérique correspondant à leur métier, elles manipulent, créent, transforment et échangent des documents. Le troisième niveau est celui des **modèle**s relatifs aux outils informatiques utilisés par les métiers. D'une manière générale le "modèle est une simplification d'un système construit dans une intention particulière. Le modèle doit pouvoir répondre à des questions en lieu et place du système modélisé" [Favre et al.(2006)]. Plus précisément, un modèle formalisé est "une description (d'une partie) d'un système écrite dans un langage bien défini" [Favre et al.(2006)]. Un modèle a une syntaxe concrète, c'est-à-dire, une notation textuelle ou graphique (correspondant à un langage), et une **sémantique**. Le modèle permet aux outils **informatique**s de faire du raisonnement automatique et de partager les données entre outils. Enfin, le quatrième niveau est le niveau des **méta-modèle**s. Ils correspondent à la structure des modèles et ils définissent le langage d'expression du modèle. "Un méta-modèle est un modèle d'un langage de modélisation" [Favre et al.(2006)]. Les méta-modèles sont définis avec des méta-méta-modèles [Bézivin(2004)]. Partagés par différents domaines de connaissances relatifs aux métiers, ils facilitent l'échange d'informations et la compréhension entre ces domaines.

3.3.1.2 Ingénierie dirigée par les modèles

Dans les années 80, l'ingénierie du logiciel a adopté progressivement la programmation orientée objet. Le paradigme orienté objet, ou *Object Oriented Paradigm* (OOP), remplace le paradigme procédural, fondé sur la définition de procédures du logiciel à développer dans une entreprise donnée. La programmation orientée objet présente deux principaux intérêts, qui sont la réutilisabilité et l'extensibilité : "un système orienté objet est susceptible d'être assemblé à partir de composants pré-écrits en un minimum d'efforts (...) le résultat sera facilement extensible sans que les composants réutilisés aient à être remaniés" [Graham(1997)]. Un objet possède plusieurs caractéristiques, notamment l'unicité. Il contient des *attributs* (les données associées à l'objet), et les *opérations* ou *méthodes* (les traitements réalisés sur l'objet). L'approche orientée objet permet de rendre accessible la donnée en faisant appel aux méthodes. Elle s'assure que la donnée est correctement utilisée.

Issue de l'évolution de la programmation orientée objet, en 2000, l'*Object Management Group* (**OMG**) définit l'*Unified Modeling Language* (**UML**) comme un cadre consensuel,

8. *Computeur-Supported Cooperative work* (CSCW) en anglais.

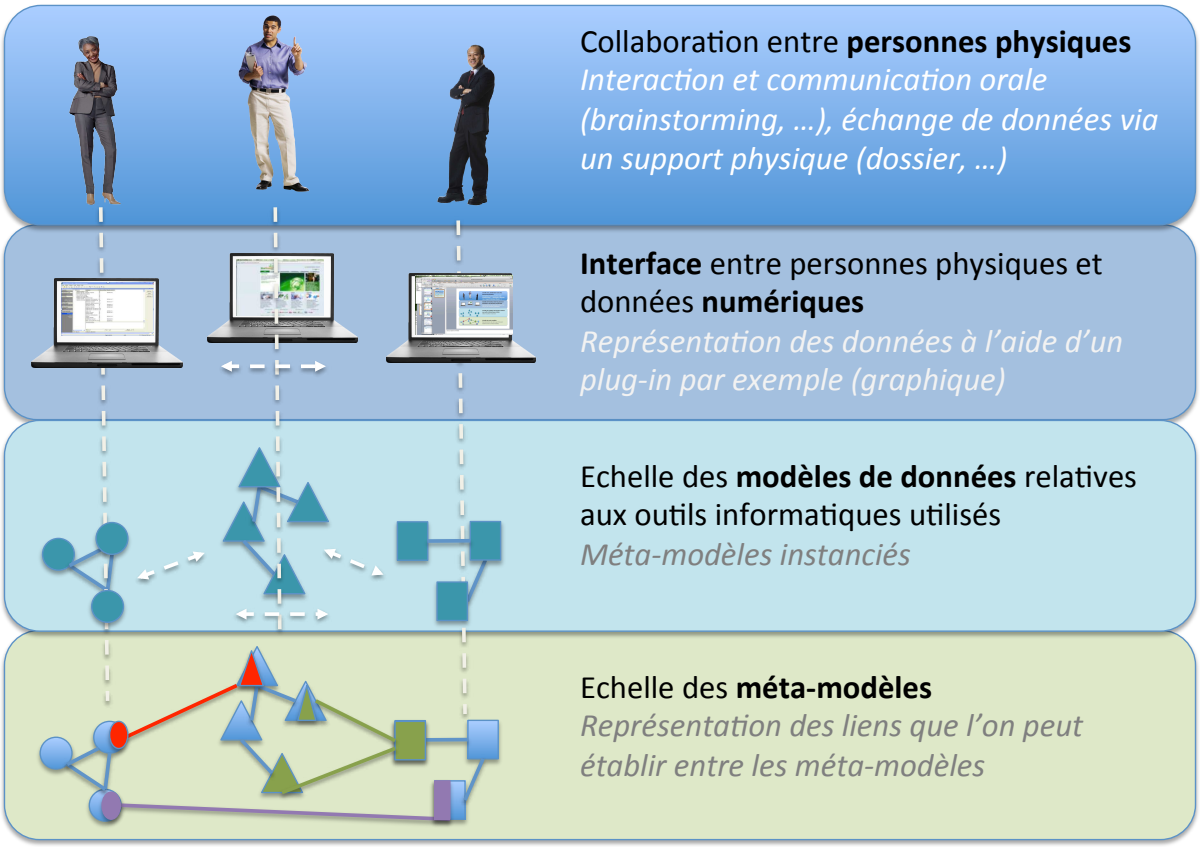


FIGURE 3.13 – Schématisation des différents niveaux d'échelles : du monde des échanges physiques au monde des échanges virtuels

essentiel, pour passer des techniques de production fondées sur le code, à celles fondées sur les modèles [Bézivin(2004)]. L'UML fournit un cadre global d'intégration pour tous les méta-modèles, puisqu'il est lui-même un méta-méta-modèle : un langage de définition de méta-modèles, "chaque méta-modèle définissant lui-même un langage pour décrire un domaine spécifique d'intérêt" [Bézivin(2004)]. Ces modèles ont été ensuite utilisés directement dans les chaînes de production de logiciels.

L'architecture dirigée par les modèles, appelée *Model Driven Architecture* (**MDA**), a été crée pour supporter le développement de systèmes complexes. L'initiative MDA par l'OMG visait la définition d'un cadre normatif. Nous verrons que l'Ingénierie Dirigée par les Modèles (**IDM**) [9] dépasse largement ce cadre.

La structure MOF (M0, M1, M2) : la Fig. 3.14 représente par un modèle pyramidal l'architecture standardisée par l'OMG de l'IDM. Le "modèle produit", ou "modèle système" correspond à la structure permettant d'organiser, de collecter et de tracer la connaissance associée au produit (niveau M0). Chaque modèle du niveau *(n-1)* est une instanciation du modèle *(n)*, héritant par là-même des caractéristiques du modèle du niveau *(n)*, le modèle M1 s'exprime à travers le langage de modélisation situé au niveau M2 (méta-modèle). En M3, au sommet de la pyramide, se trouve le méta-méta-modèle auto-descriptif et unique (par exemple, le Meta Object Facility (**MOF**) [10]).

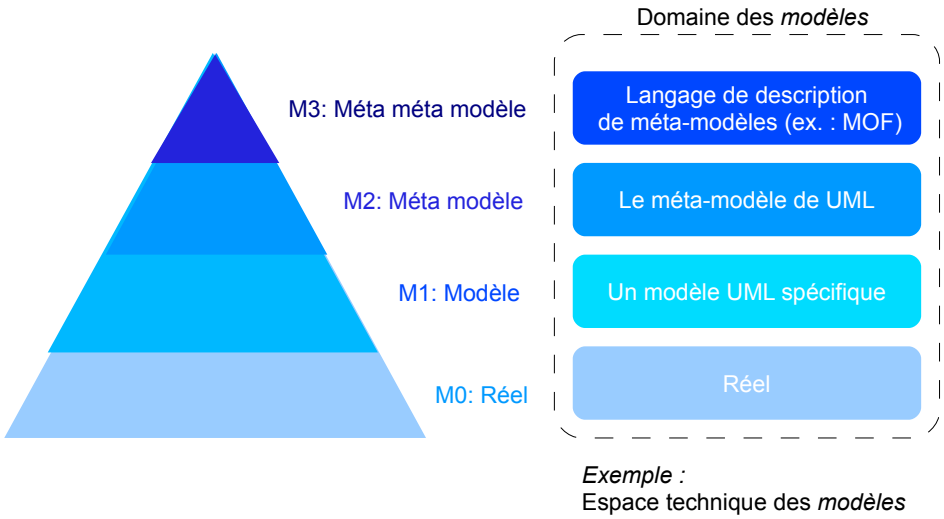


FIGURE 3.14 – Modèle pyramidal classique représentant la hiérarchie des modèles

L'IDM a pour objectif d'intégrer de multiples *Espaces Techniques* (**ET**) (ET des technologies orientées objet, des documents structurés **XML**, des bases d'**ontologie**s, etc.). L' ET est un ensemble d'outils et techniques issus d'une pyramide de méta-modèles dont le sommet est occupé par une famille de méta-méta-modèles similaires [Favre et al.(2006)]. Il correspond aux techniques, principes syntaxiques et outils associés à un domaine spécifique (format). Pour reprendre l'exemple de la Fig. 3.14, dans l'espace technique des *modèles*,

9. L'IDM est appelée *Model Driven Engineering* (**MDE**) en anglais.
10. http ://www.omg.org/mof/, Avril 2012

au niveau (M1) se trouve le *modèle UML spécifique*, qui est conforme au *méta-modèle de UML* (niveau M2), qui est conforme au *langage de description de méta-modèles (ex. : MOF)* (niveau M3) [Favre et al.(2006)].

3.3.1.3 Intégration, unification et fédération

L'interopérabilité entre les outils intervenant au cours du processus de conception est définie par la norme IEEE comme *l'aptitude qu'ont deux systèmes indépendants à échanger des informations et de pouvoir les utiliser*, et ce dans un minimum d'effort.

L'ISO 14258 [ISO(1994b)] présente trois approches d'**interopérabilité** : *l'intégration, l'unification et la fédération.*

L'intégration, l'unification, la fédération sont présentées Fig. 3.15 [ISO(1998)] :

- **Les modèles produits sont intégrés** lorsqu'ils sont fusionnés dans un même modèle de données. Un standard commun de modèle de données est utilisé pour tous les composants du système.
- **Les modèles produits sont unifiés** lorsque des *correspondances sémantiques* entre les différents modèles produit sont définies *via* le méta-modèle commun à tous les composants du système, appelé modèle "pivot".
- **Les modèles produits sont fédérés** lorsque des "mapping" (*cartes de correspondance* codées) sont utilisés pour associer dynamiquement leurs modèles distincts (au niveau sémantique, fondés sur des concepts de similarité ou d'équivalence).

Type d'interopérabilité	Intégration	Unification	Fédération
Utilisation d'un format commun	Oui ex.: format standard, STEP (AP203)	Oui ex.: format standard, XML	Non Utilisation d'une seule et même ontologie (ou méta-méta-modèle)
Types d'échanges entre les modèles	Modèles fusionnés dans un même modèle de données	Centralisés dans un sous-ensemble ayant une structure de données commune (modèle pivot)	Localisés avec ajustement dynamique entre deux modèles donnés
Flexibilité	Adaptation de chaque modèle métier au modèle standard	Correspondances entre modèles produits, par équivalences sémantiques	Ajustement dynamique via l'unique ontologie
Adaptation aux variations contextuelles (espace-temps)	Un changement implique de redéfinir le format standard et de modifier tout les modèles	Plus flexible que l'intégration mais moins que la fédération	Flexibilité et adaptation

FIGURE 3.15 – Comparaison entre l'interopérabilité type intégrative, unificatrice et fédérative, adaptée de [Paviot(2010)]

La Fig. 3.16 compare ces trois approches sur quatre critères : l'utilisation d'un format commun, le type d'échanges entre les modèles, la flexibilité du système et l'adaptation possible aux variations contextuelles (espace et temps). D'une manière générale, ces trois approches peuvent être présentées comme complémentaires. Elles ne répondent pas aux mêmes besoins. La question est donc de savoir **quel type d'interopérabilité serait la plus appropriée pour supporter les échanges d'informations entre les outils *locaux–globaux* relatifs à l'intégration de la dimension environnementale en conception.**

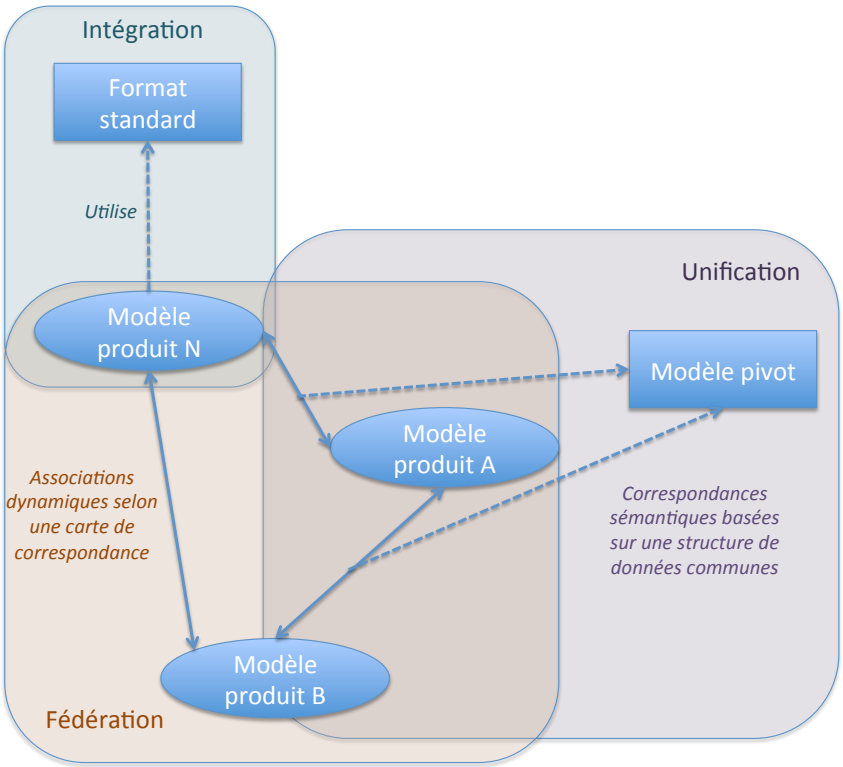


FIGURE 3.16 – Complémentarité des approches d'interopérabilité, d'après [Iraqi et al.(2011)]

Ces trois types d'interopérabilité se retrouvent dans la pratique en ingénierie produit. Historiquement, les approches intégrées se sont développées sur le marché il y a quarante ans, fondées sur un seul modèle produit CAO. Puis, depuis une vingtaine d'années elles ont dû s'adapter à la complexité croissante du système d'information, intégrant de plus en plus d'informations fondées sur des sémantiques différentes. Chaque nouvelle application métier génère en effet un nouveau modèle métier. Dès lors, les standards ont développé des modèles *génériques sémantiquement*, spécifiques à certains domaines (*cf.* le modèle STEP AP203, 214, [ISO(1994a)], etc.), pouvant servir de "pivot" entre différentes applications métier. De nouveaux problèmes sont apparus lorsque les informations ont évolués plus vite que la standardisation. L'augmentation de la complexité des produits, des applications métier, des processus, des demandes en terme d'échanges, etc., nécessite que les informaticiens développent des systèmes de plus en plus complexes. Les systèmes PLM notamment, deviennent de plus en plus complexes.

Or, nous avons montré que l'intégration de la dimension environnementale demande de s'adapter à l'évolution des nouveaux outils et connaissances liés à l'analyse environnementale, tout en gardant des liens dynamiques entre les outils du niveau *global* et les outils du niveau *local*. Dès lors, la complexité grandissante du système d'information est telle que l'approche d'intégration ne peut plus répondre, en terme de flexibilité et de dynamisme de structure pour y intégrer la dimension environnementale. Comme présenté Fig. 3.16) dans un contexte évolutif et foisonnant en terme d'outils et connaissances, seul la fédération peut permettre une flexibilité et une adaptation du système d'information, en permettant d'ajuster en permanence, les échanges d'informations nécessaires entre deux outils différents, d'une manière dynamique. Nous illustrerons ces propos par des exemples concrets, présents aujourd'hui sur le marché.

3.3.1.4 Environnement Eclipse et langage de transformations de modèles

L'environnement Eclipse : Modeling Framework (**EMF**) [11] est un cadre de modélisation et une infrastructure permettant de générer du code, fondé sur l'architecture standard de modélisation MOF présentée précédemment (Fig 3.14). Le cadre de modélisation permet notamment d'utiliser le langage UML, et de construire les modèles de données d'entrées ou de sorties associés à un logiciel. Ensuite, "pour qu'un modèle soit "productif [12]", il doit être interprétable et manipulable par une machine. Il est considéré comme essentiel dans le cadre de l'Ingénierie Dirigée par les Modèles, de pouvoir exprimer formellement le contenu d'un modèle et "quoi faire" avec ce modèle quel que soit le niveau d'abstraction. Ceci se traduit par le besoin d'exprimer formellement les transformations entre modèles, les rendant ainsi productifs. Pour cela il est indispensable de formaliser non seulement les modèles, mais aussi les langages dans lesquels ceux-ci sont décrits, et finalement les méta-modèles décrivant ces langages" [Favre et al.(2006)].

Les langages de transformations de modèles permettent de générer un ou plusieurs modèles *cibles* à partir d'un ou plusieurs modèles *sources*. Ces transformations sont définies conformément à un ensemble de règles décrivant comment transformer un modèle décrit dans un modèle source, en un modèle décrit dans un langage cible. Les modèles source et cible ne sont pas forcément décrits dans le même méta-modèle.

Le Langage de Transformation Atlas (**ATL**) [13] permet de définir les transformations de modèles *via* des règles déclaratives (et des auxiliaires si besoin).

Chaque transformation codée en ATL [Jouault et Kurtev(2006)] se traduit pas l'association :

- d'un modèle source ;
- d'un modèle cible ;
- de règles de transformations ;

11. Eclipse Modeling Framework, site internet : http ://www.eclipse.org/emf/, Avril 2012
12. Note : le modèle *productif* est manipulé et interprété par les machines et sert à la production, alors que le modèle *contemplatif* sert à la communication et la compréhension entre deux personnes physiques qui interprètent et transforment le modèle.
13. Développé par l'équipe de Jean Bezivin de LINA de Nantes, dans le projet Eclipse M2M (Model-to-Model), http ://www.eclipse.org/m2m/

– de quelques auxiliaires de construction ;

L'expert métier rattaché à un outil métier donné, peut ainsi exprimer les règles de transformations nécessaires entre les modèles venant de son outil vers d'autres outils ou inversement. Règles que l'informaticien peut ensuite exprimer en ATL et exécuter dans l'environnement Eclipse.

3.3.2 Le Système d'Information et les échanges de données actuels en conception de produits avec prise en compte des critères environnementaux

Comme il a été présenté en première partie, les industriels sont aujourd'hui soumis aux directives européennes ou aux règlements européens en matière d'environnement. Les éditeurs de logiciels ont majoritairement développé des outils permettant d'aider les industriels à répondre à législation, ou a les aider à évoluer dans les exigences des normes environnementales. Dans cette section, nous illustrons les développements en cours des outils logiciels dans l'intégration de la dimension environnemental en conception parmi les trois cas catégories suivantes :

– **Les outils logiciels disposant d'un module "environnement".** Nous prendrons comme cas d'étude le couplage CAD/LCA (simplifiée) : SolidWorks de *Dassault Système* avec le module Sustainability ;
– **Transfert d'une partie des contenus des outils de CAO vers ACV**. Nous prendrons le cas d'étude de Catia de *Dassault Systèmes* vers EIME de *CODDE* et de Smarteam de *Dassault Systèmes* vers EIME.
– **Intégration de plusieurs outils métier (ACV, CAO, module de traçabilité des substances, PEP, etc.) via des plateformes PLM**. Nous prendrons comme cas d'étude la plateforme PLM de *Dassault Systèmes* intégrant plusieurs modules complémentaires afin d'apporter des éléments de réponse aux exigences législatives environnementales, ou à la réalisation de bilans environnementaux (approche produit : Profiles Environnementaux des Produits (PEP) ou approche site : Empreinte Carbone) ;

3.3.2.1 Outils logiciels disposant d'un module "environnement"

L'outil *Solidwork* (pour les PME) propose un module *Sustainability*.

Du point de vue de l'utilisateur : intégré dans l'interface du logiciel CAO, le module [14] permet au concepteur lors de la modélisation du produit de réaliser une ACV simplifiée [15]. Elle nécessite que le concepteur sélectionne pour chaque pièce, à partir de

14. Ce module est issu de la collaboration entre les éditeurs logiciels de *Dassault Système* (site commercial : www.solidworks.com/sustainability/, août 2012) et de *PE International* (site commercial : www.pe-international.com/france/index/, Août 2012), logiciel *GaBi*

15. On caractérise cette ACV de *simplifiée* du fait qu'elle ne prend pas en compte toutes les étapes du cycle de vie, qu'elle utilise des bases de données (matériaux, méthodes de mise en forme des matériaux, etc.) restreintes, que certaines simplifications sont prises (transport très simplifié, utilisation restreinte à

bases de données internes :

- **les matériaux des pièces** : possibilité de créer sa propre base de données, impossibilité de renseigner la provenance des matériaux, ni de vérifier les hypothèses prises dans les bases de données internes ;
- **les procédés de fabrication** : *idem* ;

Puis pour le produit dans son ensemble, le concepteur sélectionne :

- **la zone du monde où le produit est conçu et celle où il est exploité** : par zones géographiques continentales, donc génère des approximations importantes (plusieurs milliers de kilomètres) ;
- **le type de transport utilisé** : un seul type de transport principal (entre le train, camion, bateau et avion) associé à tout le produit, impossibilité de définir le mode de transport et le kilométrage pour chaque composant pris séparément ;
- **la région du monde où le produit est utilisé** : par zones géographiques continentales ;
- **le type d'énergie durant la phase d'utilisation** ;

Les résultats de l'analyse environnementale sont calculés à partir de la méthode de calcul *CML 1996, 2001*[16]. Les résultats sont exprimés suivant quatre indicateurs d'impacts sur *l'eau (eutrophisation de l'eau), l'air (acidification de l'air), l'énergie (consommation énergétique) et le carbone (émission de CO2)*, en fonction de quatre paramètres de conception : *les matériaux, la fabrication, le transport et l'utilisation et la fin de vie*. Le concepteur peut modifier ses choix de conception et comparer les impacts générés par l'ancien cycle de vie au nouveau. Cette comparaison est représentée par des chiffres et des couleurs indiquant pour les quatre indicateurs d'impacts si le nouveau scénario est "pire" ou "meilleur". Enfin, un rapport environnemental s'édite automatiquement. Il comprend les résultats de l'étude environnementale ainsi que les résultats des comparaisons effectuées par le concepteur.

Du point de vue des développeurs : l'échange de données entre le module issu du logiciel d'ACV (*GaBi*) et le logiciel *Solidworks* est possible grâce à des **API**. D'autre part, l'ajout de modules supplémentaires au logiciel de CAO présente des problèmes bien connus du monde de l'informatique : le manque de modularité du système (intégration inadéquate), le manque de fonctionnalités (le module d'ACV est un logiciel d'ACV simplifié), le manque d'efficience (l'expert métier n'est pas multi-métier) [Iraqi et al.(2011)].

Le tout intégré, ou le concepteur multi-métier : même motivés avec une connaissance minimale, les concepteurs CAO ne sont pas des experts environnement. Les résultats

l'énergie consommée, etc.). Ou encore, par le fait que l'utilisateur ne peut pas réaliser des analyses de sensibilités sur les méthodes de calcul ou non plus évaluer les erreurs cumulées, générés dans son analyse. Etc.

16. *CML 1996, 2001* sont des méthodes de calcul développées par l'*Institute of Environmental Sciences at the University of Leiden in the Netherlands*, "CML 1996" et "CML 2001" : http ://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/projects/lca2/index.html ; Institute of Environmental Sciences, Leiden University, The Netherlands : "Life Cycle Assessment, An operational guide to the ISO standards, Volume 1, 2 and 3", http ://www.leidenuniv.nl/interfac/cml/ssp/projects/lca2/lca2, Août 2012

sont donc fortement simplifiés pour qu'ils puissent les comprendre. Pour compléter les Inventaires du Cycle de Vie (**ICV**) [Benetto(2003)], de nombreuses hypothèses sont prises par les concepteurs par manque de moyens : temps, connaissances et savoir-faire en ACV (pas ou peu de connaissances relatives à la mesure des incertitudes dans l'évaluation des impacts [Benetto(2004)], à la qualité des données d'inventaires [Leroy(2009)], à la complétude des données, à l'interprétation des résultats, au choix des méthodes de calcul [Reap et al.(2008)], etc.). Sans compter que certaines limites de modélisation de l'outil d'ACV nécessitent l'utilisation conjointe d'autres outils complémentaires (ex. : voir [Ekvall et al.(2007)] sur la modélisation de la gestion des déchets). L'ACV simplifiée a donc l'avantage d'être plus rapide à effectuer qu'une ACV détaillée. Mais elle est source d'erreur si elle est effectuée par un non expert [Pochat(2005)]. La possibilité de générer automatiquement un rapport confère aux résultats d'analyses une confiance qui n'est peut-être justifiée. En revanche, dans le cas où le concepteur CAO a la double casquette *expert CAO–expert environnement*, l'utilisation d'une ACV simplifiée par un expert environnement, peut tout à fait apporter des résultats pertinents, notamment en phase amont du processus de conception [Hochschorner et Finnveden(2003)]. Mais il aura pour cela besoin d'un outil plus précis que le module proposé par SolidWorks.

L'intégration dans l'outil métier de CAO d'un outil simplifié d'analyse environnementale de type ACV, restreint le potentiel d'amélioration environnementale du produit. Le concepteur ne peut pas choisir les indicateurs d'impacts en fonction des objectifs du cahier des charges ou d'autres *critères contextuels* spécifiques. Il en résultat un manque de flexibilité par rapport à la stratégie de l'entreprise pouvant être sur un autre indicateur que les quatre proposés. **Le concepteur a une action** *locale* **et donc une influence** *locale* **sur le produit** (choix de la conception, des matériaux, etc.). Il est restreint à des **mesures partielles. Les autres métiers ne disposant ni du même outil, ni des mêmes hypothèses de modélisation, ne peuvent pas s'aligner avec ses choix d'amélioration du produit**. Au niveau de la connaissance construite par le concepteur CAO en utilisant l'outil d'analyse environnementale, elle peut être fausse, selon les erreurs cumulées. La motivation du concepteur sera d'autant plus réduite s'il se rend compte des erreurs que son outil peut générer. Et ces erreurs décrédibiliseront à ses yeux les outils d'analyse environnementale.

Ces mêmes limites se retrouvent dans d'autres outils métiers intégrés sous la forme de module "environnement". En particulier, lorsque ce module n'a pas été conçu pour pouvoir échanger des données en temps réel avec un outil d'analyse environnementale *global*, piloté au niveau transversal par l'expert environnement. Par exemple l'outil *CES Selector*[17] qui propose un module *d'EcoAudit*.

3.3.2.2 Transfert d'une partie des contenus des outils de CAO vers ACV

Plusieurs travaux portent sur l'injection et l'extraction de données produit CAO vers l'outil d'ACV : la *Bill Of Material* (**BOM**) générée dans l'outil de CAO est envoyée dans le PLM vers les ICV de l'outil d'ACV. Les travaux de

17. CES Selector est un outil développé par *Granta Design*, pour le choix des matériaux, site commercial : http ://www.grantadesign.com/fr/ces.htm, Août 2012.

[Mathieux et al.(2007), Mathieux et al.(2005), Lescuyer et al.(2006)] utilisent un outil logiciel intermédiaire pour convertir les données de sortie de l'outil CAO *Catia* (ou de la BOM issue du PLM, exemple donné avec *Smarteam*[18]) vers les données d'entrée du logiciel d'ACV (exemple donné avec l'outil *EIME*[19]). Ces auteurs utilisent pour cela le langage XML, en faisant référence aux travaux sur l'interopérabilité de [Ghazel et al.(2004)]. Ces auteurs montrent qu'il est possible d'injecter des données issues de plusieurs modèles d'outil métier, relatifs à plusieurs phases du cycle de vie du produit, dans l'outil d'ACV. Contrairement à l'exemple précédent qui consistait à intégrer un module d'ACV simplifiée dans l'outil CAO, [Mathieux et al.(2007)] propose de conserver les outils métier de manière indépendante et de les rendre interopérables à l'aide d'un outil intermédiaire permettant l'export et l'import des données métier différentes dans le bon format. Les échanges de données sont localisés entre les deux outils métier (dont l'outil d'ACV), avec la création d'ajustements dynamiques entre un modèle source et un modèle cible. Ces ajustements nécessitent la définition de transformations de certaines parties des méta-modèles sources en certaines parties des méta-modèles cibles. Les auteurs insistent notamment, sur la nécessité d'intégrer des connaissances métier dans ces transformations de modèles [Mathieux et al.(2007)]. La proposition relève donc d'une **fédération** d'outils de CAO ou de données issues du PLM, vers l'outil d'ACV.

La Fig. 3.17 résume les avantages, limites et opportunités de la fédération des outils de CAO, du PLM et des outils d'ACV d'après [Mathieux et al.(2007)]. Les avantages notables sont la capacité de transfert de l'architecture produit et d'une partie de la nomenclature, de l'outil de CAO qui les crée ou du PLM qui les centralise, vers l'outil d'ACV. Cependant, pour la réalisation des ICV, les données issues de la CAO sont partielles, puisqu'elles dépendent de ce qui est défini par le concepteur CAO dans son environnement numérique : arborescence produit, parfois spécification des matériaux. Les données relatives à la mise en forme, à l'utilisation, à la fin de vie et au transport ne sont pas présentes.

La fédération nécessite dans cette étude un outil logiciel intermédiaire. Les auteurs n'étudient pas d'autres possibilités. Ils proposent une "customisation" du PLM pour faciliter la formalisation de données nécessaires à la réalisation des ICV, mais ne font pas d'étude permettant d'indiquer la configuration préférée par les concepteurs.

Bien que les auteurs de ces études en envisagent les possibilités, l'injection des résultats de l'ACV ou d'autres outils d'analyse environnementale, d'une manière dynamique vers les outils métiers, *via* les transformations adéquates nécessitant la connaissance des méta-modèles métiers cibles, est peu développée. D'autre part, il faudrait fédérer les autres outils métier contenant les données manquantes, pour réunir la totalité des données nécessaires à l'établissement des ICV. Les auteurs ne prennent aucun autre exemple des modèles relatifs à ces autres outils métier. Les connaissances associées aux données sont donc fondées sur le même référentiel : celui de la nomenclature produit. Aucune information n'est donnée concernant des conflits éventuels pouvant apparaître entre deux modèles contenant des données relatives à des sémantiques très éloignées. De même qu'aucune précision relative à l'outil logiciel intermédiaire n'est donnée, dans le cas où au moins un des outils métier

18. Développé par *Dassault Systèmes*, http ://www.3ds.com/fr/, Août 2012
19. Outil d'ACV, développé par la société CODDE, http ://www.codde.fr/, Août 2012

	Avantages	Limites	Opportunités
Interopérabilité Catia-EIME D'après [Mathieux et al. 2007]	**Transfert de données de l'outil CAO vers l'outil d'ACV** (dans les modèles de données *d'entrée* de l'outil EIME) : - Arborescence produit - **Nomenclature** partielle (matériaux si renseignés par exemple)	- **Données partielles** venant de l'activité CAO, contenues dans les modèles produit CAO: pas de données sur la consommation énergétique des produits durant la phase d'utilisation, pas de valeurs de durée de vie spécifiée, pas de référence exacte des composants, données sur les matériaux pas toujours renseignées - Utilisation d'outils intermédiaires pour « traduire » les formats d'imports / exports des logiciels métiers différents (utilisation du langage XML en tant qu'intermédiaire)	- Gains de **temps** - **Flexibilité** des connections (nécessite de définir les nouvelles transformations) - « Prise en compte **amont** des performance environnementales dans le processus de conception » (à démontrer, car l'outil d'ACV reste néanmoins basé sur des données de conception détaillées) - Améliorations de la **coopération** entre les concepteurs
Interopérabilité Smarteam-EIME D'après [Mathieux et al. 2007]	- **Nomenclatures** plus complètes (détail des composants, masse, matériaux, références, consommation des composants électroniques), - Données **fournisseurs** (emballage par exemple)	- **Customisation nécessaire** du PLM, ce qui peut être long et fastidieux dans certains contextes industriels - Utilisation d'outils intermédiaires pour « traduire » les formats d'imports / exports des logiciels métiers différents - Intégration partielle des **connaissances** des experts	- **Diversité des informations** relatives au **cycle de vie** du produit récupérables plus importantes que dans le cas de la CAO - **Customisation** possible du PLM suivant des besoins à venir pour alimenter les modèles d'entrée des outils d'ACV

FIGURE 3.17 – Interopérabilité entre les outils de CAO, de PLM et l'outil d'ACV : aspects positifs et négatifs, opportunités de l'étude

ne peut pas exporter les données qu'il manipule, dans des formats de type XML, textuel, ou STEP. Les auteurs mettent en perspective la capacité de la fédération à favoriser la prise compte de la dimension environnementale, dès les phases amont. La démonstration porte pourtant sur la conception détaillée (établissement des nomenclatures produit). Au niveau des connaissances, la continuité dans l'échange d'informations interprété par l'outil logiciel recevant les informations, permet au concepteur CAO de se forger une connaissance progressive des choix de conception et des conséquences environnementales qu'ils génèrent.

Du point de vue des utilisateurs, il n'existe pas d'étude comparative précise permettant de juger leur préférence pour les solutions d'intégration ou de fédération. [Segonds et al.(2010)] présente une étude réalisée pour connaître le point de vue des utilisateurs de deux outils à fonctionnalités équivalentes mais fondés respectivement sur "l'intégration" et "l'unification". Ce sont des outils d'analyse fonctionnelle du produit utilisés en phase amont du processus de conception. Les concepteurs sont amenés à donner leur avis sur les critères de *learnability, efficiency, satisfaction*, et *errors*. Les résultats de cette étude montrent que l'outil fondé sur l'intégration présente de nombreux avantages pour réaliser l'analyse fonctionnelle mais ne permet pas de résoudre tous les problèmes rencontrés par les concepteurs en phases amont. Les auteurs [Segonds et al.(2010)] concluent que : "*the ideal situation would be to be able to federate specialized business tools so that they might communicate and exchange data in a fluid and consistent manner (i.e. with no data loss and no erroneous interpretation of data), not to integrate all types expertise within a single business tool. Indeed, a strong integration of all these types of expertise inevitably entails establishing a consensus regarding the points of view of the various domain experts involved in collaboration*". Et les auteurs d'ajouter que cette question de consensus est inhérente à la collaboration.

De leur coté, les éditeurs de logiciels CAO/PLM ne sont pas unanimement convaincus de la méthode à adopter pour la mise en oeuvre d'une démarche d'éco-conception. Cela témoigne d'une incertitude relative aux avantages et inconvénients des différents types d'interopérabilité. Comme l'explique le responsable des solutions d'éco-conception, Jean-Pierre Theret, de chez *Dassault Systèmes*, aux ingénieurs[20] *le débat pour savoir où doit être l'éco-conception, proche de la CAO ou du PLM, n'est pas encore tranché.* Il ajoute *qu'ils envisagent actuellement différentes possibilités avec leurs clients* [Le (2010)]. Ils travaillent notamment sur le développement d'un prototype de la plateforme logicielle ENOVIA EDW "*Environnemental Data Workbench*", permettant son usage vertical avec des clients de différentes industries, faisant l'objet de la section suivante.

3.3.2.3 Plateformes outils intégrant plusieurs outils d'analyse environnementale

Le marché des systèmes logiciels PLM propose aux industriels des solutions pour intégrer les contraintes environnementales à l'échelle de l'entreprise (produit et/ou site)[21]. Ces développements spécifiques du PLM permettent de collecter, formaliser, analyser certaines données spécifiques d'une nomenclature produit provenant de toute la chaîne de développement et approvisionnement, puis de confronter ces données aux règlementations en vigueur dans les pays où le produit sera commercialisé et d'en éditer un rapport [Eco(2010)]. Ces solutions d'interopérabilité sont fondées sur plusieurs intégrations. Elle proposent et utilisent des API pour fédérer des outils utilisant des langages différents. Dans le cas de *Dassault Systèmes*, "*CMC-Enovia X-BOM Component Reuse for CES V5*" est un produit d'intégration de l'outil de choix des matériaux *CES Selector* avec *Enovia* permettant de synchroniser les bases de données matériaux pour ensuite assurer la conformité des données avec la réglementation REACH, en utilisant le produit *MCC-Enovia Materials Compliance Central* [Theret et al.(2011)]. D'un point de vue pratique, des démonstrateurs existent dans les laboratoires de recherche pour montrer les possibilités offertes par l'UML pour implémenter le PDM, notamment vis-à-vis des données sur la structure du produit et les *workflow* (par exemple, [Eynard et al.(2006)]).

La plateforme démonstrateur *Environmental Data Workbench (EDW), de Dassault Systèmes* est fondée sur l'intégration de la dimension environnementale dans les outils supportant le développement du produit et s'inscrit dans une démarche globale site et produit (ISO 14001-6). L'approche site est supportée par des outils type empreinte carbone [Theret et al.(2011)]. L'approche produit permet de réaliser des PEP *via* l'outil d'ACV. Enfin, la traçabilité des substances touche de manière transversale aux données sites et produit (certification REACH). Pour réaliser les ACV et pour assurer la traçabilité des données durant les Inventaires du Cycle de Vie, la structure de données utilisée est de type *PPR : Product-Process-Resource* (notamment reliée à *Delmia manufacturing tool*, qui est l'outil dédié aux données de production).

20. Article du magazine *Industrie et Technologie* paru en Juillet 2010 [Le (2010)]
21. *Dassault systèmes* a développé *Enovia Materials Compliance Central*, *PTC : Insight Environnement Compliance* et *Siemens PLM Software : TeamCenter Environnemental Compliance.*

Dans cette architecture PLM, un noyau central fondé sur des modèles standards (appelé EDW pour *Environmental Data Workbench*) centralise l'ensemble des informations en banques de données classiques qui collectionnent, valident et publient les fichiers. Les informations viennent à la fois du (a) PLM (ensemble des données des phases du cycle de vie du produit : extraction et transformation de matériaux, conception et simulation numérique, production, utilisation, fin de vie), (b) de la chaîne logistique, des données internes et des sources publiques, (c) de données transport, infrastructure et énergie et (d) des analyses environnementales (conformité des substances, ACV, empreinte carbone, analyse de coût). Ainsi, pour réaliser une ACV, les ICV sont compilés à partir des données centralisées disponibles.

Les avantages, les limites, ainsi que les opportunités de cette plateforme sont présentés Fig. 3.18. Nous avons pris cet exemple pour caractériser les développements en cours chez les éditeurs de PLM. Nous retrouvons les mêmes limites chez d'autres développeurs [22].

	Avantages	Limites	Opportunité
Interopérabilité de type **Plateforme CAD-PLM-LCA Via le EDW,** d'après [Theret et al. 2011]	- Approche globale, site et produit, intégrant les normes et outils transversaux jusqu'aux outils métiers ; - Gestion de l'ensemble des fichiers liés au développement du produit : large périmètre couvrant quasiment toutes les phases du cycle de vie du produit (modèles de processus de données) ; - Interopérabilité des outils, de type intégrative : dynamisme de l'interface, permettant d'importer dans un outil métier des informations venant d'autres métiers ; - Capitalisation des projets antérieurs ;	- Approche fondée sur la centralisation des données, et envois vers outil d'ACV : une gestion de la sémantique de la donnée partielle, contexte figé (nécessite une grande confiance dans les données publiées) ; - Manque de flexibilité face aux changements dans les outils : exclusivité des API (à refaire suite à mise à jour) - obsolescence des échanges , peu adapté aux contextes variables de la pratique de l'éco-conception; - Risque de réduire la démarche d'éco-conception à une édition de PEP, de rapports environnementaux ou de rapports de conformité au règlement REACH; - Pas de retour possible « intégré » de l'outil d'analyse environnementale dans les outils métier (pas de correspondance entre les données maîtrisée dans un métier et leur conséquence vis à vis de l'environnement);	- Possibilité d'intégrer d'autres outils d'analyse environnementale quantitative que l'ACV ;

FIGURE 3.18 – Interopérabilité de la plateforme Environmental Data Workbench (EDW) [Theret et al.(2011)], intégrant les outils de PLM, CAD, LCA (etc.) : aspects positifs et négatifs, opportunités de l'étude

Ces systèmes ont l'avantage d'être des approches *globales* à la fois site et produit. Ils offrent un cadre pour répondre en partie aux normes et aux règlementations environne-

22. Par exemple, PTC avec leur PLM *Windchill* proposant de réaliser une ACV et une Analyse de Coût (Informations disponibles sur le site commercial de PTC : http ://fr.ptc.com/products/windchill/lca, Août 2012)

mentales. Les données manipulées couvrent l'ensemble des fichiers liés aux développement du produit et dans un large périmètre. Nous avons vus que ces systèmes sont fondés sur une approche d'intégration au sein du système PLM en utilisant des formats standards et en *customisant* les méta-modèles venant par exemple de la CAO vers ceux de l'ACV. Les données sont donc dupliquées dans le PLM. De fait, l'intermédiaire rend les échanges réactifs entre l'ACV et la CAO, décalés dans le temps et sans possibilité de réponse de l'ACV vers la CAO. C'est aussi vrai pour les autres outils métier que ceux de la CAO. De plus, les éditeurs ne publient pas leurs méta-modèles, ce qui ne permet pas de vérifier les données échangées ni de les faire évoluer. Le risque est que cela amène à des ruptures de sémantique liées aux données, entre leur(s) outil(s) d'origine et l'outil cible dans lesquelles elles seront manipulées et interprétées par le métier. En outre, l'utilisation des API permet de fédérer des outils différents entre eux, mais rend tributaire de l'API qui n'est pas toujours disponible et devient obsolète lors du passage à une nouvelle version. Ces échanges de données unilatéraux créent un manque de dynamisme dans les échanges de données entre outils. Ils ne favorisent pas l'adaptation des méthodes et outils aux contextes changeants et évolutifs de la pratique de l'éco-conception, même si techniquement il serait possible d'utiliser des API, dans le cas où ils seraient disponibles pour chaque nouvel outil différent à fédérer. Le risque majeur d'une telle démarche est donc de réduire l'éco-conception à l'édition de Profils Environnementaux Produits, de rapports de conformité vis-à-vis de règlements ou d'exigences normatives.

Cependant, cette plateforme a pour ambition de rajouter d'autres outils d'analyse environnementale, de types Ecofaire [23], ou MAIECO/ATEP [24], ainsi que d'améliorer la collaboration entre les différentes organisations et des différents acteurs intervenant dans un projet d'éco-conception [Theret et al.(2011)]. Ces perspectives seraient peut être en mesure de contrer certaines limites que nous avons mentionnées.

3.3.3 Synthèse de la section relative aux solutions d'interopérabilité entre les outils de conception et d'analyse environnementale

Dans cette section nous avons étudié trois exemples de solutions actuelles pour permettre les échanges d'informations entre un ou plusieurs outils de conception et un ou plusieurs outils d'analyse environnementale.

Grâce aux outils globaux l'industriel édite des rapports de conformité vis-à-vis d'une liste de substances interdites ou de réalise un PEP pour communication environnementale. Ces outils sont en revanche peu adéquats pour aider la pratique de l'éco-conception dès les phases amont. Les échanges d'informations environnementales sont souvent unilatéraux et les mécanismes en jeu sont peu flexibles au changement d'outils. Les éditeurs d'outil logiciel de conception se limitent quasiment tous à l'intégration de l'outil d'ACV. Or, les

23. Ecofaire est un outil, de type guide méthodologique pour initialiser une étude d'éco-conception, s'adressant au PME, téléchargeable sur le site d'EVEA (consultant en éco-conception), http ://www.evea-conseil.com/conseil/innover-lamelioration-rupture, Août 2012

24. MAIECO/ATEP est un outil développé par les Arts et Métier Chambéry et le CETIM, www.cetim.fr, Août 2012

méthodes d'éco-conception sont plus vastes et fondées sur des outils aussi bien qualitatifs que quantitatifs. [Millet et al.(2007)] rappelle premièrement que l'ACV n'est pas un outil adapté pour les concepteurs, car elle se base sur des produits existants (déjà conçus) ou en fin de processus de conception. Deuxièmement, l'ACV n'est pas une méthode efficace pour créer une dynamique d'unité apprenante dans l'entreprise (et donc capitaliser de la connaissance). Car l'ACV n'améliore pas la légitimité ou la crédibilité de la considération environnementale. Enfin, [Millet et al.(2007)] montre que l'ACV peut générer de la confusion chez les concepteurs, réduisant par là même les chances de l'entreprise à éco-innover. La difficulté d'outiller les phases amont de la conception est en effet montrée comme une des conséquences du caractère moins formel des phases amont du processus de conception [Mougenot(2008)]. Auquel plusieurs auteurs proposent des solutions, notamment les travaux de [Segonds(2011)] dans l'aide à la conception dans un environnement collaboratif amont, qui pourrait être transposé dans le cadre de l'intégration de la dimension environnementale en conception.

Du en particulier au type d'échanges de données utilisé, les exemples de développements étudiés, présentent donc deux ruptures fondamentales : le dynamisme des échanges et la flexibilité de la structure échafaudée.

Face à ce constat, pour améliorer la prise en compte de l'environnement dans le SI et les échanges de données actuels en conception de produits, il s'agit :

- d'assurer conjointement une prise en compte *locale* et *globale* de l'analyse environnementale. Les outils d'analyse environnementale simplifiée, intégrés sous la forme de modules dans un outil métier *local* sont à utiliser en lien avec un outil d'analyse *globale*.
  Avantages : assure la qualité des analyses environnementales, tout en créant le lien entre les activités générant les données via des choix de conception et la conséquence environnementale de ces choix.

- de favoriser l'utilisation de bibliothèques d'outils d'analyse environnementale.
  Avantages : permet de s'adapter à la variabilité contextuelle de la pratique de l'éco-conception, notamment dans les phases amont du processus de conception, tout en garantissant une flexibilité du SI face au parc hétérogène et changeant d'outils logiciels.

- d'assurer un retour d'informations possible entre les outils d'analyses environnementales et les outils de conception *locaux*.
  Avantages : permet de rendre très réactifs, voire proactifs, les concepteurs dans une démarche de DTE. Co-constructions de connaissances entre les concepteurs.

L'Ingénierie Dirigée par les Modèles peut apporter des éléments de solutions que nous pensons pertinentes pour répondre aux trois points précédents.

Caractéristiques techniques de l'Ingénierie Dirigée par les Modèles

Présentée dans la section 3.3.1.2, l'IDM présente plusieurs avantages, tels que la **capacité à fédérer des modèles métiers**, tout en leur permettant d'**évoluer d'une manière indépendante**. Cette **flexibilité structurelle** permet d'**ajouter** des modèles issus de nouveaux outils métiers, **sans perturber la cohérence de la structure existante**.

Techniquement, c'est au sein de l'espace technique IDM que **l'interopérabilité sémantique et syntaxique** est assurée par un ensemble de transformations de modèles.

Pour **illustrer cet espace conceptuel**, la figure 3.19 présente d'une manière simplifiée les relations entre les outils métier (à gauche, outils de CAO, de choix des matériaux, d'analyse environnementale, etc.), leurs données d'export et d'import relatives, et l'espace de partage et de collaboration des données. C'est à ce dernier niveau (à droite de la figure) qu'interviennent les transformations entre méta-modèles fondés sur des cartes de correspondances. Leur élaboration nécessite d'impliquer les connaissances des domaines relatifs aux expertises en jeu dans la transformation.

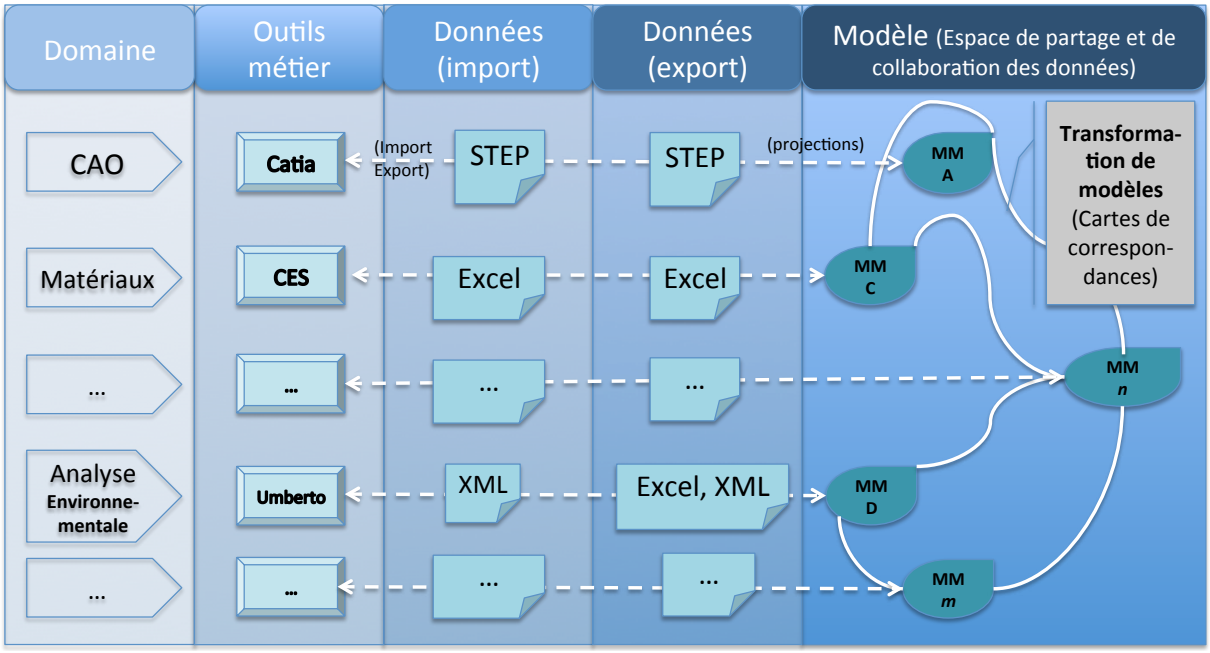


FIGURE 3.19 – Relations entre les outils métier, les données d'import et d'export et l'espace de partage et de collaboration des données

Autant de domaines (colonne à gauche) nécessaires peuvent être **ajoutés** [25]. De nouveaux domaines impliquent l'ajout de nouveaux outils métier possédant un ou plusieurs formats d'import et d'export. Les données ainsi exportées et importées circulent alors dans l'espace de partage et de collaboration (à gauche).

Les transformations de modèles impliquent de passer par deux étapes : (1) la projection des données d'import ou d'export dans l'espace de partage, et

25. L'ajout d'un nouveau domaine est symbolisé sur la figure par des formes marqués par "..."

(2) l'établissement des cartes de correspondances entre les données au sein de cet espace de partage, afin d'assurer leur circulation. **Les "projections"** correspondent au fait de "projeter" les données manipulées par un outil métier, dans son espace technique vers le monde des modèles, et inversement [Iraqi et al.(2011)].

Les opérations de projection sont fondées sur des **"cartes de correspondances"** entre le fichier d'import ou d'export de l'outil métier et un méta-modèle correspondant (généré dans nos travaux de recherche grâce au Eclipse Modeling Framework (EMF) [26]).

Il existe des API pour assurer ces opérations lorsque les format d'import et d'export sont de type textuel, XML, STEP, Excel, XMI.

Propriétés techniques de cet environnement d'IDM

L'IDM est une solution informatique permettant d'assurer les points suivants :

- Possibilité technique d'assurer conjointement une prise en compte *locale* et *globale* de l'analyse environnementale en fédérant les outils d'analyse environnementale simplifiée, intégrés *localement*, avec un outil d'analyse *globale* nécessaire à la conduite de l'éco-conception.
- Possibilité technique de définir à l'avance des bibliothèques de méta-modèles des données relatives aux outils métier impliqués dans le processus de conception et les outils d'analyse environnementale. Les modèles relatifs aux transformations nécessaires entre les méta-modèles cibles et sources sont également définissables à l'avance.
- Possibilité de l'IDM de donner un cadre favorable à la conservation des liens sémantiques associés aux données, dans les transformations entre modèles d'outils métier.

Les transformations entre méta-modèles peuvent **s'enchaîner d'une manière dynamique (chaînage dynamique)**. Il est possible de **modifier, ajouter, retirer à tout moment des transformations afin d'écarter ou de déployer les échanges de données métier souhaités (flexibilité technique)**. **Le chaînage dynamique** et la **flexibilité technique** permettent de déclencher le processus de transformation de modèles à chaque nouveau contexte et faire face aux contextes changeants. Ce qui permet techniquement de "mettre en circulation" les données nécessaires à la réalisation des analyses environnementales qui sont disponibles.

3.3.3.1 Conclusion : l'IDM offre un cadre favorable pour répondre au besoin identifié

Compte-tenues des propriétés de l'IDM, nous constatons que parmi les solutions informatiques existantes l'IDM est un choix pertinent pour répondre à notre problématique d'échanges de données (validation de la troisième hypothèse présentée dans le tableau 2.4). L'IDM est une approche cohérente avec l'approche d'interopérabilité de type fédérative. Dans ce cadre méthodologique et technologique, les connexions sont établies entre méta-modèles différents manipulant des données différentes sans perturber les autres codes [27]. "Les transformations permettent de choisir l'espace technique et le formalisme le plus

26. [Iraqi et al.(2011)] illustre ces mécanismes grâce à plusieurs cas d'étude, basés sur différents outils : TDC / Catia par exemple.

27. Les cartes de correspondances sont définies entre les différentes structures de données relatives aux différents outils (mapping).

adapté à chaque activité (par exemple conception en UML, génération de tests sur des graphes, configuration lors du déploiement via des fichiers XML), tout en ayant un cadre méthodologique unique, l'IDM" [Favre et al.(2006)]. De plus, le savoir-faire est capitalisé au niveau des modèles et non plus au niveau du code source [Favre et al.(2006)]. Du point de vue de l'industriel, la programmation orientée objet ou modèle, rend les systèmes flexibles, facilement extensibles et peu coûteux à maintenir [28] par rapport à la programmation et la conception issues de l'école de pensée des méthodes structurées, existant avant l'émergence de la programmation orientée objet [Graham(1997)].

Pour nos développements, nous utiliserons dans la suite de nos travaux *Ecore*, faisant partie de l'environnement Eclipse [29], qui est une implémentation de l'architecture normée de l'OMG. EMF a deux avantages pour nos travaux : (a) un cadre de modélisation approprié et (b) une infrastructure de génération de code pour la construction d'applications fondées sur des modèles que nous définirons dans nos expérimentations (Partie 5.1). Nous pourrons, grâce à l'IDM modéliser les relations sémantiques et syntaxiques entre les modèles métier *locaux* et *globaux* relatifs aux outils d'analyse environnementale.

28. [Graham(1997)] montre par exemple que "la programmation par objet, l'héritage en particulier, laisse la possibilité de définir clairement puis d'utiliser des modules incomplets du point de vue fonctionnel, et permet leur extension sans bouleverser le fonctionnement des autres modules ou de leurs clients. Ceci rend les systèmes plus flexibles, plus facilement extensibles et moins coûteux à maintenir" que la programmation et la conception issues de l'école de pensée des méthodes structurées, existant avant l'émergence de la programmation orientée objet.

29. EMF : Eclipse Modeling Framework : http ://www.eclipse.org/modeling/emf/, Avril 2012

3.4 Verrous à lever pour intégrer efficacement la dimension environnementale en conception

Dans ce chapitre nous avons précisé le positionnement de la recherche autour de trois hypothèses majeures relatives à : *l'intégration de la dimension environnementale en conception, des contextes évolutifs de l'analyse environnementale et de l'échange d'informations entre les outils métiers intervenant en conception et supportant les analyses environnementales.* **Ces trois axes de recherche nous font converger vers trois contraintes majeures** (*cf.* **Fig. 3.20**) **rendant difficile l'intégration de la dimension environnementale en conception** :

1. **Le verrou contextuel :** absence de bibliothèques de modèles d'outils prenant en compte la dimension environnementale, ordonnées par critères contextuels.
2. **Le verrou technique :** relatif à l'incapacité du système d'information et des outils utilisés par les industriels à s'adapter aux contextes variés que nécessite l'éco-conception
3. **Le verrou d'intégration :** confusion entre les niveaux *local–global*, rupture des liens sémantiques et de cause à effet, entre les paramètres de conception *locaux* et les paramètres environnementaux *globaux*.

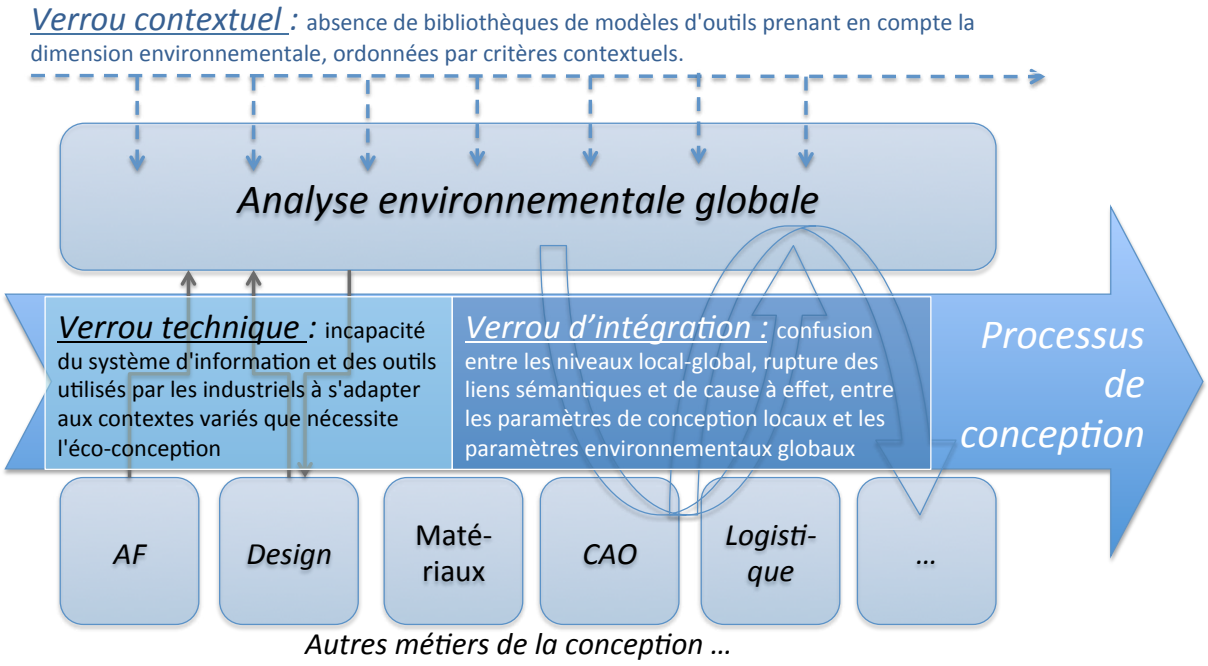


FIGURE 3.20 – Verrous à lever pour l'intégration de la dimension environnementale pendant le processus de conception des produits (niveau opérationnel)

Ces trois contraintes majeures rendent le processus de conception peu adapté à une intégration efficace de la dimension environnementale en conception.

Dans ce chapitre nous avons constaté que l'intégration de la dimension environnementale est fortement sensible aux variabilités contextuelles et nécessite l'utilisation d'outils

différents au cours du processus de conception. **Par la réorganisation local/global des outils, nous pouvons établir des liens propices aux échanges d'informations en continu entre les différents outils devant intervenir au cours du processus de conception. Pour supporter ces échanges, l'Ingénierie Dirigée par les Modèles nous semble conférer les propriétés adéquates. En particulier, la fédération d'outil apporte une solution technique pour faire évoluer le système d'information en fonction des changements**. Nous faisons l'hypothèse que ces approches pourraient être complémentaires aux approches "unifiées" afin de couvrir *au mieu* les zones *processus-produit* à changements fréquents d'une part (approche fédérée) et à changement plus lents d'autre part (approche unifiée).

Notre proposition de recherche propose **d'améliorer l'intégration de la dimension environnementale en conception, dans un contexte de variabilité forte.** Nous proposons donc au chapitre suivant une méthode fondée sur la fédération qui permettrait d'apporter des solutions aux industriels pour améliorer le dynamisme et la flexibilité des échanges d'informations entre les concepteurs et l'expert environnement. Le coeur de la méthode repose sur une modélisation de transformations d'informations aux interfaces des métiers intervenant au cours du processus de conception.

Chapitre 4

Proposition

La problématique de la prise en compte de la dimension environnementale dans le processus de conception des produits se heurte à trois verrous majeurs identifiés au chapitre précédent et sur lesquels nous nous positionnons : *le verrou contextuel, le verrou technique et le verrou d'intégration.*

Notre proposition pour répondre à la problématique est la suivante. Le niveau **global** doit avoir à sa disposition une bibliothèque de modèles associés aux données d'entrée et de sortie des outils des **concepteur**s, définis au fur et à mesure des projets et classés selon des critères contextuels propres au caractère **Evolutif** de l'éco-conception. Ces modèles ont la possibilité de se connecter **dynamique**ment afin que les activités du niveau **local** et les activités d'analyse environnementale *globale* échangent des informations spécifiques, sur des itérations courtes (outil métier et conservation de la sémantique associée aux données). Cette interopérabilité, ou plus précisément, cette **fédération** d'outils, serait déterminée par les *transformations d'informations* aux interfaces des activités métier.

Ce chapitre présente tout d'abord les propriétés fondamentales que doit conférer notre proposition pour répondre à la problématique de recherche. Puis, nous présenterons la méthode **FESTivE** pour *Federate EcodeSign Tools modEls*. La méthode FESTivE est une **méthode en deux parties** permettant la mise en oeuvre de notre proposition en industrie. Son développement informatique s'inscrit dans les développements en **Spirale**.

Notre méthode comprend :

- **une partie création** permettant de *créer* la bibliothèque de modèles de données d'entrée et de sortie d'outils métier *locaux* et d'outils d'analyses environnementales globales, ainsi que de modèles de transformations de données entre outils ;
- **une partie utilisation** aidant à sélectionner les outils issus de la bibliothèque afin de *déployer* le processus de conception en y intégrant la dimension environnementale.

4.1 Propriétés de la proposition

4.1.1 Périmètre

Dans cette section nous décrirons d'une manière théorique notre proposition de recherche. Nous présenterons ses propriétés fondamentales. La Fig. 4.1 présente [1] le périmètre de la proposition.

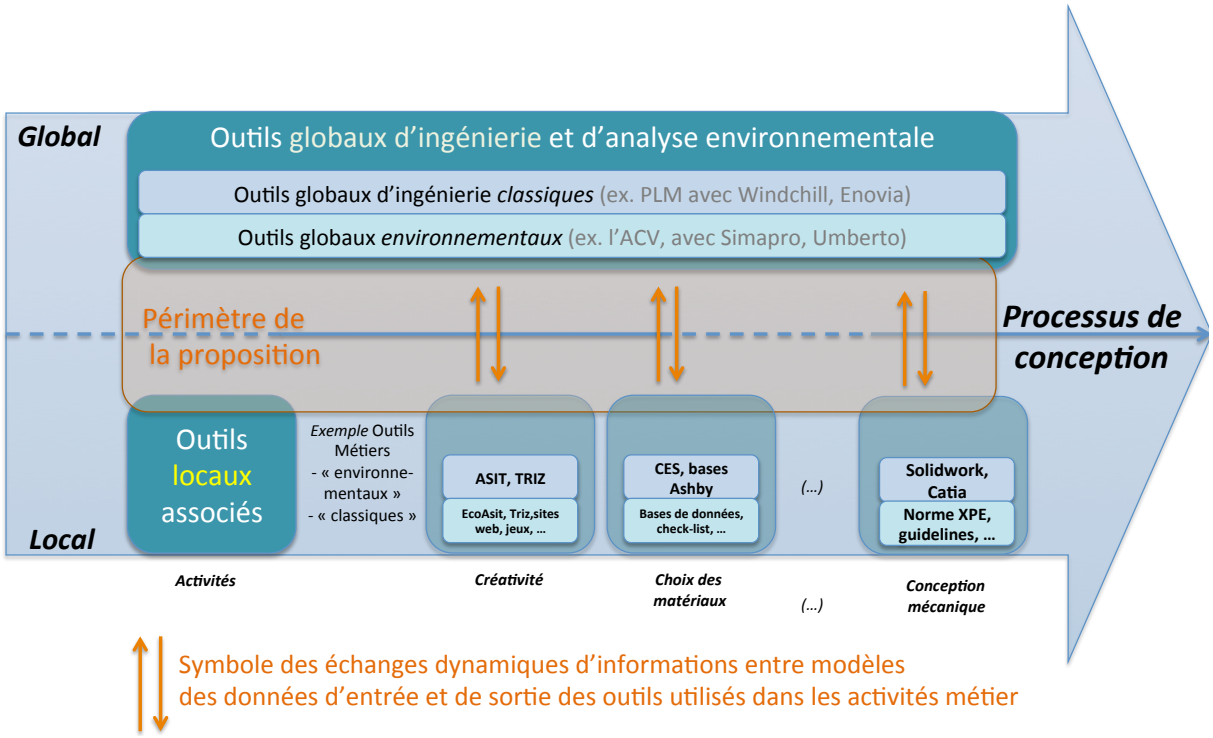


FIGURE 4.1 – Localisation de la proposition, à l'interface des activités métier intervenant au cours du processus de conception d'après la Fig. 3.11

La proposition se situe aux interfaces des niveaux *local/global* des activités métier intervenant au cours du processus de conception. Elle consiste à développer des échanges dynamiques d'informations. Ils ont lieu entre les modèles de données d'entrée et de sortie des outils utilisés dans les activités métier au cours du processus de conception. Sur la Fig. 3.11, les flèches oranges symbolisent ces **échanges bilatéraux** entre les activités métier *locales* et *globales*. Pour se faire, la proposition repose sur **l'hypothèse** que l'utilisation de la fédération favorise :

- **des échanges dynamiques** entre les activités métier d'analyses environnementales *globales* et les activités *locales*
- **une flexibilité du système d'information**

1. Ce schéma reprend celui Fig. 3.11 présentant les outils et méthodes *locales/globales* au cours du processus de conception.

– **l'intégration des paramètres environnementaux** dans chaque activité métier (mise en correspondance des paramètres, au niveau des méta-modèles).

Cette hypothèse sera validée par les expérimentations au chapitre 5.1.

4.1.2 Propriétés de la proposition

Compte-tenu des verrous à lever sur lesquels se positionne notre problématique de recherche, nous définissons trois propriétés essentielles devant être assurées par la proposition :

1. **P1 : Pouvoir s'adapter à la variabilité contextuelle que nécessite l'éco-conception**
2. **P2 : Pouvoir détecter et échanger des données disponibles nécessaires** à l'activité environnementale et y répondre d'une manière adaptée
3. **P3 : Lier les paramètres environnementaux aux paramètres des métiers** *locaux* au cours du processus de conception.

Dans les trois prochaines sections, nous allons préciser ce que nous entendons pour chaque propriété et ce que cela signifie d'un point de vue technique et pratique.

Propriété 1 : adaptation à la variabilité contextuelle que nécessite l'éco-conception

Chaque contexte entraîne une configuration différente des échanges nécessaires entre les activités. Il n'y a pas deux processus de conception identiques dans une entreprise et dans un projet de conception. Tout simplement parce que chaque projet de conception est mené par des personnes, des supports et des informations qui évoluent dans le temps. A chaque nouvelle configuration du processus de conception, des données différentes sont générées et échangées entre des outils différents. La Fig. 4.2 illustre sur le schéma *local/global* la première propriété que doit conférer la proposition : pouvoir s'adapter à cette variabilité dans les échanges.

Pour vérifier la propriété, la solution proposée est de modéliser les échanges d'informations entre les données d'entrées et de sorties des activités métier *locales* et *globales*, au fur et à mesure du processus de conception. Ces échanges sont modélisés sous la forme de modèles de transformation de données, appelés **cartes de correspondances**. Ils peuvent être capitalisés dans une "bibliothèque" de modèles associés aux outils supports des activités métier.

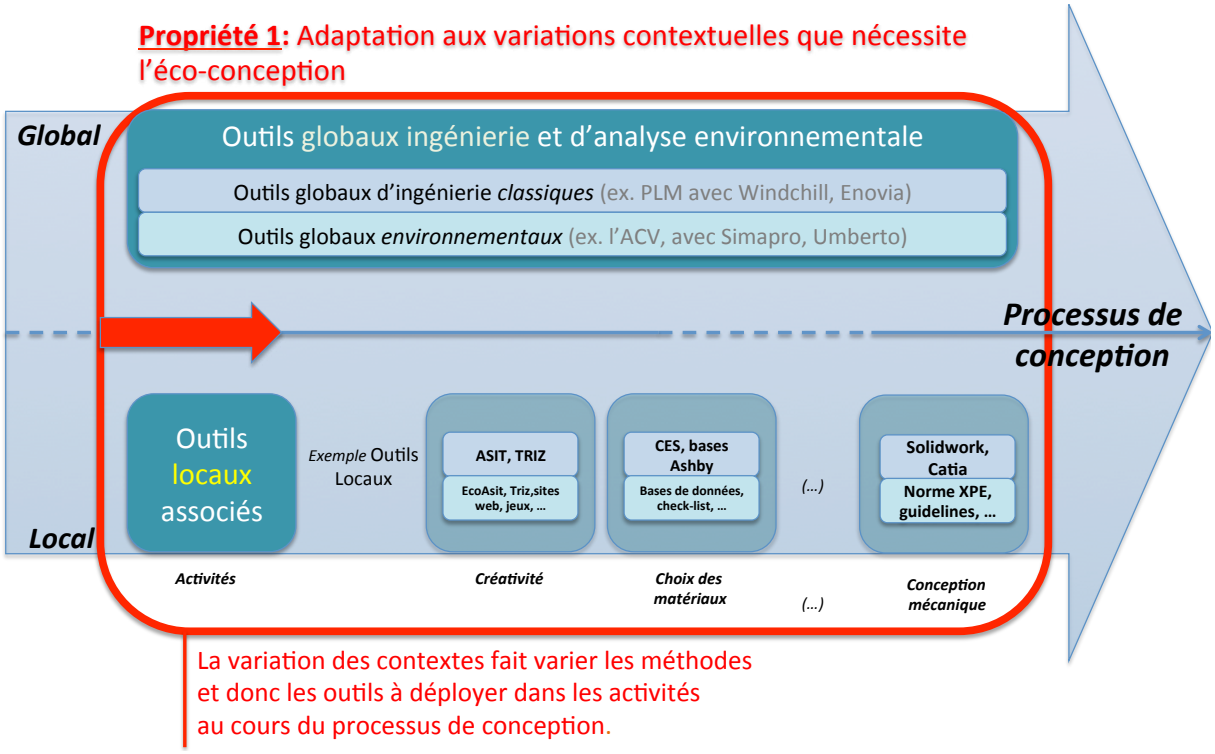


FIGURE 4.2 – Propriété n°1 de la proposition : adaptation à la variabilité contextuelle

Propriété 2 : échange des données disponibles nécessaires à l'activité environnementale et capacité d'y répondre d'une manière adaptée

Grâce à l'approche par les modèles (IDM), les données générées par une activité et les données nécessaires à une autre peuvent être ciblées et subir des transformations afin d'être échangées. Les méthodes (ici les transformations) sont appliquées sur les méta-modèles, de sorte qu'il y ait un découplage entre l'espace technique des applications (données relatives aux métiers) et des modèles (et méta-modèles).

L'enchaînement des échanges d'informations entre les activités est conduit par les échanges entre modèles. Ils "déversent" leurs contenus entre modèles, ce qui permet de déployer le processus de conception. A chaque outil utilisé dans une activité métier sont associés des modèles d'entrée et de sortie. La connaissance de ces modèles permet de définir les cartes de correspondances à établir entre ces modèles. Ainsi, une activité peut disposer au plus tôt des données d'entrée dont elle a besoin pour fonctionner. La fédération des outils permet donc d'utiliser les données nécessaires disponibles. La Fig. 4.3 situe cette propriété sur le schéma *local/global* présenté précédemment.

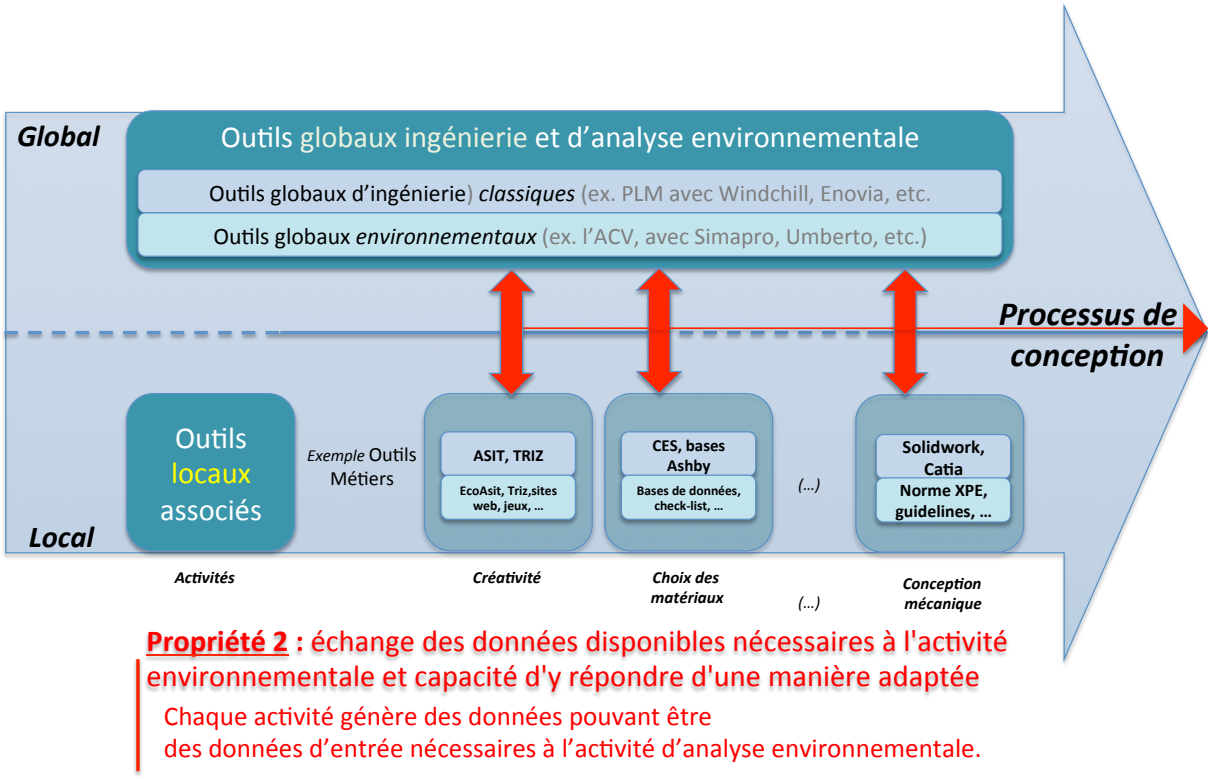


FIGURE 4.3 – Propriété n°2 de la proposition : échange des données disponibles nécessaires à l'activité environnementale et capacité d'y répondre d'une manière adaptée

Pour limiter les ambiguïtés, nous employons le terme de *carte de correspondances* pour définir les méthodes entre les méta-modèles. Le terme *transformation* est plutôt réservé au code informatique généré (définissant des règles de transformation).

Propriété 3 : lier les paramètres environnementaux aux paramètres des métiers *locaux* au cours du processus de conception

L'information échangée entre deux outils doit arriver dans un contexte favorable à sa compréhension et son interprétation. La Fig. 4.4 symbolise par des bulles rouges au bout des flèches les échanges d'informations et l'intégration des paramètres de l'activité donnant des informations dans les paramètres de l'activité reçevant ces informations. Cette intégration peut être assurée par la définition des liens entre les paramètres du

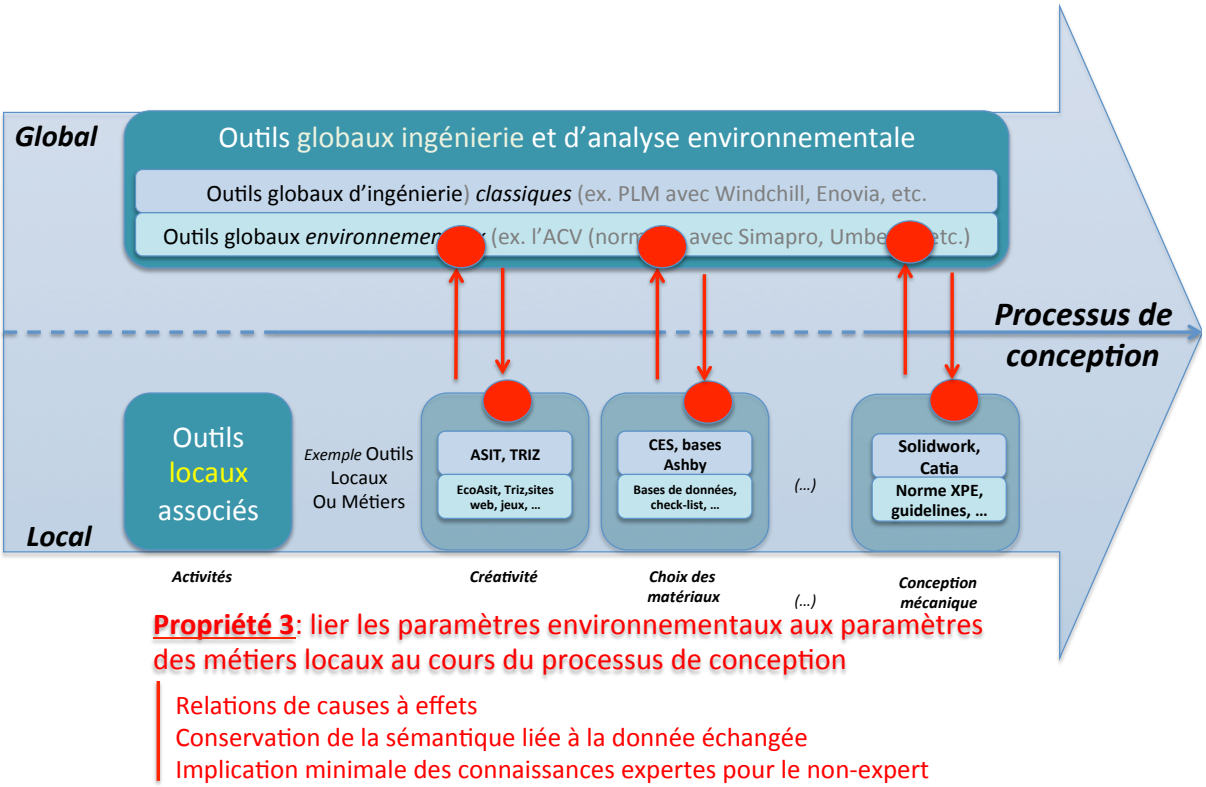


FIGURE 4.4 – Propriété n°3 de la proposition : lier les paramètres environnementaux aux paramètres des concepteurs

métier et les paramètres environnementaux à chaque échange.

Pour cela, ce lien doit être défini à *deux niveaux complémentaires* : au niveau des cartes de correspondance et au niveau de l'interface homme-machine de l'outil métier. Le lien au niveau des cartes de correspondance est nécessaire afin de permettre la fédération et donc à l'outil recevant les données de pouvoir les lire. Le lien au niveau de l'interface homme-machine de l'outil métier est tout aussi nécessaire puisqu'il permettra au métier de prendre en compte ce paramètre dans son activité. En effet, le métier doit pouvoir faire le lien entre la donnée qu'il reçoit au travers de son outil et les paramètres qu'il maîtrise dans son activité métier qui ont la capacité d'influencer la donnée reçue. Cette compréhension peut être facilitée au niveau du support utilisé par l'expert métier, par l'ajout :

– d'un *plugin* ayant pour fonction de donner une représentation particulière aux données

reçues d'une autre activité. Par exemple, les données peuvent être représentées graphiquement ;
- de *liens vers des supports complémentaires* : outils, méthodes, guides, rapports de projets antérieurs, forum, sites internet, etc.

En résumé, nous verrons au travers des expérimentations que ces deux niveaux de liens entre les paramètres une fois établis permettent :

1. d'établir une relation de cause à effet entre les paramètres manipulés dans l'activité métier et les conséquences environnementales ;
2. la conservation de la sémantique liée à la donnée véhiculée ;
3. l'implication minimale des connaissances métier non expertes dans l'interprétation des informations venant d'une activité extérieure.

Cette revue théorique des propriétés de la proposition soulève dès à présent la nécessité de connaître comment la mettre en oeuvre.

4.2 Mise en oeuvre de la proposition de thèse

Notre proposition en industrie peut faire l'objet d'un développement de type **Spirale** que nous présenterons dans la première sous-section. Puis, nous présenterons les étapes de la méthode FESTivE que nous proposons pour créer et utiliser les modèles de transformation d'informations entre les outils des activités métier *locales* et *globales*.

4.2.1 Développement en Spirale de la méthode FESTivE

Le développement des modèles permettant de fédérer les outils des activités métier peut se faire en "Spirale". Le développement en Spirale est emprunté au génie logiciel [2]. Il permet de répondre rapidement à la demande de développement logiciel sur des cycles courts de *planification-définition-évaluation-développement* [Boehm(1988)]. Nous proposons le développement en Spirale, car il a l'avantage d'être :

- **Adaptatif plutôt que prédictif**. Utilisée de manière *itératif* et *incrémental* il s'adapte aux contextes changeants ;
- **Orienté vers les personnes** : *individus* et *interaction* au centre, plutôt que processus et outils ; *fonctionnalités opérationnelles* plutôt qu'une documentation exhaustive ; *collaboratif*, avec retours des utilisateurs à chaque itération ;
- **Qualitatif et quantitatif**.

D'autre part, l'amélioration est continue et les coûts sont donc cumulatifs. L'utilisateur (*ie.* l'expert métier) est impliqué dans chaque phase des cycles courts de développement. Cela lui permet à chaque itération d'affiner sa demande d'échange d'informations avec une ou des activités. Dans la méthode FESTivE, les modèles et les cartes de correspondances sont formalisés petit-à-petit. Nous verrons en détail à la section suivante, comment cette formalisation a lieu lors de la présentation de la méthode de création de la bibliothèque de modèles.

Les grandes étapes du développement en Spirale sont les suivantes (*cf.* Fig. 4.5) :

- **Planification** ;
- **Définition des objectifs, alternatives possibles et étude des contraintes** ;
- **Evaluation des alternatives, identification et analyse des risques** avec des phases de prototypage ;
- **Développement** avec les niveaux de simulation et de modélisation associés : passage des concepts aux spécifications des modèles, puis à leur développement, puis leur validation et la vérification. Le développement détaillé des solutions de fédération passe par le codage des cartes de correspondances, par les tests (intégration, validation), puis par l'implémentation dans le système d'information existant.

Présenté selon la Fig. 4.5, le développement en Spiral peut être décrit de manière "déroulée" de la sorte :

La méthode propose **en premier** de planifier l'ensemble du cycle de vie du projet à partir de l'analyse des spécifications des besoins des métiers. Une analyse de risques est ensuite réalisée, amenant à la création d'un premier prototype, puis à la conceptualisation

2. Appelé également méthode de développement "Agile", par Agile Alliance, 2001, les méthodes "SCRUM" de Jeff Sutherland and Schwaber, 1995, "XP" de Ken Beck, 1996, etc.

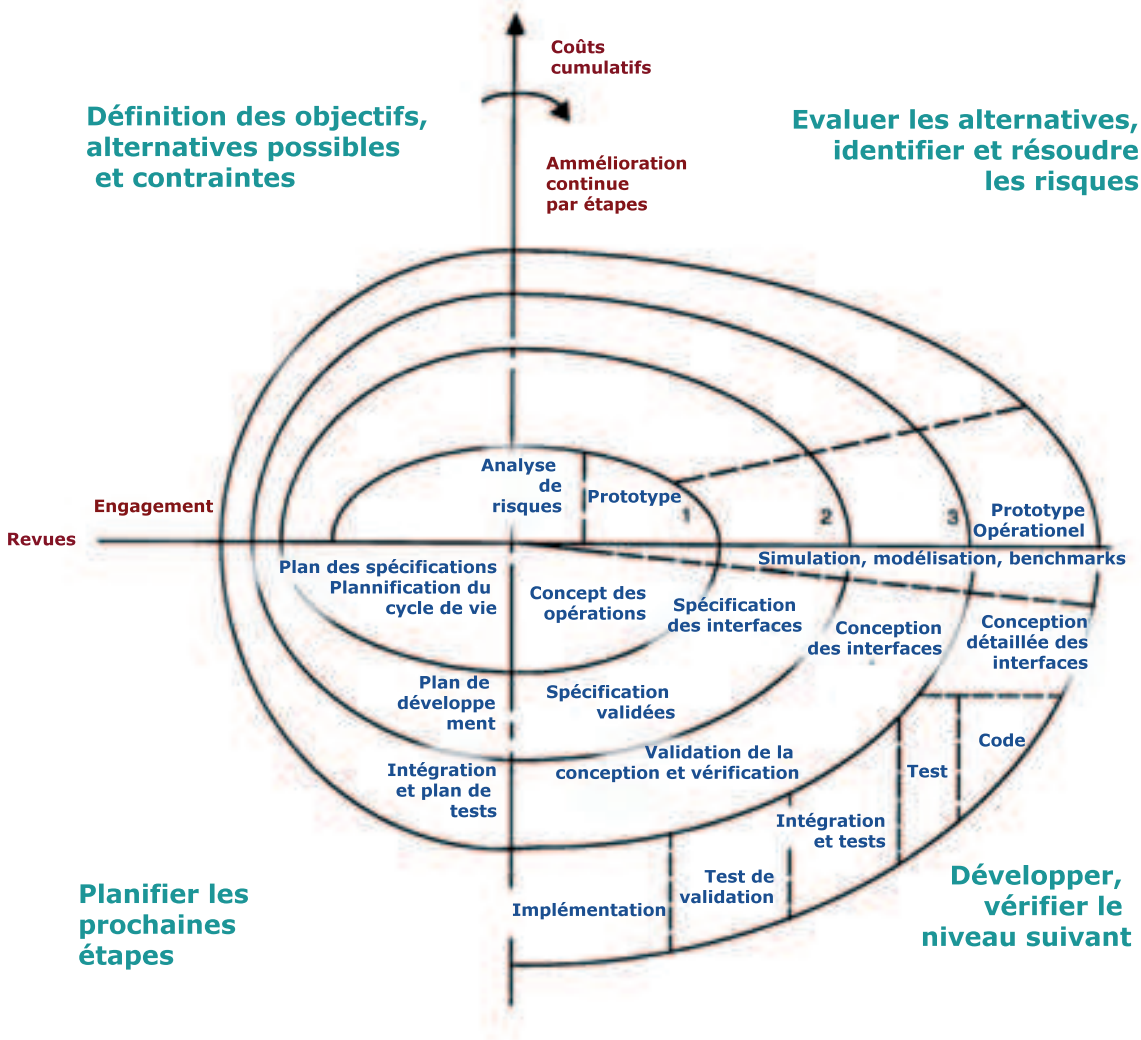


FIGURE 4.5 – Méthode de développement des transformations aux interfaces en Spirale, d'après [Boehm(1988)]

des opérations à déployer. Il s'en suit à la **seconde itération** la définition du plan de développement, suivi par une nouvelles analyse de risque couplée au prototype 2. Les modèles sont ensuite spécifiés, puis validés. La **troisième itération** planifie l'intégration et les séries de tests. S'en suit une nouvelle analyse de risque, suivie par la création du prototype 3, de la conception des interfaces, puis de la validation de la conception et d'une phase de vérification, etc. A la **dernière itération**, le prototype opérationnel est proposé, suivi de la phase de conception détaillée des modèles, du codage, des tests, des tests d'intégration, des tests de validation et de l'implémentation de la solution de fédération dans le système d'information existant.

Le développement en Spirale fourni donc le cadre général, amenant *in fine* à ce que des outils métier puissent être fédérés aux outils d'analyse environnementale selon les besoins des experts. Présentons dès à présent **le coeur de notre proposition qui permet techniquement de passer par les étapes de développement en Spirale** : la méthode FESTivE.

4.2.2 Méthode FESTivE : création de la bibliothèque de modèles associés aux outils de conception et d'analyse environnementale

L'objectif de cette section est de présenter la partie création de la méthode FESTivE. Cette partie correspond aux étapes permettant de créer une bibliothèque de modèles associés aux outils (et donc aux données) disponibles dans l'entreprise. Cette bibliothèque servira de base pour déployer le processus de conception en fédérant, au besoin, les outils métier *locaux* avec les outils d'analyse environnementale *globale*. La section 4.2.3 présentera la partie utilisation de la méthode FESTivE. Les sous-sections suivantes présentent les étapes de création des modèles de la bibliothèque.

Comme spécifié section 3.3.1, l'interopérabilité consiste à permettre à deux systèmes indépendants d'échanger des informations et de pouvoir les utiliser. La comparaison des types d'interopérabilité (intégration, unification et fédération) nous a amenés à identifier des avantages à utiliser la fédération dans le cas de l'intégration [3] de la dimension environnementale en conception (section 3.3.2). Nous avons vu que dans le cas de la fédération, il existe des *cartes de correspondances* qui associent dynamiquement un ou plusieurs modèles sources vers un ou plusieurs modèles cibles. Nous rappelons que l'établissement de ces cartes de correspondances se situe au niveau des méta-modèles.

Nous identifions deux points d'entrée pour l'établissement des cartes de correspondances :

- **par un outil métier** existant ou que l'on souhaite utiliser dans les prochains processus ;
- **par une fonction** pour le calcul d'une donnée ou d'un critère du cahier des charges, issus d'une loi de physique, une loi de comportement d'un matériau, etc.

3. Nous insistons sur le fait que l'*intégration* de l'environnement en conception et les méthodes d'interopérabilité de type *intégration* portent le même nom mais correspondent à deux concepts bien différents.

Que ce soit pour un outil ou une fonction, la démarche de création est la même. Elle consiste à suivre les étapes suivantes :

1. **modéliser les données d'entrée** nécessaires à l'outil ou à la fonction pour que l'outil ou la fonction puisse opérer : sous la forme d'un méta-modèle, noté *(MMcible)* ; puis, **pour chaque donnée d'entrée** nécessaire, identifier la source de cette donnée : *quel outil ou fonction produit cette donnée en sortie ?*
2. **modéliser les données d'entrée source** : sous la forme d'un méta-modèle noté *(MMsource)* ;
3. **définir les cartes de correspondances** nécessaires entre ces méta-modèles *(MMsource)* et *(MMcible)*. Ces cartes de correspondances doivent permettent d'obtenir les données d'entrée utilisées par l'outil ou la fonction à partir des données sources .

Les métiers savent la plupart du temps d'où viennent les données nécessaires à leur outil ou fonction.

La méthode FESTivE peut également s'appliquer rétrospectivement en étudiant des outils déployés dans processus de conception existant (projets antérieurs), afin de capitaliser formellement par les modèles les cartes de correspondances qui ont eu lieu lors des échanges d'informations entre les outils ou les fonctions. Dans le cas rétrospectif, une vision globale du processus de conception, peut permettre d'identifier plus facilement les échanges qui ont eu lieu entre les outils et par conséquent, certaines données disponibles en amont d'une activité. C'est pourquoi nous proposons de **modéliser le processus entier**.

Il existe de nombreux formalismes de modélisation de processus (Organigrammes, Réseaux de Pétri, SADT[4], PCD d'ARIS[5], BPMN[6], UML, etc.). En ce qui nous intéresse, **les diagrammes d'activité en UML** ont l'intérêt de pouvoir :

- représenter plusieurs niveaux de granularité du processus ;
- décrire l'enchaînement des activités ;
- décrire éventuellement les ressources ;
- d'être reliés aux *diagrammes de classe*, décrivant les modèles de données associés au activités en jeu dans le processus et intégrés dans l'environnement Eclipse (EMF).

Nous avons donc choisi d'utiliser UML en fonction de ces critères.

Le diagramme d'activité en UML se construit rétrospectivement ou au fur et à mesure d'un projet. Il est composé d'un noeud d'entrée, d'un noeud de sortie et suit une alternance entre les activités (ou sous-activités) et les données. Les données sont représentées par des rectangles aux bords francs. Les activités ou sous-activités sont représentées par des rectangles aux bords ronds, comme représenté Fig. 4.6.

4. Structured Analysis and Design Technique
5. Process Chain Diagram d'Architektur integrierter Informations Systeme
6. Business Process Modeling Notation

FIGURE 4.6 – Exemple d'un diagramme de processus en UML

Le diagramme d'activité doit faire apparaître trois éléments essentiels :

1. **Les activités métier** "locales" et "globales" nécessitant une vision transversale sur l'ensemble des activités en cours ;
2. **Les liens** entre les activités ;
3. **Le détail des "sous-activités"** dans le cas d'activités impliquant plusieurs outils ou méthodes. De telle sorte que chaque sous-activité soit définie par l'association de la connaissance d'un domaine spécifique et de l'outil ou de la méthode approprié(e) pour réaliser cette tâche.

Ces trois éléments se retrouvent dans le diagramme d'activité volontairement simplifié de la Fig. 4.7. Trois activités sont impliquées dans ce processus, dont l'activité globale d'analyse environnementale (à droite). Les flèches représentent les liens entre les activités. Elles supportent les échanges de données.

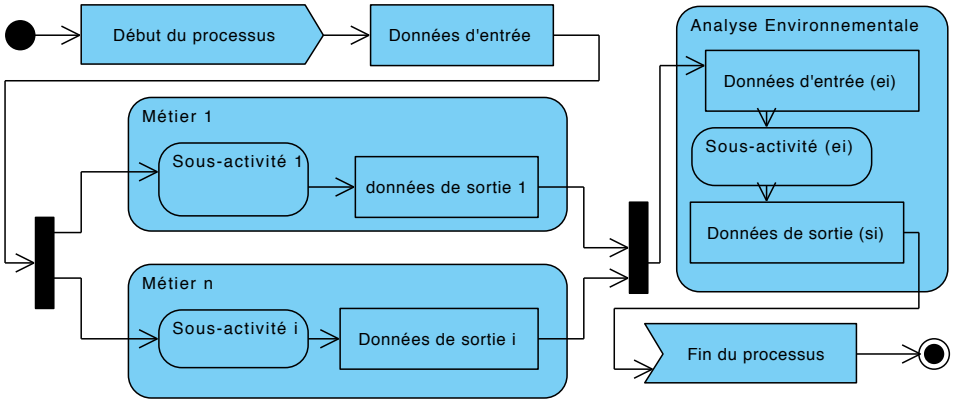


FIGURE 4.7 – Exemple simplifié d'un diagramme d'activité UML comprenant plusieurs activités, dont l'activité d'analyse environnementale

La méthode de création des modèles de la méthode FESTivE consiste à formaliser ces échanges de données entre les activités. Elle se déroule en trois étapes explicitées dans les deux sous-sections suivantes.

4.2.2.1 Etapes 1 et 2 : modélisation de données d'entrée et de données de sortie

Les deux premières étapes consistent à identifier et modéliser les données cibles et sources sous la forme de méta-modèles : nommés *(MMsource)* et *(MMcible)* respectivement. Nous choisissons le méta-langage UML pour créer ces méta-modèles sous la forme de

diagrammes de classe. Les diagrammes de classe UML ont l'avantage de pouvoir être liés directement aux diagrammes d'activité et sont exportables en format ".ecore" dans l'environnement Eclipse (EMF), nécessaire à la troisième étape[7]. Une autre solution consiste à utiliser n'importe quel modeleur utilisant UML[8] et d'exporter en format ".XMI" dans EMF.

La Fig. 4.8 présente un exemple de diagramme de classe en UML.

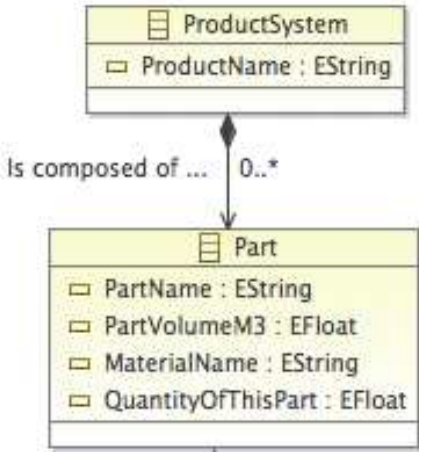


FIGURE 4.8 – Exemple simplifié d'un diagramme de classe en UML associé à l'activité de Conception Assistée par Ordinateur (CAO)

Les classes ou éléments (rectangles) sont liés par des liens d'association ou d'héritage (flèche ou extrémité avec un losange). Chaque classe comporte un certain nombre d'attributs (listés dans la classe) typés (chaine de caractère, chiffre, nombre entier, etc.). Les liens entre les classes sont spécifiés par une description en toutes lettres et le nombre de classes héritées ou liées est spécifié par : "0..*" (de zéro à l'infini). Dans l'exemple de la Fig. 4.8, le produit ou *Product*, défini par un nom (chaîne de caractères), est composé de 0 à l'infini de *pièces* ou *Part*, comportant chacune un *nom*, un *volume* en mètre cube (chiffre flottant), un *nom de matériaux* et une *quantité unitaire*. Cette classe simplifiée décrit les données de sortie de l'activité de CAO lors de la modélisation simple d'une pièce composée de plusieurs composants. L'application de la méthode nécessite de modéliser également les données d'entrée de l'activité de CAO et de toutes les autres activités impliquées.

Cette étape a donc pour intérêt de formaliser les données disponibles et nécessaires à un outil ou une fonction, sous la forme de *(MMsource)* et *(MMcible)*.

4.2.2.2 Etape 3 : définir les cartes de correspondances

La troisième étape de la méthode utilise les *(MMsource)* et *(MMcible)* créés à l'étape 1 et 2 pour définir les cartes de correspondances entre ces méta-modèles.

7. L'EMF comprend un module permettant de modéliser les diagrammes de classe graphiquement en format ".ecorediag" ou textuellement en format ".ecore".

8. Visual Paradigm par exemple, site commercial : http ://www.visual-paradigm.com/product/-vpuml/, Août 2012

Dans la section 3.3.1.4, nous avons présenté l'environnement Eclipse permettant de construire les cartes de correspondances entre les méta-modèles d'entrée et de sortie des outils métier. Les cartes de correspondances s'associent entre elles au cours du processus de conception, par leur caractère modulaire (propriété issue de l'Ingénierie Dirigée par les Modèles). L'utilisation des cartes de correspondances peut se faire au besoin au cours du processus de conception, d'une manière dynamique.

Les cartes de correspondances sont codées en utilisant un langage de programmation au choix. Nous avons illustré cette étape par l'utilisation du langage de transformation (ATL) dans la section 3.3.1.4. Les métiers collaborent avec l'informaticien pour interpréter les cartes de correspondances et générer le code. L'informaticien aidé des experts relatifs aux modèles source et cible peuvent redéfinir les transformations au besoin : compléter les transformations lors d'une mise à jour des bases de données du logiciel, ajouter ou supprimer des données dans les modèles source et cible, modifier des règles de transformation, etc. Le code généré peut être hétérogène, c'est-à-dire utiliser des langages de programmation différents.

L'entreprise capitalise par ces transformations, une banque de connaissances aux interfaces métier. Ceci donne l'avantage à l'entreprise de pouvoir s'adapter plus facilement :

- à **l'évolution des connaissances** dans les métiers, voire au départ d'un concepteur ;
- au **changement de logiciels.** C'est-à-dire sans avoir à redéfinir l'ensemble des transformations. Par exemple si deux logiciels de CAO du marché génèrent le même format d'export (STEP) et manipulent et fournissent quasiment les mêmes données. Alors les modèles et de données sont presque équivalents. Donc les échanges pourront être assurés par une partie ou la totalité des anciens méta-modèles et des règles de transformation. Si certaines fonctionnalités sont présentes dans le nouveau logiciel, il suffit de modifier ou d'ajouter une partie des méta-modèles et d'implémenter les cartes de correspondances. Le changement de logiciels aux fonctionnalités quasi-équivalentes, n'engendre donc que très peu de modifications.

Catégories de cartes de correspondances

Comme présenté en section 3.3.1.4, chaque transformation nécessite de définir une règle de transformation entre les *(MMsource)* et *(MMcible)*. La *carte de correspondances* apporte une réponse sémantique à la question : "quels mécanismes permettent de transformer les informations contenues dans le (ou les) les *(MMsource)* en informations contenues dans le (ou les) *(MMcible)*" ? Ces mécanismes sont ce que nous appelons la *connaissance* associée aux transformations. Elle se traduit dans les faits par ce que nous nommons *transformations d'informations*.

Dans nos travaux de recherche nous avons identifié plusieurs types de cartes de correspondances qui reviennent d'une manière récurrente : les *allocations*, les transformations de type *base de données* et les *opérations*. Elles sont présentées dans le tableau 4.1 et illustrées par les figures 4.9, 4.10 et 4.11.

TABLE 4.1 – Caractérisation des *transformations de connaissances* fondées sur des cartes de correspondances différentes.
Note : Base de donnée est noté *BDD*.

	Type	**Description**	**Modèle Source**	**Modèle Cible**	**MOF**
A	Allocation	Déverse le contenu d'un modèle source dans un modèle cible équivalent	Valeur source	Même valeur	fig.4.9
B	équivalence entre BDD	-Transforme le contenu d'un modèle source par un autre contenu -Alloue (agrégation/distribution) ce contenu dans le modèle cible	Dénomination de la BDD A	Dénomination de la BDD B différente	fig.4.10
C	Opération	-Extrait plusieurs données de un ou plusieurs modèles sources ; -Réalise l'opération ; - Déverse le résultat de l'opération dans modèle cible.	Plusieurs contenus de modèles sources	Résultat de l'opération dans le modèle cible	fig.4.11
D	Combinaison	Combinaison de A, B, C	Plusieurs valeurs	Résultats	

La transformation fondée sur une carte de correspondances de type Allocation : transfert le contenu d'un attribut (de type : float, string, etc.) du modèle source vers un attribut équivalent contenu dans le modèle cible (Fig. 4.9).

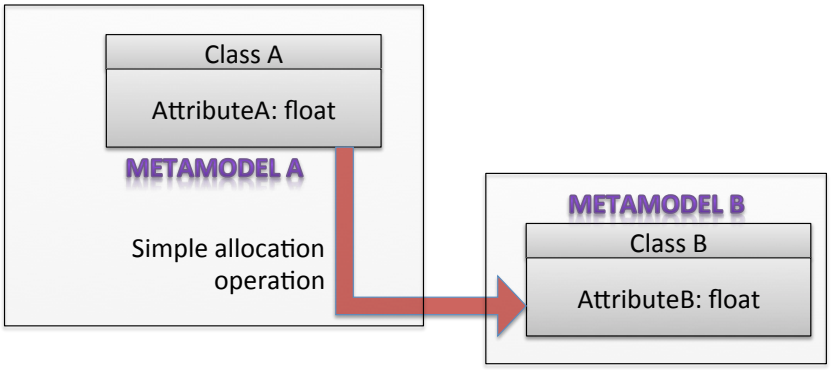


FIGURE 4.9 – Illustration d'une carte de correspondances de type Allocation (MOF et langage ATL)

La transformation fondée sur une carte de correspondances de type équivalences de Bases de données : (Fig. 4.10) fait correspondre la dénomination de l'attribut du modèle source associé à une base de données *source*, à la dénomination de l'attribut du modèle cible associé à une base de données différente. En d'autres termes, cette correspondance permet de lier des termes équivalents, exprimés différemment dans leur base de données relatives.

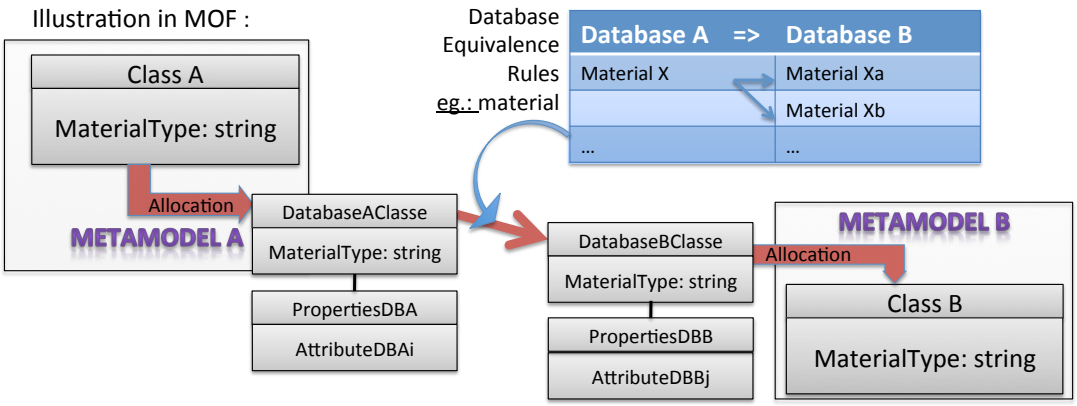


FIGURE 4.10 – Illustration d'une transformation basée sur une carte de correspondance de type *base de donnée* (MOF, langage ATL)

Exemple : de nombreux *outils environnementaux* sont fondées sur l'agrégation de flux d'énergie et de matières primaires (ACV, Mass Flow Analysis, etc.), et sur une étude d'impacts potentiels. Ces méthodes utilisent des bases de données spécifiques [9], qui expriment

9. Ces bases de données sont issues des résultats de recherche de laboratoires spécialisés, venant de différents pays. Par exemple, les bases de données *Ecoinvent* utilisées par le logiciel d'ACV SimaPro (site

un flux de matière (ex. : 1kg d'acier) ou d'énergie en une compilation de valeurs des flux primaires nécessaires à l'obtention de cette quantité de matière ou d'énergie (prenant en compte l'extraction, les transformations, le transport, etc.). En parallèle, des outils métier de *choix de matériaux* (de type CES Selector pour les universitaires, ou GRANTA MI pour les industriels [10]) sont aussi fondés sur les bases de données matériaux. A la différence des outils d'analyse environnementale, un matériau (ex. : l'acier) aura pour attributs des propriétés physico-chimiques, mécaniques (densité, le module d'Young, etc.). D'autre part, les bases de données de ces deux outils métier (ACV, choix des matériaux) utilisent des dénominations différentes, à un niveau de granularité différent ("acier" est un terme général qui désigne l'ensemble des familles d'aciers différents). Dès lors, *la transformation de type équivalences de bases de données* fera correspondre les termes équivalents des deux bases de données relatives à ces outils, au niveau de précision voulue. De sorte que, lorsque l'expert matériaux sélectionne le matériau adéquat, l'expert environnement reçoit d'une manière dynamique dans l'ICV (Inventaire du Cycle de Vie, relative au produit étudié) le type de matériau sélectionné, exprimé dans la base de données de son outil métier.
La carte de correspondances est définie une fois par l'expert relatif à la base de données en question (ex. : expert matériaux pour des bases de données matériaux) en collaboration avec l'informaticien. Puis, à chaque évolution d'une des deux bases de données, les cartes de correspondances doivent être **mise à jour** [11].
Difficultés associées : il est très rare d'avoir un nombre identique d'éléments équivalents dans chacune des deux bases de données utilisant des termes différents. Soit la transformation doit gérer des allocations de type "un vers plusieurs" ou de "plusieurs vers un". Ce qui peut créer des conflits de sémantique, ou de connaissances associés aux termes : réduction de précision d'un terme, incohérences, etc. Il est cependant nécessaire de conserver la souplesse de la transformation, ce qui exclu le codage *en dur* d'équivalences de terme d'une manière arbitraire. Nous pourrons plutôt nous orienter vers des choix multiples pour résoudre ce terme de conflits. Par exemple, l'expert métier aura une boîte de dialogue à sa disposition, lui indiquant qu'un terme doit être spécifié parmi plusieurs termes possibles. Ou dans le cas de "plusieurs vers un", une boîte de dialogue précisera que le seul terme équivalent disponible dans sa base de données est un terme général recouvrant plusieurs autres termes (d'une précision plus fine éventuellement) dans une autre base de données (venant d'un autre outil métier). Toute la difficulté consistera dans ces cas à évaluer le cumul des pertes ou gains de précisions des données, par rapport au résultat final de l'analyse.

commercial du même nom : http ://www.ecoinvent.org/, Août 2012), d'autres bases de données sont aussi disponibles dans SimaPro (US LCI, ELCD, US Input Output, EU and Danish Input Output, Dutch Input Output, LCA Food, Industry data v.2.), site commercial de SimaPro : Préconsultant (http ://www.pre-sustainability.com/content/databases, Août 2012). Ces bases de données couvrent l'ensemble du cycle de vie des composants d'un produit ou du produit lui-même (matériaux, procédés de mise en forme, de transport, packaging, usage, incinération, recyclage, enfouissement technique, etc.).

10. Cite commercial de Granta Material Intelligence, basé sur les bases de données matériaux "Ashby" : http ://www.grantadesign.com/products/index.htm, Août 2012.

11. La mise à jour consiste simplement à rééditer des listes de termes équivalents.

La transformation fondée sur une carte de correspondances de type Opérations : (Fig. 4.11) calcule la valeur du contenu d'un modèle cible à partir d'une opération faisant intervenir des données contenues dans un ou plusieurs modèles sources. L'opération peut être fondée sur des opérateurs (multiplication, fonctions simples, etc.) ou des fonctions plus complexes.

Difficultés associées : l'opération ne peut avoir lieu que lorsque l'ensemble des attributs sources sont disponibles. Si un des attributs n'est pas renseigné, l'opération sera bloquée. Ce sera aussi le cas, lorsque les unités ou certains identifiants, ne correspondent pas [12]. Dans ces cas, une boîte de dialogue peut renseigner l'expert métier sur les opérations en cours, qui sont en attente d'être débloquées. Si le problème peut être résolu en modifiant les valeurs des attributs (identifiant, unité, valeur, etc.), l'expert métier peut le faire en modifiant ces données dans l'interface de son outil métier. Si c'est un problème relatif à la modélisation ou aux cartes de correspondances (ex. : incomplétude, etc.), l'expert métier doit communiquer avec l'informaticien pour améliorer progressivement la définition de la transformation [13].

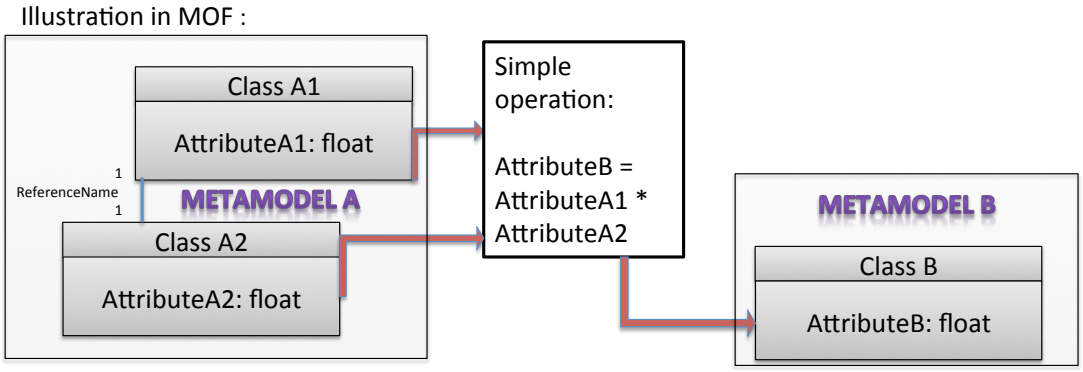


FIGURE 4.11 – Illustration d'une transformation basée sur une carte de correspondances de type *opération* (MOF, langage ATL)

Ces types de cartes de correspondances illustrent les possibilités offertes par l'IDM pour définir des *transformations de connaissances* entre modèles. Libre à l'entreprise ou aux communautés d'ingénierie (dont d'éco-conception) de **définir et partager leurs cartes de correspondances, dans un esprit communautaire.**

La méthode de création des modèles de la méthode FESTivE que nous venons de présenter a pour vocation d'être appliquée au domaine industriel en suivant un développement de type Spirale. Pour ce faire, le support de mise en oeuvre présenté dans la section suivante permet de réunir l'ensemble des informations nécessaires à la création de la bibliothèque de modèles associés aux outils existants et à venir dans une entreprise donnée.

12. Par exemple, le concepteur peut mettre une condition selon laquelle chaque donnée identifiée comportant une valeur numérique, doit s'accompagner d'une unité explicitée. Et que l'opération ne peut avoir lieu que si les unités coïncident.
13. Caractère incrémental de la méthode de type Spirale.

4.2.3 Méthode FESTivE : utilisation des modèles pour le déploiement du processus de conception

La précédente section a décrit la partie de la méthode FESTivE permettant de créer la bibliothèque de modèles de données et de transformations entre modèles, associés à des outils et des fonctions. A partir de cette bibliothèque, les modèles sont utilisés pour déployer le processus de conception. La **partie utilisation de la méthode FESTivE proposée** est présentée dans cette section. Elle se déroule en plusieurs petites étapes, de manière à déployer le processus de conception tout en facilitant les échanges d'informations entre les métiers *locaux* et l'analyse environnementale. Cette dernière nécessite en effet une vision transversale, *globale* afin de gérer les impacts collatéraux des choix pris séparément par métiers *locaux* et de leur apporter une réponse adaptée.

4.2.3.1 Etapes de la partie utilisation de la méthode FESTivE

L'expert environnement applique la partie pratique de la méthode FESTivE à travers les étapes suivantes :

1. **Sélection des outils** dans la bibliothèque de modèles pour répondre au cahier des charges (fonction également de la tactique définie par le chef de projet, et des ressources qu'il alloue) ;
2. **Identification des activités du processus de conception prévisionnel** qui fourniront les modèles sources et les modèles de transformations associés aux outils choisis ;
3. **Déploiement du processus de conception** en associant au fur et à mesure les outils d'analyse environnementale et les outils d'ingénierie locaux.

4.2.3.2 Flexibilité des choix d'outils

Au cours du processus de conception, l'expert environnement peut à tout moment décider d'utiliser un outil de la bibliothèque correspondant à une analyse environnementale par exemple. Les échanges d'informations entre modèles, suivant les transformations établies contenues dans la bibliothèque, se font alors automatiquement à l'aide de projections dans l'espace des modèles [Iraqi et al.(2012)]. Ainsi, en sélectionnant un nouvel outil dans la bibliothèque, l'expert environnement "extrait" d'une manière automatique les données disponibles nécessaires en entrée de son outil d'analyse environnementale. Si ces données sont trop incomplètes pour pouvoir utiliser l'outil, l'expert réitére son choix d'outil, jusqu'à ce qu'il y ait adéquation entre les données disponibles et les données nécessaires pour réaliser l'analyse environnementale sélectionnée.

En résumé, grâce à la bibliothèque de modèles prédéfinis assurant la rapidité des échanges d'informations entre modèles, l'expert environnement s'adapte rapidement au contexte du processus de conception qui se déploie (évolution des activités en jeu et des données disponibles, modification du cahier des charges, répondre à la demande spécifique d'un métier, etc.).

4.2.4 Support de mise en oeuvre de la proposition

La mise en place d'enquêtes est nécessaire dans un premier temps, afin de construire les maquettes et les prototypes (*cf.* développement en Spirale, section 4.2.1). L'enquête a pour objectif de récolter les données nécessaires à la modélisation des activités et des données. Elle initie le développement de la méthode FESTivE par les concepteurs. Le support d'enquête utilisé au chapitre 5.1 est donné en annexe A.5.

Si l'enquête est orchestrée par une **personne extérieure**, elle s'effectue en deux temps : (1) **l'observation du travail** des agents et (2) l'**interview** des métiers et des managers. C'est en effet une condition nécessaire pour bien s'immerger dans le travail des utilisateurs et percevoir leurs problématiques. C'est ce qui a été réalisé dans le cadre de nos travaux (*cf.* chapitre 5.1) avec plusieurs entreprises (Parkeon et Quiksilver).

Les résultats de l'enquête sont présentés à l'ensemble des participants, en prenant l'aspect d'une **maquette**[14]. La maquette permet de confronter les résultats de l'enquête aux métiers intervenants (qui incluent les utilisateurs), et recevoir leurs retours. Dans notre cas, les maquettes sont élaborées conformément à la légende explicitée sur la Fig. 4.12. Les *ronds* représentent les métiers, les *rectangles aux bords ronds* décrivent la (sous-)activité réalisée, et les *rectangles* représentent des réservoirs de données. Le logiciel en ligne Prezi[15] qui a été utilisé pour réaliser cette maquette, anime d'une manière dynamique les échanges de données entre les métiers modélisés.

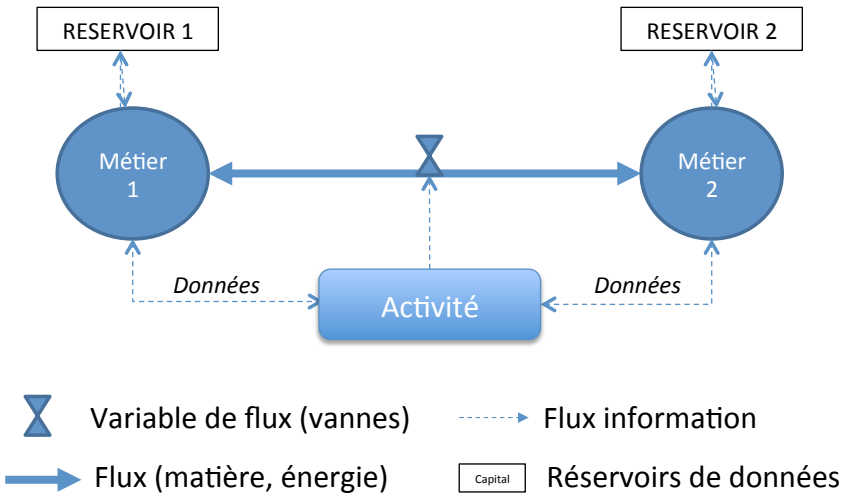


FIGURE 4.12 – Légendes utilisées dans le type de maquettes présenté Fig. 4.14

14. Une maquette permettra de tester l'aspect visuel, ergonomique de la proposition. Par exemple, en mettant en situation les métiers, face à des outils interopérants virtuellement.

15. Logiciel Prezi est un outil collaboratif en ligne (plusieurs personnes peuvent travailler sur le même document en même temps), permettant de faire des présentations dynamiques. L'élaboration de la maquette peut se faire à des échelles différentes, ce qui nous permet de représenter la systémique des échanges entre les activités en jeu lors d'un processus de conception : au niveau des activités, puis au niveau des données échangées dans l'activité même. Le site commercial de Prezi est à l'adresse : http ://prezi.com/, Août 2012.

La Fig. 4.13 illustre l'aspect que peut avoir une maquette. Chaque "bulle" représente un métier interviewé. Le logiciel Prezi utilisé permet de *zoomer* sur les bulles et de décrire à un niveau granulaire plus fin l'activité. Les échanges de données entre sous-activités impliquées dans l'activité sont alors visibles. La Fig. 4.14 présente le détail d'un métier contenu dans une des bulles.

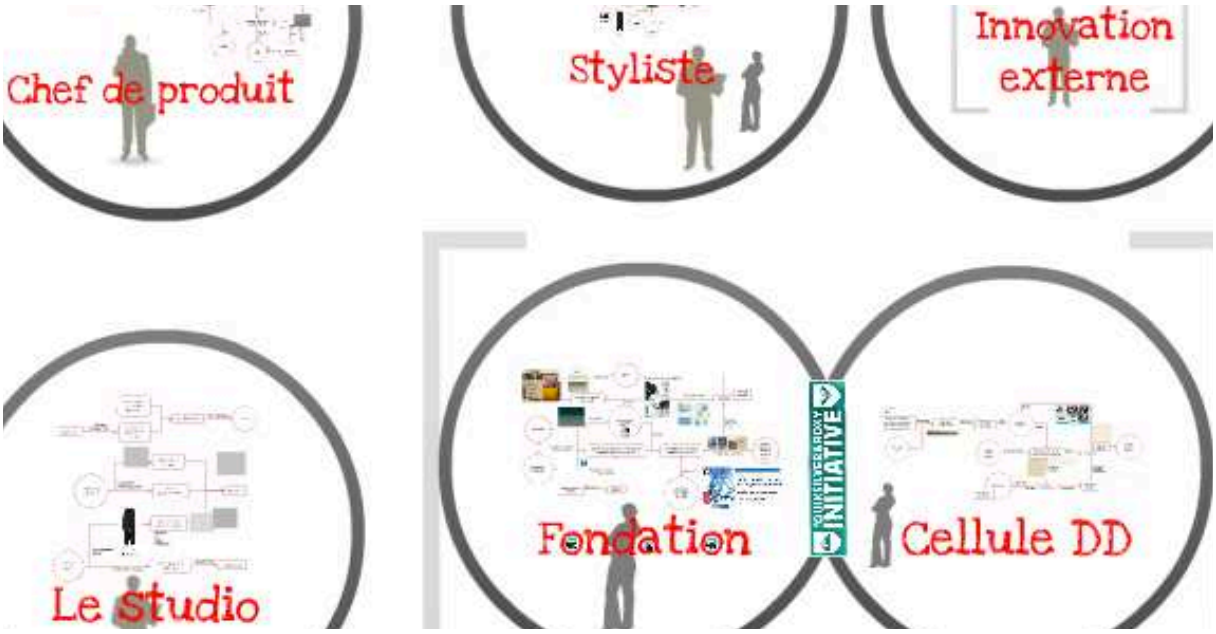


FIGURE 4.13 – Exemple de résultats d'enquête sous forme d'une maquette Questionnaire appliqué à la société Quiksilver (représentation par Prezi, http ://prezi.com/), dans le cadre du projet de l'ANR *Convergence*, décembre 2012.

Le développeur, en collaboration avec les métiers créera ensuite les premiers **prototypes** [16]. Chaque étape de développement de la méthode FESTivE en industrie peut faire l'objet d'un prototype : prototype du diagramme d'activités, prototype des méta-modèles sources et cibles (étape 1 et 2) et prototype des cartes de correspondances (étape 3). La Fig. A.4 présentée en annexe A.4, illustre l'ébauche d'un modèle d'activité réalisé *a posteriori*, à partir des données récoltées par les enquêtes.

Chaque nouveau modèle associé à un outil (ou une fonction particulière) vient alimenter la bibliothèque. La section suivante présente la partie "utilisation" de la méthode FESTivE, à savoir le déploiement du processus de conception au cours duquel les échanges d'informations entre les métiers *locaux* et l'analyse environnementale *globale* sont supportés par la fédération.

16. Un prototype est dénué d'aspect visuel et teste l'aspect technique de la proposition issue de l'application de la méthode FESTivE. C'est une version incomplète des propositions de cartes de correspondances qui sera ensuite codée par l'informaticien (sous la forme de règles de transformation et de Helper, illustrés en annexe A.7 et présentés dans le chapitre 5.3.2). Ce prototype permet de tester si techniquement les transformations de modèles sont effectives.

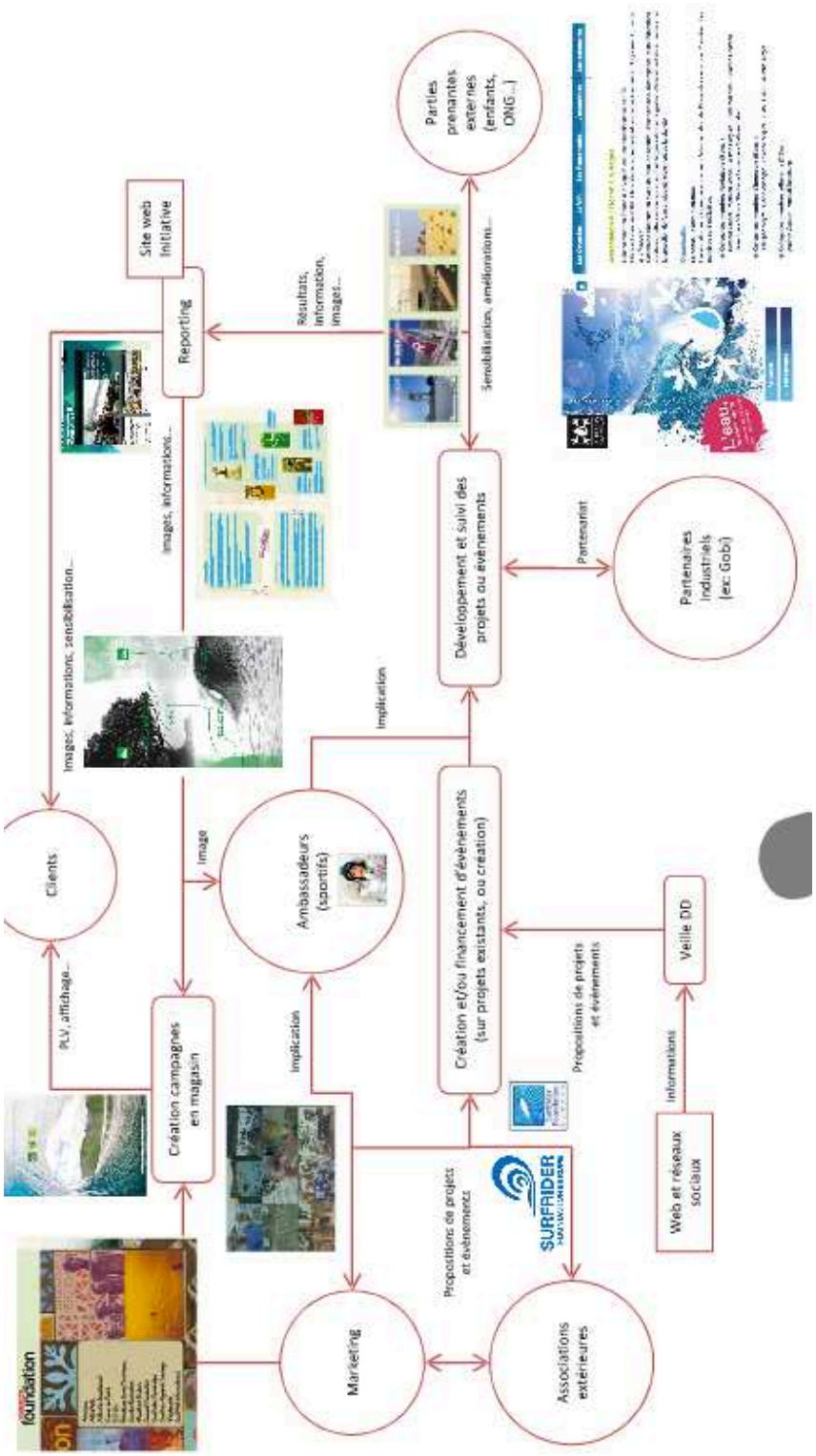


FIGURE 4.14 – Schéma du processus général de réalisation des projets au sein de la Quiksilver Initiative

Support : questionnaire 4.2.4, appliqué à la société Quiksilver (représentation par Prezi, http ://prezi.com/), dans le cadre du projet de l'ANR *Convergence*, décembre 2012

Synthèse de la partie Proposition

Dans ce chapitre, la proposition de recherche a été définie **par trois propriétés fondamentales, permettant d'apporter une réponse à la problématique initiales** : *"comment permettre aux concepteurs de collaborer efficacement avec le métier d'expert environnement, quelque soit le contexte du projet d'(éco-)conception ?"*.

Nous avons ensuite proposé une méthode pour développer la proposition en industrie, reposant sur le mode développement de type Spirale : la méthode **FESTivE** pour *Federate EcodeSign Tools modEls*. La méthode FESTivE comprend **une partie** *création* **de la bibliothèque de modèles et une partie** *utilisation* **de déploiement de la proposition au coeur du processus de conception.**

Il s'agit dès à présent, **d'expérimenter et de valider la proposition** dans son ensemble, c'est-à-dire, au niveau de la méthode FESTivE de mise en oeuvre, des propriétés conférées et de ses perspectives dans une démarche globale d'intégration de l'environnement en entreprise. Pour cela, le chapitre suivant présente deux cas d'études en industrie.

Chapitre 5

Expérimentations et validations

Introduction

Cette partie présente les cas d'études réalisés en vue **d'expérimenter et valider la proposition** présentée au chapitre précédent.

La structure de ce chapitre est illustrée sur la Fig. 5.1. Deux cas d'études sont présentées dans ce chapitre. Ils constituent le démonstrateur de nos travaux de recherche.

FIGURE 5.1 – Plan du chapitre 4 : expérimentations et validations

La première section présente un cas d'étude réalisé dans l'entreprise *Parkeon*, sur le projet de conception d'un nouveau terminal de stationnement : *appelé projet NTR* (New Terminal Range). Les expérimentations menées au cours de ce cas d'étude ont pour objectif de démontrer que notre proposition est adaptée au milieu industriel et confère les trois propriétés P1, P2 et P3, pour la mise en oeuvre efficace de l'éco-conception :

– P1 : Pouvoir s'adapter à la variabilité contextuelle que nécessite l'éco-conception
– P2 : Pouvoir détecter et échanger des données disponibles nécessaires à l'activité environnementale et y répondre d'une manière adaptée
– P3 : Lier les paramètres environnementaux aux paramètres des métiers *locaux* au cours du processus de conception.

La seconde section présente le second cas d'étude réalisé avec l'entreprise Quiksilver. Les expérimentations ont été menées dans le cadre du projet ANR *Convergence*[1] mené avec l'entreprise *Quiksilver, l'Institut Français du Textile et de l'Habillement (IFTH)* et plusieurs partenaires académiques : *UTT (ICD-CREIDD), Arts et Métiers ParisTech (LSIS, Aix en Provence), Grenoble INP (G-SCOP) et IAE Lyon*. Ce cas d'étude a pour objectifs d'expérimenter et de valider l'utilisation de la proposition dans un autre contexte industriel, ainsi que d'en expérimenter le déploiement dans un cadre plus global d'intégration de la dimension environnementale en entreprise.

Hypothèses d'expérimentations et de validations

Expérimentation n°1 fondée sur un cas d'étude industriel (entreprise Parkeon, domaine de la mécatronique)

Objectifs : (O1) expérimenter la méthode FESTivE : création de la bibliothèque de modèles et utilisation de ces modèles au cours du processus de conception ; (O2) valider la praticité de la méthode FESTivE en industrie, (O3) valider les propriétés fondamentales de la proposition, suite à l'application de la méthode FESTivE (P1, P2 et P3).

Moyens mis en oeuvre : réalisation de maquettes et de prototypes, enquêtes et retours d'expériences (centrés sur les utilisateurs).

Expérimentation n°2 dans la cadre du projet ANR *Convergence*, cas d'étude industriel (Entreprise Quiksilver, domaine du textile)

Objectifs : (O4) expérimenter et valider l'applicabilité de la proposition (comprenant la méthode FESTivE) dans un autre contexte industriel et (O5) dans une démarche environnementale globale d'entreprise. La démarche est caractérisée de *globale* en ce sens qu'elle donne de la cohérence aux différents niveaux de l'opérationnel : stratégique, tactique et métier.

Moyens mis en oeuvre : enquête et interviews réalisées sur une trentaine de métiers différents dans toute l'entreprise, validation des résultats d'enquête et du co-développement du chaînage d'indicateurs au travers des membres du consortium du projet ANR *Convergence*.

Notre proposition sera validée selon les hypothèses suivantes :

– Une approche de validation de la théorie par rapport aux retours d'expériences. Nous nous positionnons dans cette recherche sur la définition de la "recherche empirique" au sens de [Flynn et al.(1990)]. Les données utilisées dans ses recherches sont

1. Ce projet de l'ANR propose un outil de pilotage global aidant les entreprises à mettre en place une démarche de développement durable.

issues des observations pratiques sur des cas d'étude industriels. La recherche empirique se distingue principalement des recherches conduites en laboratoire qui sont exclusivement fondées sur des modélisations mathématiques.
- Une approche par *bottom-up* : un cas d'étude pour généraliser les résultats.

Les résultats de ces travaux de recherches en conception sont mesurés sur deux échelles temporelles. A court terme, certains effets des travaux de recherches sont validés par les développements informatiques, les interviews. Les effets de ces travaux sur la conception ne peuvent en revanche se mesurer que sur des échelles temporelles de plusieurs années. Ces deux échelles de validation de nos travaux sont propres à la recherche en conception [Blessing et Chakrabarti(2009)]. Nous définirons un cadre de validation à long terme en conclusion (chapitre suivant), pour permettre à la communauté scientifique de mesurer une partie de la contribution de ces recherches sur les pratiques de conception.

Conscient de l'importance de l'application industrielle de notre proposition, nous avons mis en place ces expérimentations en industrie à travers les cas d'étude présentés dans ce chapitre. Comme le montre [Barth et al.(2011)] "*in order to improve design in practice, it is logical that the effectiveness of a scientific proposal in the field of engineering design should be demonstrated in an industrial setting*".

Même si la multidisciplinarité des domaines couverts par la recherche en conception rend difficile la classification des méthodes de validation [Barth et al.(2011)], nous proposons une validation de manière quantitative et qualitative. La réalisation du prototype constitue une validation de type "expérimentale" d'après [Barth et al.(2011)]. En effet, les résultats de l'application de la méthode (les codes générés) sont des données factuelles et quantitatives permettant de juger l'implémentation réalisée. Ensuite, nous proposons une validation de certains aspects de notre proposition de manière qualitative mais fondée sur des terrains expérimentaux : à l'aide de questionnaires, de discussions avec les personnes interviewées en entreprise, en comparant la situation initiale et l'application de la méthode.

5.1 Expérimentation n°1 : mise en place d'un Système d'Information pour augmenter la capacité d'éco-conception

5.1.1 Objectif

Ce démonstrateur est entièrement fondé sur un cas d'étude industriel dans l'entreprise Parkeon. Rappelons que ses objectifs (O1, O2 et O3), *cf.* Tableau 5.1 :

- (O1) expérimenter la méthode FESTivE : création de la bibliothèque de modèles et utilisation des modèles dans le processus de conception
- (O2) valider la praticité de la méthode FESTivE en industrie
- (O3) vérifier si la proposition dans son ensemble, c'est-à-dire le fait de fédérer des outils d'analyse environnementale avec des outils de conception, vérifie bien les trois propriétés fondamentales P1, P2 et P3 (*cf.* Tableau 5.1), qui seront alors validées totalement ou partiellement.

TABLE 5.1 – Objectifs du démonstrateur fondés sur le cas d'étude de *Parkeon*

Objectif	**Sous-objectifs**
Expérimenter et valider la méthode FESTivE de création de la bibliothèque de modèles et d'utilisation de la bibliothèque de modèles en industrie	- application des étapes de la méthode FESTivE - critique des informaticiens - illustration de la proposition aux métiers de Parkeon : concevoir et tester les maquettes auprès des concepteurs et informaticiens - *Feedbacks* venant des industriels pendant la durée des expérimentations
Valider les propriétés fondamentales de la proposition	Mise en situation pour tester si la proposition permet : - de s'adapter à la variabilité contextuelle que nécessite les projets d'éco-conception chez Parkeon - de faciliter les échanges des données entre l'analyse environnementale globale et les concepteurs locaux - de lier les paramètres environnementaux aux paramètres des concepteurs

5.1.2 Cadre industriel et protocole d'expérimentation

5.1.2.1 Présentation de l'entreprise et du cas d'étude

Parkeon : "acteur clé de la mobilité urbaine"

Née sous le nom de Parkeon en 2003, mais d'une existence de plus de 30 ans dans le groupe *Schlumberger*, Parkeon se définit comme un *acteur clé de la mobilité urbaine*,

en proposant des solutions de gestion du stationnement, de recharge pour véhicules électriques, et des solutions billettistes pour les transports publics. Son chiffre d'affaire était de 168 millions d'euros en 2010 et l'entreprise a plus de 1100 collaborateurs dans le monde : en Europe, Australie et Etats-Unis. Son siège social se situe à Paris. Besançon, le site où ont été réalisées les enquêtes, demeure son principal site de développement et d'intégration.

Très connu de nous tous, le secteur de la voirie compte 160 000 horodateurs en fonction dans le monde. L'entreprise propose également dans son offre commerciale les services d'hébergement et d'exploitation des serveurs, avec notamment la supervision et le paramétrage des équipements à distance, traitement des données en service, gestion des données clients et l'émission de rapports statistiques. Parkeon sous-traite la fabrication des sous-ensembles électroniques et mécaniques et également les phases d'installation et maintenance. Ces opérations peuvent être effectuées par les clients (villes, ou opérateurs transport). La partie *Recherche et Développement* des produits et services est réalisée sur le site de Besançon.

Cette entreprise a été choisie comme cas d'étude du fait de sa démarche d'éco-conception initiée en 2005 que nous allons aborder dans les détails au travers du projet NTR : New Terminal Range.

Cas d'étude, le projet NTR : New Terminal Range

Le projet NTR, pour *New Terminal Range*, fut le premier projet pilote d'éco-conception de Parkeon. La composante environnementale fut prise en compte dans les choix de conception au même titre que les autres contraintes, et ce, dès les phases amont. Ce projet pilote avait pour objectif de concevoir un nouveau *Terminal* (nom générique d'une machine de gestion du stationnement) éco-conçu. Les Fig. 5.2 et 5.3 illustrent le terminal commercialisé actuellement, qui est le résultat de ce projet pilote d'éco-conception. Le cas d'étude choisi pour ce démonstrateur est l'étape de *design et specification* du projet NTR.

FIGURE 5.2 – Citypal, objet d'étude
Illustration extraite du web : http ://www.parkeon.com/fr/horodateur-citypal.html, mise à jour juin 2012, ©Parkeon 2012

La stratégie d'éco-conception sur ces gammes de terminaux était initialement positionnée sur la phase d'utilisation (optimisation de l'énergie utilisée couplée à la production d'énergie par des panneaux photovoltaïques), puis s'est étendue sur les autres phases, notamment la fin de vie (visant au delà des taux obligatoires de recyclages des composants électroniques fixés par la directives DEEE). Les critères environnementaux et les objectifs sous-jacents définis lors du projet NTR sont explicités plus précisément dans le tableau 5.5. Ce projet est pilote dans l'application stratégique du critère environnemental dans les projets futurs.

Le projet NTR s'est déroulé suivant les phases de *Design et spécification (Définition, pré-étude), Développement (conception), Qualification, Industrialisation et Optimisation.* Seule la première phase est concernée par ce cas d'étude :

– **Design et Spécification** : les concepts de machine sont générés par des designers externes (cabinet Axena *cf.* Fig. 5.3). En parallèle les concepteurs et le designer internes à Parkeon réalisent plusieurs pré-études pour converger vers une solution unique de design répondant aux différents besoins et objectifs du projet. Cette étape donne lieu à plusieurs itérations entre les designers et les concepteurs de Parkeon. Un des critères rentrant en ligne de compte étant le volet environnemental, sur les critères explicités Tableau 5.5.

FIGURE 5.3 – Illustration des dessins ou concepts (design) réalisés dans le cadre du démonstrateur du projet NTR Parkeon
Note : dimensions approximatives : *longueur* 380mm, *largeur* 400mm *hauteur* 2200mm.

Note : *Dans la suite du document, nous appellerons le projet NTR, le cas d'étude Parkeon faisant l'objet de notre expérimentation.*

Ainsi, le cas d'étude NTR est un projet qui présente les avantages d'être : collaboratif, multi-métiers, et pilote dans la prise en compte de la dimension environnementale, fondée sur des critères précis et quantifiables. Ces critères sont appliqués de manière comparative aux terminaux conçus antérieurement par l'entreprise : les modèles Stelio ©et Strada ©). Parkeon a affiché sa volonté de faire évoluer à la fois les outils, les connaissances et les habitudes de conception, pour y intégrer une démarche systématique d'éco-conception. Notre proposition de recherche cherchant à améliorer la collaboration entre les acteurs de la conception et l'expert environnement, par le biais des échanges de données et de

partage de connaissances, est donc parfaitement en phase avec la philosophie du projet NTR.

5.1.2.2 Chronologie de l'étude du projet NTR

Le projet NTR a eu lieu initialement dans l'entreprise entre 2009 et 2010 (phase de *Design et Spécification*). Nous nous réfèrerons à la Fig. 5.4 pour la chronologie des dates évoquées dans cette section.

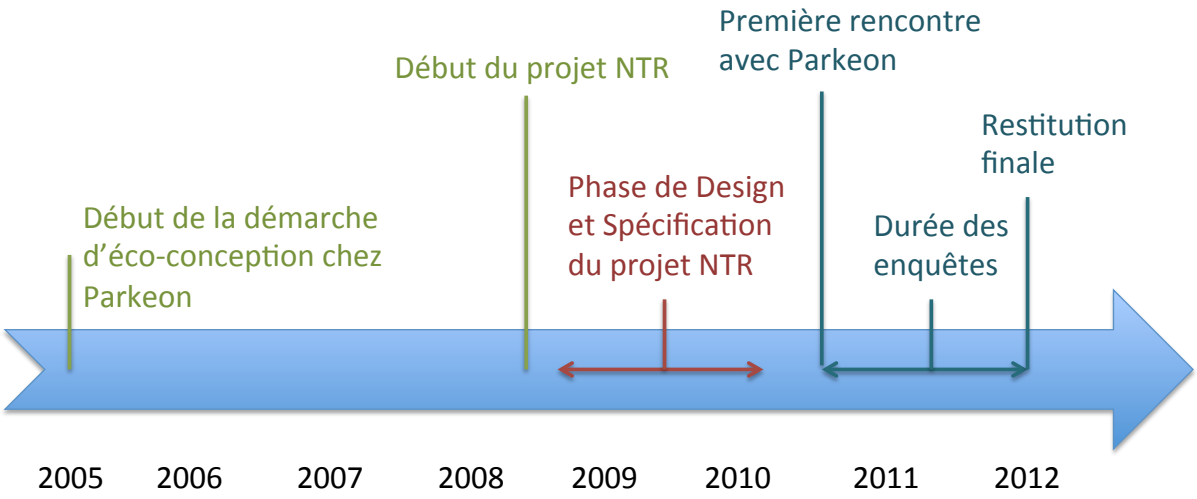


FIGURE 5.4 – Chronologie du projet NTR et de l'expérimentation menée avec Parkeon

Les phases d'optimisation, de test sur le terrain sont toujours actives. Les enquêtes sur les deux premières phases auxquelles nous nous intéressons, se sont donc réalisées *a posteriori*, en utilisant le questionnaire présenté section 4.2.4 et en étudiant les dossiers supports utilisés par les différents métiers et par le chef de projet pendant le projet. Ces dossiers regroupent un ensemble de documents relatifs au produit développé : propositions de designs venant des designers, fichiers CAO venant des concepteurs mécaniques, analyses environnementales (études comparatives, ACV, construction d'un outil de lignes directrices pour les designers et concepteurs CAO, analyse énergétique, etc.), données relatives au service achat et à la logistique, classeurs excel du chef de projet pour la hiérarchisation des concepts en phase amont, etc.

La première réunion de discussion autour de ce projet de recherche avec l'industriel s'est déroulée à la fin de l'année scolaire 2010. Les enquêtes ont commencé officiellement en décembre 2010, à partir de l'étude de documents sur le fonctionnement de l'entreprise et sur le déroulement du projet NTR. Puis les premières interviews se sont déroulées en mars 2011. La restitution finale a eu lieu le 19 et 20 Juin 2012.

A partir de l'étude des enregistrements des interviews et des documents relatifs au produit et à l'organisation, nous avons réalisé une cartographie du processus de conception et des activités en jeu lors du projet NTR, sous la forme d'un diagramme d'activité UML (*cf.* Fig. 5.12). Puis, en suivant le protocole de la réalisation du **prototype**, présenté section 5.1.2.6, nous avons appliqué les étapes de la méthode FESTIVE relative à la création des modèles associées aux outils métier.

Une fois le prototype terminé, c'est-à-dire une bibliothèque de modèles associés aux outils métier de la CAO, de la logistique, des designers, de l'expert environnement et énergétique et les transformations associées pour fédérer ces outils pendant un projet type NTR, nous sommes passés en phase de tests de la méthode FESTivE, via les mêmes participants à l'enquête. Pour ce faire, nous avons créé des **maquettes**, en suivant le protocole présenté section 5.1.2.7.

Nous avons alors présenté individuellement ces **maquettes** aux différents participants, afin de tester si la proposition dans son ensemble était adaptée au contexte de leur métier et était pertinente en terme de collaboration avec les autres métiers. C'était aussi l'occasion de discuter à propos des améliorations éventuelles. L'informaticien responsable du PLM et de l'ERP (*cf.* tableau 5.2) a été sollicité plus spécifiquement pour répondre à des questions relatives à l'implémentation de la proposition au coeur du parc informatique de Parkeon. Enfin, l'expert environnement et énergétique a également vérifié si la proposition appliquée à la situation de Parkeon satisferait bien les trois propriétés fondamentales (section 4.1.2).

5.1.2.3 Personnes impliquées pendant l'expérimentation

Le tableau 5.2 présente les personnes impliquées dans la réalisation du démonstrateur, en participant aux enquêtes, fournissant des données nécessaires à l'élaboration du prototype et ayant testé les maquettes présentées section 5.1.4.2. Les deuxième et troisième colonnes du tableau font référence aux activités auxquelles les contributeurs du démonstrateur appartiennent et les outils métier qu'ils ont utilisés lors du projet NTR. La dernière colonne du tableau présente le nombre de participants aux interviews. Le "chef" expert environnement et énergétique était assisté dans la partie environnement par deux autres personnes, ayant la double casquette de spécialistes de l'éco-conception et également ingénieur CAO de formation.

TABLE 5.2 – Présentation des personnes impliquées pour l'expérimentation dans l'entreprise Parkeon, et outil support utilisé lors du projet NTR
Note : deux des trois personnes ressources impliquées en analyse environnementale se sont relayées, ne constituant que deux personne ressource durant le projet.

Pers. impliquée(s)	**Activité**	**Outil métier**	**nb.**
Designer externe	Design industriel	CAO : 3DS-Max©	1
Concepteur CAO	Conception mécanique	CAO : ProEngineer©	2
Logistique	Service Logistique	SAP©	1
Expert Environnement	Analyse environnementale	ACV : Simapro©+ outil interne	3
Expert Energétique	Analyse énergétique	Simapro©, Excel©	1
Chef de projet	Gestion du projet NTR	Excel©	1
Informaticien Parkeon	Administrateur CAO	ProEngineer, Windchill, Advitium©	1
Informaticien Parkeon	Resp. Information System	Windchill, Advitium,MFGpro©	1
Informaticien du LSIS	Développeur informatique	EMF (UML, ATL)	1

5.1.2.4 Collecte d'informations auprès des services de Parkeon

Le questionnaire présenté dans la section 4.2.4 a été utilisé dans le cadre de cette expérimentation afin de formaliser les activités de conception déployées lors du projet NTR, ainsi que les relations d'échanges de données qui ont eu lieu entre les différents métiers impliqués. Fig. 5.5 présente les principales étapes de collecte d'informations auprès de Parkeon durant le projet. *L'expert environnement* de Parkeon est la personne clef, relais sur le terrain et moteur pendant toute la durée du projet. C'est grâce à son initiative au sein de Parkeon que nous avons débuté la collaboration, choisissant dès le début de travailler sur le projet NTR.

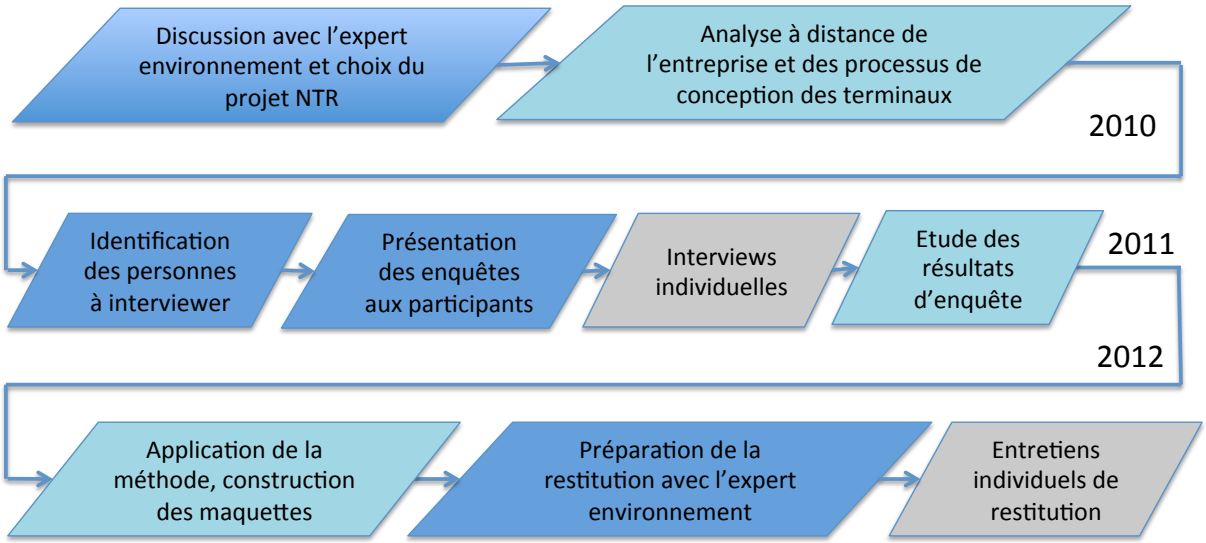


FIGURE 5.5 – Présentation générale des phases de collecte d'informations auprès des services de Parkeon pendant le durée du projet

Après une étude théorique des processus de Parkeon et de matériels spécifiques au projet NTR, nous avons identifié les personnes à interviewer. Les interviews ont été précédées par une réunion-discussion plénière avec les participants au projet NTR sur le sujet de recherche menée dans ces travaux. D'une manière générale, le personnel de Parkeon impliquées dans le projet NTR et les informaticiens étaient assez demandeurs de solutions pour améliorer la collaboration pendant un projet de conception, et en particulier entre l'analyse environnementale et leur activité respective. Les résultats des enquêtes ont en effet mis en lumière certains points pouvant être améliorés. Les résultats des enquêtes sont précisés dans la section suivante.

5.1.2.5 Prototype et maquettes réalisées à partir de l'enquête sur le projet NTR

Les développements et tests sur le démonstrateur regroupent deux parties : le prototype et les maquettes (*cf.* Fig. 5.6).

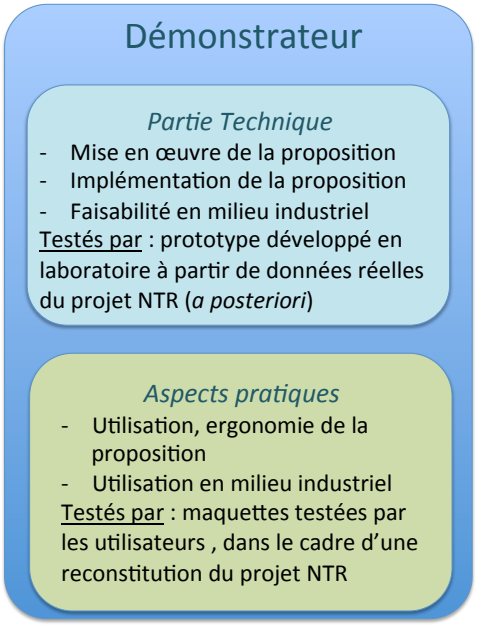


FIGURE 5.6 – Illustration de la partie technique et la partie pratique du démonstrateur et des tests respectifs réalisés

- **Un prototype** : correspond aux transformations réalisées à l'aide du *Framework* EMF, en utilisant les langages UML pour la définition des méta-modèles et modèles, et ATL pour le codage des transformations ;
  - *Méta-modèles réalisés* : deux par outil métier du démonstrateur, correspondant aux méta-modèles (1) des données d'entrées nécessaires à l'utilisation de l'outil et (2) des données de sortie de l'outil.
  - *Modèles réalisés* : deux par méta-modèles, correspondant aux données réelles d'entrée et de sortie des activités métier, lors de deux itérations successives.
  - *Transformations réalisées* : deux. La première reliant les méta-modèles de sortie des outils métier hors analyse environnementale, aux méta-modèles d'entrée de l'analyse environnementale. La seconde reliant les méta-modèles de sortie de l'outil d'analyse environnementale vers les autres outils.
- **Des maquettes** : correspondent aux "films" réalisés des activités métier qui sont intervenues lors du projet NTR.

5.1.2.6 Protocole utilisé pour réaliser le prototype

La figure 5.7 présente le protocole qui a été suivi pour réaliser le prototype du projet NTR Parkeon. Pour chaque activité (numérotée et encadrée à gauche sur la figure), les informations nécessaires à sa réalisation sont spécifiées (données obtenues via les enquêtes, connaissances métier, etc.), ainsi que les personnes impliquées (*cf.* Tableau. 5.2), et le support utilisé. Les cinq étapes qui ont été menées intègrent celles de la méthode FESTivE, comprenant la création de la bibliothèque de modèles relatifs aux outils métiers : construction du diagramme d'activité, construction des méta-modèles, instanciation des méta-

modèles construits, construction des cartes de correspondances relatives aux échanges entre les méta-modèles identifiés et codage des transformations. L'ensemble des méta-modèles, modèles et transformations codées, correspond au prototype. Le prototype simule l'échange de données entre les outils déployés au cours du processus de conception et des outils d'analyse environnementale utilisés pendant le projet NTR.

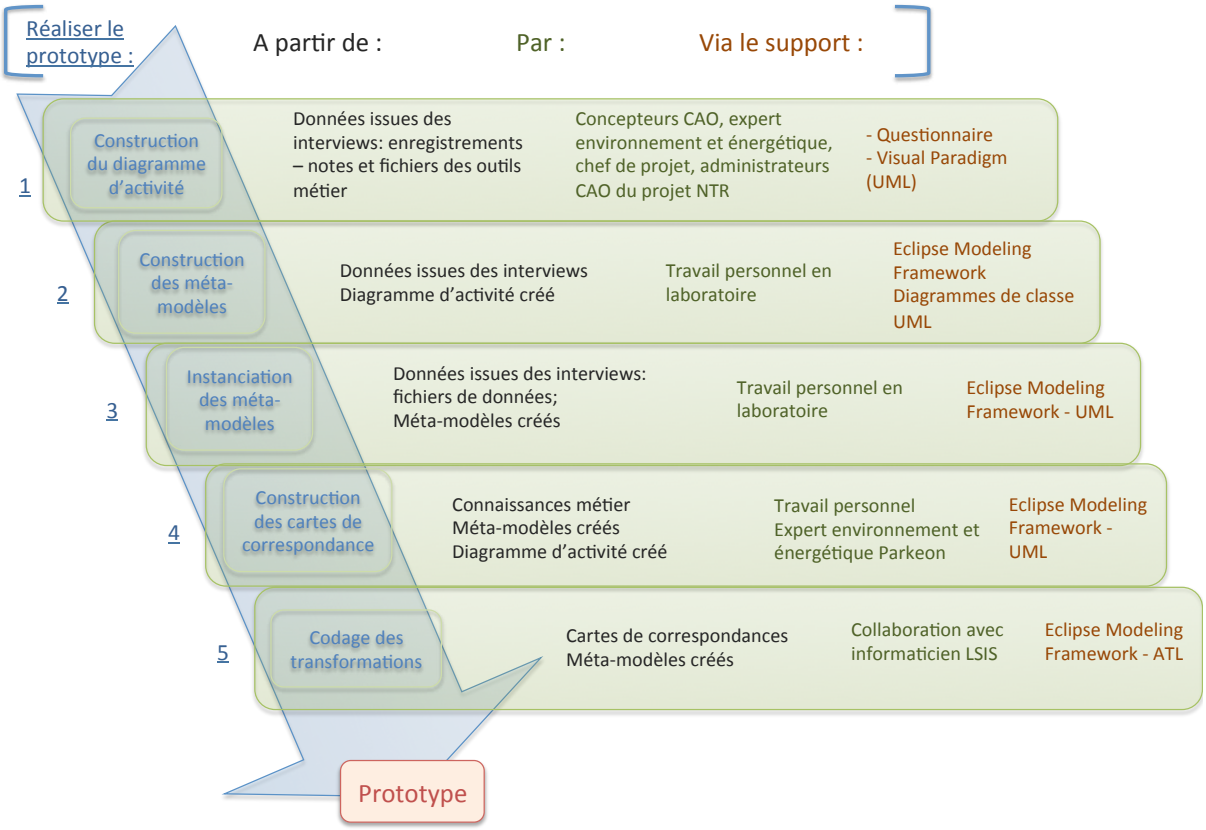


FIGURE 5.7 – Protocole en cinq étapes déployé pour réaliser le prototype dans le cadre du projet NTR

Le prototype sert à expérimenter la méthode FESTivE.

5.1.2.7 Protocole utilisé pour réaliser les maquettes

La maquette a pour objectif de présenter d'une manière pratique aux concepteurs du bureau d'étude comment se traduirait la proposition de fédération de leur outil avec celui de l'expert environnemental. Pour qu'ils puissent s'imaginer en situation de conception sur leur outils métier, la maquette est un film réalisé des outils respectifs des concepteurs. La liste des maquettes réalisées est présentée Tableau 5.3. Le protocole utilisé pour réaliser les maquettes fut le suivant :

- Modélisation rétrospective des activités métier par les outils déployés (liste spécifiée dans le Tableau 5.3) à l'aide des fichiers réels utilisés lors du projet. Ces fichiers sont issus des résultats de l'enquête sur la situation initiale.
- Mise en marche du démonstrateur : fédération des outils (utilisation du prototype fondés sur la méthode FESTivE : échanges des données relatives à l'analyse environnementale)
- Réalisation de films présentant l'utilisation des outils métier échangeant des informations dans une approche fédérative.

Chaque outil utilisé fait l'objet de trois films, couvrant trois courtes itérations successives.

- *Le premier film* lors de la première itération présente l'activité métier en pleine réalisation de son travail habituel, exportant les données dans le format souhaité pour interopérer avec l'outil d'analyse environnementale.
- *Le second film* correspond à la seconde itération, lorsque dans l'activité métier, le métier reçoit les "retours" venant de l'analyse environnementale, sous la forme de *plugin* au coeur de son outil métier. L'expert réitère alors son choix, en conscience vis-à-vis des impacts environnementaux que son premier choix a généré, et exporte ses données vers l'activité d'analyse environnementale une seconde fois.
- *Le troisième film* correspond à la troisième itération et diffère de l'itération précédente en cela que le concepteur co-construit des connaissances nouvelles avec l'expert environnement grâce aux échanges précédents. Ses choix se font comparativement aux résultats de ses choix précédents.

TABLE 5.3 – Liste des outils ayant fait l'objet de maquettes pour les expérimentations

Pers. impliquée(s)	**Outil métier**
Concepteur CAO	CAO : ProEngineer© SolidWorks©avec le module "Sustainability"
Logistique	EcoTransIT©
Expert Environnement	ACV : SimaPro©+ outil interne
Expert Energétique	SimaPro©, Excel©
Informaticiens	EMF (UML, ATL)

Les outils *EcoTransIT* et *SolidWorks* avec le module *Sustainability* utilisés comme *viewer* sont des exemples "d'outils logiciels intermédiaires" permettant de "lire" les données issues de l'analyse environnementale et de les représenter dans leur environnement numérique.

Dans cet exemple, les modules ne font aucun calcul. Des informations complémentaires sur ces modules sont données en annexe A.6.

Dans le cas de calculs réalisés par les modules, des problèmes de gestion des écarts relatifs entre les résultats d'analyses sont à prendre en compte. En effet, les analyses environnementales effectuées avec les outils *EcoTransIT*, *SolidWorks via* le module *Sustainability* et l'ACV détaillée réalisée sur *SimaPro* montrent des écarts dans les résultats, malgré l'utilisation d'éléments de modélisation identiques. Cela est tout à fait cohérent puisque ces outils n'utilisent pas les mêmes hypothèses de calculs (méthodes de calculs différentes, simplification des données de modélisation des bases de données, réduction des options de modélisation, etc.). Le fait d'utiliser deux outils de modélisation donnant des résultats différents, mais cohérents (c'est-à-dire avec toujours le même écart relatif par exemple), ne serait pas problématique dans l'absolu. Mais en réalité, il est très difficile d'obtenir le même écart relatif pour des raisons bien connues des experts en ACV : pas de consensus sur les méthodes de calculs ou les bases de données (problèmes d'allocations dans les normes [Ekvall et Finnveden(2001)]), variabilité des résultats due à des facteurs spatio-temporels différents (données spécifiques à certaines régions du monde, dynamisme des impacts modélisés dans le temps, etc.) (*cf.* chapitre 3.4).

A moins (1) d'avoir des outils autorisant l'utilisateur à vérifier l'intégralité de son contenu, afin de réaliser des cartes de correspondances entre les hypothèses et paramètres de modélisations, (2) une norme, unifiant les paramètres de modélisation (pour l'instant peu probable étant donné les divergences de points de vue, mais des travaux vont dans ce sens), les résultats des analyses réalisées par les modules seront différents de l'analyse réalisée par un outil d'ACV détaillée. De plus, ils ne subissent pas forcément les mêmes évolutions au même moment (bases de données, méthodes de calcul, etc.).

Par conséquent, les maquettes ont été réalisées pour que le métier concerné par cet outil expérimente la situation une fois la première partie de la méthode FESTivE appliquée. L'analyse environnementale est effectuée globalement et projetée sans effectuer d'autres calculs, dans l'espace de l'outil métier *local* à l'aide de *viewer*.

5.1.3 Analyse de la situation initiale et mise en place du projet NTR

5.1.3.1 Motivations initiales et opportunités

Avant le début du projet NTR un des ingénieurs environnement faisait la constatation que "les concepteurs sont véritablement submergés de contraintes (vandalisme, corrosion, résistance au feu, tenue dans le temps, variation de températures, design, compatibilité électromagnétique, coûts, etc.) et ne vont pas instinctivement utiliser les outils mis à leur disposition. La communication reste donc le vecteur essentiel pour mobiliser les équipes et rappeler sans cesse les aspects liés à l'éco-conception". Il ne fut donc jamais question d'imposer arbitrairement le critère environnement aux concepteurs. La démarche environnementale entamée avant le début du projet NTR par l'équipe environnementale de Parkeon s'est réalisée en concertation avec les autres services. Elle aboutit aux points suivants.

– **Réalisations d'ACV** : ACV complète du terminal de la gamme précédente, avec étude de sensibilité ; sensibilisation des équipes (notamment les achats, le marketing et les concepteurs) et de certains fournisseurs ; formalisation d'un support permettant la collecte des données d'entrée pour l'outil d'ACV (sur tableau Excel).
– **Supports informatifs, outils internes d'analyse environnementale** : projet de réalisation de fiches informatives sur les technologies ; préconisations relatives à l'éco-conception des terminaux adressées aux chefs de projets ; suggestion d'intégration de critères environnementaux aux grilles d'évaluation des choix de conception dans les phases amont ; réalisation d'un outil de lignes directrices fondées sur les résultats d'ACV obtenus.
– **Concertations** : discussions avec les différentes équipes (notamment les concepteurs) et mise en place d'une réflexion collective autour de l'éco-conception.

Le tableau 5.4 dresse le bilan des actions environnementales entreprises au début du projet NTR. Ce fut sur ces bases que s'est initiée une réflexion avec le marketing sur des argumentaires environnementaux spécifiques aux sous-ensembles, ou aux fonctions (*apport d'énergie*) du produit. Ainsi que des travaux sur l'analyse du besoin d'un sous ensemble avec les concepteurs CAO. Dans le projet NTR le critère environnement fut ajouté au cahier des charges, avec un facteur de pondération non négligeable par rapport aux autres critères.

TABLE 5.4 – Bilan des actions environnementales menées au début du projet NTR

Actions environnementales	**Description**
Proposition d'un argumentaire environnemental aux différents services	- argumentaire spécifique à des sous-ensembles ou fonctions avec le marketing - travaux sur l'analyse du besoin du sous-ensemble chapeau solaire avec les concepteurs
Intégration des critères environnementaux dans la grille d'évaluation de conception	Objectif atteint avec facteur de pondération non négligeable et fonctions non négociables (*cf.* tableau 5.5)

5.1.3.2 Outils déployés au cours du processus de conception

Outils déployés au cours du processus de conception du projet dans lequel s'inscrit le projet NTR

La Fig. 5.8 présente les outils déployés au cours du processus de conception dans lequel s'est inscrit le projet NTR (c'est-à-dire du choix du concept à la conception détaillée). Les bulles (bleues) au centre décrivent les phases du processus, auxquelles peuvent être associés les métiers de la conception (non représentés sur la figure). Les outils *locaux* utilisés par ces différents métiers sont présentés en dessous [2] (bulles violettes) : outils de la suite TDC

2. Pour la version colorée de la figure : les bulles rouges, entre les violettes et bleues, représentent les outils d'analyse environnementale simplifiés, adaptés au niveau *local* du métier (par exemple les lignes

(pour l'analyse fonctionnelle), outil de CAO, etc. Au-dessus des bulles centrales traçant les étapes du processus, sont représentés les outils *globaux*. Dans la première colonne se trouve l'ensemble des outils permettant de définir la tactique relative au projet : analyse de la demande, analyse concurrentielle, analyse règlementaire et normative, etc. Puis sur tout le reste du processus sont présentés des outils d'analyse environnementale nécessitant une vision transversale : outil d'évaluation qualitative et semi-quantitative, ACV simplifiée et détaillée, ainsi qu'un outil de calcul du taux de recyclabilité [3] qui est utilisé suivant le même principe (non concerné par notre étude NTR). La grande bulle au niveau le plus haut, correspond à l'outil de pilotage du chef de projet, utilisant une grille multi-critères : relatifs aux prix, au design, à la fabricabilité, à la faisabilité et aux fournisseurs. Enfin, les flèches présentent les principaux échanges d'informations entre les activités (pas forcément entre les outils directement). Les canaux utilisés sont le mail, via des fichiers Excel principalement.

Outils déployés au cours du projet NTR

La Fig. 5.9 présente spécifiquement les outils utilisés lors du projet NTR (analyse de concepts). Les différents métiers intervenus au niveau *local* sont en charge : du design (esthétique, proposition des concepts), de la CAO et des choix technologiques, de l'évaluation de l'ergonomie, de l'étude des fournisseurs et de la logistique. Au niveau *global*, la deuxième bulle transversale en partant du haut en allant vers le bas, représente l'activité d'analyse environnementale et la bulle beige au dessus présente l'activité du chef de projet qui gère les impacts collatéraux entre les différents critères (dont le critère environnement). Les flèches symbolisent les échanges de données, transitant soit oralement (lors de *stand up meeting* [4] par exemple) ou via les mails. La matrice pondérée pilotée par le chef de projet est un des supports qui véhicule et centralise les données techniques par critère pour l'évaluation des concepts. Cette matrice est un outil Excel. La fin de notre étude correspond au choix final du concept.

L'analyse globale est multi-critères. Chaque critère est évalué localement, sauf pour le critère environnement qui doit gérer les impacts collatéraux des différents choix de conception, de technologie, de design, d'ergonomie et de fournisseur (logistique). Plusieurs scénarios sont donc réalisés. Chaque activité *locale* reçoit des informations des autres métiers et notamment de l'activité d'analyse environnementale, sous la forme de lignes directrices. Ces métiers *locaux* fournissent les données nécessaires à l'activité d'analyse environnementale oralement [5] ou par courriers électroniques.

directrices, déclinées du niveau *global*)

3. L'outil de calcul du taux de recyclabilité du produit est utilisé dès la phase de design conceptuel, pour mesurer au plus tôt la performance de recyclabilité du produit. Au cours du processus de conception, à chaque itération les calculs fondés sur un même modèle de calcul, sont précisés et les taux sont comparés, permettant un pilotage relatif à ce critère.

4. Petite réunion d'avancement rapide, tous les participants sont debout ce qui favorise la rapidité des échanges d'informations

5. Un des experts en éco-conception nous a confié lors des enquêtes que "les oreilles sont les outils les plus efficaces pour obtenir les informations nécessaires pour l'analyse environnementale des concepts en cours de dimensionnement". Cette réflexion montre la difficulté pour les experts environnement d'avoir des données formalisées dans les phases amont des projets de conception.

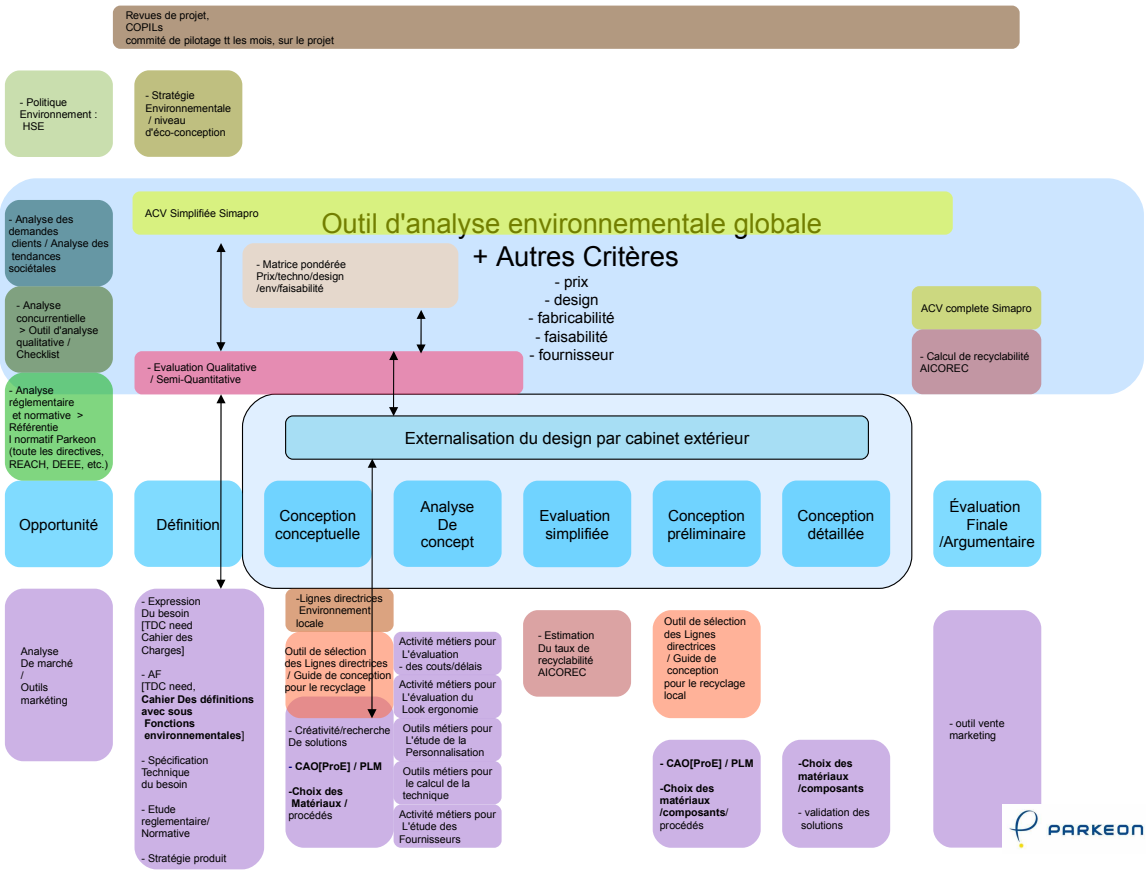


FIGURE 5.8 – Outils utilisés pendant le processus de conception dans lequel s'inscrit le projet NTR, chez Parkeon

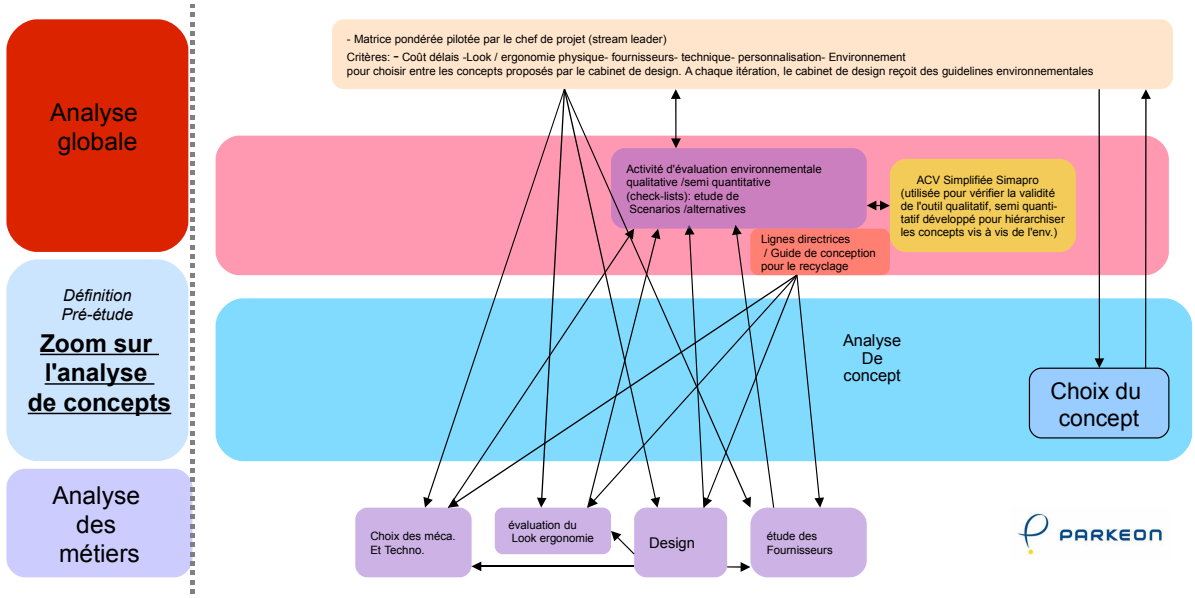


FIGURE 5.9 – Outils utilisés pendant le processus de conception qui est organisé suivant les niveaux *local vs. global*

Structure du système d'information lors du projet NTR

La Fig. 5.10 présente le SI général et simplifié de Parkeon, relatif à la gestion des données produit. Les bulles symbolisent le système support de gestion des données du cycle de vie du produit : PDM, PLM et ERP. Les carrés représentent les activités métier, les flèches correspondent aux données qui sont transmises sur le système de gestion des données centralisées.

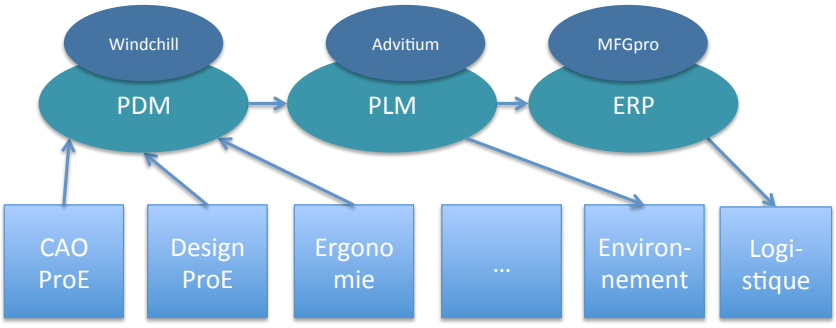


FIGURE 5.10 – Struture générale et simplifiée du SI de Parkeon, relatif à la gestion des données produit, à l'époque des enquêtes

5.1.3.3 Synthèse de la situation lors du projet NTR

Les personnes

Les interviews des différents métiers ont fait apparaître les points clés suivants par rapport à l'organisation et la gestion du projet NTR (collaboration entre les métiers [6]) :

- un management qui a pour volonté de mettre au centre la décision des métiers ;
- un pilotage précis dès les phases amont [7] : utilisation d'une grille de critères pondérée par facteurs spécifiques, évalués par des indicateurs spécifiques avec grille de valeurs hautes, basses et le pas pour chaque indicateur.
- cycles itératifs rapides pour rendre au plus réactif les concepteurs dans les phases amont, lorsque les données ne sont pas encore tout à fait formalisées.
- de nombreuses réunions informelles hebdomadaires sont organisées sur le "plateau projet" : synchronisation, discussion des choix et des directives, pendant toute la durée du projet.
- des échanges de données fréquents par mails, à l'aide de support de type Excel, par exemple : données relatives aux caractéristiques mécaniques du produit, grille de critères.

Les critères environnementaux

Les critères environnementaux affichés dès le début du projet NTR sont présentés dans le tableau 5.5 suivant. Leur précision témoigne d'une volonté assez marquée venant de l'équipe de direction, de les faire respecter. Les critères de taux de recyclabilité, d'utilisation de matériaux d'origine recyclée et de toxicité des procédés de fabrication ont un niveau non négociable. D'autre part, ces critères sont intégrés dans la grille d'évaluation, ce qui est l'élément tactique le plus décisif de la part du chef de projet.

La collaboration des ingénieurs environnement et des autres métiers

La collaboration entre les ingénieurs environnement et les autres métiers intervenant dans les phases amont du processus de conception peut être qualifiée de partielle :

- **sur le plan de la légitimité :** les experts environnement sont reconnus, puisque le critère environnement fait partie des critères de management. Néanmoins le facteur de pondération du critère environnement par rapport au critère de coût est moindre, mais au même niveau que le critère du design. De ce fait ce n'est pas considéré comme une priorité et les informations relatives à ce critère sont traitées secondairement par les autres métiers. La pondération des critères a donc pour intérêt de formaliser officiellement leur importance relative, et donc a pour défaut d'établir une hiérarchie entre eux. Cette considération hiérarchique par les métiers a pour effet, par manque de temps de ne pas faire circuler les informations nécessaires à l'analyse environnementale à la même vitesse que les autres informations.

6. Les équipes de conception sont organisées sous la forme de "plateau projet", regroupant plusieurs corps de métiers. L'intérêt est de faciliter la collaboration informelle entre les différents métiers devant collaborer pendant un projet de conception.

7. Le chef de programme a "*horreur d'être dans le flou*" selon les concepteurs interrogés.

TABLE 5.5 – Exemples de critères et objectifs environnementaux du projet NTR

Critère environnemental	**Niveau**
Taux de recyclabilité	Minimum 95% (obligation DEEE : 75%) Non négociable
Temps de dépollution	Inférieur à 10 minutes
Energie verte (syst. complet)	- Autonomie en énergie solaire Non négociable - Réduire l'impact env. global total par rapport à la gamme précédente
Consommables	Réduction de 20% / impact papier
Réduction de l'empreinte CO2 à travers l'ensemble du cycle de vie	- réduction systématique si possible - faire mieux que la concurrence
Utilisation de matériaux d'origine recyclée	Privilégier, mesurer et communiquer Non négociable
Toxicité du process de fabrication	Réductions supérieures au règlement Non négociable

Cela pose le problème suivant : l'analyse environnementale est un métier parmi les autres qui doit évaluer le critère environnement à la même vitesse que l'évaluation respective des autres métiers. La connaissance des facteurs de pondération des critères est nécessaire aux concepteurs pour les guider dans leurs choix mais ne doit pas être au détriment d'une des activités métier. Cette conséquence n'est donc pas liée au manque de considération de la valeur du critère, mais au manque de temps des différents métiers à consacrer à l'échange et au partage d'informations.

– **sur le plan des échanges d'informations, dans le fond :** du fait de l'aspect non prioritaire, les échanges ne sont impulsés quasiment que par l'expert environnement. C'est-à-dire, il dépense un temps et une énergie considérables à aller chercher les informations relatives au produit dont il a besoin pour réaliser ses études d'impacts environnementaux. Ceci a pour conséquence de non systématiser les échanges d'informations. D'autre part, étant donné que l'environnement est un critère nouveau pour certains métiers, la connaissance relative à ce domaine est parfois manquante. Si les liens entre les paramètres maîtrisés par les métiers et leurs conséquences sur les paramètres environnementaux ne sont pas établis, il est difficile pour les métiers de comprendre sur le fond le besoin d'implication que l'expert environnement leur demande. C'est la raison pour laquelle l'expert environnement a créé un outil d'analyse environnementale présentant les résultats de l'analyse sous la forme de lignes directrices orientées métier. Mise à part quelques améliorations à apporter aux lignes directrices, l'outil présente des aspects intéressants en terme de *traduction* des conséquences environnementales des choix *locaux* pris par les métiers. Sur le plan scientifique, c'est un outil qui est fondé sur des résultats d'ACV détaillées, réalisées en parallèle par les ingénieurs environnement (notamment alimenté par les projets passés, pour lesquels les informations sont disponibles sur le PLM (Advitium©)). La traduction des

impacts environnementaux en lignes directrices est établie de manière cohérente et transparente par rapports aux résultats d'ACV. Mais elle demande un travail assez conséquent puisqu'elle se réalise manuellement.

– **sur le plan des échanges d'informations, dans la forme :** les supports utilisés du niveau *local* (métiers autre que relatif à l'environnement) vers le niveau *global* (environnemental) sont formels et informels. Les supports informels sont oraux. Les supports formalisés sont des fichiers Excel ou fichiers textuels échangés par mails, des questionnaires à remplir (un questionnaire relatif au service achat et logistique a été donné aux fournisseurs, pour recevoir des informations permettant d'établir les ICV), ou des informations disponibles sur le PLM ou l'ERP. Comme le projet NTR est en amont du processus de conception, les informations ne sont pas encore publiées sur le PLM. Par contre certaines données fournisseurs antérieures au projet peuvent être déjà présentes sur le système ERP (MFG/Pro©).

Ces trois points montrent que **l'intégration du critère environnement parmi les critères d'évaluation des concepts est nécessaire mais non suffisante. Le besoin d'améliorer les échanges d'informations entre les métiers *locaux* et l'expert environnement est clairement identifié. De plus, cette intégration valorisera les efforts fournis par les experts environnement.**

A partir de ces résultats d'enquête, la section suivante présente l'application de la méthode FESTivE, dans sa partie création de la bibliothèque de modèles des outils utilisés par les métiers interviewés sur le projet NTR. Cette phase a fait l'objet de plusieurs discussions avec l'ingénieur environnement. La section suivante présente l'étape de restitution. Cette phase a consisté à présenter les maquettes aux agents interviewés et à faire les séances d'expérimentation de la proposition, basées sur des entretiens individuels. Nous verrons que ces résultats contribueront à valider la méthode FESTivE sur ce cas d'étude. Ils seront présentés dans la section 5.1.5.3.

5.1.4 Construction du prototype et des maquettes expérimentales

5.1.4.1 Construction du prototype expérimental

Etape 1 du prototype : construction du diagramme d'activité relatif au processus déployé lors du projet NTR

Les enquêtes réalisées et l'étude des supports utilisés lors du projet NTR, mettent en évidence les grandes phases du projet orchestrées par le chef de projet :

– **Phase 1 : présentation du cahier des charges aux designers**
Les spécifications concernant le produit, sous la forme d'un cahier des charges défini au niveau managers, sont données au cabinet de design. L'équipe d'experts environnement rédige à l'avance, une liste de lignes directrices environnementales destinée aux designers externes (*cf.* tableau 5.2) pour les aider à prendre en compte dans leur phase de créativité, la dimension environnementale.

– **Phase 2 : évaluation multi-critère des concepts**

Suite aux propositions venant du cabinet de design, l'équipe de Parkeon entame une évaluation des concepts sur plusieurs itérations avec l'équipe de design. Ce processus itératif finalement converge vers une unique solution (résultant de plusieurs éléments de concepts présents dans les concepts initiaux proposés par le cabinet de design). Pour évaluer les concepts initiaux du design, le chef de projet définit six sections différentes, associées respectivement à plusieurs critères. A chaque critère est alloué un facteur de pondération, de même que chaque section est pondérée par un facteur unique. Devant chaque critère sont spécifiés les responsables métier, l'équipe de concepteurs, l'objectif à atteindre, l'unité et l'échelle (min, max, échelle, pas). Une de ces six sections est l'environnement.
Lors de ces étapes itératives, chaque service relatif à un des métiers impliqué dans l'évaluation d'une des sections a collaboré avec les autres. Lors de cette collaboration, les activités métier se sont échangées des données sur le produit. Ces données sur le produit (données liées au design, pièce CAO en surfacique (vide), proposition de matériaux) ont été extrapolées (ou fait l'objet d'un dimensionnement) à partir des données succinctes fournies par le cabinet de design. Par exemple, pour évaluer certains aspects techniques du produit, les concepteurs CAO ont modélisé les pièces associées au produit conceptuel proposé. Ces modèles de pièces plus approfondis, renseignés d'éléments techniques sur le produit, ont permis aux ergonomes d'évaluer leur critère lié à "la pertinance *vs.* le besoin", ou encore, au service Achat d'identifier les fournisseurs potentiels.

Précision sur l'étape d'évaluation environnementale des concepts
A cette étape, les experts environnement créent un outil simplifié d'analyse d'impacts environnementaux générés lors du cycle de vie, fondé sur des données qualitatives et semi-quantitatives (*cf* Fig. 5.11) relatifs aux lignes directrices fournies en début de projet au cabinet de design. Les résultats finaux donnés par l'outil ont été étalonnés par les résultats d'ACV des produits antérieurs développés par Parkeon.

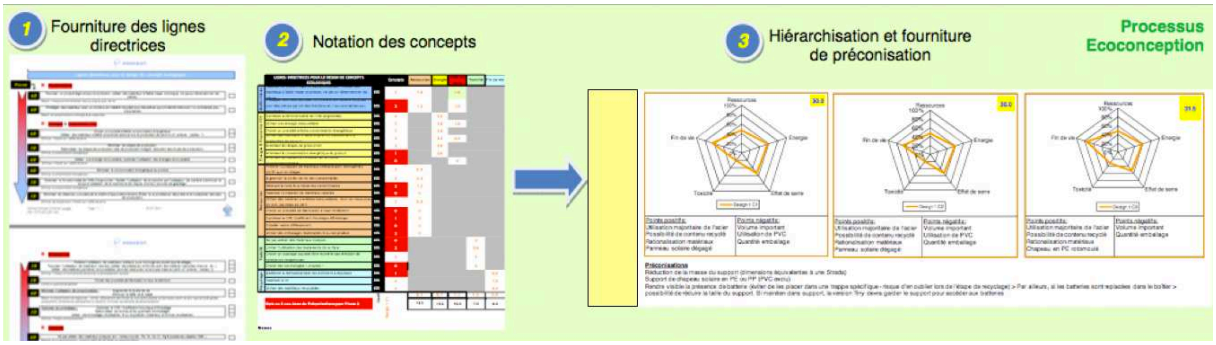


FIGURE 5.11 – Outil interne d'ACV simplifiée, semi-qualitative - quantitative, développé par l'ingénieur environnement

Pour chaque concept, le niveau de prise en compte de lignes directrices par les designers, est évalué sur une échelle de 0-nul à 5-fort. Les notes inférieures à 2 sont automatiquement sélectionnées comme préconisations prioritaires pour la phase suivante. Ensuite, une note par thématique (critères environnement, par exemple, l'effet

de serre) est calculée en multipliant le niveau de prise en compte par le degré de l'importance de la ligne directrice. On obtient donc un total par thématique pour chaque concept. Puis on calcule pour chaque thématique la note thématique relative (ramenée à la note maximale possible), ce qui permet de tracer le graphe radar de chaque concept. La note totale du concept est calculée en divisant la somme des notes thématiques par la note maximum. Ce résultat est ensuite étalonné par les résultats d'ACV de référence (des produits antérieurs).

– **Phase 3 : validation du concept final et début du dimensionnement mécanique du produit** Une fois l'analyse multi-critère terminée et le concept choisi, les concepteurs internes de Parkeon conçoivent le produit à partir du cahier des charges et du design.

A partir de ces résultats d'enquête nous avons construit le diagramme d'activité UML du projet NTR présenté Fig. 5.12. On note qu'aucun processus n'avait été réalisé au début du projet sous cette forme.

Le diagramme d'activité Fig. 5.12 fait apparaître six activités principales : rectangles larges bleus, contenant les sous-activités (petits rectangles aux bords ronds) et les données d'entrée et de sortie de ces sous-activités (petits rectangles). Les activités transversales sont celles du *Stream Leader* (gestion du projet) et du *Global Environmental analysis* (analyse environnementale globale). Les activités au centre, locales, sont celles du *Design (externe)*, *Choix des fournisseurs*, *Conception mécanique CAO, choix des technologies* et *Ergonomie*. On observe sur la figure, une alternance de données et de sous-activités, en partant du point de départ (en haut), à la fin du projet NTR que nous avons étudié (en bas à gauche).

Notons quelques éléments clés à la lecture du diagramme :

1. Le processus est itératif[8]. Au début de chaque itération les spécifications produit sont données par le chef de projet aux différents métiers. Chaque métier travaille alors en parallèle et produit des données de sortie qui sont analysées par l'activité d'analyse environnementale.

2. L'activité d'analyse environnementale, au cours d'une itération, reçoit les choix pris par les autre métiers et utilise son outil d'analyse environnementale simplifiée. Elle est contrainte d'attendre qu'un nombre critique d'informations sur le produit lui parvienne. Lorsque la quantité de données fournies est suffisante, l'activité d'analyse environnementale édite des recommandations spécifiques à chaque métier. Ces recommandations sont sous la forme de lignes directrices, associées aux graphes radars présentant les résultats d'analyse environnementale simplifiés (explicités ci-dessus et illustrés Fig. 5.11, les critères environnementaux des graphes radars sont l'effet de serre, la toxicité, la fin de vie, les ressources et l'énergie). Elle fournit aux métiers ses recommandations manuellement (via les mails).

8. Etant donné que les activités se déroulent d'une manière itérative, afin d'éviter une trop grande complexité de lecture et limiter la taille de l'image, nous choisissons un modèle de processus, plutôt qu'une trace (représentation de chaque activité à chaque itération).

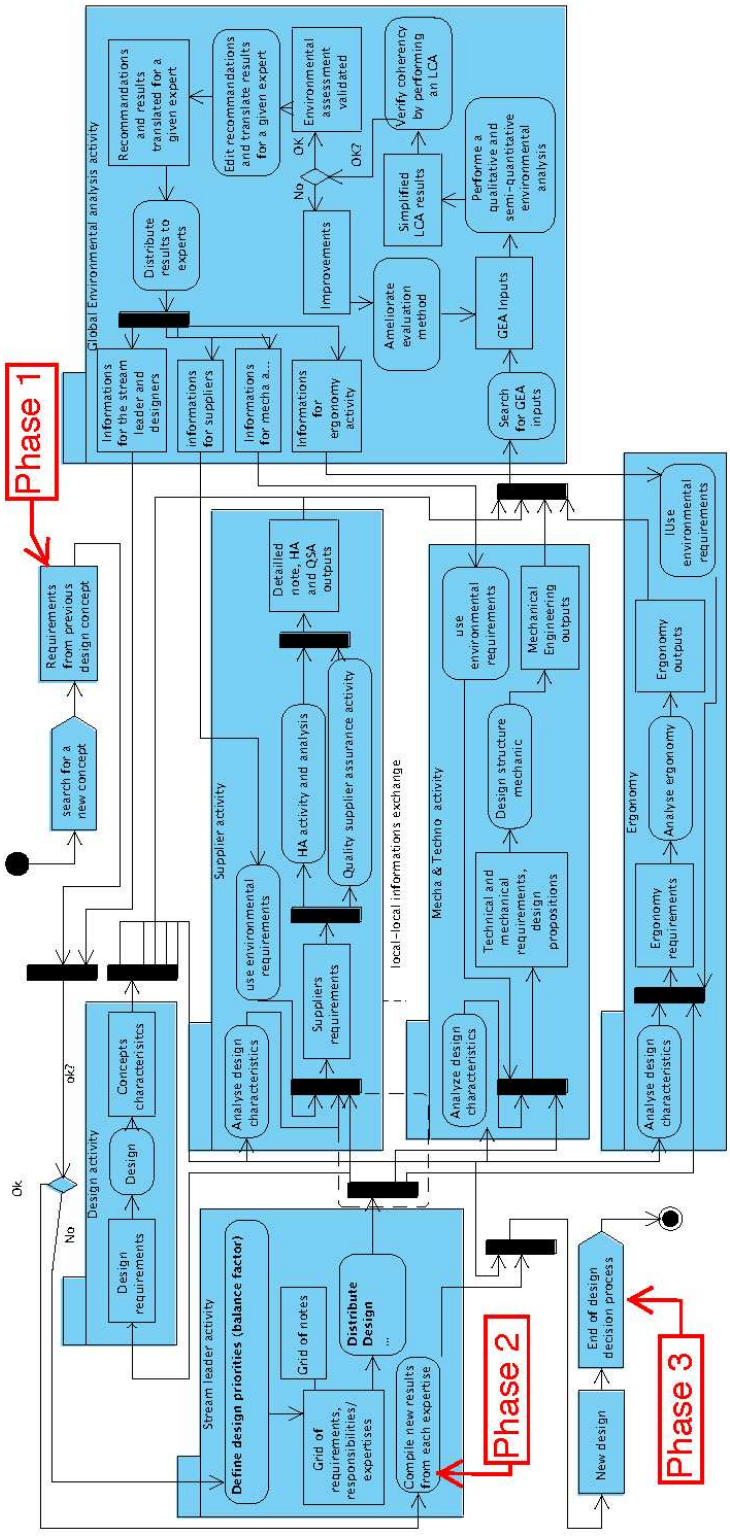


FIGURE 5.12 – Processus de conception déployé lors du projet NTR, formalisé sous la forme d'un diagramme d'activité UML

3. Les concepteurs, en cours d'activité, injectent dans leurs données d'entrée les recommandations spécifiques venant de l'analyse environnementale.
4. A chaque itération, le chef de projet vérifie si les objectifs sont atteints, utilise sa grille à six sections pondérées pour comparer les solutions de conception (présentée ci-dessus). Enfin le projet se termine lorsque les concepteurs ont convergé vers une unique solution de conception de l'horodateur.

Ce diagramme d'activité a pour intérêts de : (1) représenter la dynamique des échanges entre les activités, (2) d'identifier les données de sortie et d'entrée entre l'activité d'analyse environnementale et les autres activités.

Une synthèse des avantages et inconvénients rencontrés dans l'étape 1 du protocole de réalisation du prototype est présenté Tableau 5.6.

TABLE 5.6 – Etape 1 du protocole d'application du prototype : difficultés rencontrées lors de la modélisation du diagramme d'activité

Remarques vis-à-vis de la modélisation du diagramme d'activité
- la représentation de tous les échanges peut devenir assez complexe visuellement, surtout lorsqu'il y a plusieurs itérations en même temps ;
- difficulté d'appréhender le temps qui s'écoule ;
+ facilité d'utilisation du langage UML ;
+ cas d'application adapté à ce type de représentation : 6 activités, et seulement sur la phase amont du processus de conception ;
+ projet NTR bien structuré et organisé lors de son déroulement, bonne clarté dans les propos des personnes interviewées, donc identification des activités et des échanges facilités

En suivant le protocole de création du prototype Fig. 5.7, l'étape suivante réalisée correspond à la modélisation des données d'entrées et de sorties des activités, ou plus précisément, des méta-modèles associés aux activités.

Etape 2 du prototype : construction des méta-modèles

A partir des données issues des interviews et du diagramme d'activité créé, les données d'entrée et de sortie ont été décrites à l'aide de diagrammes de classe[9]. Ces diagrammes concernent les activités de Design, Mécanique, Logistique et Analyse globale environnementale.

Les activités métier peuvent comprendre plusieurs outils, ce qui nécessite de définir les diagrammes de classe d'entrée et de sortie pour chaque nouvel outil utilisé. C'est le cas pour tous les échanges de données réalisés via les mails, avec des fichiers Excel. Lors du projet NTR, la plupart des données de sortie des activités étaient rentrées manuellement

9. Cette étape d'application du protocole correspond à l'étape de la méthode de création des modèles présentée section 4.2.2.1.

dans le PLM ou l'ERP. Dans cette phase amont projet, la plupart des données étaient échangées par mails : les données des services logistiques vers les autres métiers, ou les données des nomenclatures venant des concepteurs CAO vers les autres métiers. Cette étape de réalisation des méta-modèles demande en outre d'avoir une connaissance approfondie des outils métier. Certains de ces outils métier sont disponibles dans les laboratoires de recherche, ce qui nous a permis de les manipuler plus en détail après la première série d'enquête. Certains autres outils métier correspondant à la même activité métier mais présentant des avantages vis-à-vis de l'intégration de la dimension environnementale [10], étaient disponibles en laboratoire. Les méta-modèles réalisés pour permettre la circulation des données environnementales dans les différents environnements numériques des outils métier, sont illustrés par des outils existants dans le commerce (*cf.* Tableau 5.7). L'intégration de données environnementales dans les activités suivantes est illustrée par les outils métier suivants :

- l'activité de CAO et choix des technologies :
  - Nous distinguerons dans cette activité, les activités de CAO, de choix des matériaux et de choix des technologies, avec leurs outils métier relatifs.
  - *Activité de CAO (mécanique)* : illustration des possibilités offertes par la fédération, par un outil de type SolidWorks comprenant un module *sustainability* ; modélisation des méta-modèles d'entrée et de sortie relatifs
  - *Activité de choix des matériaux et des technologies* : illustration des possibilités offertes par la fédération, par un outil de type CES [11] avec le module intégré *Eco Audit* ; modélisation des méta-modèles d'entrée et de sortie relatifs
- l'activité gérant la logistique : illustration des possibilités offertes par la fédération, par un outil de type EcoTransIT, présentant l'avantage d'intégrer un outil de calcul d'impacts environnementaux (reposant sur des calculs d'ACV [12]) ; modélisation des méta-modèles d'entrée et de sortie relatifs.

Le prototype réalisé est donc basé sur la situation réelle du projet NTR, qui dans le cas de la fédération, revient à illustrer les outils utilisés par Parkeon par des outils pouvant aider les concepteurs *locaux* à collaborer avec l'analyse environnementale au niveau *global* en "lisant" les données issues de l'analyse environnementale. Nous verrons ces illustrations plus en détail dans la section 5.1.5. Le tableau 5.7 présente la totalité des méta-modèles réalisés dans le cadre des expérimentations, comprenant à la fois les outils initiaux déployés lors du projet NTR et les illustrations.

La Fig. 5.13 illustre un des diagrammes de classe représentant l'activité du service de logistique et achat, correspondant à certaines données de sortie de l'outil Excel supportant cette activité. Seules les données pouvant concerner l'activité d'analyse environnementale sont conservées afin de réduire la complexité du diagramme.

10. Nous verrons des illustrations réalisées pour l'application des solutions de fédération à l'aide d'outils intégrant la dimension environnementale dans leur environnement, d'une manière détaillée dans la section 5.1.5

11. Développé par Granta Design. L'outil dans l'industrie équivalent à CES selector plutôt tourné vers les universitaires, est l'outil Granta MI. Les deux outils reposent sur des méta-modèles qui peuvent être similaires au niveau de détail auquel nous les avons définis.

12. Le rapport présentant les calculs, les hypothèses, et les sources des données manipulées est disponible sur le site http ://www.ecotransit.org/, Juillet 2012

TABLE 5.7 – Spécification des diagrammes de classe créés par les activités en jeu dans le projet NTR
Mat. pour Matériaux, *act. env.* pour activité environnementale

Activité	**Outil**	**Diagrammes de classe construits**
Design	3DS-Max	- données de Sortie - données d'Entrée venant de l'act. env. comprenant les données de conception
	Excel	- données de Sortie
Mécanique	ProEngineer	- données de Sortie - données d'Entrée venant de l'act. env. comprenant les données de conception
	Solidworks	- données de Sortie
	Sustainability	- données d'Entrée venant de l'act. env. comprenant les données de conception
	Excel	- données de Sortie
Choix des Mat. et Techno.	CES Eco Audit	- données de Sortie - données d'Entrée venant de l'act. env. comprenant les données de conception
Logistique	EcoTransIT ACV simplifiée	- données de Sortie - données d'Entrée venant de l'act. env. comprenant les données de conception
	Excel	- données de Sortie
Analyse env. globale	Outil interne	- données d'Entrée - données de Sortie
	ACV	- données d'Entrée - données de Sortie

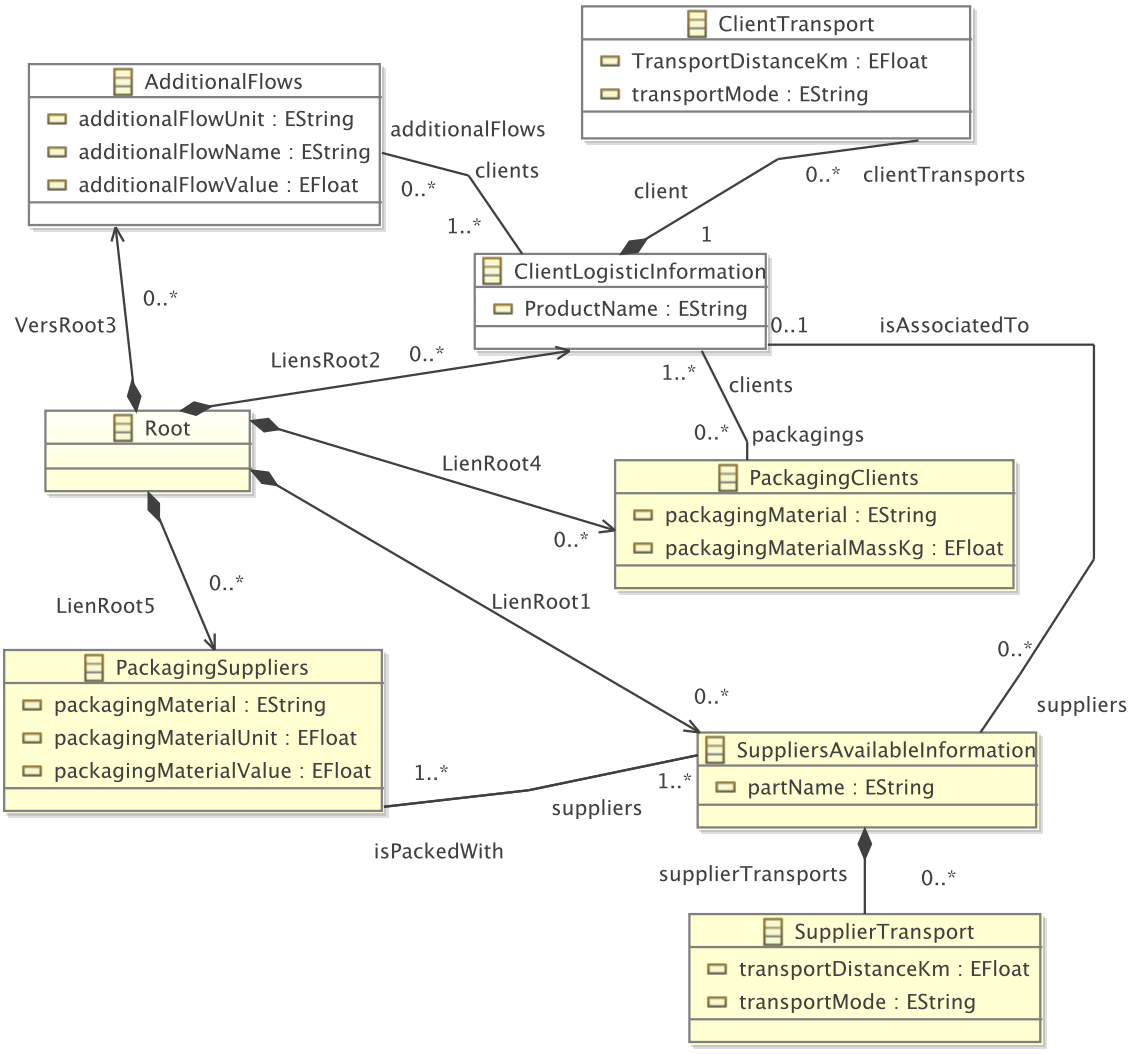


FIGURE 5.13 – Diagramme de classe représentant les données de sortie de l'activité du service logistique et achat.

Eléments clés pour la lecture du diagramme de classe :

- Les données relatives à l'acheminement des produits vers les clients. Ces données sont toutes reliées à la classe "ClientLogisticInformation" : les classes concernant l'emballage, le type de transport et la distance parcourue et les flux additionnels.
- Les données relatives aux fournisseurs, c'est-à-dire qui concernent les pièces détachées qui ont servi à concevoir le produit sur le site de Besançon (où a lieu l'assemblage final du produit). Ces données sont toutes reliées à la classe "SuppliersAvailableInformation" : les classes concernant le type de transport et distance par fournisseur, le détail de l'emballage utilisé par fournisseur.
- La classe *Root*, comme élément de construction du méta-modèle, qui a servi à créer des liens sémantiques entre les données, afin de permettre l'instanciation des méta-modèles.

Suite à la définition de l'ensemble de ces diagrammes de classe présenté en annexe A.10, l'étape suivante présentée ci-dessous consiste à les instancier. Le tableau 5.8 résume les avantages et inconvénients de cette étape.

TABLE 5.8 – Etape 2 du protocole d'application du prototype : difficultés rencontrées lors de la modélisation des méta-modèles

Remarques vis-à-vis de la modélisation des méta-modèles
- grande connaissance nécessaire de l'outil métier (manipulation obligatoire)
- discussion nécessaire pendant la réalisation avec des personnes du métier
+ le questionnaire d'enquête a été suffisamment précis pour pouvoir réaliser les méta-modèles
+ bonne réactivité des industriels pour répondre aux questions
+ disponibilité de plusieurs outils métier en laboratoire de recherche pour essais

Etape 3 du prototype : instanciation des méta-modèles

Les résultats d'enquête ont permis d'établir sur 3 itérations, les données réelles échangées entre les activités, et d'instancier les méta-modèles issus de l'étape précédente. Cette étape est assez simple, puisqu'elle consiste uniquement à compléter les méta-modèles avec les données issues des fichiers métier d'entrée et de sortie des activités. La difficulté réside dans la cohérence chronologique du scénario utilisé pour retracer la circulation des données. Par exemple, il faut au préalable avoir identifié clairement les itérations et classer les fichiers métier relatifs à chaque itération pour chaque outil utilisé.

La Fig. 5.14 illustre un méta-modèle instancié relatif aux données de sortie de l'activité de CAO. Certaines données sont incomplètes (par exemple les attributs grisés ou leur valeur égale à "0.0" du modèle Fig. 5.14). Plus le processus avance dans le temps, plus le

nombre de données formalisées dans ce modèle augmente. L'utilisation des modèles permet en outre de formaliser au plus tôt les informations disponibles. Enfin, les transformations seront réalisées sur les données présentes. Les valeurs manquantes n'empêcheront donc pas les autres transformations d'avoir lieu, mis à part dans le cas où la valeur manquante est nécessaire à un calcul. Ces points sont abordés plus en détail dans la section suivante.

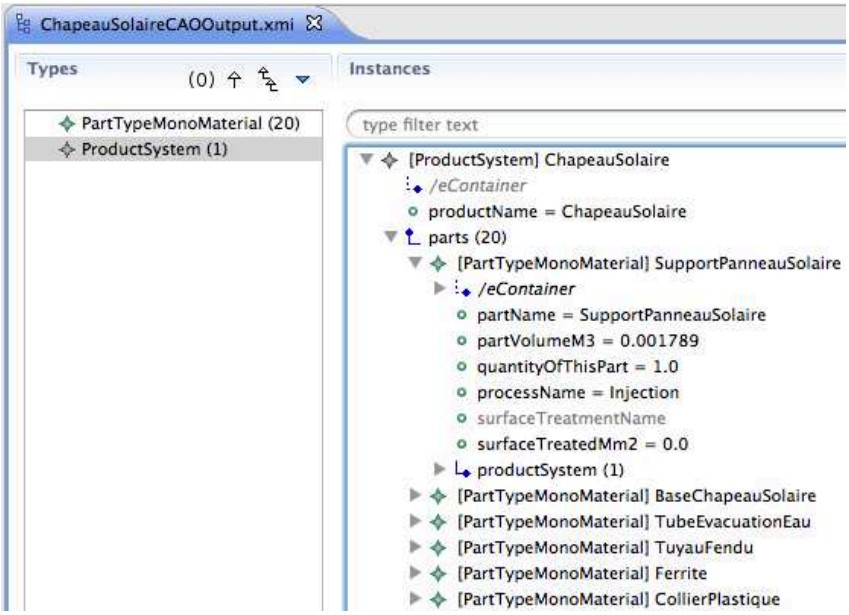


FIGURE 5.14 – Exemple de méta-modèle instancié avec les données réelles
Ici données de sortie de l'outil de CAO, extrait du framework EMF. Les attributs grisés ou leur valeur égale à "0.0" du modèle sont des données par défaut, non remplies.

Lors de cette expérimentation, les données pour instancier les méta-modèles ont été remplies *à la main* sur l'outil de modélisation EMF.

Nous verrons dans la prochaine étape, que ces données peuvent être générées automatiquement en utilisant les projections [Iraqi et al.(2012)]. En effet, les formats d'import et export des outils utilisés dans la réalisation du prototype présenté sur la Fig. 5.17 (Excel, STEP, XML, XMI) sont des formats qui peuvent permettre de faire les projections dans l'espace des méta-modèles, d'une manière automatique.

Le tableau 5.9 présente les avantages et inconvénients de cette étape.

TABLE 5.9 – Etape 3 du protocole d'application du prototype : difficultés et avantages de l'étape de création des modèles

Avantages et inconvénients de la modélisation des instanciations
+ démarche qui consiste "à remplir" les méta-modèles par les valeurs réelles d'une manière automatique si utilisation des projections (objectif à terme)

Etape 4 du prototype : construction des cartes de correspondances entre les modèles

L'établissement des cartes de correspondances peut se faire avec n'importe quel support. Le détail des types de cartes de correspondances proposées lors de cette étude est présenté dans le tableau 5.11. On se réfèrera aux catégories présentées à la section 4.2.2.2.

Fig. 5.15 illustre une carte de correspondances sous la forme d'un fichier excel qui a été réalisé pour représenter et pour définir les équivalences de termes entre la base de données matériaux associés aux outils de choix des matériaux (ici CES) et les outils d'analyse environnementale (ici base de données Ecoinvent). Il est à noter que les autres volets du classeur excel (onglet visible en bas de l'image) présentent les propriétés associées à la base de données matériaux (propriété physico-chimique, mécanique, par exemple), et celles associées à la base de données Ecoinvent (flux primaires d'énergie et de matière première correspondant à l'extraction et la transformation de la matière première pour l'obtention de la quantité de matériaux définie). Il est en effet pertinent à ce stade de garder des liens sémantiques entre les données échangées dans la transformation. Ainsi, le choix du matériau, dans l'outil de choix des matériaux, se fera en analysant son comportement mécanique par exemple (et la conséquence de ce choix sur les autres métiers, possibilités de mise en forme de la pièce, etc.). Alors que dans l'outil d'analyse environnementale, l'évaluation du même matériau se fera en analysant les impacts générés tout au long de son cycle de vie. Dès lors, il est primordial de permettre à l'expert matériaux faisant le choix des matériaux, de croiser les critères d'impacts environnementaux aux critères qu'il maîtrise, d'une manière simple et compréhensible pour lui. Cette opération doit pouvoir être réalisée dans le temps imparti, sinon elle risque d'être évitée. De l'autre côté, pour que l'expert environnement puisse faciliter cette compréhension, il a besoin de trouver les raisons fonctionnelles émanant des choix des autres concepteurs. C'est ainsi que les cartes de correspondances lui permettent dans certains cas d'en connaître la raison. En quelque sorte, **les cartes de correspondances permettent de** *capitaliser* **les liens sémantiques associés aux paramètres échangés entre les activités métier.**

Un autre exemple de transformations de type "calcul" ayant eu lieu à cette étape est celui du calcul automatique de la (distance.masse) associée à chaque trajet. Ce résultat est en effet une donnée d'entrée nécessaire à l'outil d'analyse environnementale. Ce résultat est obtenu par le **calcul automatique de la masse * distance par trajet réalisé par la logistique**, présenté sur la Fig. 5.16.

Dans cet exemple, l'expert environnement a représenté simplement sur fichier texte, le calcul qui faciliterait l'établissement de ses inventaires (données d'entrée d'ACV). Pour chaque donnée utilisée dans la transformation, sont précisés : le nom exact de l'attribut en question (avec le type : flottant, chaîne de caractère, etc.) et l'emplacement de cette donnée dans le méta-modèle (à partir du diagramme de classe relatif : le nom du diagramme et le nom de la classe dans lequel cet attribut se trouve).

Cette illustration d'équivalence montre que certaines transformations génèrent des chaînes de calculs. Sur l'exemple précédent : dans un premier temps la masse associée à chaque sous-composant doit être calculée, ensuite ces masses sont sommées, puis cette somme est multipliée par une distance (opération à effectuer pour chaque mode de transport).

1	Equivalence de base de donnée matériaux, entre les bases de donnése méca/mat/techno et analyse environnementale	
2	CES database	Ecoinvent Database
3		
4	PC	polycarbonate, at plant/kg/RER
5	LLDPE	polyethylene, LLDPE, granulate, at plant/kg/RER
6	LDPE	polyethylene, LDPE, granulate, at plant/kg/RER
7	HDPE	polyethylene, HDPE, granulate, at plant/kg/RER
8	PP	polypropylene, granulate, at plant/kg/RER
9	PS	polystyrene, general purpose, GPPS, at plant/kg/RER
10	PTFE	tetrafluoroethylene, at plant/kg/RER
11	PBT	fleece, polyethylene, at plant/kg/RER
12		REF: Ecoinvent Database, 1997: ISBN 3-905594-38-2
13	REF:Michael F. Ashby, Materials and the environment, eco-informed material choice, 2009, Elsevier	
14	REF: Mike Hashby and Kara Johnson, Material and Design, the art and science of material selection	
15	in product design, BH, Elsevier, 2002, ISBN: 0 7506 5554 2	

Equivalence | PropertiesCES | PropertiesEcoinvent | +

FIGURE 5.15 – Exemple d'équivalences de termes entre la base de données matériaux associées aux outils de choix des matériaux et les outils d'analyse environnementale
Note : CES [Ashby(2005)] pour les données matériaux et base de données Ecoinvent [htt(2010)] pour les données environnementales.

Calcul des distance.masse (en KgKm) du product (= somme des parts) pour compléter les Inputs_LCA :

TransportDistanceKgKm : EFloat (From : Inputs_LCA.ecorediag, Class : ProductTransport)

=

SOMME {Density : EFloat (From: MaterialOutputsV1.ecorediag) *** PartVolumeM3 : EFloat** (From : meca_outputs.ecorediag) *** QuantityOfThisPart : EFloat** (From : meca_outputs.ecorediag) }

(Pour chaque Part composant le Product)

* **TransportDistanceKm : EFloat** (From : Supplier_ClientOutputs.ecorediag, classe : ClientLogisticInformation)

FIGURE 5.16 – Exemple de cartes de correspondances entre plusieurs modèles. Cas du calcul de la masse du composant multipliée par le distance parcourue par trajet.

Suivant la complexité de ces chaînes de calculs il faut pouvoir gérer l'enchaînement des calculs et établir des priorités et renvois de valeurs en cas de blocage.

Le tableau 5.10 résume les avantages et inconvénients de la proposition, rencontrés à cette étape.

TABLE 5.10 – Etape 4 du protocole d'application du prototype : avantages et inconvénients de l'établissement des cartes de correspondances

Avantages et inconvénients de l'établissement des cartes de correspondances
- gérer l'enchaînement des calculs complexes ;
- prévoir le renvoi à des valeurs ou des messages en cas de valeurs nulles ou de blocages des transformations ;
+ simplicité de représentations des cartes de correspondances (classeur excel, texte, schéma, etc.) ;
+ capitalisation des liens sémantiques dans les cartes de correspondances ;
+ caractère incrémental de l'établissement des cartes de correspondances : n'importe quelle correspondance est ajoutée sans modifier l'existant ;
+ les transformations sont définies sur les méta-modèles et non sur les valeurs réelles des attributs (paradigme de la programmation orientée objet et modèle), elles sont applicables sur l'ensemble des données véhiculées par les méta-modèles

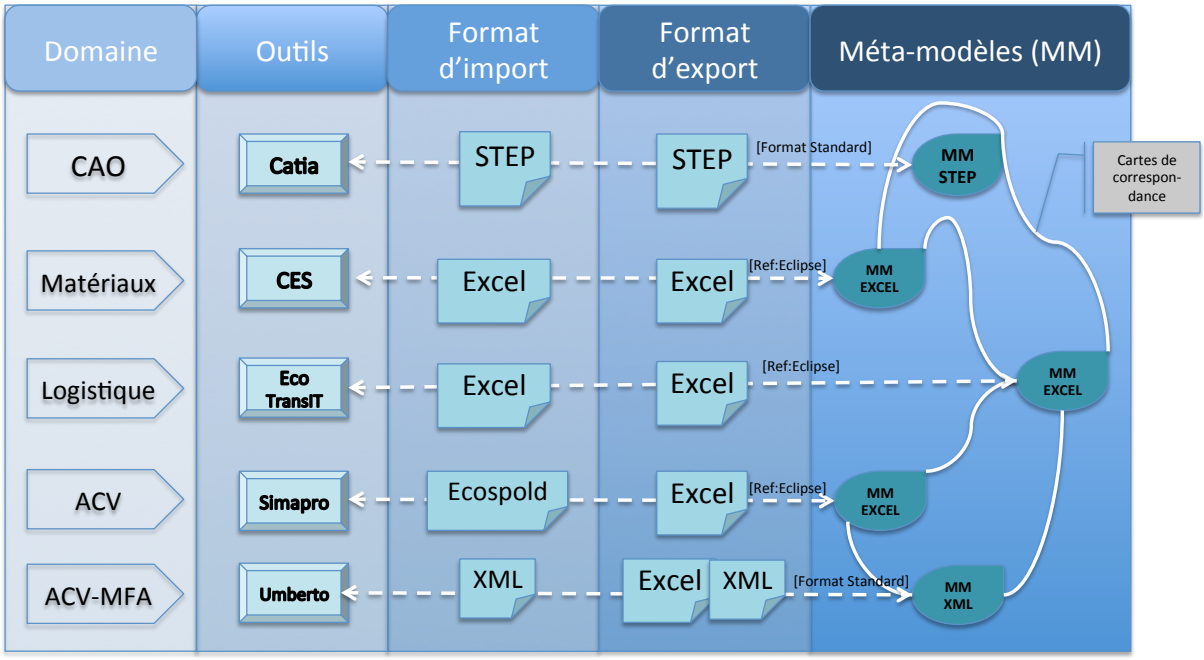
Etape 5 du prototype : codage des transformations

La dernière étape consiste à coder les transformations à partir des cartes de correspondances et des méta-modèles établis dans les phases précédentes. Lors du cas d'étude nous avons collaboré avec un informaticien du laboratoire de recherche, qui a codé les transformations pour réaliser le prototype. Son travail simule celui de l'informaticien en industrie lors de l'application de la méthode FESTivE de création des modèles d'outils environnementaux. L'informaticien de Parkeon a ensuite analysé les implémentations réalisées, afin d'en juger la pertinence dans le cadre de l'entreprise.

Comme il a été explicité section 4.2.2.2 au niveau des caractéristiques techniques des cartes de correspondances entre modèles d'entrée et de sortie, le code a été écrit dans l'environnement EMF en utilisant le langage de programmation ATL. Quelques détails du code généré, ainsi qu'une illustration, sont présentés dans l'annexe A.7.

Le canevas du prototype réalisé à partir des données du projet NTR est présenté sur la Fig. 5.17. Sur la colonne de gauche sont représentés les domaines ou métiers, intervenus dans le projet NTR. L'activité de mécanique et technologie a été divisée en deux activités complémentaires : CAO et matériaux. Sur la deuxième colonne en partant de la gauche sont représentés les outils. Dans les deux colonnes suivantes sont précisés les formats d'import et d'export relatifs. La colonne de droite se positionne au niveau des

méta-modèles. Entre chaque méta-modèle représentant les données de sortie ou d'entrée de l'outil métier, des cartes de correspondances ont été définies.



[Ref:Eclipse] *cf.* site internet de Eclipse : http://www.eclipse.org/modeling/emf/, document téléchargeable permettant de réaliser des opérations d'injection extraction à partir d'Excel ;
[Format Standard] renvoie vers la norme qui définit le format.

FIGURE 5.17 – Canevas des transformations à coder, du prototype réalisé dans le projet NTR

Synthèse de l'étape de codage des transformations

Chaque type de transformation se retrouve dans la liste des transformations établies dans le cadre du projet NTR, comme l'illustre le tableau 5.11.

Lors de cette expérience de codage des transformations, plusieurs échanges entre l'informaticien et les concepteurs [13] ont été nécessaires.

Cette étape nécessite en effet :

1. **Une capacité de compréhension de l'informaticien des cartes de correspondances** qui correspondent à la spécification des transformations

   Par exemple : lors de cette expérimentation l'informaticien, du fait qu'il ne soit pas impliqué dans la conception de produits étant externe à l'entreprise, ignorait qu'un *product* est composé de plusieurs *parts*. De même qu'il n'avait pas les connaissances

13. Lors de cette étape de l'expérimentation, les concepteurs sont incarnés par la personne qui a synthétisé les résultats d'enquête : interview et documents étudiés, qui possède par ailleurs des connaissances en conception mécanique et en éco-conception, relayée sur le terrain par l'expert environnement de Parkeon, et pouvant poser des questions directement aux concepteurs si besoin. Dans cette expérimentation, nous incarnons donc les concepteurs après collecte des données.

TABLE 5.11 – Illustration de chaque type de transformation établi dans le cadre du projet NTR

Type de transformations	**Exemples issus du projet NTR**
Allocation simple	Transformation la plus courante, par ex. : -Nom des pièces et arborescence produit -Mode de transport -etc.
Equivalence de base de données	Equivalence de terme entre les bases de données : -données matériaux (données interne/Ecoinvent) -données relatives aux modes de transport (EcoTransIT ou Excel / Ecoinvent)
Calculs	Opérations de calcul, fonctions suivantes : -masse (densité*volume) par élément monomatériau -(masse*distance) par élément transporté (pièce) -(masse totale du produit*distance) pour le transport final du produit chez le client

suffisantes pour vérifier les liens de cardinalité entre les pièces et le product (appartenance, de 1 part vers plusieurs products, ou de plusieurs parts vers 1 product, etc.). Cela peut entraîner des erreurs dans le code.

2. **Une vérification minutieuse des concepteurs** ayant rédigé les cartes de correspondances, de la signification des transformations codées, afin d'éviter les erreurs.

   Par exemple : sur la Fig. A.5 les helpers renvoient à la valeur "0" lorsque la valeur numérique associée à la densité est manquante, ou lorsqu'il n'y a pas la donnée numérique associée au volume, dans les modèles, lors de la transformation entre modèles (donc sur des instances de méta-modèles). Or, lors du premier code généré par l'informaticien, ce dernier avait renvoyé la valeur numérique "1". Ceci avait pour conséquence de fausser le résultat du calcul de la masse, puisque nous obtenions après compilation, des valeurs de masses égales parfois à la densité ou au volume (si le volume était manquant ou respectivement si la densité était manquante). Il était alors difficile de voir l'erreur de calcul. Après vérification de la signification du code avec l'informaticien [14], nous avons décidé ensemble le renvoi à des valeurs "0". Mais il est tout à fait possible de renvoyer à du texte, par exemple "Résultat non disponible ; raison : tel modèle est non renseigné".

Ces trois points montrent l'intérêt de développer les transformations en utilisant une méthode de management de type Spirale (*cf.* section 4.2.1) : cycles itératifs courts, méthode incrémentale ; validation étape par étape par l'utilisateur ("user centered development").

14. Il s'agit de participer à une réunion pendant laquelle l'informaticien passe en revue les différentes transformations en expliquant verbalement leur signification pratique.

TABLE 5.12 – Etape 5 du protocole d'application du prototype : avantages et inconvénients lors du codage des transformations

Avantages et inconvénients lors du codage des transformations
- une capacité de compréhension de l'informaticien des cartes de correspondances ;
- vérification minutieuse des concepteurs des transformations générées ;
+ méthode itérative cohérente avec la méthode type Spirale ou Agile (*cf.* section 4.2.1) ;
+ le codage des transformations peut se faire d'une manière incrémentale et hétérogène
+ facilité de modifier localement une règle de transformation ou un *helper* après codage ;

Conclusion des étapes de création du prototype : implémentation de la bibliothèque de modèles (Méthode FESTivE)

Une fois les étapes de 1 à 5 du protocole déployées pour réaliser le prototype, nous obtenons :

- une série de modèles de données de sortie des outils issues des différents domaines impliqués (design, mécanique et technologie, logistique, ergonomie), appelés outils métier des concepteurs *locaux* ;
- un modèle d'entrée et de sortie relatif à l'outil d'analyse environnementale utilisé sur le projet NTR, ici l'ACV, appelé outil *global* ; ainsi que les transformations relatives à la fédération des outils métier des concepteurs *locaux* avec l'outil d'analyse environnemental *global*.

Ces modèles et transformations associés sont désormais classés dans la bibliothèque de modèles d'outils *globaux et locaux* de Parkeon, qui pourra potentiellement être partagée dans un esprit communautaire relatif à l'ingénierie de produit.

5.1.4.2 Maquettes expérimentales

Pour chaque métier, plusieurs maquettes ont été réalisées pour mettre en situation l'utilisation de l'outil pour les métiers, sur plusieurs itérations :

- **Activité de conception (CAO) (Concepteurs mécaniques) :** maquette de l'outil ProEngineer (utilisé par les concepteurs de Parkeon) ; SolidWorks avec le module *Sustainability* (non utilisé par Parkeon mais connu) (illustration sur la Fig. 5.20)
- **Choix des matériaux et des technologies (Concepteurs mécaniques) :** maquette de l'outil CES, avec le module *Eco Audit*, non utilisé par Parkeon mais connu (illustration Fig. 5.18)
- **Activité de Logistique et service Achat (agents des services achat et logistique) :** maquette de l'outil EcoTransIT (illustration Fig. 5.18)
- **Activité d'analyse environnementale globale (expert environnement et énergétique) :** maquette de l'outil d'ACV Simapro (illustration Fig. 5.19)

– **Métiers informatiques (administrateurs CAO, PLM et ERP) :** maquette de EMF où sont visualisés les méta-modèles, leurs instanciations et les transformations ;

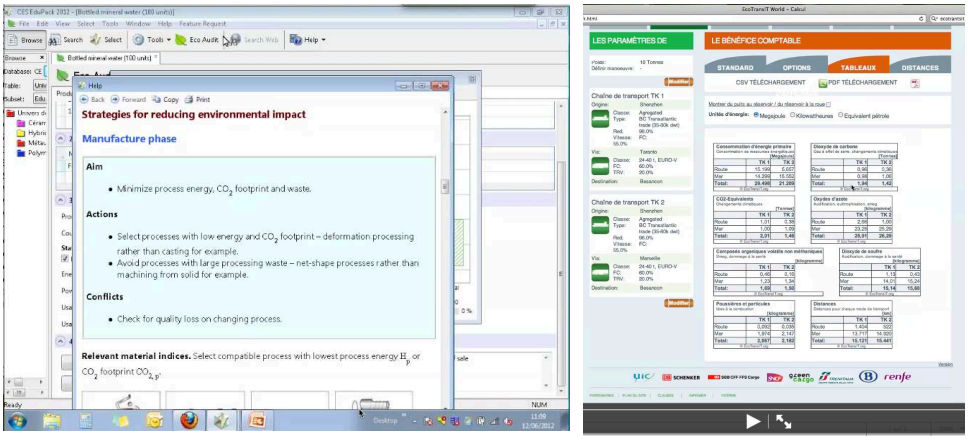


FIGURE 5.18 – Illustration par copies d'écran des maquettes réalisées sur l'outil CES (à gauche) et EcoTransIT (à droite)

5.1.5 Validation des apports conceptuels et technologiques

5.1.5.1 Introduction et critères de validation

Nous rappelons que nous nous positionnons dans cette recherche sur la définition de la "recherche empirique" au sens de [Flynn et al.(1990)]. Les données utilisées dans ses recherches sont issues des observations pratiques sur des cas d'étude industriels. La recherche empirique se distingue principalement des recherches conduites en laboratoire qui sont exclusivement fondées sur des modélisation mathématiques.

Dans notre cas d'étude NTR, chaque étape menant à la réalisation du prototype a permis d'expérimenter la méthode de création des modèles. Une série de questions a été posée aux différents participants du projet NTR et à l'informaticien de recherche afin d'expérimenter plusieurs critères relatifs à l'utilisation des méthodes : leur adéquation aux contraintes liées au milieu industriel et aux caractéristiques du projet, l'implémentation des modèles. Le tableau 5.13 présente les critères testés, relativement aux objectifs du démonstrateur présenté au début de cette partie.

5.1.5.2 Questions posées lors des expérimentations

Avant de montrer les maquettes (*ie.* films), quelques informations sont données aux métiers. Pour chaque interview, les étapes suivantes ont été suivies :

– **Le positionnement du problème** : les problèmes rencontrés et les besoins relatifs à chaque métier. Ils ont été identifiés lors du traitement des résultats d'enquête effectuée au début du projet. Ce rappel permet de les valider.
– **Glossaire des termes employés** : permet d'éviter toute confusion.

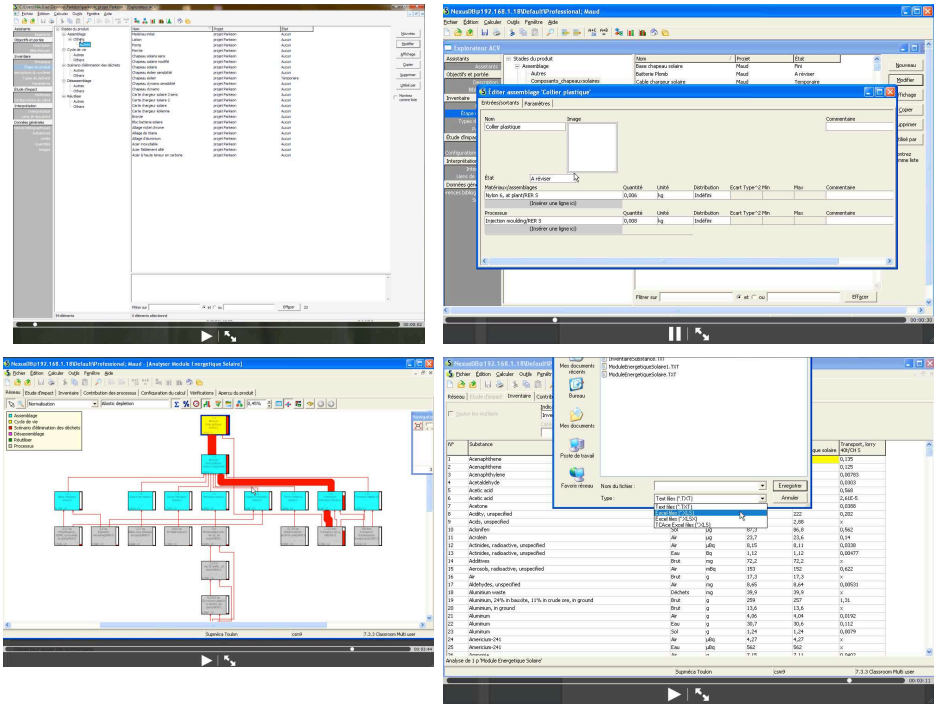


FIGURE 5.19 – Illustration par copies d'écran des maquettes réalisées sur l'outil SimaPro

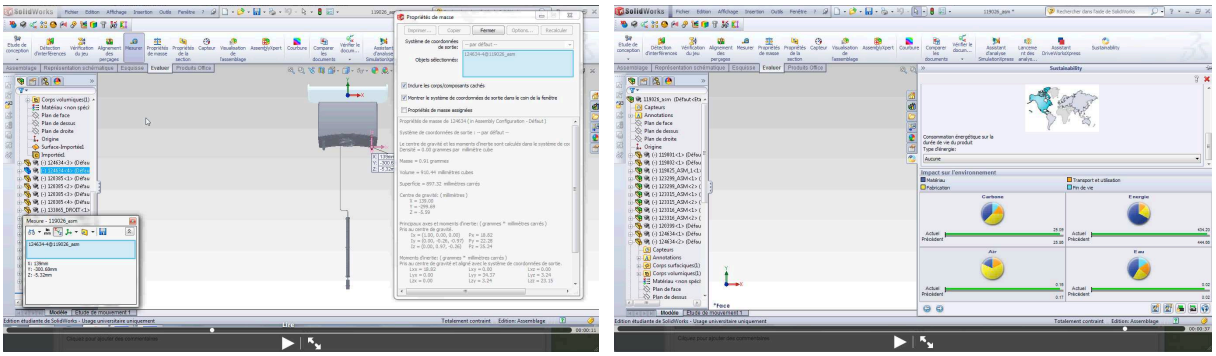


FIGURE 5.20 – Illustration par copies d'écran des maquettes réalisées sur l'outil CAO (ici SolidWorks disposant du module *Sustainability*)

TABLE 5.13 – Critères d'expérimentation de la proposition sur le projet NTR en fonction des objectifs de la proposition
Note : "env." pour *environnement*, "fed." pour *fédération*.

Objectifs	**Sous-objectifs**	**Critères**
Expérimenter et valider la méthode de création de la bibliothèque de modèles et la méthode d'utilisation de la bibliothèque de modèles en industrie	- application des étapes de la méthode - critiques des informaticiens - illustration de la proposition aux métiers : conception et test des maquettes - critiques des industriels	- grille des avantages et inconvénients - point de vue expert env. métiers locaux et informaticiens * réticences * avantages * opportunités
valider les propriétés fondamentales de la proposition	Mise en situation avec les maquettes	La proposition permet-elle : -de s'adapter à la variabilité contextuelle que nécessite les projets d'éco-conception chez Parkeon -de faciliter les échanges des données entre l'analyse env. globale et les concepteurs locaux -de lier les paramètres env. aux paramètres des concepteurs

- **Présentation de la proposition** : fédération [15], l'approche MDE, la méthode proposée (recueil des critiques apportées sur la proposition).
- **Présentation des films du métier par métier interviewé**, recueil des critiques et réponses aux questions posées.

Certaines questions posées pour recueillir l'avis critique des interviewés utilisent l'échelle de Likert [16]. Cette échelle de mesure est communément utilisée en psychologie sociale, psychologie du travail, ou encore dans les études de marché. Elle contient cinq niveaux (présentés ci-dessous) permettant à la personne interrogée d'exprimer son accord ou désaccord, par rapport à une affirmation qui lui est posée. L'intérêt du nombre impair de niveaux de réponse est de ne pas forcer l'avis positif ou négatif de la personne interviewée.

Dans la suite du texte, les réponses de type grille de Likert sont notées *pttd/pd/m/d/ttd*, pour :

1. pas du tout d'accord
2. pas d'accord
3. ni pas d'accord, ni d'accord
4. d'accord
5. tout à fait d'accord

Questions posées aux métiers de la CAO, technologie et choix des matériaux :

- Rappel des besoins : *quelles sont les données que vous aimeriez avoir des autres métiers pour faciliter votre travail et celles que vous aimeriez donner aux autres métiers pour faciliter leur travail ?*
- *Vous perdez du temps à rechercher les matériaux qui sont disponibles sur la base de données du PLM, par rapport à la dénomination du matériau dans votre base de données CAO. Vous aimeriez que cette équivalence + échanges se fassent automatiquement, juste en appuyant sur "actualiser les données en cours" ? pttd/pd/m/d/ttd.*
- *L'action que vous avez à faire pour publier les données est-elle facile et rapide ?*
- *Est-ce que l'échange dynamique vous paraît un moyen rapide et efficace d'échange d'informations avec l'ingénieur environnement ?*
- *Est-ce que l'échange dynamique vous fait gagner du temps par rapport au système PLM pour l'échange des données nomenclature ?*
- *Est-ce que l'échange dynamique (réalisé en parallèle) vous ennuie moins que de rentrer les données sur le PLM ?*
- *Est-ce que cet échange vous rend plus réactif dans un cycle d'itération ?*
- *Vous permet d'anticiper les besoins de l'autre plus facilement ?*

Questions posées aux experts environnement et énergétique :

- *Est-ce que l'échange dynamique vous paraît un moyen rapide et efficace d'échanger des informations avec les autres métiers ?*

15. Des informations techniques sur la génération des transformations sous EMF sont rajoutées, seulement pour les informaticiens.
16. Du nom de Rensis Likert, psychologue américain (1903-1981)

- *Est-ce que l'échange dynamique vous fait gagner du temps par rapport au système PLM pour l'échange des données nomenclature ?*
- *Est-ce cet échange vous rend plus réactif dans un cycle d'itération ? Réactif dans le sens où il est possible de répondre d'une manière adaptée rapidement aux métier de l'autre (sur une itération).*
- *Est-ce que l'échange dynamique vous permet d'anticiper les besoins de l'autre plus facilement ?*
- *Quel échange de données pourrait être automatisé comme cela plus facilement ?*

Questions posées au service achat et logistique :

- *Connaissiez vous l'outil EcoTransIT ? Oui / vaguement / jamais entendu parlé*
- *L'expert environnement pourrait vous apporter des précisions si besoin et des explications, car cet outil pourrait transmettre dynamiquement des informations à l'outil utilisé par l'expert environnement. Qu'en pensez-vous ?*
- *Est-ce que cet échange vous rend plus réactif dans un cycle d'itération ? pttd/pd/m/d/ttd.*
- Est-ce que cet échange vous permet d'anticiper les besoins de l'autre plus facilement ? *pttd/pd/m/d/ttd.*
- *Avis général (utilité, efficacité, réticences, ...), points positifs, points négatifs et suggestions.*

Questions posées à l'informaticien administrateur CAO :

- *Par rapport à vos connaissances des besoins des concepteurs CAO et du système d'information de l'entreprise, la fédération des outils de CAO avec les outils de l'analyse environnementale, correspond-elle à un besoin ?*
- *Est-ce que l'échange dynamique vous paraît un moyen rapide et efficace d'échanger des informations entre les concepteurs CAO et l'ingénieur environnement ?*
- *Est-ce que l'échange dynamique vous fait gagner du temps par rapport au système PLM pour l'échange des données nomenclature ?*
- *Est-ce que l'échange dynamique (réalisé en parallèle) vous ennuie moins que de rentrer les données sur le PLM ?*
- *Est-ce cet échange vous rend plus réactif dans un cycle d'itération ?*
- *Vous permet d'anticiper les besoins de l'autre plus facilement ?*
- *Avez-vous déjà développé la fédération entre outils ? De quelle manière ?*
- *Quel échange de données pourrait être automatisé avec la fédération ?*

Questions posées et réponses de l'informaticien général :

- *Avez-vous déjà développé la fédération entre outils ? De quelle manière ? Connaissez-vous des cas où cela a été développé ?*
- *Quel est votre avis sur la fédération des outils ? Avantages et défauts techniques*
- *La méthode de création pourrait être techniquement utilisée chez Parkeon ?*
- *Cette méthode serait difficile à mettre en oeuvre ?*

Les réponses aux questions sont présentées dans l'Annexe A.8.

5.1.5.3 Retour d'expérience sur l'utilisation du prototype et de la maquette

Le tableau 5.14 synthétise les illustrations après application de la méthode sur le projet NTR.

La proposition sert de base à l'élaboration des maquettes servant à la validation.

TABLE 5.14 – Illustrations après application de la méthode sur le projet NTR
Note : "env." pour environnement(ales/aux) ; "co." pour connaissances ; "an." pour analyse, E pour "entrée" et S pour "sortie".

Type d'illustrations	**Problèmes rencontrés** *initialement*	**Proposition des métiers internes** *intialement*	**Illustrations proposées** *expérimentales*	**Vérifications des propriétés**
Du local à l'act. env. globale	Les experts env. : -identification des données nécessaires difficiles ; -et l'obtention	-demander des informations par mail (.txt, .xls) ; -aller physiquement demander les informations	-formalisation des données E + fédérer les outils à partir des cartes de correspondance	-adaptation aux différents contextes : outils et co. métiers ; -données nécessaires synchronisées aux données dispo.
de l'act. env. globale au local	Les métiers locaux ont des difficultés à : -comprendre l'an. env. ; -anticiper les réductions d'impacts possibles	Ont développé un outil d'ACV simplifiée + lignes directrices	utiliser l'ACV détaillée pour vérifier l'outil d'ACV simplifié ajout d'outils au besoin	-le détail et la qualité des informations transmises sont adaptés aux activités.

Retours des concepteurs mécaniques CAO et Technologie

Les concepteurs CAO et les concepteurs Technologie interrogés, évaluent leur travail en deux tâches principales : 20% correspondant au "métier CAO", et 80% correspondant à un travail de bureautique. Or, ils considèrent que leur savoir-faire n'apporte aucune valeur ajoutée dans le travail de bureautique, consistant à manipuler des données et consolider les extractions d'informations redondantes. La proposition se positionne donc sur une problématique réelle de leur métier, celui du SI assurant les échanges d'informations entre leur activité et les autres services de l'entreprise.

Le Tableau 5.15 présente les points positifs et négatifs qu'ils ont identifiés par rapport à notre proposition après avoir visionné les maquettes (outil ProEngineer, SolidWorks).

Les concepteurs mécaniques CAO et les concepteurs spécifiques pour le choix des technologies, ont ensuite proposé plusieurs suggestions pour répondre à la spécificité de leur métier :

- **Disposer d'un terminal** permettant de savoir si la transformation est bloquée. *Remarque* : si oui, pour quelle raison : "non disponible", valeur "non conforme" n'ayant pas d'équivalent défini, etc. Dans certains de ces cas (valeurs non conformes) faire évoluer la transformation avec l'aide de l'informaticien.
- **Définir une liste des données à renseigner au plus tôt** : utiliser par exemple l'outil "check" de ProEngineer, permettant de rappeler au concepteur que certaines

TABLE 5.15 – Avantages et réticences concernant la proposition de la part des concepteurs mécaniques CAO et choix des technologies

Réticences	**Avantages**
- Si les transformations deviennent complexes - Automatisme des transferts d'informations sans contrôle direct de ce qui est envoyé - Pouvoir résoudre une situation de"blocages" d'informations	- Conservation du lien entre les données relatives aux métiers - Partage d'informations - Définition des informations à partager - Maintenance dynamique des informations, due à une maintenance locale des outils métier - Enrichissement incrémental des modèles et des transformations - Echanges simples - Jamais en interférence avec le métier de la conception donc pas besoin de se confronter directement avec la personne pour des échanges routiniers - Indicateurs en liens avec les paramètres de conception permettant de co-construire avec l'expert environnement de la connaissance liée aux paramètres métiers respectifs - Très réactifs sur petites itérations - Evite d'avoir à tout générer à la fin, vue la pression croissante des délais en conception - Imaginer appliquer cette méthode pour l'analyse globale des coûts

informations peuvent être renseignées avant la fin du projet (indicatif, pas impératif). Permet également de faire un suivi des paramètres remplis.
- **Etendre la démarche au Redesign To Cost** : en définissant des cartes de correspondances qui permettraient de garder les liens *fonctionnels* du produit, même à la fin du processus de conception. En fin de processus, la *vue fabrication* précède la vue produit (fonctionnelle).
  Elle comprend les informations nécessaires à la fabrication du produit (F-BOM), les liens relatifs aux contraintes fonctionnelles liées à la conception du produit sont supprimés (et donc impossibilité de remonter aux besoins). Dès lors, lorsque les analyses de coûts sont réalisées, il ne subsiste que les liens permettant de faciliter la production. Il conviendrait donc de déployer des outils d'analyse de coût (**LCC**) dès les phases amont du processus, en travaillant sur des itérations courtes, à l'image de la proposition faite pour l'analyse environnementale globale. Cette démarche pourrait faire partie d'une analyse de la valeur globale, appliquée au processus en cours.

La proposition demande un investissement initial non négligeable, puisqu'il faut définir l'ensemble des cartes de correspondances. L'informaticien, prévoit également le temps de coder les transformations. L'informaticien juge ce temps investi en fonction de la difficulté à établir les cartes de correspondances. Par la suite, l'action à réaliser pour publier les données est jugée facile et rapide pour chaque métier. En terme d'implémentation, le système est jugé facile à faire évoluer : modularité et incrémentalité du code.

Retours de l'informaticien, administrateur CAO

L'informaticien et administrateur CAO a une bonne connaissance du métier de CAO, tout en étant informaticien de coeur de métier. D'après lui, la proposition est assez théorique mais souhaitable. La méthode FESTivE est applicable. Il rejoint l'avis des concepteurs CAO, vis-à-vis de l'inadéquation entre leur savoir-faire et le fait de rentrer les informations manuellement dans le PLM. De plus, le PLM ne leur transmet aucun retour venant des métiers utilisant les informations qu'ils ont renseignées. Le tableau 5.16 présente les points positifs et négatifs identifiés par l'informaticien, administrateur CAO, par rapport à notre proposition après avoir visionné les maquettes (ProEngineer, SolidWorks et EMF pour les transformations).

L'administrateur CAO a ensuite proposé plusieurs perspectives :
- **Utiliser la méthode FESTivE pour faire un couplage Analyse du cycle de vie environnementale et coût : Design To Environment et Design To Cost**. Aujourd'hui ces outils de chiffrages fonctionnent uniquement *a posteriori* (par exemple, l'outil développé par le CETIM). En utilisant la fédération, les concepteurs pourraient anticiper sur des cycles très courts, les coûts induits du produit en cours de développement. Ce serait donc une stratégie de Design To Cost et non pas de Redesign To Cost, bien plus contraignante et coûteuse.
- **En phase avec l'évolution des mentalités des éditeurs de logiciels** : d'après lui, les éditeurs rencontrent un nombre croissant de cas où le "tout intégré" ne fonctionne pas, car les entreprises ont développé un parc de logiciels hétérogène. Ils doivent

TABLE 5.16 – Avantages et réticences concernant la proposition de la part de l'informaticien, administrateur CAO

Réticences	**Avantages**
- La proposition est assez théorique - Le retour sur investissement sera fonction du volume de transformations à créer	- Permet au concepteurs de donner un retour au plus tôt - L'aspect itératif est à bien mettre en avant : avoir des échanges sur des cycles itératifs très rapides, très courts - Dynamisme dans le choix de l'outil d'analyse environnementale - Evolution incrémentale - Pas forcément de frein psychologique sur le fait de publier des informations en cours de processus, au contraire, pour les concepteurs c'est positif de n'avoir à s'occuper que des données qui les concernent - Proposition répondant à un réel besoin

dès lors intervenir dans ce contexte hétérogène. Améliorer la capacité à échanger avec les autres éditeurs pourraient leur ouvrir des parts de marché et leur garantir une compétitivité.

Pérennité de la proposition

D'une manière générale, l'expert environnement pense que l'établissement des différents modèles au travers des étapes de la méthode FESTivE, ne devrait pas poser de problème puisque chacun maîtrise son outil. Par contre, les liens avec les informaticiens peuvent être plus difficiles à établir. En effet, le choix de l'informaticien se fait en fonction du parc informatique à administrer, par métier *local* (CAO par exemple) ou regroupant plusieurs métiers *locaux* (PLM par exemple). L'administrateur *local* a souvent une double casquette d'informaticien et du métier *local* concerné. Donc réaliser les modèles de données, des cartes de correspondances, ainsi que du codage de transformations pourrait s'inscrire dans son périmètre de travail. Ceci lui permet ensuite de faire évoluer les modèles. Par rapport aux besoins identifiables dans Parkeon, **la pérennité** des solutions de fédérations proposées sera fonction des paramètres suivants :

- **La personne en charge de l'administration des solutions de fédération est clairement identifiée** : administrateur *local* et/ou *global*.
- **La capacité des informaticiens à comprendre des modèles anciens** : l'UML est un langage unifié et suffisamment simple à comprendre pour de nouveaux informaticiens.

- **La capacité de faire évoluer les modèles** : n'importe quelle nouvelle transformation peut être ajoutée à l'existant. Le système présente l'intérêt de pouvoir être hétérogène (plusieurs langages utilisés pour des transformations différentes).
- **La modularité du système** : le système est modulaire, il s'adapte aux nouvelles configurations nécessaire, suivant l'évolution du parc informatique et des contraintes de conception.

Donc *a priori* ces éléments sont réunis pour que la proposition puisse être pérenne dans l'entreprise.

Par rapport à notre proposition de fédération, les ETL permettent aussi une gestion de la cohérence des données métiers (grâce à l'utilisation uniforme des méta-modèles et des liens qu'ils entretiennent). Par contre, les ETL ne permettent pas un découplage métiers/technologies aussi intéressant (avec gestion des connaissances indépendantes des outils métiers utilisés) ; ni une maintenance simplifiée et une meilleure évolutivité (langages de modélisation déclaratifs et extensibles).

Par rapport au déploiement de la proposition chez Parkeon, le responsable *Information System* pense que sa mise en oeuvre peut être difficile, compte-tenu des applications existantes relativement anciennes. Le parc informatique actuel est hétérogène et comporte des logiciels qui ne permettent pas toujours d'exporter les données en formats textuels, XML, STEP ou Excel. Cela pourrait être couteux s'il fallait réaliser un API pour chaque outil différent. En réalité, nous avons montré que pour le cas d'étude NTR, pour les phases de conception préliminaire et détaillée, les échanges de données sont effectués par des fichiers Excel, ou des fichiers aux formats STEP et XMI. Ce qui facilite l'utilisation des API puisqu'ils sont disponibles.

La méthode FESTivE dans sa partie de création des bibliothèques de modèles pourrait, d'après le responsable être techniquement utilisée chez Parkeon. Ces affirmations vont dans le sens de l'administrateur CAO. L'informaticien, administrateur CAO pense en revanche, qu'elle serait difficile à mettre en oeuvre sans l'engagement stratégique de l'entreprise. Pour lui, le principal frein viendrait plutôt des organes de direction, qui doivent impulser le changement au niveau stratégique, pour qu'il soit appliqué dans la tactique et en pratique au niveau des concepteurs.

Critique de la proposition par l'expert environnement

L'expert environnement juge que la proposition répond à un réel besoin. Il suffit pour s'en convaincre d'observer le nombre d'outils Excel réalisés par les différents métiers pour formaliser et échanger des informations entre eux.

Tableau 5.17 présente les points positifs et négatifs identifiés par l'expert environnement et énergétique, après avoir étudié le prototype et l'ensemble des maquettes réalisées, sur deux boucles itératives (ProEngineer, SolidWorks et EMF pour les transformations, Simapro, EcoTransIT et CES).

L'entretien a également permis de retenir deux aspects importants selon lui :

- **Disposer d'un terminal permettant de visualiser le statut des transformations en cours** : l'enchaînement des calculs, localiser les blocages éventuels et avoir un moyen de demander ou de renseigner des informations pour améliorer l'en-

TABLE 5.17 – Avantages et réticences concernant la proposition de la part de l'expert environnement

Réticences	**Avantages**
- Déporte la maîtrise des informations dans les échanges sur l'informaticien - Sans terminal permettant de visualiser les états des échanges, risque *d'être dans le flou* - Manque de visibilité sur l'effort à fournir pour la maintenance et l'évolution du système - Appréhension sur façon de gérer les résultats différents proposés par les outils locaux (relatifs aux hypothèses de chaque contexte) par rapport aux résultats d'ACV - Complexité de mise en oeuvre, définition du premier niveau d'implémentation pertinent	- Chaque métier est libre de choisir ses outils : pas de contrainte de choix de l'outil relatif à son intégration dans le parc existant (plus de souplesse) - Plus de transparence dans le choix des outils - Plus de transparence dans les données manipulées - Implémentation incrémentale (choix de parties de méta-modèles à connecter - Demande moins d'investissement financier et de ressource humaine - Aide au pilotage des objectifs environnementaux durant toute la durée du projet

chaînement sur l'itération suivante, prévoir dans les transformations des renvois à une valeur d'approximation, etc.
Remarque : cette réflexion est relative à la "trace des processus de transformations", faisant l'objet de recherches actuelles dans notre laboratoire de recherche notamment.

- **Anticiper la conservation des liens sémantiques associés aux données** : peut demander un moment de test et de rodage, d'où l'idée de travailler sur des itérations courtes et de vérifier que les transformations ne posent pas de problème au fur et à mesure. Par exemple, la définition des liens entre les paramètres environnementaux et les paramètres métier *locaux* peut demander une validation par le métier en "réel".

Enfin, l'expert environnement a formulé des cartes de correspondances spécifiques aux analyses environnementales auquel il est confronté. Ces propositions sont relatives d'une part, au calcul de la balance énergétique du système et d'autre part, au calcul du taux de recyclabilité des produits :

- **Calcul global de la balance énergétique du produit en cours de conception** : nécessite la valeur de l'énergie entrant (Ee). (Ee) est dépendant des facteurs suivants : la localisation, le rendement du panneau solaire paramétré par sa technologie, le rendement du chargeur, le rendement de la charge de la batterie paramétré par le type de batterie, et le rendement de charge minimale, de la température de l'élément, et enfin, du courant de charge. Certains de ces paramètres sont évalués à l'aide de mesures sur le terrain (par exemple la température) ou par des données de géo-localisation (taux d'ensoleillement), des données fournisseurs (spécifications), ou encore, des données mesurées en atelier (rendement de charge minimale).
  D'autre part, la consommation du terminal est un facteur important de la balance énergétique.
  Pour effectuer le calcul d'un manière automatique, il faut définir les cartes de correspondances de type calcul, entre l'ensemble des modèles issus des différents paramètres nécessaires à la réalisation du calcul issu des différentes sources.
  Ainsi, grâce au système mis en place, dès les phases amont de la conception, l'expert environnement réalise des analyses d'impacts potentiels, relatifs à la balance énergétique du produit des différents concepts en cours. Il anticipe les besoins des métiers *locaux* (en fournissant des supports informationnels (technologies, lignes directrices, guide, etc.), des résultats d'analyses spécifique) pour garantir l'objectif énergétique de départ.

- **Calcul global du taux de recyclage du produit en cours de conception** : se calcule par l'agrégation de l'ensemble des taux de recyclage élémentaires (masse et matière des éléments composants le produit). Chaque taux théorique est pondéré par des critères spécifiques liés aux filières de recyclages (incluant le démontage, broyage, tri et valorisations différenciées), aux rendements, ou encore par la réalité du terrain (perte, spécificité, etc.). Ici encore les données viennent de différentes sources.

Plusieurs transformations seront nécessaires, à la fois des calculs, et d'équivalences de bases de données. Enfin, plusieurs fonctions pourraient être pré-définies pour des scénarios de fin de vie différents.

Ces deux exemples de calculs prédéfinis alimentent une base de données de fonctions définissant des transformations pouvant être nécessaires au cours des projets de conception des produits. L'avantage est de capitaliser sur l'ensemble des projets, voire en parallèle lors du déroulement des projets les fonctions possibles pour traduire le calcul spécifique éventuel d'un paramètre de conception.

De plus, ces transformations prédéfinies associés aux différents modèles (dont les données réelles peuvent être capitalisées au cours des projets), sont couplées avec les bases de données relatives aux outils d'ACV (par exemple, en couplant avec les bases *Ecoinvent*), afin de calculer l'impact environnemental de la fonction "alimenter en énergie", ou "utiliser des matériaux recyclés".

5.1.6 Validation des objectifs O1, O2 et O3

5.1.6.1 Validation de la capacité de création et d'utilisation de la bibliothèque de modèles en industrie (O1) : méthode FESTivE

Les résultats des tests effectués sur les prototypes et les maquettes permettent de conclure que les étapes de la méthode FESTivE s'enchaînent d'une manière cohérente, sans présenter de difficultés particulières. La génération du code par l'informaticien du laboratoire lors de la création du prototype ne présente aucun obstacle technique ou pratique particulier. Les principales réticences et les avantages émis par chaque métier ont été synthétisés dans les tableaux précédents.

L'application de la méthode FESTivE de création de la bibliothèque de modèles et de sélection des modèles dans la bibliothèque pour déployer le processus de conception, permet de fédérer les outils d'analyse environnementale et les outils de conception tout au long du processus de conception.

5.1.6.2 Validation de la praticité de la méthode FESTivE en industrie (O2)

Les perspectives émises par les métiers interviewés montrent que la proposition a été bien assimilée. La méthode FESTivE est adaptée au milieu industriel. Les implémentations demandent un investissement progressif (notamment en terme d'apprentissage). Les implémentations sont réalisées de manière incrémentale par les informaticiens et les métiers, sur un modèle de développement de type méthode Spirale, couramment utilisé dans le milieu du génie logiciel. La proposition reposant sur des principes communs à la fédération, l'implémentation des transformations au coeur du système d'information est modulaire et flexible.

5.1.6.3 Validation sur la capacité de la méthode FESTivE à répondre aux propriétés fondamentales (O3) : P1, P2 et P3

Augmentation générale de la capacité de réactivité des concepteurs vis-à-vis de la composante environnementale

La **Réactivité** est a prendre au sens de la capacité de répondre rapidement et d'une manière adaptée aux autres métiers.

Unanimement, les métiers jugent que leur capacité de réaction face aux choix effectués par les autres, lors du processus de conception, est augmentée. Du fait des itérations courtes et de la simplicité des échanges (en un "clic"), les métiers *locaux* considèrent qu'ils peuvent réagir vite à la demande de l'activité d'analyse environnementale *globale*.

Les experts environnement considèrent que la proposition leur permet d'avoir plus rapidement les informations venant des activités métier *locales*, et donc augmente leur capacité de réaction. Ils pensent que selon leur analyse des données disponibles, ils pourront adapter le niveau de précision des calculs d'analyses.

Amélioration de la pro-activité entre les concepteurs locaux et les experts environnement globaux

La **Pro-activité** est à prendre au sens de la capacité à anticiper les besoins d'une tierce personne et la capacité à y répondre le plus efficacement possible. L'ensemble des personnes interviewées considère que le système proposé favorise l'anticipation des concepteurs, dans le champ d'action couvert par plusieurs itérations courtes.

En effet, la capacité d'anticipation est fonction des moyens matériels de transmission des informations au plus tôt, et d'une circulation des informations rapide sur plusieurs itérations courtes. La circulation des informations rapide est rendue possible par la modélisation des données (formalise et explicite les données) et par la correspondance des données échangées entre les activités, en évitant notamment la perte des liens sémantiques des données. Elle est entretenue par la capacité des métiers à *construire* (au sens de *faire évoluer*) leur activité en fonction des besoins ultérieurs des autres métiers.

Mais également, elle est fonction de la juste mesure des connaissances des interlocuteurs leur donnant la capacité d'interprétation et de compréhension des informations dans leur activité métier relative, et d'autre part, dans le projet global. Les modèles relatifs aux échanges, observés en fonction du temps permettent de capitaliser des modèles de processus. Ces modèles aident le métier à se situer par rapport à la stratégie ou tactique globale du projet. Il peut ainsi en déduire les besoins à venir : *cf.* Fig. 5.21 présentant l'anticipation possible des concepteurs sur plusieurs cycles d'itérations.

Comme le font remarquer l'expert environnement et le concepteur CAO, ils co-construisent la connaissance des liens entre les paramètres de leur activité et celle de l'autre, autour des critères du cahier des charges à prendre en compte, et de la stratégie du projet.

Définie comme telle, la pro-activité entre les acteurs du projet, favorise la mutation de l'organisation vers une organisation auto-apprenante.

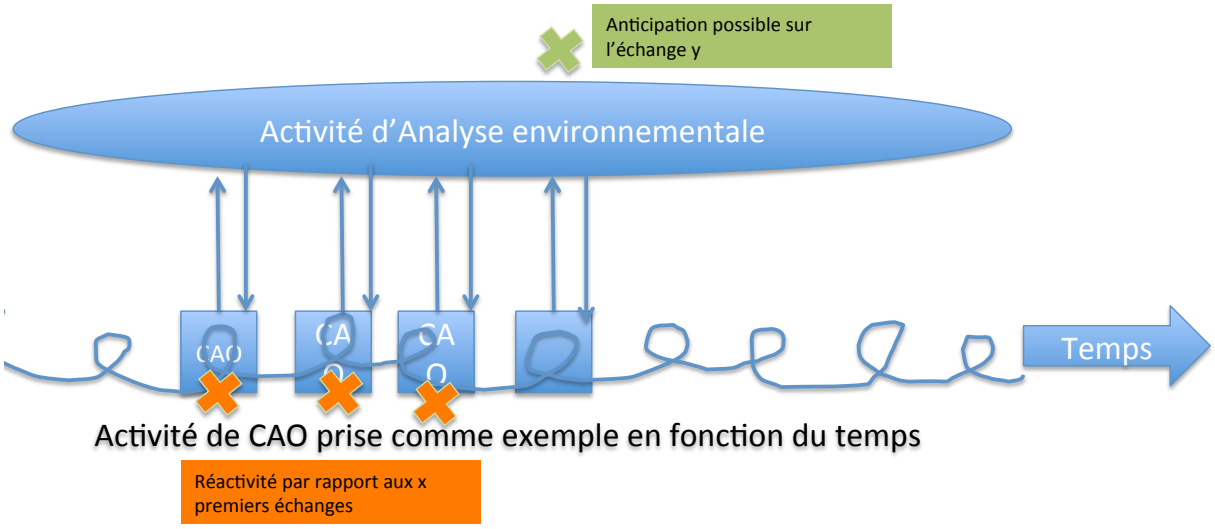


FIGURE 5.21 – Réactivité *vs.* pro-activité

Intérêt de la pro-activité dans un projet de conception

La capacité d'anticipation de l'expert environnement se traduit par une capacité de déployer l'outil d'analyse environnementale qui lui semble adapté au contexte du moment. La capacité d'anticipation du métier *local* se traduit par une aptitude à la réalisation de choix favorables à la diminution des impacts environnementaux.

Les concepteurs CAO considèrent d'une manière générale que, plus les échanges sont dynamiques et rapides, plus la quantité d'informations échangées sera importante. Or, d'après leur expérience, plus les informations générées par les activités sont partagées entre les activités, au plus tôt, plus les problèmes de conception sont évités. Ils considèrent donc que la pro-activité est un élément clé pour le bon déroulement d'un processus de conception.

L'expert environnement voit la pro-activité comme facilitateur de pilotage du projet vis-à-vis de la composante environnementale. Il peut anticiper au plus tôt une éventuelle dérive du projet, en modifiant sa trajectoire : nouveaux choix d'outils plus adaptés, outils informatifs plus appropriés, etc.

La Fig. 5.22 présente les résultats des enquêtes effectuées sur le projet NTR avant et après application de la méthode FESTivE. Les estimations par paramètre, ont été obtenues par les réponses des participants aux enquêtes, sur la base du projet existant NTR (à gauche) et du prototype et des maquettes (à droite). Les paramètres présentés sont : le temps décompté par échange d'information, le taux d'informations formalisées pour les mêmes activités et les liens établis entre les paramètres métier locaux et les paramètres environnement.

Les résultats montrent que :

– Le temps dépensé par échange d'information a baissé entre la situation initiale et l'application de la méthode FESTivE. La proposition permet en effet d'échanger automatiquement des données dans l'interface de l'outil métier, sans passer par des fichiers textes, Excel, intermédiaires ou par des réunions orales.

– Le taux d'informations formalisées par activité a augmenté. Les modèles permettent en effet de formaliser les données entrée/sortie des outils métiers, et par conséquent des activités.
– Les liens établis entre les paramètres métier locaux et les paramètres environnement ont augmenté. En effet, en amont (du *local* vers le *global*), les cartes de correspondances établies dans l'espace des méta-modèles, formalisent les liens entre les paramètres des métiers *locaux* et les paramètres d'entrée de l'analyse environnementale *globale*. Pendant l'activité d'analyse environnementale la teneur des liens de cause à effet entre données d'entrée (paramètres métiers *locaux*) et les impacts environnementaux (données de sortie) sont évalués par les outils propres à cette activité. Enfin, en aval (du *global* vers le *local*) l'utilisation d'un *plugin* dans l'interface de l'outil métier, permet la lecture conjointe des paramètres environnementaux (ex. : critères établis dans le cahier des charges) et des paramètres métiers. Le lien *de cause à effet* entre ses paramètres et les conséquences environnementales est établi par le métier (moyennant les impacts collatéraux des choix des autres métiers).

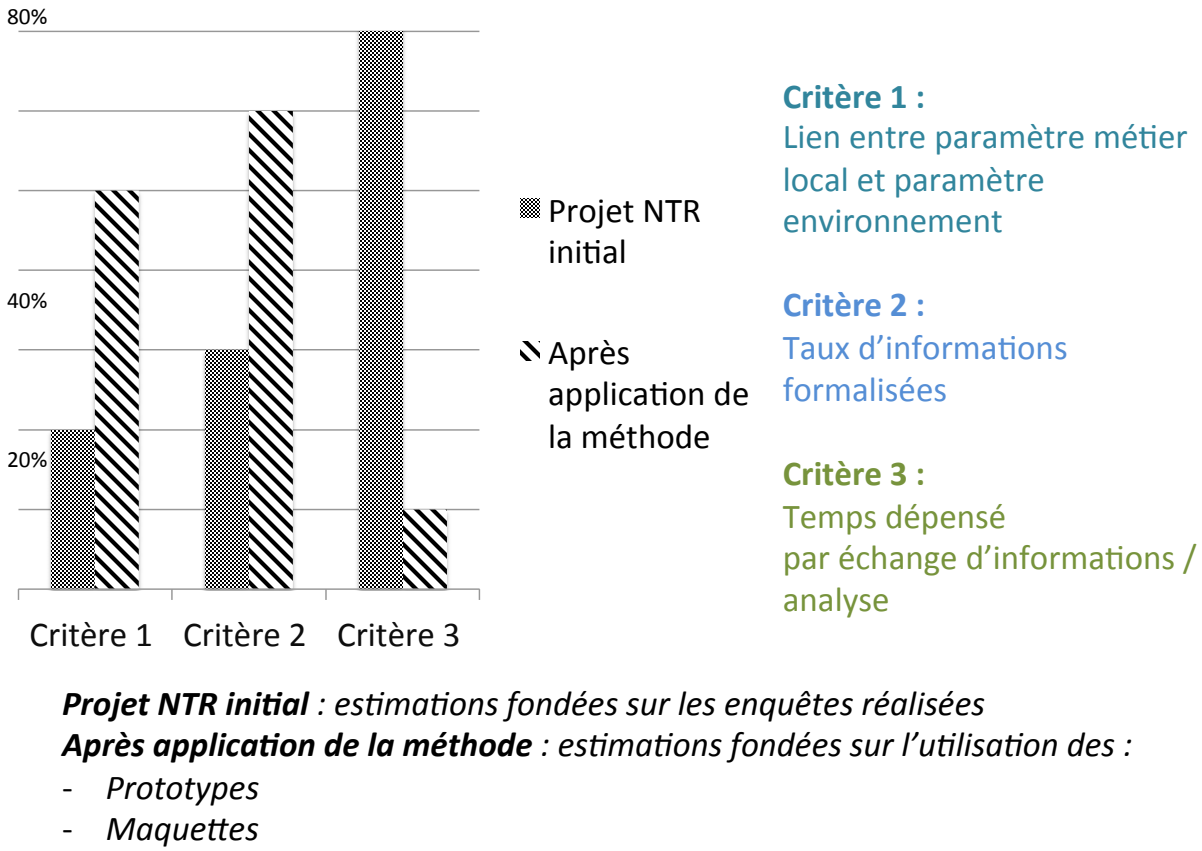


FIGURE 5.22 – Paramètres : temps par échange ; taux d'informations formalisées ; intégration des informations, avant et après la proposition

Si l'on considère que la réactivité d'une personne est sa capacité à apporter une réponse

rapide aux autres, la variation des paramètres précédents a pour effet d'améliorer la réactivité des métiers sur une itération (*cf.* Fig 5.23). De même que si le temps par échange diminue et que le lien entre les paramètres de chacun est formalisé, le temps par itération diminue. Une réactivité importante par itération courte, permet par rapport à l'ancienne itération plus longue, d'anticiper sur les besoins de l'autre. Au bout de n itérations courtes, la personne peut anticiper sur l'itération $n+1$.

Si l'on considère qu'être pro-actif est la capacité d'anticiper les besoins d'une tierce personne et de pouvoir y répondre le plus efficacement possible, alors la proposition améliore la pro-activité entre les concepteurs et l'expert environnement. L'amélioration des liens entre les paramètres favorise la capacité de réponse. Le temps par itération est diminué et l'amélioration de la capacité d'anticipation sur l'itération $n+1$ est augmentée.

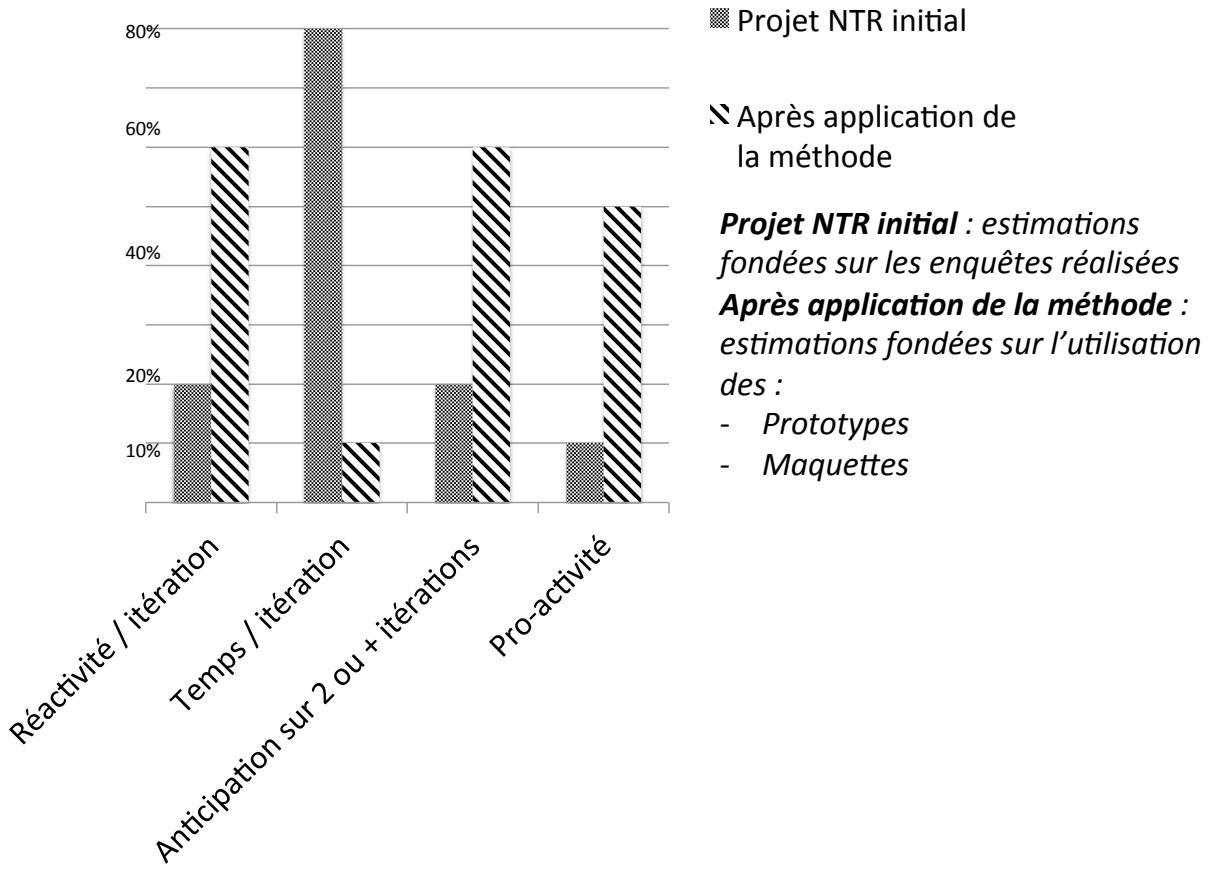


FIGURE 5.23 – Conséquences sur la pro-activité à partir des paramètres temps, réactivité et intégration des informations, avant et après la proposition

Enfin, les échanges peuvent être caractérisés d'échanges *dynamiques* de par la rapidité d'exécution des transformations, spécifiques aux données entrée/sortie des outils *locaux* aux *globaux* engagés au cours du processus de conception et inversement.

Capacité du démonstrateur à vérifier P1, P2 et P3

Ainsi, le démonstrateur montre que la proposition :

- **permet aux experts environnement de s'adapter plus facilement et plus rapidement aux contextes variables que supposent les projets de conception prenant en compte la dimension environnementale (P1), grâce à son caractère dynamique et à l'amélioration de la capacité de réactivité des métiers collaborants du système.**
- **améliore le lien entre les paramètres métiers locaux et les paramètres environnementaux (P2).**
- **permet la détection des données disponibles nécessaire à l'activité d'analyse environnementale et l'échange adapté d'outil à outil de domaines différents, manipulant des données différentes (P3), grâce à la nature de l'interopérabilité conservant les liens sémantiques des données issues de différents domaines.**

Le démonstrateur vérifie que la proposition confère les trois propriétés. Une fois la méthode FESTivE appliquée, le système d'information offre une plus grande flexibilité vis-à-vis de l'intégration de la dimension environnementale en conception.

5.2 Expérimentation n°2 : démarche globale environnementale de mise en place du développement durable dans l'entreprise

5.2.1 Objectif

Nous avons vu au travers du cas d'étude précédent que notre proposition contribue à l'intégration pro-active de la dimension environnementale au coeur des activités des concepteurs, au niveau opérationnel. Dès lors, l'objectif de cette expérimentation est :

- **(O4) d'expérimenter et valider l'applicabilité de la proposition dans un autre contexte industriel ;**
- **(O5) de s'intégrer dans une démarche environnementale globale, en montrant que des liens dynamiques et cohérents peuvent être établis avec la tactique et la stratégie de l'entreprise.**

Pour ce faire, nous nous sommes positionnés sur le cas d'étude proposé dans les travaux menés dans le projet ANR *Convergence*[17]. Ce projet ANR propose un outil de pilotage global aidant les entreprises à mettre en place une démarche de développement durable. **Pour évaluer la capacité de notre proposition à entretenir des liens dynamiques et cohérents entre les niveaux tactique et stratégique de l'entreprise en matière d'environnement de développement durable, ce cas d'étude a été réalisé dans l'entreprise Quiksilver.**

5.2.2 Cadre industriel de l'expérimentation

Quiksilver[18] a été créé en 1969. Son domaine d'activité est la production et la distribution de vêtements et accessoires outdoor liés aux sports de glisse (surf, snow, skate). L'entreprise appartient au groupe Quiksilver inc. avec un volume de production de 28 million de pièces (textile, accessoires, etc., toutes marques confondues) pour un chiffre d'affaire en Europe en 2011 de 546 M d'euros.

En 1999 l'entreprise lance le slogan "*Don't Destroy What You Came to Enjoy*", et prend part petit à petit à des initiatives de protection de l'environnement et de sensibilisation à l'environnement, par le biais d'évènements, ainsi qu'en entretenant des partenariats avec diverses associations. En 2001, les premiers produits en coton bio apparaissent. En 2005, Quiksilver a créé la "fondation Quiksilver". Puis, Quiksilver Europe lance le premier programme d'éco-conception : EcoCircle, piloté par le département du développement durable et réunissant des acteurs internes et externes de l'entreprise. Ce projet d'éco-conception a été conduit de la phase de R&D à la phase d'industrialisation entre mars 2007 et août 2008 et a fait l'objet d'une étude approfondie dans le cadre de *Convergence*.

Quiksilver affiche aujourd'hui une volonté d'intégrer l'éco-conception au coeur des activités métier.

17. Pour plus d'informations concernant ce projet de recherche, se référer à la section 2.1.3.1.

18. Le site internet est www.quiksilver.com, et en particulier : www.the-quiksilver-initiative.com, qui présente les initiatives dédiées au développement durable

Compte-tenu des termes utilisés par Quiksilver en interne, dans cette section, nous utiliserons de préférence "designer" pour désigner les concepteurs. En français, "designer" peut être pris au sens "d'industrial designer", ou être la traduction de "concepteur". Il est utilisé ici comme terme général pour définir des différents métiers *locaux* intervenant durant le processus de design, ou conception, d'une nouvelle collection.

5.2.2.1 Protocole expérimental et chronologie du cas d'étude

Ce cas d'étude n°2 s'est organisé en plusieurs étapes, suivant la chronologie ci-après, présentées graphiquement sur la Fig. 5.24.

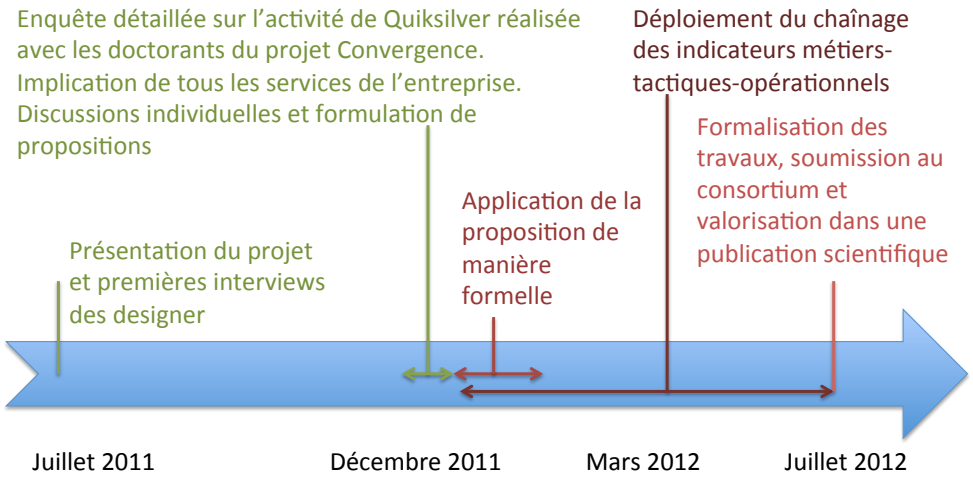


FIGURE 5.24 – Chronologie du cas d'étude réalisé dans l'entreprise Quiksilver

- **Etat des lieux, bilan de l'existant et présentation des objectifs aux responsables de département :** juillet 2011.
- **Enquête sur le milieu du textile et dans Quiksilver** : réalisée de juin à décembre 2011 [19]. A l'issue de cette enquête, l'ensemble des activités de Quiksilver ont été modélisées sous la forme d'un diagramme présentant les liens entre chaque activité de l'entreprise, les métiers impliqués et les données d'entrée et de sortie véhiculées (*cf.* légende présentée Fig. 4.12).
- **Application de la proposition de thèse à certaines activités intervenant dans le processus de conception de Quiksilver** en discussion avec les métiers concernés : application de la méthode de création de la bibliothèque de modèles sur plusieurs activités, par exemple, les "couples" : graphiste-Analyse environnementale globale, technicienne de collection-analyste environnemental (via le choix des matériaux et des procédés de transformation), designer-Analyse environnementale. Cette étape a été réalisée de décembre 2011 à mars 2012.
- **Déploiement et chaînage des indicateurs stratégiques et tactiques au niveau opérationnel** et inversement, réalisé de décembre à juillet 2012.

19. L'enquête chez Quiksilver a été menée avec les deux doctorants de *Convergence* : Romain Allais de l'UTT et Feng Zhang de l'INP Grenoble.

Mise en évidence de la fluctuation dans la valeur des indicateurs tactique et stratégique après application de la proposition au niveau opérationnel : cohérence entre les trois niveaux et liens dynamiques. Cette étape a été réalisée entre décembre et juillet 2012.

– **Synthèse de l'expérimentation par la formalisation des travaux dans une publication scientifique** [Zhang et al.(submited)] et validation auprès du *consortium* de *Convergence*.

5.2.2.2 Personnes impliquées

L'ensemble des personnes impliquées dans le projet sont présentées dans le Tableau 5.18. Le service "Quiksilver Initiative" en charge de tous les projets relatifs à l'environnement a accompagné ce projet en mobilisant tous les services de l'entreprise. Une large majorité de services a fait l'objet d'interviews. Au total nous avons réalisé 28 interviews avec les doctorants du projet *Convergence*.

TABLE 5.18 – Présentation des personnes impliquées pour l'expérimentation dans l'entreprise Quiksilver, notamment dans les phases d'enquêtes

Département	**Domaine ou métier interviewé**
Backoffice	Quiksilver initiative et fondation Quiksilver Communication Ressources humaines Contrôleur de gestion Juriste Directeur des ressources humaines
Design	Chef de produit Styliste Graphique Assistante de design Directeur de design
Opérations	Appro-planning Qualité Production QAS Chief Operation Officer
Vente	Responsable de marque Marketing Administrateur des ventes Analyste de ventes Commerce Assistante commerciale On-line commerce Retail network Service client

5.2.3 Analyse de la situation initiale et modélisation des processus

Les informations recueillies par le biais des enquêtes effectuées sur les 28 agents de Quiksilver, entre juillet et décembre 2011, ont servi de base à l'application de la méthode FESTivE de création de la bibliothèque de modèles. Chaque entretien a duré environ une heure. Les entretiens étaient de type semi-directifs et comprenant une majorité de questions ouvertes : *décrivez les principales tâches réalisées dans votre activité ; avec quels métiers échangez-vous des informations ; quels sont les supports que vous utilisez pour réaliser ces tâches ; quelles sont les informations échangées entre les outils.* Le support d'enquête proposé dans la proposition, section 4.2.4 fut le support de base, sachant que les niveaux de détails n'étaient pas les mêmes suivant les métiers.

Ces informations rassemblent : les activités présentes dans l'entreprise, la nature de ces activités (service stratégique, plutôt tactique ou opérationnel) les liens entre ces activités, les métiers impliqués dans les activités et les données d'entrée et de sortie véhiculées (suivant le degré d'importance de l'activité pour notre étude[20], ainsi que les supports de communication.).

Les informations issues de l'enquête ont été traitées avec les doctorants de *Convergence*. Chacun analysant les données qui se rapportent à ses recherches : niveau stratégique (travaux de Romain Allais), niveau tactique (travaux de Heng Feng) et niveau des métiers du design (outils et échanges de données fédérés à l'aide de la proposition présentée ici).

Les résultats issus des enquêtes ont fait l'objet d'une restitution au sein de *Convergence*, sous la forme d'une cartographie, vérifiée par l'expert environnement de Quiksilver, présentée partiellement pour cause de confidentialité dans l'Annexe A.9. Pour les 28 personnes interviewées ont été réalisées des "fiches personnelles" décrivant leur activité **textuellement** (liste de sous-activités, supports utilisés, métiers avec qui l'interviewé collabore, remarques), et **graphiquement** en faisant apparaître les "sous-activités", les "données échangées" entre les sous-activités ou avec d'autres "métiers" (*cf.* Fig. 5.25).

La cartographie est représentée selon la légende présentée section 4.2.2. Cette cartographie regroupe toutes les informations nécessaires à la réalisation du diagramme d'activité UML. Elle fait apparaître les activités métier de types *locales* et *globales*, les liens entre les activités et le détail des sous-activités (surtout les activités impliquées dans le processus de design). Elles présentent donc bien les trois éléments fondamentaux issus de l'étape de la méthode FESTivE que nous proposons, section 4.2.2.

A partir de cette cartographie, **les activités de designer, de chef de produit, de technicienne de collection et d'analyse environnementale,** ont été analysées finement pour identifier **les liens entre outils pouvant faire l'objet d'une fédération.** Nous prendrons pour cette étude, **les "couples" : graphiste-analyste environnemental global, technicienne de collection-analyste environnemental** (via le choix des matériaux et des procédés de transformation), **designer-analyste environnemental.**

20. Les activités liées au Design ont été finement analysées, notamment via l'étude des documents supports et en questionnant plus de métiers proportionnellement à d'autres secteurs (comme le service juridique).

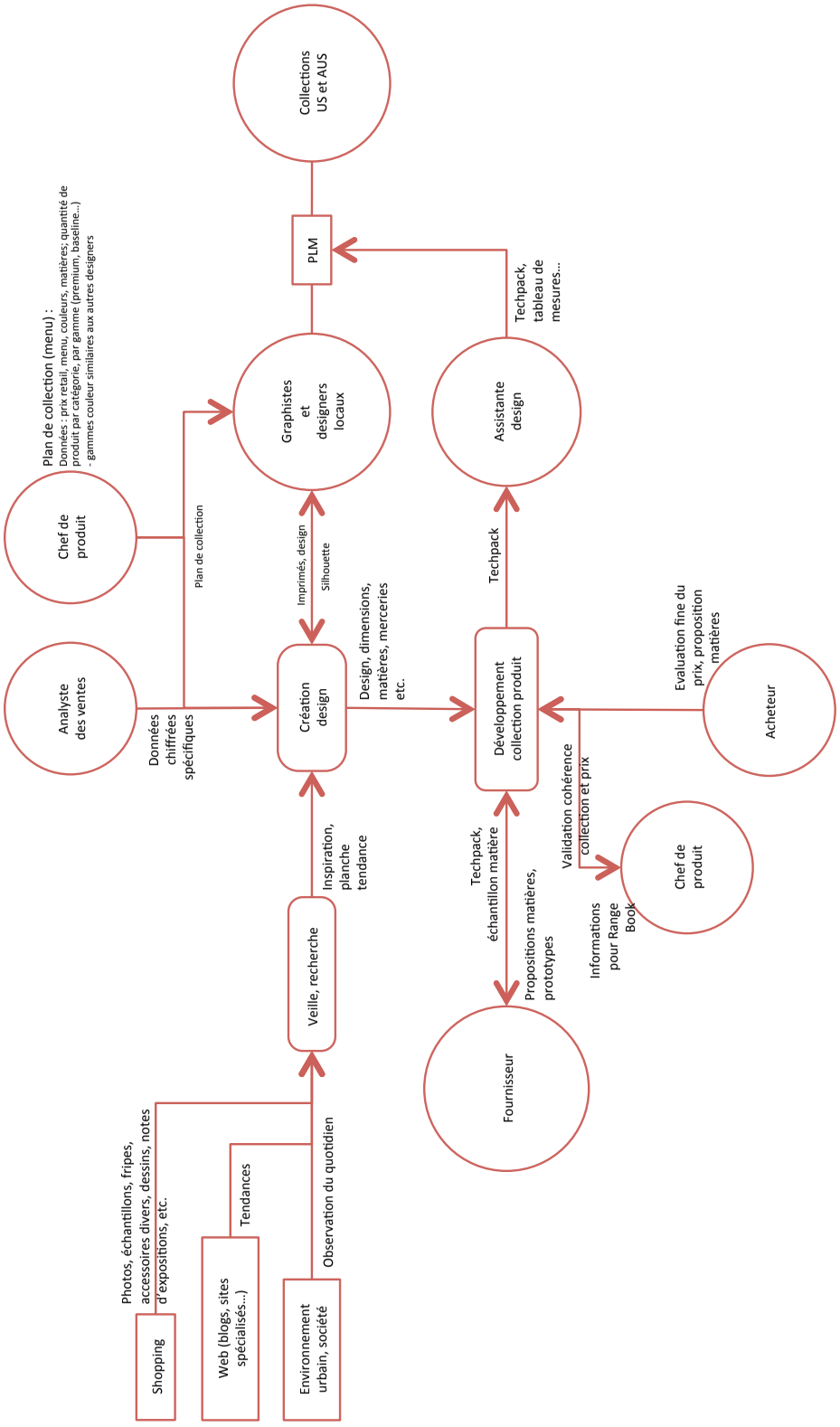


FIGURE 5.25 – Exemple d'éléments de la cartographie issue de l'enquête effectuée au sein de Quiksilver, ANR *Convergence*, ici : présentation de l'activité du designer

L'étape suivante qui consisterait à implémenter le système d'information de Quiksilver n'a pas été réalisée puisque Quiksilver est encore en phase d'étude. Ce type d'implémentation a été réalisé lors de la première expérimentation dans l'entreprise Parkeon (prototype, Tableau 5.1).

5.2.4 Co-construction et retours d'expériences sur la proposition d'amélioration des échanges au niveau opérationnel (O4)

Deux des 10 mots clés caractérisant Quiksilver énoncés par le responsable des Ressources Humaines[21], étaient les mots "Natural" et "Pro-active". Les activités étant liées à la montagne et à la mer, le lien[22] est fort avec le milieu naturel. *Natural* renvoie pour la Fondation Quiksilver, à la volonté de protection et de préservation[23], sans pour autant afficher le style du vêtement comme "naturel". Les valeurs véhiculées transparaissent autant par les événements[24] que l'entreprise organise, que par les produits et par l'organisation interne de l'entreprise[25]. Nous verrons comment les discussions établies au travers de ce cas d'étude avec les agents de Quiksilver amènent à des solutions concrètes pour prendre en compte du *Natural* au coeur de leurs activités métiers.

Le terme *Pro-active*, renvoie, comme nous l'avons vu, à la capacité d'anticipation de l'équipe face à un stimulus et à sa capacité à y répondre d'une manière adaptée. L'objectif dans cette section est d'illustrer l'amélioration possible de la pro-activité des métiers intervenants pendant le développement des produits de Quiksilver. Pour ce faire, nous proposons d'intégrer notre proposition de fédération à l'organisation et au système d'information existant dans l'entreprise. Nous verrons dans cette section, que la proposition peut fonctionner en synergie avec le système existant de l'entreprise, au niveau opérationnel.

Pour ce faire, trois illustrations sont présentées dans les sous-sections suivantes, relatives aux activités : d'un designer, d'un graphiste et d'une technicienne de collection. Elles sont le fruit des discussions réalisées en retour d'expérimentation avec les agents interviewés (dont l'expert environnement).

5.2.4.1 Illustration dans le cas de l'activité de design

La Fig. 5.26 présente la cartographie de l'activité du designer, utilisant la légende présentée Fig. 4.12. Les "ronds" représentent les activités des autres métiers avec qui le

21. RH de Quiksilver (Eu) pendant les interviews en décembre 2011

22. Il suffit de rentrer à l'intérieur de l'entreprise pour voir à quel point les employés partagent les même valeurs, le même *style de vie*.

23. *cf.* Les Green Campain réalisées par la Fondation Quiksilver, ou encore le slogan : "Don't destroy what you came to enjoy".

24. L'événement "Du flocon à la vague" (http ://www.dufloconalavague.org/) est un exemple des événements auxquels Quiksilver participe et qui est à l'initiative d'un employé de Quiksilver.

25. En effet, trois valeurs essentielles se retrouvent dans la mission, la stratégie et la tactique vis-à-vis de l'environnement : the "playgrounds", "products" and the "community" : veiller à la protection de leurs espaces d'activités, concevoir des produits innovants, techniques et durables, promouvoir des valeurs communes pour garantir une soutenabilité à long terme.

designer interagit. Les carrés bords francs sont les "réservoirs de données" (par exemple un guide, un site internet).

Les rectangles transparents à bords ronds et de couleur rouge correspondent à l'ensemble des sous-activités entreprises par le designer avant préconisations. Tous les éléments de couleur verte représentent les préconisations, que nous présentons au niveau de deux "zones".

5.2.4.2 Zone 1 : apporter des sources d'informations environnementales pendant la réalisation des veilles par les designers

Au début de chaque nouvelle collection, le designer entame une recherche, ou veille. Il part faire du "shopping", consulte le web et observe l'environnement urbain (évolution des goûts, etc.). Cette veille (partagée avec celle des autres designers) sert d'inspiration de base pour le design. Ainsi, en discutant avec le designer, nous avons mis en évidence qu'une des voies d'entrée pour qu'il s'intéresse à l'éco-conception et puisse en acquérir quelques fondamentaux, serait d'incrémenter ses sources d'inspiration par des sources de même nature mais relatives à l'éco-conception. C'est d'ailleurs l'esprit des travaux de recherche de [Lofthouse(2004)] qui montre que l'activité des designers dans une démarche d'éco-conception a un rôle tout à fait similaire à celui entrepris dans une démarche de conception classique. Dans cette phase d'inspiration, les outils classés dans la bibliothèque, pouvant être de simples "réservoirs d'informations", gardent "la culture" (entendue au sens de [Lofthouse(2004)]) du designer, afin de ne pas détourner l'objectif du designer dans cette étape, ou dénaturer sa recherche [26].

Voici quelques exemples de supports pouvant alimenter la bibliothèque d'outils du designer vis-à-vis de la dimension environnementale, présentées sur le schéma Fig.5.27 :

- **Inspirations de type Web** : ajout de blogs ou de sites liés à l'éco-conception, comme par exemple InformationInspiration de [Lofthouse(2003)] ; si besoin de se renseigner plus spécifiquement, ajout possible de sites informatifs présentant des petits outils de générations de concepts [27]
- **Shopping** : inspiration de milieu naturel également (différentes façons de voir la fonctionnalité des vêtements, pas uniquement "mode").
- **Inspiration de type environnement urbain, société** : explorer les valeurs de "l'urbanisme durable", de la "slow life" (etc.), participer à des conférences, expositions, débats, lieux alternatifs, en lien avec ces valeurs.

5.2.4.3 Zone 2 : entretenir une relation d'échanges d'informations pendant le développement du produit entre le designer et l'activité d'analyse environnementale

La phase de "développement du produit" (*cf.* Fig. 5.28) correspond aux phases de conception préliminaire et conception détaillée. Pendant le développement, le designer est

26. D'après [Lofthouse(2004)] : "*New tools designed for industrial designers will need to be designed in keeping with the culture of industrial design and focus on the types of issues that they are interested in, in order to ensure that the full potential that industrial designers have to offer ecodesign projects, can be capitalised on*".

27. Exemple de sites : www.thesecretlifeofthings.com, www.wikid.eu (EcoDesign strategy wheel).

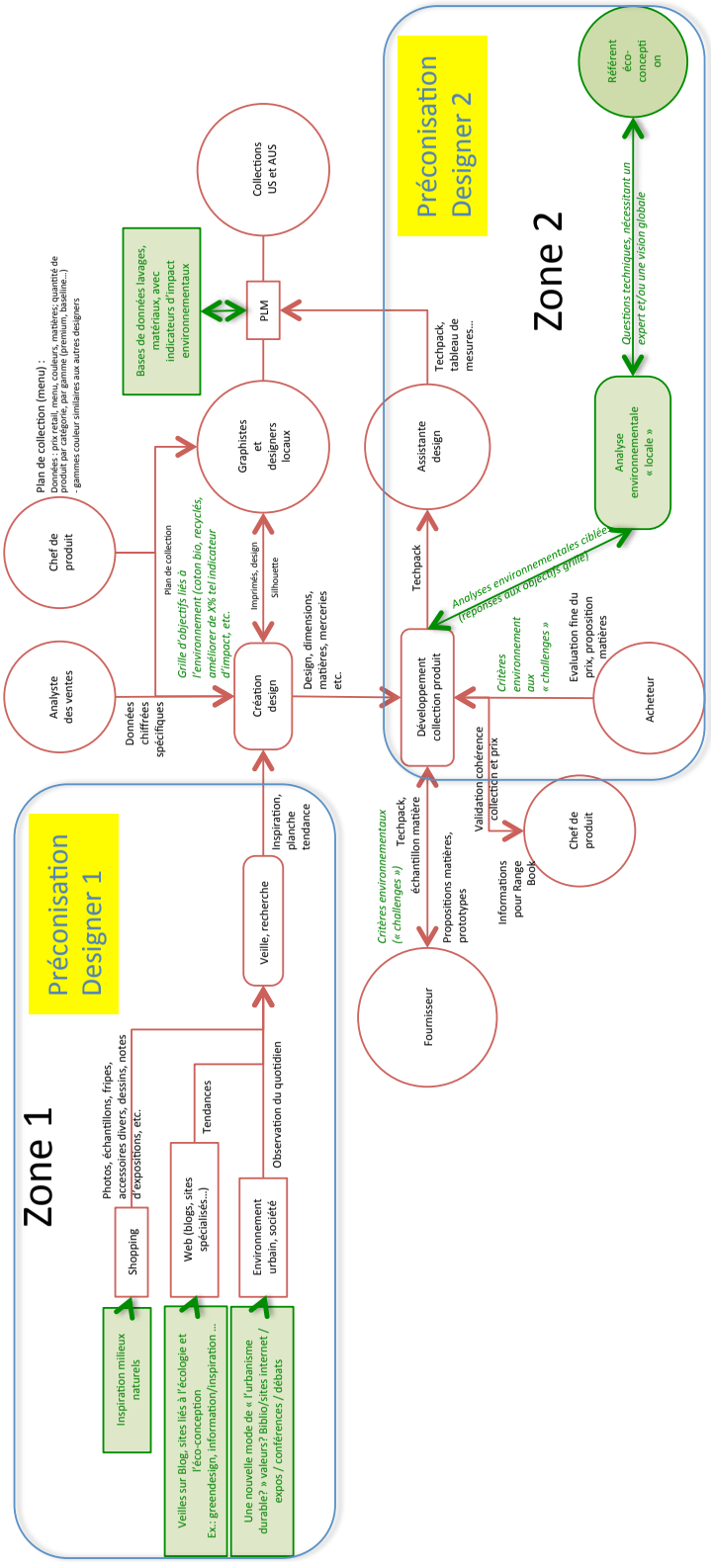


FIGURE 5.26 – Activité du designer, implémentée par l'ajout de supports ou d'interaction avec l'activité d'analyse environnementale (en vert)

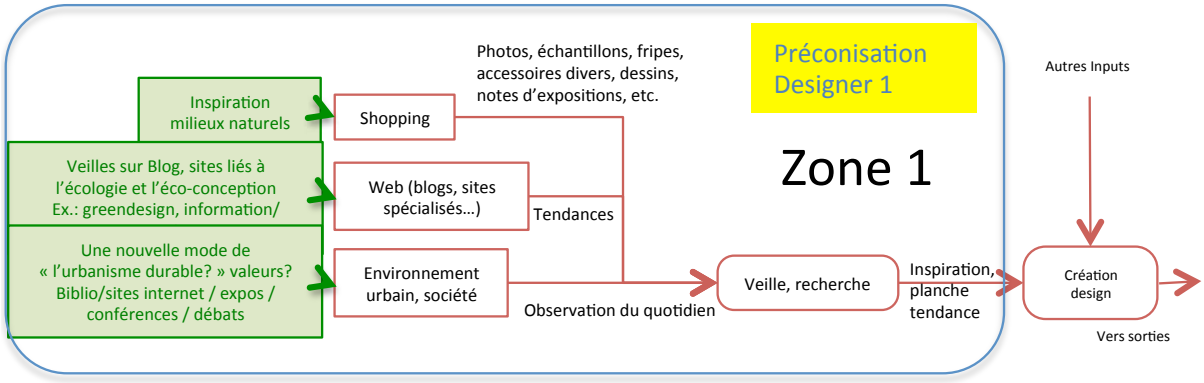


FIGURE 5.27 – Exemple 1 : illustration des liens possibles entre l'activité des designers et l'activité d'analyse environnementale

Pendant la réalisation des veilles par les designers

confronté à des choix déterminants vis-à-vis de la dimension environnementale.

C'est aussi le moment où les données sur le produit sont petit à petit formalisées et quantifiées : choix des textiles, des lavages, des fournisseurs, etc.

Le designer veille à ce qu'au travers de ces différents choix, l'aspect esthétique du produit soit conservé. Il s'assure que les concepts et les valeurs qui en découlent, ne sont pas dénaturés. Sauf dans le cas de vêtements techniques particuliers, il n'utilise pas d'outil de calcul, mais plutôt effectue des tests sur des échantillons envoyés par les fournisseurs [28] (fermetures, texture, reflets, effets du tissus, etc.).

A chaque prise de décision, il a besoin d'indications environnementales relatives aux éléments du produit : les matières, les types de lavage, fournisseurs, technique d'assemblage, (etc.). Ces informations pourraient lui être fournies pas l'expert environnement, garantissant la vision *globale* nécessaire à l'analyse environnementale.

Pour cela, dans le même esprit que celui mis en oeuvre dans l'expérimentation n°1, l'expert environnement réalise des analyses environnementales (en sélectionnant son outil dans une bibliothèque d'outils classés par critères contextuels (textile, créativité, etc.)). Puis, pour transmettre localement les résultats de son analyse environnementale, son outil d'analyse environnementale global est fédéré avec les outils consultés par les designers *locaux*. C'est-à-dire, avec :

- **Le PLM** : sous la forme d'indicateurs adjoints aux bases de données matériaux, procédés, fournisseurs, (etc.) *cf.* activité de technicienne de collection présentée à la sous-section 5.2.4.4 ;
- **L'outil logiciel de dessin** (*Acrobat* par exemple) : sous la forme d'un *plugin* présentant les résultats d'analyse à l'aide d'indicateurs d'impacts simplifiés *cf.* activité du graphiste présentée à la sous-section 5.2.4.5 ;
- **L'intranet** (développé et utilisé chez Quiksilver), en postant des résultats d'analyses simplifiées. L'intranet a l'avantage de créer un autre lien de communication entre les designers et l'expert environnement, puisqu'il permet d'utiliser toutes les techniques

28. Les principaux fournisseurs sont répertoriés dans une liste. L'entreprise entretient avec eux des relations durables.

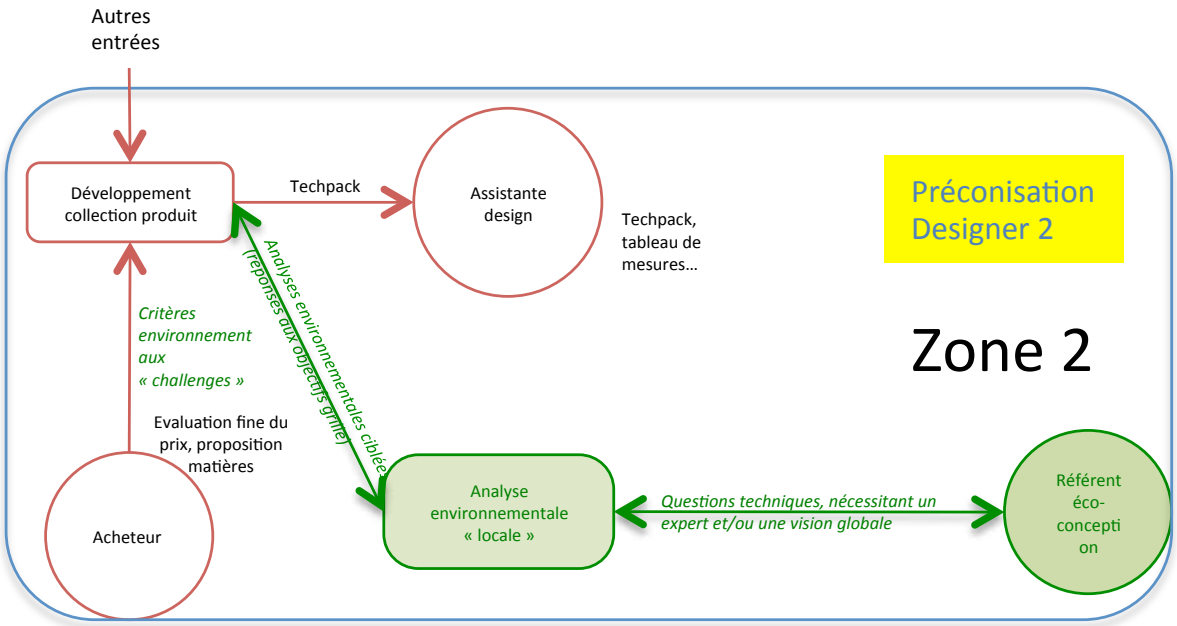


FIGURE 5.28 – Illustration des liens possibles entre l'activité des designers et l'activité d'analyse environnementale

de *web sémantique* (les cartes euristiques peuvent être utilisées pour représenter et transmettre une partie des connaissances environnementales de l'expert environnement), avec possibilité de "chater" pour répondre à des questions plus spécifiquement.

Egalement, la compréhension locale des designers est guidée *via* des supports physiques, des guides, des livres, des fiches techniques, ou encore des dossiers de projets antérieurs annotés par l'expert environnement.

Ces exemples illustrent les possibilités offertes pour intégrer dans les activités du designer des aspects environnementaux, sans modifier la manière dont il travaille. Cela illustre la propriété (P1) que la proposition confère.

5.2.4.4 Fédération des outils d'analyse environnementale globale avec les outils de la technicienne de collection (cas du PLM)

La technicienne de collection joue, en quelque sorte, le rôle d'intermédiaire technique entre les designers et les fournisseurs. Elle formalise sur le PLM les informations techniques venant des designers (à partir d'une feuille de renseignement papier). Elle échange des informations technique sur le produit avec d'autres services (fournisseurs, patronniers, etc.). Son travail est donc déterminant pour renseigner le designer de certains aspects liés à l'environnement (lui indiquer qu'un procédé de lavage est nettement plus impactant sur certains indicateurs environnementaux, qu'un autre procédé pour un rendu équivalent, etc.). Souvent en discussion avec les fournisseurs, elle échange des informations utiles à l'analyse environnementale.

Après discussion avec la technicienne de collection nous avons établi qu'elle pourrait entretenir des liens privilégiés avec l'expert environnement par le PLM :

- **pour des analyses rapides : en disposant d'indicateurs d'impacts environnementaux simplifiés :** (indicateurs couleur) devant chaque élément de la base de données matériaux et procédés de lavage. Cette base de données est commune à l'ensemble de Quiksilver. Donc l'implémentation de ces bases avec des indicateurs environnementaux, profiterait à tout le groupe (US, Asie, Eu). Ces bases synchronisées avec les outils d'analyse environnementale de l'expert environnement, permettent de faire les mises à jour nécessaires suivant l'évolution des données (en utilisant la fédération) et des résultats des analyses effectuées. L'outil d'analyse environnementale peut être pré-configuré pour faire des analyses routinières. Et les résultats de l'analyse environnementale sont "traduits" (via des transformations appropriées) pour renseigner les bases de données du PLM (données matériaux, etc.), d'une manière uniforme pour toutes les données. Le système d'outils interopérables est de type "unifié".
- **pour des analyse spécifiques : en demandant directement à l'expert environnement.** L'expert environnement extrait alors des informations dont il a besoin via les informations publiées par la technicienne ou en fédérant son outil d'analyse avec l'outil *local* de la technicienne (son classeur Excel, plus "riche" que les bases de données PLM). L'expert environnement répond dynamiquement et plus spécifiquement à la demande de la technicienne, par rapport au produit en cours de définition, ce qui peut favoriser l'émergence de nouveaux matériaux, procédés, etc. , et donc améliorer l'innovation.

Ces deux propositions d'échanges sont illustrées sur la Fig. 5.29. Sur cette figure sont représentées à gauche les activités de la technicienne de collection, et à droite, les activités de l'expert environnement. Au centre de l'image, nous observons les deux types d'échanges : les échanges supportés par le système PLM permettant une **analyse rapide** (interopérabilité de type "unification" d'informations sur une plate-forme commune) ; et les **échanges spécifiques** (interopérabilité de type "fédération", échanges dynamiques et adaptés aux contextes spécifiques de l'activité de la technicienne de collection). **Les deux systèmes collaboratifs diffèrent par la fréquence des changements (flexibilité, adaptation au contexte évolutif) auxquels ils peuvent faire face. Ils sont complémentaires, et l'un peut servir de ressource à l'autre.**

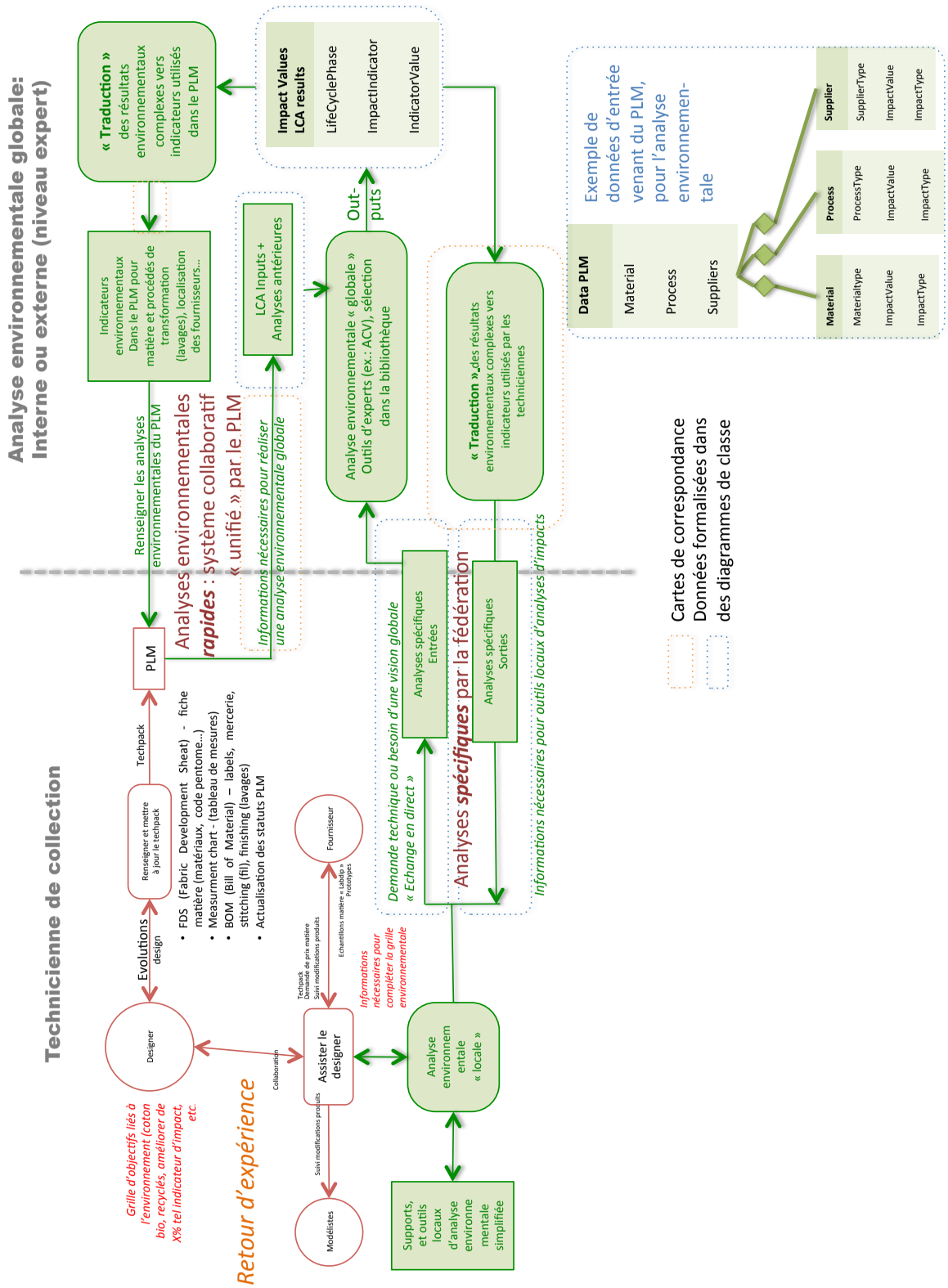


FIGURE 5.29 – Proposition de fédération entre les activités de la technicienne de collection et l'activité d'analyse environnementale

5.2.4.5 Fédération d'outils entre l'activité de graphiste et l'activité environnementale

Notre proposition de fédération d'outils environnementaux peut aussi s'appliquer à l'activité *locale* du graphiste. Cette dernière consiste à dessiner à l'aide d'un outil dédié (de type *Acrobat*). Les dessins sont utilisés ensuite comme illustrations imprimées sur les produits (t-shirt, etc.). L'activité est purement artistique (dans le sens d'allier l'esthétisme à l'action de créer). Cependant, l'outil de dessin manipule des données de type : surface du dessin, couleur utilisée, zones vides, etc. Ces données pourraient être utilisées pour réaliser des analyses environnementales au niveau *global*, en fédérant l'outil de dessin *local* à l'outil d'analyse environnementale *global* sélectionné par l'expert environnement. Les résultats de cette analyse environnementale seraient représentés de manière simplifiée dans l'environnement numérique du graphiste, à l'aide d'un *plugin*, pour aider le graphiste à faire des illustrations qui généreront une fois imprimées sur les produits, le minimum d'impacts environnementaux : au travers les choix des couleurs, de la surface du dessin, des fournisseurs, etc. Pour ce faire, il faut que le lien sémantique entre l'activité artistique générant des données quantifiables, et la conséquence des variations de valeurs de ces données sur un jeu d'impacts environnementaux soit conservé. **Cette situation correspond bien au domaine d'application de la proposition de nos travaux : des outils différents, manipulant des données différentes, un besoin de garder la sémantique associée aux données.**
Après application de la méthode FESTivE (telle qu'elle a été illustrée dans le cas d'étude n°1), la Fig. 5.30 illustre les échanges d'informations possibles entre l'activité du graphiste et l'activité d'analyse environnementale.

Détail du calcul du volume ayant lieu dans la transformation

On appelle (Dpg1) les paramètres de dessin relatifs à l'activité du graphiste, qui dans ce cas correspondent à (a) la surface du dessin et (b) la couleur du dessin. Pour réaliser l'analyse environnementale, le volume (Vc1) de peinture de couleur (b) est nécessaire. (Vc1) est donné par l'équation 4.1 à partir des paramètres du dessin (Dpg1 (a,b)) et du facteur d'épaisseur (Th1 (b)) relatif à la couleur (b) :

$$Dpg_1(a) * Th_1(b) = V_b(1) \tag{4.1}$$

Cette opération simple fait correspondre des paramètre spécifiques à l'activité du graphiste à des paramètres d'entrée pour l'activité d'analyse environnementale.

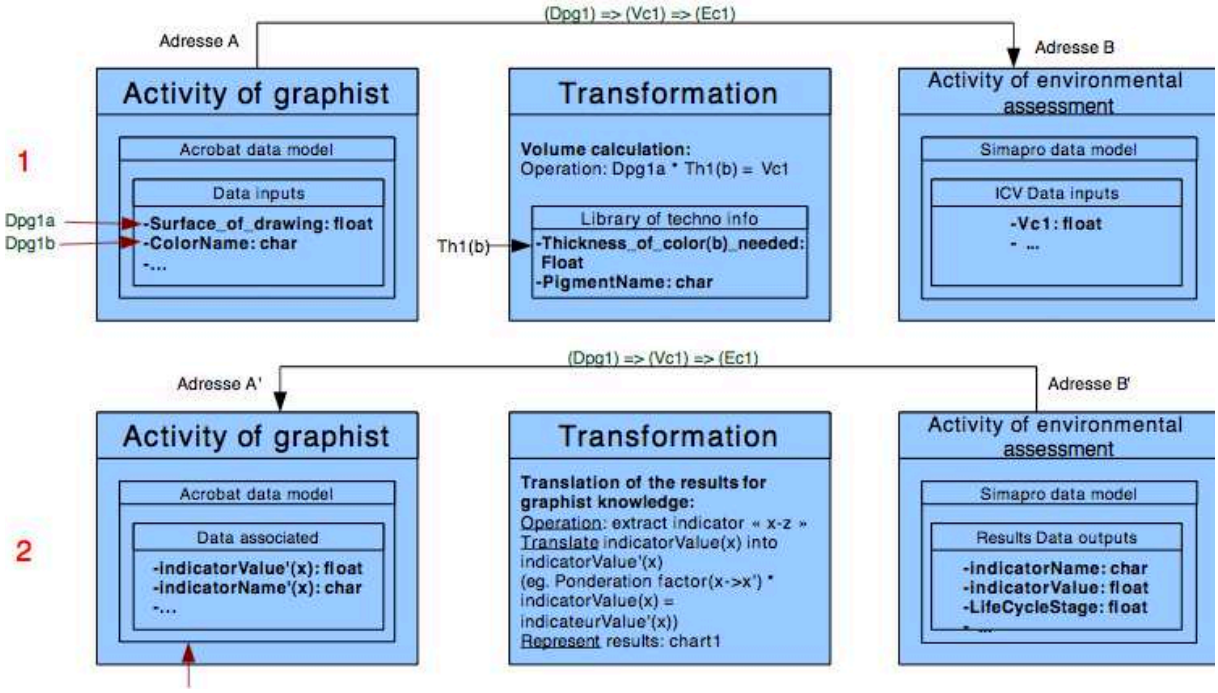


FIGURE 5.30 – Illustration des cartes de correspondances possibles entre les données de l'activité artistique du graphiste et l'activité d'analyse environnementale
Après application de la méthode FESTivE

1. **Les trois rectangles du dessus** correspondent à la description de l'échange de données de l'activité du graphiste à l'activité d'analyse environnementale. A gauche, les données disponibles dans l'outil de dessin sont formalisées dans un diagramme de classe simplifié. On peut y voir l'attribut relatif à la surface du dessin et celui relatif à la couleur utilisée pour tracer le dessin. Les deux données forment un couple "surface-couleur", conservant ainsi leur dépendance l'une à l'autre. Au centre, est représentée la carte de correspondances liant les données issues du premier diagramme de classe relatif au graphiste au second (extrémité à droite), présentant les données d'entrée nécessaires à l'analyse environnementale. La carte de correspondances proposée spécifie les transformations à réaliser pour calculer le volume de peinture nécessaire à l'impression du dessin. Pour cela, la couleur doit être reliée à un nom de pigment et à une épaisseur de matière nécessaire pour que le tissu puisse être correctement imprimé (équivalence de base de données, puis transfert des attributs relatifs à la couleur (pigments, épaisseur) présents dans la base de données, calcul du volume (surface * épaisseur), injection de la donnée en entrée dans le logiciel d'analyse du cycle de vie). Le volume, le type de pigment, viennent implémenter le contenu des méta-modèles des données d'entrée de l'outil d'analyse environnementale *globale*.
2. **Les trois rectangles du dessous** correspondent à la description de l'échange de données dans l'autre sens, c'est-à-dire, de l'activité d'analyse environnementale *globale* à l'activité du graphiste *locale*. En partant des données de sortie de l'outil d'analyse environnementale sélectionné (à droite), les indicateurs d'impacts, leur valeur, ainsi que les données liées au produit (ici ce sera les données liées à la peinture), sont envoyés dans l'outil de dessin. Les cartes de correspondances permettent d'agréger certaines valeurs d'impacts, les multiplier par des facteurs de pondération si besoin, donner des nouveaux noms aux indicateurs d'impacts créés (adaptés aux connaissances du graphiste), tout en gardant le lien avec le nom de la couleur du dessin. L'enjeu technique est ensuite de présenter à l'aide d'un *plugin* le contenu des méta-modèles d'entrée de l'outil de dessin ainsi renseigné. C'est en effet un enjeu, car il faudrait que l'outil de dessin puisse être customisé d'un "module environnemental", servant de *viewer* des données relatives aux paramètres environnementaux et aux paramètres techniques (ici la couleur du dessin).

Une activité métier *locale* appartenant au domaine artistique, que l'on a tendance à penser informe, inquantifiable, peut tout à fait être reliée dynamiquement à une activité d'analyse environnementale *globale* quantitative.

5.2.4.6 Synthèse des validations

Pour répondre aux objectifs du cas d'étude, ces applications de la proposition de nos recherches ont été établies dans un contexte assez différent du cas d'étude précédent

(Parkeon). Le domaine du textile associé au type de produit choisi (à faible valeur technologique ou multi-physique), présente un contexte fortement artistique, où l'inspiration des designers véhicule le message fort de la marque : le *life style* associé à la communauté des surfers & skaters.

Par rapport à ces contraintes contextuelles fortes, l'application de la proposition a apporté une réponse spécifique.

- **Sur l'inspiration des designers** : l'étude de l'activité des designers nous a montré que les travaux de veille et de recherche de tendances, sont les bases de l'inspiration du designer à chaque nouvelle collection.
- **Sur l'évaluation environnementale au cours du processus de développement des produits** : complémentarité des approches collaboratives rapides (unifiées via le PLM) et spécifiques (via la fédération).
- **Sur la question de l'activité artistique vis-à-vis de notre proposition** : comment permettre un échange pro-actif entre le graphiste et l'analyste environnemental ?

Cette liste d'applications de la proposition n'est pas exhaustive. La méthode FESTivE s'appliquerait de même à d'autres métiers, comme le chef de marque. Ces outils mis en place au niveau opérationnel ne seront utilisés par les designers que s'ils répondent à une demande tactique de la part des chefs de département. Ceci nous amène à la sous-section suivante qui a pour objectif d'illustrer les liens dynamiques à établir entre les niveaux métier, tactique et stratégique de l'entreprise.

5.2.5 Co-construction et retours d'expériences sur le déploiement de la proposition en cohérence avec les niveaux stratégique et tactique de l'entreprise (O5)

5.2.5.1 Introduction : travaux menés dans *Convergence*

La Fig. 5.31 présente la colonne vertébrale de la proposition réalisée dans le cadre de *Convergence*[29].

Les trois modules complémentaires y sont représentés : le module stratégique (en haut), le module tactique (au milieu) et le module opérationnel (en bas). En plus de cette partition par module, la Fig. 5.31 est divisée verticalement :

- **Au centre, chaque module est décrit** par les actions qui y sont menées et les métiers auxquels s'adresse le module :
  - **Le module stratégique** : fait intervenir les organes de direction, qui définissent les objectifs stratégiques en matière de développement durable, en accord avec la stratégie globale de l'entreprise. Les stratégies sont définies par des objectifs entreprise (OE) dont l'atteinte est mesurée par des indicateurs de performance (KSI).
  - **Entre le niveau Stratégique et Tactique** : les organes de direction en collaboration avec les chefs de service, ou de département proposent une feuille de

29. Nous rappelons que ces travaux sont collectifs et que cette proposition est élaborée conjointement avec tous les membres de l'ANR et en particulier avec les travaux de doctorat de Feng Zhang (module tactique) et Romain Allais (module stratégique)

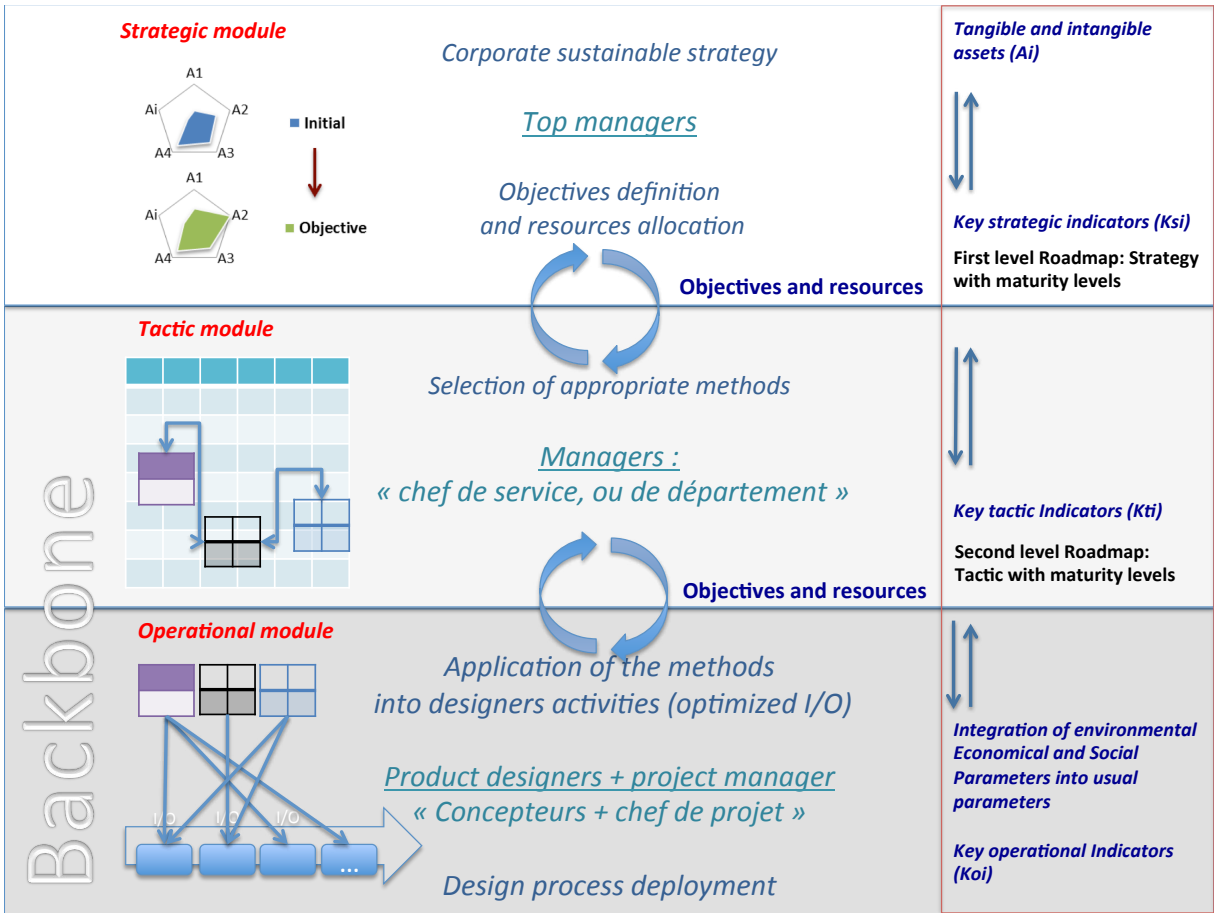


FIGURE 5.31 – Colonne vertébrale de la proposition dans le cadre du projet ANR *Convergence* (travaux collectifs)

route. Cette feuille de route compile les *objectifs stratégiques* et *les moyens tactiques (outils, méthodes, ressources) pour les atteindre*. Elle définit les niveaux de performance à atteindre en fonction des ressources allouées (niveaux de maturité).
  - **Le module Tactique (au centre)** : s'adresse aux chefs de service ou de département, leur permettant de sélectionner les méthodes adéquates afin d'atteindre les objectifs définis au niveau stratégique en fonction des ressources allouées. Par exemple, la tactique prévoit un enchaînement de méthodes de reconception ou *design for remanufacturing* : REPRO2 [Zwolinski et Brissaud(2008)], DfRem metrics [Willems et al.(2008)], RemPro matrix [Sundin(2004)], [Hatcher et al.(2011)] etc.
  - **Entre les niveaux stratégique et opérationnel** : des supports techniques sont proposés aux métiers intervenant dans le processus de conception. Ces documents décrivent les méthodes et outils sélectionnés qu'ils peuvent utiliser pour atteindre les objectifs.
  - **Au niveau opérationnel, le plus bas** : les métiers suivent les activités supportées par les outils préconisés. Grâce à la méthode FESTivE, le processus de conception est dès lors défini et déployé progressivement.
- **Sur le côté gauche chaque module est illustré par un schéma représentant** :
  - **Le module stratégique** à l'aide de deux radars : décrivant la situation initiale et la situation visée de l'entreprise vis-à-vis de sa stratégie, mesurées par les actifs (Ai). La mesure de ces gains est obtenue par un outil de comptabilité élargie [Fustec et al.(2011)].
  - **Le module tactique** par une matrice de carrés symbolise l'outil de sélection des méthodes appropriées pour répondre aux objectifs. Ce module est en effet un outil d'optimisation des activités qui seront impliquées dans la conception en fonction de choix d'outils, méthodes et ressources à déployer.
  - **Le module opérationnel** par les carrés de couleurs (symbolisant les méthodes sélectionnées au niveau tactique) reliés par des flèches, aux activités à déployer au cours du processus de conception (symbolisées par des carrés bleus aux bords ronds). Les "I/O" représentent les données d'entrée et de sortie de chaque activité. Ainsi, les données de sortie d'une activité correspondent aux données d'entrée de l'activité suivante.
- Sur la colonne droite de la figure, sont représentés les indicateurs utilisés à chaque niveau :
  - **Les trois modules sont supportés par une feuille de route**
    - **Le module stratégique** utilise deux jeux d'indicateurs : les capitaux matériels et immatériels (déduits des actifs (Ai)) et les indicateurs clés stratégiques (Ksi). Les (Ai) se présentent sous la forme d'un tableau de bord comptable qui se base sur les (Ksi). Les (Ksi) s'adressent autant aux organes de direction qu'aux responsables de service.
    - **Le module tactique** est soutenu par un jeu d'indicateurs tactiques (Kti).

Cette description théorique de la proposition de l'outil de *Convergence* nous amène à considérer les fluctuations possibles des indicateurs, suite à l'intégration de la dimension environnementale au niveau opérationnel par l'application de notre proposition de recherche.

5.2.5.2 Scénarios applicatifs

Fluctuation des ressources et des outils du niveau tactique : approche *bottom-up*

D'après les travaux de [Zhang et Zwolinski(2012)], développés dans la cadre de *Convergence*, le niveau tactique concerne les chefs de départements. Les indicateurs stratégiques sont déclinés en indicateurs tactiques (par exemple, atteindre 90% de taux de recyclabilité des produits). En fonction de ces objectifs à atteindre, les chefs de département simulent les dépenses de ressources à allouer en fonction des possibilités tactiques. Puis, ils sélectionnent la meilleure combinaison de ressources dont ils disposent, par rapport à la tactique à déployer. Les ressources couvrent les ressources en Temps-Homme, en Outils et en Connaissances.

Le Tableau 5.19 met en évidence que les préconisations au niveau opérationnel font évoluer les ressources par la liste de facteurs de variation présentés : les ressources en Outil, Connaissance et Temps-Homme.

TABLE 5.19 – Facteurs de variations des indicateurs tactiques suite à l'application des préconisations du niveau opérationnel

Type de ressource	Facteur de variation
Outils	- nouveaux outils pouvant être proposés par l'expert environnement (tous supports : étapes à réaliser dans l'utilisation des outils, procédure, etc.) - nouvel outil à l'initiative d'un métier - outils choisis par l'expert environnement pour l'analyse environnementale, classés dans la bibliothèque de modèles d'outils à déployer en fonction des contextes
Connaissances	- augmentation des connaissances : *des designers* (veille, étude des tendances en éco-conception) *de la technicienne de collection* (lors des échanges spécifiques et imprévus avec l'expert environnement) - capitalisation des connaissances dans le processus dans les transformations (libère du temps Homme)
Temps Homme	- efficacité des échanges bidirectionnels : qualité de la réponse environnementale + adéquation entre la demande et la réponse / temps de l'échange - pro-activité : anticipation des besoins des autres métiers (ex. : besoins du designer au cours d'une collection) engagement des acteurs (motivation)

Ces facteurs de variations sont donc à prendre en compte par les chefs de département du niveau tactique, pour mettre à jour les ressources dont ils disposent d'un projet sur l'autre. Elle est aussi nécessaire pour faire évoluer leurs connaissances vis-à-vis des combinaisons possibles entre les ressources (par exemple permettre une collaboration entre

la technicienne et l'expert environnement sur un projet, a pour effet d'améliorer les ressources en connaissances).

Avancement du plan stratégique : approche *top-down*

D'après les travaux du doctorant Romain Allais [Allais et al.(2012)] développés dans le cadre de *Convergence*, le niveau stratégique fait intervenir les organes de direction. Ils se positionnent par rapport aux objectifs qu'ils veulent atteindre en matière de développement durable[30]. Ils définissent les indicateurs stratégiques (recyclabilité des produits) à donner aux chefs de département du niveau tactique. Ces objectifs sont définis à l'aide de niveaux de performance. Le niveau de performance 1-faible correspond à une recyclabilité du produit en prenant en compte seulement la fabrication. Le niveau de performance 5-fort agrandit le périmètre d'action vis-à-vis de la recyclabilité du produit, en prenant en compte les moyens existants sur le territoire pour recycler le produit, avec par exemple, collecte, acheminement et développement de filières de retraitement. L'entreprise raisonne à partir son activité et du territoire sur lequel elle est implantée (entreprise étendue).

A tout moment, l'entreprise peut réaliser un bilan financier et extra financier de ces actifs matériels et immatériels. Présenté dans l'annexe A.11, le tableau de bord fondé sur le thésaurus Bercy[31] étudié dans les travaux de Romain Allais dans le module stratégique de *Convergence*, est appliqué comme exemple (non exhaustif), aux propositions réalisées dans cette expérimentation chez Quiksilver. Le *Thésaurus-Bercy* propose un moyen de mesure du patrimoine global d'une entreprise. Nous avons étudié en annexe certains des facteurs du niveau opérationnel (après l'application de notre proposition de recherche), qui peuvent selon le Thésaurus, faire varier la valeur des actifs immatériels de l'entreprise. Nous avons essentiellement étudié les capitaux suivants : le capital Humain, Organisationnel, de Système d'Information, Savoir et Naturel.

Application générale du scénario de chaînage d'indicateurs au cas d'étude Quiksilver

Nous prendrons dans cet exemple, un scénario fondé sur l'indicateur du taux de recyclabilité. Cet indicateur est bien développé au niveau des laboratoires de recherche en matériaux et couramment utilisé par les industriels, les bases de données sont donc considérablement fournies. Le démantèlement pose des questions qui engagent des choix multi-contraintes (la technique, le prix, la compatibilité d'une technologie de collage avec un matériaux, etc.) qui demandent à l'expert environnemental de gérer les impacts collatéraux associés aux différentes contraintes. L'intérêt de la fédération est justement de gérer plus dynamiquement cette complexité liée aux aspects multi-contraintes.

La Fig. 5.32 présente un chaînage possible entre les indicateurs du niveau stratégique, tactique et opérationnel.

30. Le développement durable est traité dans cette étude sous la composante environnementale

31. Le thésaurus est présenté ci-dessous, pour plus d'informations, *cf.* l'observatoire de l'immatériel, site internet : http ://www.observatoire-immateriel.com/, qui propose une méthodologie d'évaluation du capital immatériel couplée à un outil logiciel permettant de réaliser un diagnostic et une mesure des différents actifs immatériels.

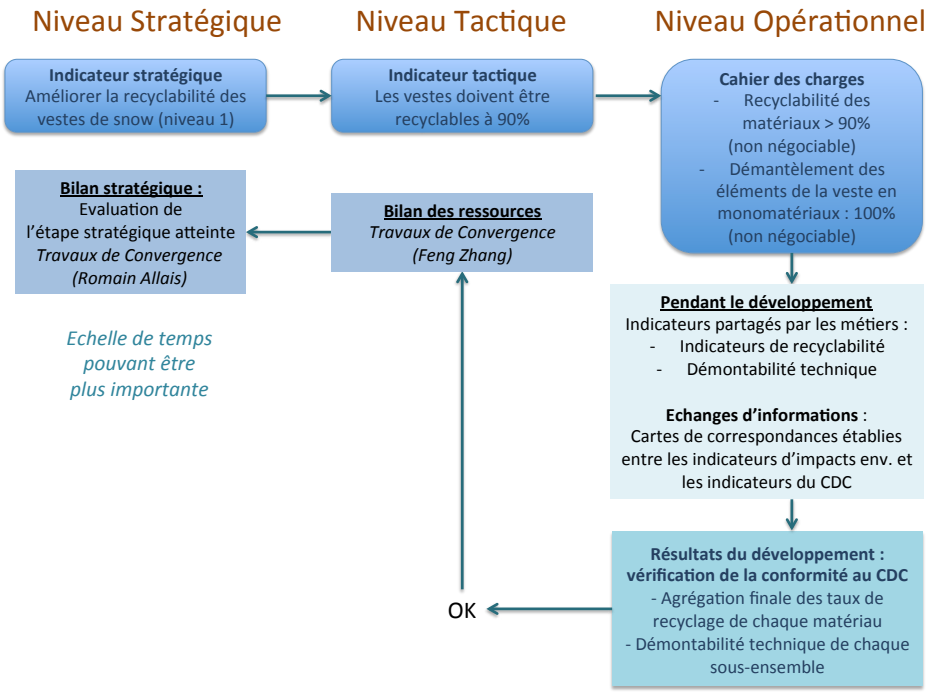


FIGURE 5.32 – Exemple de chaînage des indicateurs entre les niveaux stratégiques, tactiques et opérationnels

L'exemple prend le taux de recyclage comme indicateur stratégique (niveau de performance bas). Cet indicateur est décliné au niveau tactique sur une gamme de produits (vestes de snow), par "les vestes de snow doivent être recyclables à 90%". Cet indicateur est décliné au niveau opérationnel, au travers du **CDC** aux designers, au chef de produit et à l'ensemble des métiers intervenant dans le développement de la conception de la veste. Le CDC comporte dans cet exemple, les indicateurs suivant : *recyclabilité des matériaux supérieure à 90%* (critère non négociable) et *démantèlement à 100% des éléments de la veste en monomatériaux* (critère non négociable). Pendant la durée du développement ces critères vont guider les choix des designers. Par exemple, au niveau de l'application de la proposition de recherche :

- **Le designer** s'inspire de combinaisons de matériaux et fermetures pouvant être facilement démantelés pour concevoir la veste : grâce aux sites internet, aux expositions auxquelles il a participé, à la lecture d'ouvrages, etc.
- **La technicienne de collection** a besoin d'informations relatives au taux de recyclabilité des matériaux : (1) elle consulte la base sur le PLM, (2) le matériau qu'elle cherche n'existe pas, elle pose directement la question à l'expert environnement et fédère son classeur Excel contenant les données relatives au produit et au nouveau matériau avec l'outil que l'expert environnement aura choisi. Elle reçoit une réponse à sa question directement sur son outil Excel (elle peut réitérer et comparer). Possibilité que cela entraîne une mise à jour du PLM (évolution des bases de données matériaux et données relatives au taux de recyclabilité).

– **Pendant toute la durée du développement de la veste** : au début du processus, l'expert environnement sélectionne dans sa base de données, le modèle de transformation relatif au calcul du taux de recyclabilité des matériaux et accessoires. Pendant toute la durée du processus, il renseigne d'une manière dynamique les métiers par rapport aux critères du CDC. Quand le chef de produit le lui le demande, il agrège l'ensemble des valeurs des taux de recyclabilité de chaque sous-ensemble et chiffre le taux de recyclabilité global de la veste en cours de développement. Il donne aussi une réponse au critère de démontabilité technique.

Sur cet exemple, nous remarquons qu'il est tout à fait possible de faire un scénario cohérent entre les trois niveaux, supporté dans l'outil développé dans *Convergence*.

5.3 Synthèse des résultats apportés par les expérimentations

5.3.1 Validation de la proposition dans le contexte opérationnel du processus de conception

La méthode FESTivE que nous avons proposée dans ces travaux de recherche comprend deux volets : la création et de déploiement des modèles d'outils, aux termes desquels la proposition satisfait les trois propriétés fondamentales énoncées. L'expérimentation n°1 présentée dans ce chapitre avait pour objectif d'expérimenter et de valider l'applicabilité de la méthode FESTivE en milieu industriel.

La méthode FESTivE de création d'une bibliothèque d'outils est applicable en milieu industriel

L'expérimentation n°1 réalisée dans le cadre du cas d'étude NTR dans l'entreprise *Parkeon* montre que les étapes de la méthode FESTivE s'enchaînent d'une manière cohérente et sont adaptés au milieu de l'entreprise. L'implémentation du système d'information de l'entreprise par les propositions de fédération des outils métier *locaux* existants en conception "classique" et les outils métier d'analyse environnementale *globale* se fait progressivement, d'une manière incrémentale, et sur des cycles d'itérations courts. L'implémentation est alors testée et validée par les métiers eux-mêmes (méthode de développement de type Spirale).

La méthode FESTivE de déploiement des outils de la bibliothèque est praticable en milieu industriel

La précédente partie de la méthode FESTivE permet d'enrichir une bibliothèque de modèles associés à des outils (*locaux et globaux*), ou aux calculs spécifiques (fonction de calcul du taux de recyclabilité ou de la consommation énergétique par exemple). Ensuite, les outils d'analyse environnementale *globale* sont déployés au cours du processus de conception en fonction du contexte (spécifié par des indicateurs contextuels : type de données disponibles, étape, etc.). Le prototype réalisé sur deux itérations et utilisant une analyse environnementale simplifiée, puis détaillée, valide la méthode FESTivE sur le plan technique. Le retour des utilisateurs par le biais des maquettes en valide la méthode FESTivE sur le plan pratique.

La proposition vérifie les trois propriétés

Les résultats de l'expérimentation n°1 montrent comparativement à la situation initiale, que la proposition rend plus dynamiques les échanges entre les métiers (propriétés 2 et 3). L'expert environnement a la capacité de déployer les outils d'analyse environnementale les plus appropriés au contexte d'éco-conception du projet (adaptation aux contextes propriété 1). Enfin, la proposition améliore la pro-activité entre les activités métiers *locales* et l'activité d'analyse environnementale *globale* (effet des propriétés P1, P2 et P3).

5.3.2 Illustration de la proposition dans une démarche environnementale globale d'entreprise

L'expérimentation n°2 illustre la capacité de la proposition à s'appliquer à une démarche environnementale globale d'entreprise. La proposition est soutenue par des liens dynamiques et cohérents entre la tactique, la stratégie et le niveau opérationnel de l'entreprise. Nous avons proposé plusieurs facteurs influençant la capacité des designers à prendre en compte la dimension environnementale :

- des facteurs influençant les autres niveaux, issus du niveau opérationnel :
  1. facteurs influençant les ressources au niveau de la tactique ;
  2. facteurs influençant sur le plus long terme, les actifs immatériels de l'entreprise (fondé sur le Thésaurus Bercy, un référentiel de mesure développé conjointement par des universitaires et des experts comptables, ainsi que des consultants en analyse financière, et utilisé par des grands groupes (Auchan, SAP, Véolia Propreté, etc.)).
- l'illustration d'un chaînage possible d'indicateurs entre les niveaux stratégique, tactique et métier, par une mise en situation effectuée au niveau opérationnel.

De plus, la proposition est applicable au milieu du textile, au cours d'un processus de développement d'un produit plus tourné vers des valeurs esthétiques que technologiques. L'activité du designer est donc primordiale. Bien que son métier soit plus d'ordre artistique, notre proposition s'y applique, en formalisant les données échangées (grâce à l'approche d'IDM véhiculée par la méthode FESTivE).

Les résultats de l'expérimentation mettent en évidence : une complémentarité des systèmes collaboratifs de type "unification", permettant des échanges rapides (et routiniers), et des systèmes collaboratifs soutenus par la "fédération", permettant des réponses spécifiques qui s'adaptent aux variations des contextes que suppose la démarche d'écoconception.

Chapitre 6

Conclusions et perspectives

6.1 Conclusion

Au regard des enjeux internationaux environnementaux transparaissant dans les directives et les règlements, l'éco-conception apparaît comme un chemin nécessaire pour l'industriel. Comme nous venons de voir et au regard de la complexité du travail des concepteurs, l'environnement peine à être intégré parmi les autres critères de la conception.

En partant de l'analyse du contexte des activités des concepteurs, nous nous sommes positionnés sur **trois hypothèses** soutenant l'intégration de la dimension environnementale en conception. Premièrement, la dimension environnementale est intégrée au coeur des activités des métiers intervenant dans le processus de conception. Ensuite, les concepteurs peuvent s'adapter aux contextes évolutifs de la prise en compte de la dimension environnementale en conception. Enfin, le système d'information gère les échanges d'informations spécifiques entre l'activité d'analyse environnementale et les autres activités métier.

A travers l'état de l'art, nous avons exploré chaque domaine associé aux hypothèses. La première section a analysé les possibilités d'intégration du paramètre environnement au coeur des activités des concepteurs selon trois paramètres. Le premier faisait appel à la notion essentielle de cycle de vie. Le second concernait les opportunités et les limites dans les phases du processus de conception. Le troisième paramètre étudié fut celui de la connaissance environnementale minimale nécessaire à cette intégration.

La seconde section s'est intéressée aux éléments contextuels ayant une influence sur le choix de l'analyse environnementale en conception. Une lecture des outils et méthodes d'éco-conception a été réalisée suivant ces critères contextuels et suivant une organisation *locale/globale*. Cette organisation spécifique est une vue de l'esprit permettant d'identifier plus facilement les échanges d'informations entre les métiers *locaux* et l'activité transversale d'analyse environnementale. Ces deux premières sections ont fait émerger la nécessité de pouvoir échanger des informations de manière dynamique entre les outils *locaux* et *globaux*. Les échanges sont "dynamiques". Ils peuvent être déployés du *local* vers le *global* et inversement, et de manière rapide et adaptée aux choix d'outils qui s'offrent aux

concepteurs en fonction des éléments contextuels de la conception.

La troisième section a analysé les solutions d'interopérabilité entre les outils de conception et d'analyse environnementale. C'est-à-dire la capacité de ces outils à échanger des informations et à se les approprier. Plusieurs illustrations de développement ont été prises afin de faire émerger les avantages, les limites et les opportunités des systèmes d'interopérabilité existants.

Ces trois analyses ont convergé vers l'identification de **trois verrous** majeurs : le verrou *d'intégration*, le verrou *contextuel* et le verrou *technique*. Le verrou d'intégration révèle une confusion existant entre les niveaux *local* et *global* amenant à une rupture des liens sémantiques et des relations de cause à effet, entre les paramètres de conception *locaux* et les paramètres environnementaux *globaux*. Le verrou contextuel correspond à une absence de bibliothèque de modèles d'outils disponibles pour les concepteurs et prenant en compte la dimension environnementale, ordonnés par critères contextuels. La bibliothèque de modèles disponibles n'est ni accessible au sein de l'entreprise, ni au sein de réseaux ou communautés de partage qui pourraient en avoir besoin. Enfin, le verrou technique tient de l'incapacité du système d'information et des outils dans la configuration actuelle à s'adapter aux contextes variés de la pratique de l'éco-conception. Notre analyse de l'existant nous amène donc à penser que ces trois contraintes rendent le processus de conception peu adapté à une intégration efficace de la dimension environnementale.

Dès lors, notre proposition de recherche présentée au quatrième chapitre consiste premièrement à se placer dans le cadre *local/global*. Ceci résulte d'une vue de l'esprit qui consiste à dissocier le niveau *global*, qui confère une vision transversale, du niveau *local* des activités des concepteurs. Dans ce cadre, nous proposons une méthode déclinée en deux procédures complémentaires : la méthode FESTivE, pour *Federate EcodeSign Tools modEls*. La première partie consiste *à construire* au niveau *global* une bibliothèque d'outils classés selon des critères contextuels. Pour chaque outil sont définis les méta-modèles d'entrée et de sortie, ainsi que des modèles de transformation (ou cartes de correspondances) entre ces méta-modèles. La seconde partie de la méthode FESTivE permet de sélectionner les outils issus de la bibliothèque afin d'assurer un échange dynamique d'informations. Ces échanges sont soutenus par les transformations de modèles entre les outils choisis au niveau des activités *locales* et les outils d'analyse environnementale *globale*.

Le cinquième chapitre présente les expérimentations que nous avons réalisées sous deux cas d'étude industrielle, dans les entreprises Parkeon et Quiksilver.

L'expérimentation n°1 a montré que la proposition de recherche appliquée au cas d'étude a configuré différemment la collaboration entre les concepteurs et l'expert environnement. Cette situation nouvelle confère trois propriétés fondamentales : la capacité de s'adapter à la variabilité contextuelle que nécessite l'éco-conception, la détection et l'échange des données disponibles nécessaires à l'activité environnementale et la capacité d'y répondre d'une manière adaptée, et enfin, la possibilité de lier les paramètres environnementaux aux paramètres des métiers locaux au cours du processus de conception. Cette expérimentation témoigne du fait que le déploiement de la méthode FESTivE en industrie permet aux

concepteurs d'échanger des informations spécifiques rapidement sur des itérations courtes.

La seconde expérimentation va plus loin en mettant en évidence une complémentarité des systèmes collaboratifs favorisés par l'application de notre proposition et donc, de la méthode FESTivE. Des échanges rapides et routiniers sont possibles et complémentaires aux échanges spécifiques et dynamiques qui ont lieu entre les concepteurs *locaux* et l'expert environnement. De fait, ces derniers ont une meilleure faculté organisationnelle et intellectuelle à anticiper les besoins de l'autre. Leur capacité à être pro-actifs dans le déroulement du projet est augmentée. Cet environnement fournit donc un moyen pratique à l'expert environnement pour piloter sa tactique environnementale tout au long du processus de conception des produits. Dès lors, l'expérimentation n°2 corrobore le fait que la proposition peut s'inscrire dans une démarche environnementale globale d'entreprise, dans laquelle le niveau des métiers de l'opérationnel entretiendrait des liens cohérents et dynamiques avec les niveaux tactiques et stratégiques.

Contribution industrielle

La méthode FESTivE développée dans nos travaux est applicable au milieu industriel et nous avons également montré qu'elle pouvait s'inscrire dans une démarche globale d'intégration de l'environnement en entreprise. Le support d'enquête et la légende utilisés pour cartographier le système d'activités impliquées et les informations échangées dans l'entreprise peuvent être applicables à différents contextes d'entreprises. La cartographie dresse un bilan de l'intégration de la dimension environnementale au coeur des activités de l'entreprise.

Les résultats de la première expérimentation ont apporté à Parkeon des solutions pratiques pour intégrer l'environnement en conception autour de sa problématique propre (notamment le taux de recyclabilité ou l'optimisation énergétique). La contribution directe des travaux menés a été d'alimenter la réflexion de Parkeon sur l'amélioration du SI pour les concepteurs. Les enquêtes et interviews peuvent être considérées comme un "audit externe" environnemental. La mise en oeuvre de la proposition de manière pérenne nécessite toutefois une volonté des chefs de départements.

L'entreprise Quiksilver est pour sa part une entreprise pilote dans le test de l'outil développé dans le cadre du projet de l'ANR *Convergence*. Dans nos travaux, nous avons créé un support d'enquête permettant de réunir les informations nécessaires à l'application de la méthode FESTivE. Ce support d'enquête a aussi la capacité d'étendre son périmètre. Il a en effet servi de base pour définir les informations relatives aux autres niveaux de l'opérationnel de l'entreprise : les niveaux stratégique et tactique concernant les directeurs et chefs de département. Nous avons souligné la complémentarité de nos travaux avec ceux des deux doctorants du projet ANR *Convergence*. Chacun de nous trois développant en synergie avec les deux autres niveaux, un niveau spécifique de l'outil de *Convergence*. Ainsi, les travaux de recherche présentés dans cette thèse contribuent au module "Opérationnel" de cet outil, qui se situe au niveau des métiers de la conception (ou du *design*). De fait, dans sa phase d'exploitation (prévue en 2013), l'outil contribuera à améliorer la mise en pratique globale du Développement Durable pour les industriels, dans un rayonnement territorial Français. L'IFTH assurera la diffusion de l'outil.

Au service des experts environnement : la proposition présente un avantage non négligeable pour l'expert environnement. Grâce aux solutions dynamiques d'échanges d'informations, l'effort nécessaire à la collecte des données à jour en fonction de l'avancé de la conception sera considérablement réduite. De plus, l'expert environnement peut comparer rapidement deux éléments de conception entrant en jeu dans les résultats d'analyse environnementale, sans avoir à recommencer la modélisation complète du système. Ainsi, l'expert est en mesure de faire une communication environnementale fiable sur la partie liée uniquement aux variables de conception.

Au service des concepteurs : l'échange des informations environnementales se fait d'une manière bidirectionnelle avec l'expert environnement. Elles peuvent être supportées de manière complémentaire par des outils collaboratifs communs (échanges routiniers), ou spécifiquement pour des demandes inhabituelles. Les informations sont adaptées au langage du métier. Chaque information est en effet contextualisée dans l'outil métier et mise en relation avec les paramètres métier maîtrisés localement par le concepteur. Les cartes de correspondances entre les méta-modèles ont la capacité d'assurer la conservation de la sémantique associée à la donnée. Ainsi, le concepteur est plus facilement à même de pouvoir faire le lien entre l'information environnementale qu'il reçoit et ses choix de conception. Le concepteur voit sa capacité d'anticipation par rapport au paramètre environnement augmenter.

Au service de l'entreprise : en tant que contribution actuelle mise en perspective dans le devenir du projet ANR *Convergence*. L'outil proposé permet de gérer des ressources liées à l'environnement. Il supporte la mise en oeuvre opérationnelle par les métiers de la conception, de critères environnementaux choisis par les chefs de département ou de service et la direction de l'entreprise. Au niveau des concepteurs et de l'expert environnement, l'outil repose sur l'application de la méthode FESTivE. Les avantages présentés dans les deux paragraphes précédents se retrouvent donc dans une perspective plus globale d'amélioration de l'intégration de la dimension environnementale au sein de l'entreprise.

Lors du déploiement de l'outil *Convergence* en industrie, il sera important de veiller à l'utilisation qui en est faite. Comme tout outil de gestion utilisant plusieurs indicateurs sur l'activité des agents, il aura une influence sur la psychologie des personnes qui s'en servent. Il est important de promouvoir la capabilité au sens de [Buclet(2011b)]. Il s'agit de donner les moyens aux concepteurs pour qu'ils soient plus autonomes dans leur activité et non pas qu'ils se sentent observés en permanence. Dans cette perspective, les indicateurs locaux utilisés par les concepteurs pourraient ne pas être visibles pour les chefs de service. Un autre garde-fou consisterait à ne déployer certains indicateurs que lors de jalons prévus à l'avance.

Contribution académique

Les apports académiques de nos travaux de recherche sont de proposer une méthode fondée sur un développement informatique spécifique à l'ingénierie dirigée par les modèles (IDM), au service de l'intégration de la dimension environnementale dans les processus d'ingénierie produit. Nos travaux transposent donc une partie des apports scientifiques

issus du domaine de l'IDM, au domaine de l'ingénierie produit, pour enrichir le domaine scientifique de la recherche en éco-conception.

Notre proposition utilise la méthode FESTivE ayant la capacité de séparer l'espace technique des applications de celui des modèles (propriété fondamentales de la fédération supportée par l'IDM). Il est dès lors possible de travailler sur les méta-modèles associés aux outils de conception et d'analyse environnementale, indépendamment des technologies. Les outils sont utilisés à toutes les étapes du processus de conception. La prise en compte de l'environnement peut donc être initiée dès les phases amont et s'étendre jusqu'à la fin du processus de conception. Comme les phases amont sont particulièrement propices à l'innovation, la proposition peut être vecteur d'innovations environnementales.
Par l'utilisation de la méthode FESTivE, le potentiel qui s'offre alors à l'éco-conception est tout à fait puissant.

- **Il est possible de définir à l'avance des méta-modèles** relatifs aux données d'entrée ou produites par un outil utilisé en éco-conception.
  Nous en avons donné quelques exemples. Dissociés de l'espace technique des applications, ces méta-modèles peuvent être complétés selon les évolutions de manière incrémentale, échangés, même entre concurrents (seules les instanciations comportent les données réelles). Les méta-modèles peuvent comporter des parties relatives à différents aspects de l'outil (informations qualitatives ou quantitatives, relations entre entités, etc.). Le même méta-modèle peut être utilisé dans des transformations différentes intervenant à des moments différents du processus de conception. Il est en effet possible de n'utiliser qu'une seule partie du méta-modèle dans une transformation. Par exemple, un outil proposant des analyses qualitatives et quantitatives disposerait d'un méta-modèle comportant une partie relative aux aspects qualitatifs et une autre relative aux aspects quantitatifs.

- **Il est possible de créer des "connections" entre ces méta-modèles**, pour permettre d'approcher au mieux la systémique des échanges réalisés dans une situation de collaboration entre des concepteurs *locaux* et l'expert environnement réalisant une analyse environnementale *globale*. La fédération permet d'assurer des échanges de données spécifiques.
  Nous avons défini des catégories de transformations de modèles possibles : allocations, équivalence de bases de données, calculs (fonctions plus ou moins complexes : exemple du calcul du taux de recyclabilité ou de la performance énergétique d'un système). Ces transformations peuvent être implémentées de manière modulaire, dans un espace de code hétérogène, qui peut évoluer en fonction du *turn over* des informaticiens.

- **Il est possible de s'échanger les méta-modèles relatifs aux outils et les modèles de transformation dans un esprit communautaire**, aussi bien entre les industriels que les chercheurs. L'objectif est d'enrichir une bibliothèque de méta-modèles relatifs aux données manipulées par les outils, classés par critères contextuels. En effet, dans le cas de la fédération, les transformations et les méta-modèles sont indépendants, et donc peuvent être échangés séparément.
  Nous avons donné des exemples de catégories de critères contextuels nécessaires à

prendre en compte pour choisir l'outil adapté à l'analyse environnementale permettant de suivre les objectifs fixés en matière d'éco-conception. A travers l'outil *Convergence*, les échanges pourraient se développer aussi au niveau des modèles tactiques et stratégiques : feuilles de routes, bouclage de flux. Ce dernier point relève des stratégies d'écologie industrielle. L'entreprise pourrait ainsi partager sur son territoire une cartographie de ses flux pour permettre la mise en place de synergies industrielles.

– **Il est possible d'unifier certaines relations entre données**, si certains échanges reviennent de manière régulière, afin de créer un méta-modèle pivot, commun.
C'est déjà le cas pour les outils d'ACV interopérant avec les outils de CAO[1]*. Si les données pour un autre outil se stabilisent dans quelques années, permettant de définir suffisamment finement la sémantique d'un méta-modèle (servant de médiateur), il serait envisageable de créer un méta-modèle pivot, définissant de manière unifiée les relations entre ces modèles. Il concernerait en particulier les parties collaboratives des modèles associés aux outils métiers.*

Ces points permettent de répondre à la demande *d'échanges spécifiques et imprévus* d'une manière dynamique selon les contextes différents (approche fédérative), et à la demande *d'échanges répétitifs et identiques*, concernant les analyses plus "routinières" (approche unifiée). **Nous avons montré la complémentarité de ces approches lors de l'expérimentation n°2**.

Si nous rentrons un peu plus dans les détails des méta-modèles, l'intérêt de les définir dans le cadre de l'analyse environnementale est de pouvoir formaliser des données tout en gardant leurs liens sémantiques associés. En effet, dû à son caractère transversal, nous avons vu qu'une des difficultés à laquelle doit faire face l'analyse environnementale, est la gestion des impacts collatéraux des différents choix réalisés par les différents métiers *locaux*. Or, conserver la sémantique associée aux données dans les méta-modèles d'origine permet de conserver les relations entre plusieurs variables[2].

Les conséquences de l'application de la proposition au niveau de la pratique de l'éco-conception sont de plusieurs ordres. Tout d'abord, il est plus facile et rapide pour les concepteurs de prendre en compte le paramètre environnement. A terme, le paramètre environnement pourrait être intégré systématiquement dans les prises de décision, comme le paramètre coût ou faisabilité. Cette facilité joue sur un autre ordre : celui de la motivation. Les concepteurs et les experts environnement sont plus entrains à collaborer ensemble. L'expert environnement ressent moins de frustration, car il a plus de facilité à être compris et les concepteurs ont plus de facilité à anticiper ses besoins. D'autre part, si l'application de la méthode FESTivE est dans une démarche globale de prise en

1. Voir les possibilités d'un modèle Pivot sur le logiciel SIEC par exemple : http ://www.acv-siec.fr/siec/index.php/siec/produit-siec, août 2012.

2. Exemple de relation entre plusieurs variables pouvant être conservée dans les méta-modèles : à un fournisseur dépend la donnée sur le matériau et sur le transport. Dans le méta-modèle de type diagramme de classe UML, on définira une relation d'association de classes entre la classe contenant les données "matériaux" et celle des données "transport", le tout hérité par la classe parent "fournisseur".

compte de l'environnement au niveau de l'entreprise, notamment par l'outil *Convergence*, la justification des objectifs de son travail est nettement facilitée. La crédibilité de l'expert environnement est renforcée par sa capacité à avoir une action *locale* et une vision *globale* complémentaires.

Ces travaux sont en revanche limités au niveau de la mesure réelle des améliorations environnementales apportées par la proposition. De même que l'innovation environnementale réelle pouvant être stimulée par la méthode FESTivE n'a pas été démontrée.

Le prototype et les maquettes nous ont permis de comparer la proposition fondée sur des hypothèses à une réalité améliorée. Nous avons réalisé un "démonstrateur" comme la plupart des recherches en conception. Il montre que la méthode est applicable en milieu industriel. Et que la situation améliorée confère des propriétés qui lèvent les verrous que nous avons identifié à l'issue de l'état de l'art. En revanche, la mesure précise du degré de réduction des impacts environnementaux que généreront les produits conçus n'a pas pu être réalisée. Tout comme la capacité à éco-innover, ou a "faire mûrir" des idées innovantes des phases amont du processus de conception en les concrétisant par la conception d'un produit radicalement innovant du point de vue environnemental, n'ont pas été démontés.

Comme le précise [Blessing et Chakrabarti(2009)], une validation complète de la proposition n'est pas toujours possible pour plusieurs raisons. Dans notre cas, le temps de nos recherches est d'une trop courte durée pour que nous puissions terminer la validation sur le terrain. Nous proposons donc un plan de validation qui permettra de continuer cette validation.

6.2 Perspectives

6.2.1 Plan de validation des travaux

L'objectif de ce plan de validation est de pouvoir évaluer la conséquence environnementale de l'utilisation de notre proposition chez les industriels de contextes différents. C'est-à-dire la capacité de notre proposition à augmenter le nombre de produits éco-conçus relativement à l'ensemble des produits conçus.

Dans un premier temps, il convient de mesurer le niveau de pro-activité développé par les concepteurs. Nous avons défini à la section 5.1.5 les critères permettant d'évaluer cette pro-activité : *augmentation du nombre de liens entre paramètres métier local et paramètres environnement, avec des taux d'informations formalisées plus important*, ainsi que *la réduction du temps dépensé par échange d'information*. Pour évaluer la pro-activité, il faut mesurer sur plusieurs projets les tendances enregistrées sur ces trois critères. Des enquêtes de terrain seront nécessaires. Ensuite, cette tendance doit être validée par la variation de trois autres critères : *l'augmentation de la réactivité des concepteurs et de l'expert environnement par itération, la réduction du temps par itération*, ainsi que *l'augmentation de la capacité d'anticipation des concepteurs et de l'expert environnement sur deux ou trois itérations*. Si la tendance enregistrée sur plusieurs cas d'études et sur plusieurs années de pratique montre que l'augmentation des trois premiers critères va de paire

avec l'augmentation des trois suivants, alors nous pourrons conclure que la pro-activité chez les concepteurs est augmentée.

L'augmentation de la pro-activité chez les concepteurs peut avoir plusieurs effets. Nous cherchons à mesurer si la pratique de l'éco-conception de manière pro-active permet aux concepteurs d'éco-concevoir plus de produits (ou de systèmes, de services).

Dans un second temps, il s'agit donc de mesurer par les statistiques l'évolution du rapport des "produits éco-conçus" sur "produits conçus". Si cette évolution suit une courbe croissante, alors nous pourrons conclure que la méthode permet d'améliorer le taux de produits éco-conçus. C'est-à-dire qu'elle systématise l'éco-conception à tous les projets.

Dans ces mesures statistiques, il sera impossible d'isoler le sujet afin qu'il n'y ait que les critères choisis qui influencent les résultats des mesures. Des interviews sont donc nécessaires pour vérifier auprès des concepteurs les circonstances des mesures enregistrées. Ils seront capables d'identifier les raisons de l'évolution des critères que nous avons cités. Ces raisons peuvent être aussi bien la performance du système d'information, comme une meilleure entente entre les concepteurs pour des raisons affectives. Les raisons doivent correspondre avec la mise en pratique de notre proposition, et ce, quelle que soit son évolution de par l'appropriation qui en est faite par les concepteurs.

6.2.2 Eco-conception en phase amont

De part la diffusion scientifique de ces travaux au travers des publications, colloques et travaux de recherche avec les industriels, plusieurs perspectives de recherche nous paraissent intéressantes.

La formalisation des données est propice à la pratique de l'éco-conception dans les phases amont. Nous avons montré sur l'exemple de la fédération entre les outils de dessin et d'analyse environnementale que la méthode que nous proposons peut également s'appliquer dans les phases amont du processus de conception, lorsque les concepts ne sont pas encore définis. Au niveau de l'analyse fonctionnelle, nous avons réalisé des essais de transformations entre méta-modèles provenant de l'outil d'analyse fonctionnelle et d'un outil d'analyse environnementale qualitative, afin de créer et conserver un lien sémantique entre les fonctions du produit et choix de conception pris par la suite. Les travaux de [Iraqi et al.(2012)] montre la possibilité de fédérer un outil d'analyse fonctionnelle avec un outil de CAO (fédération d'outils *locaux/locaux*).

Dans ces recherches nous n'avons pas étudié spécifiquement la fédération des outils de créativité. Une séance de créativité en groupe permet d'identifier des concepts. Pendant cette phase, la fédération n'a pas forcément d'intérêt puisque les personnes échangent verbalement. Ensuite, ces concepts doivent être évalués de manières collective et individuelle par le groupe. C'est là que l'interprétation des concepts par les métiers rentre en jeu. Cette étape est celle qui doit susciter l'adhésion chez les participants. [Pol et al.(2004)] montre que cela représente le moment critique de l'innovation. Lors de cette interprétation ils utilisent des outils pour générer des modèles propres à leur métier. Les transformations d'informations entre les modèles pourraient opérer à ce moment afin qu'ils partagent les "vues métiers" de chaque membre du groupe. Dans nos perspectives, il serait intéressant de travailler sur les transformations nécessaires dans ces échanges en phases amonts. Cela

s'inscrit dans le même ordre d'idée que les transformations réalisées dans le cas d'étude Quiksilver avec le graphiste.

6.2.3 Capitalisation et suivi des données et des transformations dans le temps

La proposition pourrait permettre d'anticiper le niveau de complétude des données d'entrée d'un modèle (par exemple, celui des ICV) à extraire de plusieurs modèles provenant d'activités différentes. Comme présenté sur la Fig. 6.1, une loi de complétude des données relatives à un modèle d'entrée pourrait retracer l'évolution de l'apport de données en fonction du temps (ou du nombre d'itérations) pour un projet type. Par exemple les données disponibles d'un inventaire du cycle de vie au

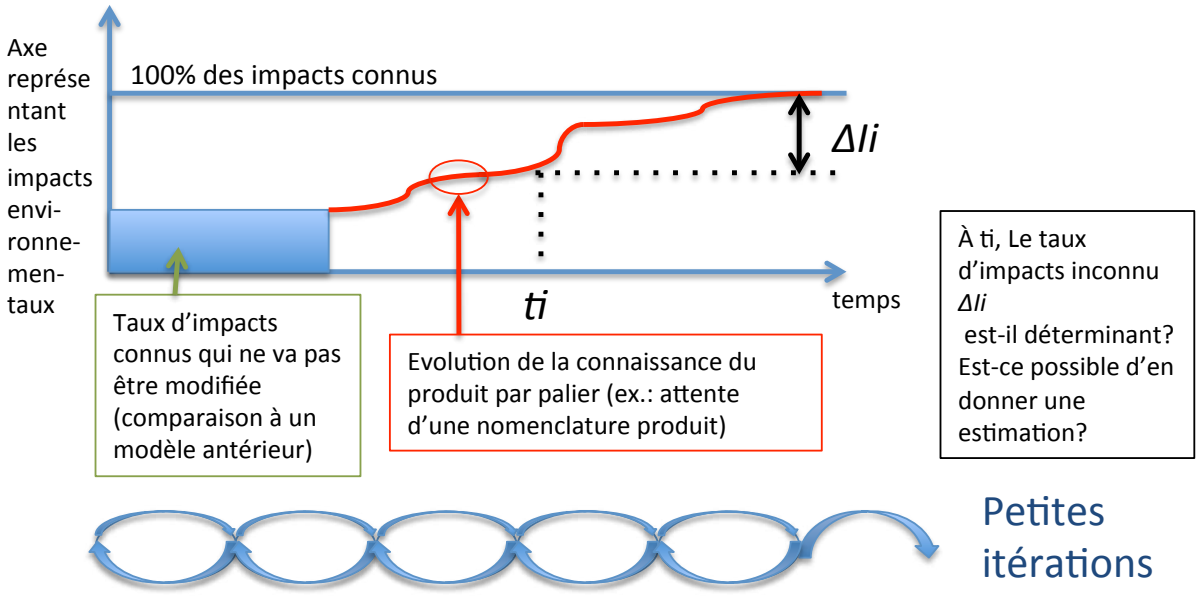


FIGURE 6.1 – Seconde perspective issue des résultats de l'enquête lors du projet NTR

court du temps en début de processus, évolueront vraisemblablement par paliers.

Chaque palier correspond à l'apport d'un métier. Cependant, la configuration change si les données issues d'une transformation proviennent de plusieurs modèles de sortie.

Dans ce cas, l'évolution de complétude suivrait plutôt une loi d'évolution de type exponentielle. L'intérêt serait de pouvoir prévoir et évaluer à partir de quel moment les données qui manquent sont déterminantes à la hauteur de x% sur le calcul le l'évaluation finale. Ce qui revient à pouvoir évaluer la fiabilité des résultats en fonction de l'apport de données d'entrée. Et cela pourrait aider l'expert environnement à évaluer les risques de ces décisions dans les étapes clés décisionnelles en conception.

La proposition pourrait permettre de capitaliser les échanges effectués lors d'un projet. La capitalisation pourrait être réalisée sous la forme de "traces de processus". Les liens sémantiques entre les méta-modèles pourraient permettre de "remonter"

la *trace que le processus de conception* a laissé en avançant dans le temps. Des travaux sont en cours au laboratoire du LSIS sur la modélisation de *traces de processus*.

En comparant les traces de plusieurs projets de même type, l'expert environnement établit des liens de causalité entre les trajectoires (et types d'échanges d'informations) et les améliorations environnementales réalisées. Ces liens permettraient d'évaluer l'efficacité des trajectoires vis-à-vis du paramètre environnement. Ils aideraient à la définition des critères contextuels et au choix de nouveaux outils. De plus, les "blocages" dans les échanges d'informations pourraient être détectés et gérés rétrospectivement afin d'anticiper de futures ruptures[3] dans les échanges.

Cette perspective peut être enrichie en ajoutant de la connaissance liée aux décisions prises au fil du processus. En effet, le CREIDD et le Laboratoire des Systèmes Mécaniques et de l'Ingénierie Simultanée (LASMIS) de l'UTT mènent actuellement des travaux sur l'utilisation de la mémoire de produit dans le cas de l'éco-conception. L'objectif de ces travaux est d'augmenter l'efficacité de l'éco-conception. Cela est réalisé au moyen d'un support informatique capitalisant les décisions critiques qui ont été prises lors d'un projet de conception. Le terme "critique" est interprété ici par rapport à la conséquence de la décision vis-à-vis des impacts environnementaux générés. Une partie du travail de la doctorante Miriam Kozemjakin da Silva est de vérifier si des améliorations environnementales peuvent être réalisées lorsque les concepteurs remettent en question leurs choix antérieurs de conception. Cette remise en question a lieu lorsque le concepteur souhaite consulter une prise de décision antérieure au projet qu'il est en train de suivre. La démarche ressemble à celle du *Case based reasoning*, sauf que l'objectif est de remettre en question les causes des choix réalisés antérieurement.

La perspective de nos travaux est de coupler l'outil informatique capitalisant l'ensemble des décisions critiques de projets antérieurs proposés dans les travaux de l'UTT, à l'outil capitalisant l'ensemble des traces de processus (Arts et Métiers). Les traces de processus étant reliées aux contextes des échanges d'informations réalisés entre les activités, il serait possible d'établir un lien de cause à effet entre une prise de décision critique et son contexte dans le projet antérieur. Ainsi, l'expert environnement pourra retrouver dans la mémoire des projets l'instant critique vis-à-vis d'un contexte. Il formulera alors des recommandations pour les concepteurs, voire choisira un outil d'analyse environnementale pertinent. A travers ces recommandations, les concepteurs remettront en question les causes des choix qui ont été pris à l'issue des décisions critiques antérieures.

Cette double traçabilité permettrait de remonter à la raison des choix de conception et de les réévaluer. Les choix pris par habitude sont remis en question. Ce qui est propice à l'innovation. De plus, les modèles de transformations associés aux échanges ayant eu lieu lors des prises de décisions critiques pourront être implémentés rétro-activement afin d'augmenter leur robustesse.

Finalement dans cette perspective, l'évolution des concepts pendant le processus de conception est mise en correspondance avec la connaissance déployée par les métiers. Et

3. Ces "blocages" peuvent avoir pour cause un problème technique d'implémentation ou de définition des transformations, une rupture sémantique associées aux données. Les méta-modèles doivent dans ce cas être modifiés ou simplement complétés. Cela peut être également à cause d'une rupture d'intégration de l'information dans l'activité métier : connaissances minimales permettant l'interprétation de l'information manquante, indisponibilité des *viewers* dans l'outil métier, etc.

cela remet en question les propositions de conception. Ce n'est pas sans rappeler la *théorie C-K*[4] de [Hatchuel et Weil(2003)].

Evolution des modèles de transformations : les travaux liés à la mémoire de projets, développent des modèles sur la représentation des connaissances en vue de leur capitalisation. Il serait intéressant d'explorer leur potentialité afin d'envisager comment enrichir les modèles de transformations d'informations. Par exemple, des modèles issus du web sémantique mettraient en avant des aspects plus *humains* dans les échanges d'informations : les associations d'idées, les relations entre les concepts, le lien entre représentation et perception, etc. Ce travail pourrait être en lien avec les équipes de recherche travaillant sur la sémantique de conception : développement de correspondance entre des notions de sciences sociales et des notions d'ingénierie (évolution comportementales, des connaissances, interactions, etc.). Cette réflexion peut nous aider à développer une économie tournée vers la fonctionnalité des produits, alternative à l'économie fondée sur la possession du bien.

Cette thématique débouche sur la question de notre manière de faire de la conception aujourd'hui. Sommes-nous en mesure de faire coïncider deux temps de conception : celui associé aux sciences sociales et celui des sciences de l'ingénierie d'aujourd'hui ?

6.2.4 L'éco-conception de systèmes durables

Au fond, sommes-nous en train de nous poser les bonnes questions vis-à-vis de l'éco-conception ? D'après Nicole Jetté-Soucy[5], "le péril majeur aujourd'hui ne réside pas dans la dégradation de l'environnement, mais dans la démission de l'homme et de sa pensée (...). La protection de l'environnement n'exige pas moins d'interventions humaines, mais, au contraire, davantage d'ingéniosité et d'invention."

Dans l'annexe A.1, nous avons ouvert un regard critique sur la capacité réelle du développement durable à inspirer le changement dans l'industrie. [Buclet(2011b)] montre que tel qu'il est défini dans le rapport [Brundtland(1987)], le développement durable[6] consisterait à perdurer dans la même dynamique tout en voulant en éviter ses travers. Depuis la première réunion internationale sur l'état de la planète (à Stockholm en1992) jusqu'au dernier Sommet de la Terre il y a quelques semaines (à Rio en 2012), les politiques, les experts, les parties civiles, constatent que *plus la société évolue, moins elle est soutenable*. Et plus il est urgent d'agir. Mais l'échec d'un accord signé à Copenhague (au sommet climatique en 2009) est-il plus dramatique que la signature d'un accord "idéologiquement insuffisant, socialement criminel et technologiquement dangereux" [Tanuro(2012)] ? Et l'auteur ajoute qu'une "autre politique est nécessaire. Un autre monde et un autre climat sont possibles, qui naîtront de la mobilisation sociale".

4. D'après cette théorie, le processus de conception consiste à spécifier progressivement le concept initial en y ajoutant des propriétés issues de l'espace des connaissances des métiers. La connaissance est disponible et arrêtée, alors que le concept correspond à une potentialité inconnue. L'espace des concepts est un espace de propositions [Hatchuel et Weil(2003)].

5. Pour une écologie de l'homme, article paru dans http ://agora.qc.ca/, 2012-04-01.

6. [Latouche(2007)] parle "d'oxymore" du développement durable : prolonger la survie d'une activité condamnée et condamnable.

Les marges "écologiques" que nous pouvons réaliser sur le cycle de vie des produits sont considérables. Cependant, en restant dans la même logique de marché et façon de consommer, ces marges seront largement compensées par les biens que nous accumulons. L'éco-conception se trouve au milieu d'un conflit idéologique. Le problème est donc structurel et non pas technologique. Comme le rappelle [Tanuro(2012)], "les défis pratiques à relever sont forts complexes, mais il n'y a pas de raison de les croire insolubles" compte-tenu du potentiel technique des énergies renouvelables qui restent à notre disposition. Et [Tanuro(2012)] d'ajouter que "le fond de l'affaire est politique. En dernière instance, le choix qui nous est proposé est dramatiquement simple :

- soit on restreint radicalement la sphère de la production capitaliste, et il est possible de limiter au maximum les dégâts (...) ;
- soit on reste dans la logique capitaliste d'une accumulation de plus en plus frénétique".

Si la *société de consommation* existe, c'est que des millions de consommateurs utilisent des biens tous les jours. Ces acteurs du monde, ont la capacité d'être partie prenante dans l'élaboration de nouveaux fondements des modes de valeurs et de la manière à coopérer. Les approches de dématérialisation soutenues par exemple par l'économie de fonctionnalité s'accompagnent en effet de nouveaux paradigmes de consommation. Comme le montre [Buclet(2011a)] l'éco-conception, aussi bien que l'économie de fonctionnalité ou l'écologie industrielle ne saurait aboutir à des résultats à la hauteur des enjeux actuels "dès lors que les acteurs ne font pas l'effort de remettre en cause les repères du système dominant". **La question sur l'apport à long terme de ces travaux de recherche est donc de savoir si cette remise en question changerait fondamentalement notre manière de percevoir l'éco-conception en entreprise, et notre manière de la pratiquer. Dans ce cas, nos travaux de recherche, à travers notamment les travaux menés dans le projet ANR *Convergence*, pourront contribuer à servir de tremplin aux concepteurs pour concrétiser leurs aspirations d'innovation, à la hauteur des enjeux qui s'imposent.**

Bibliographie

[Allais et al.(2012)] Allais, R., T. Reyes, et L. Roucoules, 2012, Vers l'intégration du territoire dans la définition des stratégies d'entreprises, *Coleit, méthodes, outils et instruments au services de l'écologie industrielle et territoriale*, 1–10.

[Ammenberg et Sundin(2005)] Ammenberg, et Sundin, 2005, Products in environmental management systems : drivers, barriers and experiences, *Journal of Cleaner Production*, *13*, (405e415).

[Ariès(2011)] Ariès, P., *La simplicité volontaire contre le mythe de l'abondance*, ISBN-10 : 2707169749 ISBN-13 : 978-2707169747, Poche, 25 août 2011.

[Ashby(2005)] Ashby, M. F., *Materials Selection in Mechanical Design*, number ISBN 0 7506 6168 2, Elsevier, Italy, third édition, 2005.

[Barth et al.(2011)] Barth, A., E. Caillaud, et B. Rose, August 15-18 2011, How to validate research in engineering design ?, *International conference on engineering design ICED11*, 1–11.

[Bassi(1998)] Bassi, L., 1998, Harnessing the power of intellectual capital, *Journal of Appl Manufacturing System*, *9*, (9), 29–35.

[Baudrillard(1996)] Baudrillard, J., *La société de consommation*, éditions Poche, 15 novembre 1996.

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

[Benetto(2003)] Benetto, E., Analyse du cycle de vie, réalisation de l'inventaire, in *Technique de l'ingénieur*, number G 5 510, 2003.

[Benetto(2004)] Benetto, E., Analyse du cycle de vie. incertitudes des évaluations des impacts, in *Technique de l'ingénieur*, number G 5 620, 2004.

[Bernard et Tichkiewitch(2008)] Bernard, A., et S. Tichkiewitch, *Methods and tools for effective knowledge life-cycle-management*, Springer, 2008.

[Berneman et al.(2009)] Berneman, C., P. Lanoie, S. Plouffe, et M.-F. Vernier, L'écoconception : quels retours économiques pour l'entreprise ?, technical report, Pôle d'écoconception et management de cycle de vie Chambre de commerce – industrie et services de Saint-Étienne/Montbrisson, France-Quebec, 2009.

[Bézivin(2004)] Bézivin, J., *RSTI L'objet, où sont les objets ?*, chapter Sur les principes de base de l'ingénierie des modèles, 145–156, November 2004.

[Blessing et Chakrabarti(2009)] Blessing, L. T., et A. Chakrabarti, *DRM, a Design Research Methodology*, number ISBN 978-1-84882-586-4 DOI 10.1007/978-1-84882-587-1, Springer-Verlag, London, 2009.

[Boehm(1988)] Boehm, B. W., May 1988, Spiral model of software development and enhancement, *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 61–72.

[Bony(2006)] Bony, A., *Le Design, essais sur des théories et des pratiques, chapitre sur l'histoire du design dans la seconde moitié du XXe siècle*, Institut français de la mode, édition du regard, 2006.

[Bourg et Papaux(2010)] Bourg, D., et A. Papaux, *Vers une société sobre et durable*, ISBN-10 : 2130581870 ISBN-13 : 978-2130581871, Broché, 1 collection : developpement d édition, 5 mai 2010.

[Bourg(2007)] Bourg, D., 2007, Quelle gouvernance climatique ?, *Research*eu*, , (52).

[Bourg(2011)] Bourg, D., *Pour une sixième république*, number ISBN-10 : 2738127274 ISBN-13 : 978-2738127273, Broché, collection : science hum édition, 27 octobre 2011.

[Brezet et van Hemel(1997)] Brezet, H., et C. van Hemel, Ecodesign, a promising approach to sustainable production and consumption, technical report, UNEP, France, 1997.

[Brissaud et al.(2006)] Brissaud, D., S. Tichkiewitch, et P. Zwolinski, *Innovation in Life Cycle Enginnering and Sustainable Development*, Springer, 2006.

[Brundtland(1987)] Brundtland, Our common future, technical report, 1987.

[Buclet(2011a)] Buclet, N., *Ecologie industrielle et territoriale, stratégies locales pour un développement durable*, Septentrion, presses universitaires, France, 2011*a*.

[Buclet(2011b)] Buclet, N., *Le territoire, entre liberté et durabilité*, Presse Universitaire de France, 2011*b*.

[Byggeth et al.(2007)] Byggeth, S., G. Bromann, et K.-H. Robert, 2007, A method for sustainable product development based on a modular system of guiding questions, *Journal of Cleaner Production*, *1*, (11), 1–11.

[Byggeth et Hochschorner(2006)] Byggeth, S., et E. Hochschorner, 2006, Handling trade-offs in ecodesign tools for sustainable product development and procurement, *Journal of Cleaner Production*, *14*, (15-16), 1420–1430.

[Cohen(1997)] Cohen, D., *Richesse du monde, pauvreté des nations*, Flammarion, 1997.

[Debaecker(2004)] Debaecker, D., *PLM La gestion collaborative du cycle de vie des poduits, Product Life-Cycle Management*, number ISBN 2-7462-0884-9, Hermes Science, Paris, 2004.

[Debord(1996)] Debord, G., *La société du spectacle*, number 9, Gallimard, 1 janvier 1996.

[Dewulf(2003)] Dewulf, W., *A Pro-Active Approach to Ecodesign : Methods and Tools, Ecodesign in central America*, Isbn 90-5682- 419-8, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, 2003.

[Drucker(2000)] Drucker, P., 2000, Knowledge work, *Executive Excellence*, *Provo*, p11–12.

[Eco(2010)] mai-juin 2010, Ecoconception : les outils plm sont-ils prêts ?, *CAD magazine*, , (155), 14–19.

[Ekvall et al.(2007)] Ekvall, T., G. Assef, A. Björklund, O. Eriksson, et G. Finnveden, 2007, What life-cycle assessment does and does not do in assessments of waste management, *Waste Management*, *27*, 898–996.

[Ekvall et Finnveden(2001)] Ekvall, T., et G. Finnveden, 2001, Allocation in iso 14041—a critical review, *Journal of Cleaner Production*, *9*, (3), 197–208.

[Ertas et Jones(1996)] Ertas, A., et J. C. Jones, *The Engineering Design Process*, Wiley, 2nd édition, 1996.

[Eversheim et Schulten(1999)] Eversheim, W., et I. Schulten, Optimal degree of parallelism and integration in design and process planning, in *Integration of process knowledge into design support systems*, éds. H. Kals et F. V. H. Houten, Kluwer academic, 1999.

[Eynard et al.(2006)] Eynard, B., T. Gallet, L. Roucoules, et G. Ducellier, 2006, Pdm system implementation based on uml, *Mathematics and Computers in Simulation*, , (70), 330–342.

[Favre et al.(2006)] Favre, J.-M., J. Estublier, et M. Blay-Fornarino, *L'ingénierie dirigée par les modèles, au-delà du MDA*, Hermes Science publications, 2006.

[Finnveden et al.(2009)] Finnveden, G., M. Z. Hauschild, T. Ekvall, J. Guinee, R. Heijungs, S. Hellweg, A. Koehler, D. Pennington, et S. Suh, 2009, Recent developments in life cycle assessment, *Journal of Environmental Management*, *91*, (1-21).

[Flynn et al.(1990)] Flynn, B. B., S. Sakakibara, R. Schroeder, K. A. Bates, et E. J. Flynn, 1990, Empirical research methods in operations management, *Journal of operations management*, *9*, 250–284.

[Fustec et al.(2011)] Fustec, A., et al., Thésaurus-bercy v1 référentiel français de mesure de la valeur extra-financière et financière du capital immatériel des entreprises, technical report, Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie, 7 octobre 2011.

[Gandon(2001)] Gandon, F., *Distributed Artificial Intelligence and Knowledge Management : ontologies and multi-agent systems for a corporate semantic web*, Ph.D. thesis, Université de Nice, Sophia Antipolis, 2001.

[Gao et al.(2003)] Gao, J. X., A. Hayder, P. Maropoulos, et W. M. Cheung, 2003, Application of product data management technologies for entreprise integration, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, *16*, (7-8), 491–500.

[Ghazel et al.(2004)] Ghazel, M., A. Toguyeni, et M. Bigand, 2004, An uml approach for the metamodelling of automatic production systems for monitoring puprpose, *Computers in Industry*, *55*, (3), 283–299.

[Graham(1997)] Graham, I., *Méthodes orientées objet*, International Thomson Publishing France, française édition, 1997.

[GRI(2000 2008)] GRI, Rg and afss, sustainability reporting guidelines and apparel and footwear sector supplement, Rg version 3.0/afss version pilot, Global Reporting Initiative, 2000-2008.

[GRI(2000 2011)] GRI, Indicator protocols set environment (en), Version 3.1, Global Reporting Initiative, 2000-2011.

[Grisel et Osset(2008)] Grisel, L., et P. Osset, *L'analyse du cycle de vie d'un produit ou d'un service, Applications et mise en pratique*, number ISBN : 978-2-12-465151-1,

Afnor, 2nd édition, 2008.

[Grundstein(2006)] Grundstein, M., 2006, Management des connaissances et des compétences : Vers un modèle de référence (mgkme), *Journée C2EI, Connaissances et compétences en entreprise industrielle*, 1–7.

[Hallstedt et al.(2010)] Hallstedt, S., H. Ny, K.-H. Robert, et G. Bromana, 2010, An approach to assessing sustainability integration in strategic decision systems for product development, *Journal of Cleaner Production*, *18*, 703–712.

[Hallstedt(2008)] Hallstedt, S., *A foundation for sustainable product development*, Doctoral dissertation series (reccueil d'articles), Blekinge Institute of Technology, department of Mechanical Engineering, Sweden, 2008.

[Hatcher et al.(2011)] Hatcher, G., W. Ijomah, et J. Windmill, 2011, Design for remanufacture : a literature review and future research needs, *Journal of Cleaner Production*, *19*, 2004–2014.

[Hatchuel et Weil(2003)] Hatchuel, A., et B. Weil, Stockholm, August 2003, A new approach of innovative design : an introduction to c-k theory, *ICED'03*.

[Herva et al.(2011)] Herva, M., A. Franco, E. F. Carrasco, et E. Roca, 2011, Review of corporate environmental indicators, *Journal of Cleaner Production*, *19*, 1687–1699.

[Hochschorner et Finnveden(2003)] Hochschorner, et G. Finnveden, 2003, Lca methodology evaluation of two simplified life cycle assessment methods elisabeth, *International Journal of Life Cycle Assessment*, *8*, (3), 119 – 128.

[Howard et al.(2008)] Howard, et al., 2008, Describing the creative design process by the integration of engineering design and cognitive psychology literature, *Design Studies*, *29*, (2), 160–180.

[htt(2010)] http ://www.ecoinvent.ch/, suiss center for life cycle inventories, July 2010.

[Hubka et Eder(1996)] Hubka, V., et W. E. Eder, *Design science : Introduction to needs, scope and organization of engineering design knowledge*, Springer, 1996.

[IFEU-Heidelberg et al.(2011)] IFEU-Heidelberg, Öko-Institut, et IVE/RMCON, Ecological transport information tool for worldwide transports, methodology and data, technical report, Commissioned by DB Schenker Germany UIC (International Union of Railways), Berlin, Hannover, Heidelberg, July 31th 2011.

[Ilgin et Gupta(2010)] Ilgin, M. A., et S. M. Gupta, 2010, Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ecmpro) : A review of the state of the art, *Journal of Environmental Management*, , (91), 563–591.

[INERIS(1994)] INERIS, Directive n° 94/62/ce du 20/12/94 relative aux emballages et aux déchets d'emballages, site officiel de l'INERIS, 1994.

[Iraqi et al.(2011)] Iraqi, M., M. Kleiner, et L. Roucoules, Model-based (mechanical) product design, in *MoDELS 2011*, 548–562, 2011.

[Iraqi et al.(2012)] Iraqi, M., M. Kleiner, et L. Roucoules, Tools interoperability in engineering design using model-based engineering, in *Proceedings of the 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis ESDA2012*, France, July 2012.

[ISO(1994a)] *ISO (International Organization for Standardization) Configuration Controlled 3D Designs of Mechanical Parts and Assemblies (AP 203)*, ISO-10303-203, 1994*a*.

[ISO(1994b)] *ISO (International Organization for Standardization) Industrial Automation Systems - Concepts and Rules for Enterprise Models. ISO 14258 : 1994*, ISO, 1994*b*.

[ISO(1998)] ISO, 10303-22 (1998) systèmes d'automatisation industrielle et intégration - représentation et échange de données de produit, technical report, International Standard Organization, 1998.

[ISO(2002)] ISO, *International Organization for Standardization, Environmental Management-Integrating Environmental Aspects into Product Design and Development. ISO/TR14062 :2002(F)*, Geneva, 2002.

[ISO(2004)] ISO, *International Organization for Standardization, Systèmes de management environnemental, Exigences et lignes directrices pour son utilisation, ISO 14001*, 2004.

[ISO(2006)] *ISO (International Organization for Standardization) Environmental Management Life Cycle Assessment Principles and Framework. ISO 14040-44 : 2006*, ISO, 2006.

[ISO(2009)] *ISO (International Organization for Standardization) Produits mécaniques Méthodologie d'éco-conception. ISO XPE01005 : 2009 (F)*, ISO, Mars 2009.

[ISO(2010)] ISO, *International Organization for Standardization, Lignes directrices relatives à la responsabilité sociétale, ISO 26000*, 2010.

[ISO(2011)] ISO, *International Organization for Standardization, Systèmes de management environnemental, Lignes directrices pour intégrer l'éco-conception, ISO 14006*, 2011.

[Jancovici et Grandjean(2007)] Jancovici, J.-M., et A. Grandjean, *Le plein s'il vous plaît ! : La solution au problème de l'énergie [Poche]*, number ISBN-10 : 2757803018 ISBN-13 : 978-2757803011, 8 février 2007.

[Janin(2000)] Janin, M., *Démarche d'éco-conception en entreprise, un enjeu : construire la cohérence entre outils et processus*, Ph.D. thesis, Ecole nationale des arts et métiers, 2000.

[Jouault et Kurtev(2006)] Jouault, F., et I. Kurtev, Transforming models with atl, in *MoDELS 2005Workshops, LNCS3844*, éds. J.-M.Bruel, 128–138, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.

[Kiritis D(2003)] Kiritis D, Bufardi A, X. P., 2003, Research issues on product lifecycle management and information tracking using smart embedded systems., *Adv Eng Inform*, , (17), 189–2002.

[Klein(2003)] Klein, N., *No Logo*, number ISBN-10 : 2742737804 ISBN-13 : 978-2742737802 in Babel, Poche, 31 mars 2003.

[Knight et Jenkins(2008)] Knight, P., et J. Jenkins, 2008, Adopting and applying eco-design techniques : a practioner's perspective, *Journal of Cleaner Production*, *17*, (5), 549e558.

[Kota et Chakrabarti(2007)] Kota, S., et A. Chakrabarti, Development of a plateform for supporting design for environment, in *International conference on engineering design, ICED'07*, Paris, August 28-31 2007.

[Latouche(2001)] Latouche, S., *La Déraison de la raison économique : de l'efficacité au principe de précaution*, ISBN-10 : 2226125361 ISBN-13 : 978-2226125361, Broché, collection : bibliothèque albin michel economie édition, 4 Avril 2001.

[Latouche(2007)] Latouche, S., *Petit traité de la décroissance sereine*, Broché, 24 octobre 2007.

[Le (2010)] Juillet 2010, Le temps de l'éco-conception, *Industrie et Technologies*, , (924), 22–39.

[Leroy(2009)] 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, Ph.D. thesis, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2009.

[Lescuyer et al.(2006)] Lescuyer, L., F. Mathieux, F. Roucoules, et H. Davail, 2006, Opportunities and challenges for connecting environmental assessment and cad software tools : example of implementation by legrand., *Going Green - CARE INNOVATION 2006 - From WEEE / RoHS Implementation to Future Sustainable Electronics, Vienna*.

[Lindahl(2005)] Lindahl, M., *Engineering Designers' Requirements on Design for Environment Methods and Tools*, Ph.D. thesis, Department of Machine Design, Integrated Product Development, Royal Institute of Technology Stockholm, 100 44 Stockholm, Sweden, 2005.

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

[Lipovetsky(2003)] Lipovetsky, G., La société d'hyperconsommation, 2003.

[Lofthouse(2003)] Lofthouse, V., 2003, Designing for designers - ecodesign tools to inform and inspire, *IEEE*, , (0-7803-7743-5/03/).

[Lofthouse(2004)] Lofthouse, V., 2004, Investigation into the role of core industrial designers in ecodesign projects, *Design Studies*, *25*, (2).

[Lu et al.(2007)] Lu, S. C.-Y., W. Elmaraghy, G. Schuh, et R. Wilhelm, 2007, A scientific foundation of collaborative engineering, *Annals of the CIRP*, *56*, (2), 605–634.

[Luzeaux et Ruault(2008)] Luzeaux, D., et J.-R. Ruault, *Systèmes de systèmes, concepts et illustrations pratiques*, number ISBN 978-2-7462-1875-8, Hermes Science, June 2008.

[Mathieux et al.(2005)] Mathieux, F., L. Roucoules, L. Lescuyer, et Y. Bouzidi, 2005, Opportunities and challenges for connecting environmental assessment tools and cad software, *Innovation by Life Cycle Management LCM Barcelona*.

[Mathieux et al.(2007)] Mathieux, F., D. Brissaud, L. Roucoules, et L. Lescuyer, Connecting cad and plm systems with ecodesign software : Current experiences and futures opportunities, in *International Conference on Engineering Design 2007*, 2007.

[McDonough et Braungart(2002)] McDonough, M., et M. Braungart, *Cradle to Cradle : Remaking the Way We Make Things*, North Point Press, 2002.

[Meadows et al.(1973)] Meadows, D. H., D. L. Meadows, J. Randers, et W. W. Behrens, *The Limits to Growth*, Potomaniac associates book, 1973.

[Mercier-Laurent(2011)] Mercier-Laurent, E., *Les écosystèmes de l'innovation*, Lavoisier, 2011.

[Miled(2011)] Miled, A. B., *Vers un système de réutilisation des connaissances en ingénierie de conception*, Ph.D. thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2011.

[Millet et al.(2007)] Millet, D., L. Bistagnino, C. Lanzavecchia, R. Camous, et T. Poldma, 2007, Does the potential of the use of lca match the design team needs ?, *Journal of Cleaner Production*, *15*, 335e346.

[Millet(2003)] Millet, D., *Intégration de l'environnement en conception, l'entreprise et le développement durable*, Hermes Science, 2003.

[Morin(1990)] Morin, E., *Science avec conscience*, Fayard, édition du Seuil, 1990.

[Morin(2005)] Morin, E., *Introduction à la pensée complexe*, number ISBN 978-2-02-066837-8, Points, Avril 2005.

[Morin(2007)] Morin, E., *L'an I de l'ère écologique, suivit de, dialogue avec Nicolas Hulot*, Tallandier, histoires d'aujourd'hui, 2007.

[Mougenot(2008)] Mougenot, C., *Modélisation de la phase d'exploration du processus de conception de produits, pour une créativité augmentée*, Ph.D. thesis, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Décembre 2008.

[Navarro et al.(2005)] Navarro, G., T. C. Rizo, S. B. Ceca, et D. M.J. Collado Ruiz, Ecodesign function and form. classification of ecodesign tools according to their functional aspects, in *International conference on engineering design, ICED'05*, Melbourne, August 15-18 2005.

[Nghiem(2010)] Nghiem, T., *Des abeilles et des hommes : Passerelles pour un monde libre et durable*, number ISBN-10 : 2227479000 ISBN-13 : 978-2227479005 in ESSAIS, Broché, 16 septembre 2010.

[Niemann et al.(2009)] Niemann, J., S. Tichkiewitch, et E. Wesstkämper, *Design of Sustainable Product Life Cycles*, number ISBN : 978-3-540-79081-5, Springer, springer-verlag berlin heidelberg 2009 édition, 2009.

[Nonaka et Takeuchi(1995)] Nonaka, I., et H. Takeuchi, *The Knowledge-Creating Company : How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation*, OUP USA, 1995.

[Ny et al.(2006)] Ny, H., J. P. MacDonald, G. Broman, R. Yamamoto, et K.-H. Robert, 2006, Sustainability constraints as system boundaries : an approach to making life-cycle management strategic, *Journal of Industrial Ecology*, *10*, (1).

[Ny(2009)] Ny, H., *Strategic Life-Cycle Modeling and Simulation for Sustainable Product Innovation*, Ph.D. thesis, Department of Mechanical Engineering School of Engineering Blekinge Institute of Technology, SWEDEN, May 2009.

[Oosterman(2001)] Oosterman, B., *Improving Product Development Projects by Matching Product Architecture and Organization*, Ph.D. thesis, Groningen University, 2001.

[Pahl et Beitz(1996)] Pahl, G., et W. Beitz, *Engineering Design : A Systematic Approach*, vol. 2nd edition, London, springer verlag édition, 1996.

[Panchetti(2009)] Panchetti, M., *Exploitation d'images numériques pour la simplification et la déformation de modèles polyédriques*, Ph.D. thesis, LSIS. Aix-en-Provence, Arts et Métiers ParisTech, 2009.

[Passet(2000)] Passet, R., *L'illusion néo-libérale*, Flammarion, 2000.

[Paviot(2010)] Paviot, T., *Méthodologie de résolution des problèmes d'interopérabilité dans le domaine du Product Lifecycle Management*, Ph.D. thesis, Ecole Centrale Paris, 2010.

[Plouffe et al.(2011)] Plouffe, S., P. Lanoie, C. Berneman, et M.-F. Vernier, 2011, Economic benefits tied to ecodesign, *Journal of Cleaner Production*, *19*, 573e579.

[Pochat(2005)] Pochat, S. L., *Intégration de l'éco-conception dans les PME : Proposition d'une méthode d'appropriation de savoir-faire pour la conception environnementale des produits.*, Ph.D. thesis, Arts et Métiers ParisTech, 2005.

[Pol et al.(2004)] Pol, G., J. Legardeur, S. Minel, et C. Merlo, Biarritz 2004, Les phases informelles en amont des projets de conception, *Colloque ERGO'IA*, 1–6.

[Polanyi(1966)] Polanyi, M., *The Tacit Dimension*, Routledge and Kegan Paul, London, 1966.

[Reap et al.(2008)] Reap, J., F. Roman, S. Duncan, et B. Bras, 2008, A survey of unresolved problems in life cycle assessment part 2 : impact assessment and interpretation,

International Journal of Life Cycle Assessment, *13*, 374–388.

[Reyes(2007)] Reyes, T., *L'éco-conception dans les PME : les mécanismes du cheval de Troie méthodologique et du choix de trajectoires comme vecteurs d'intégration de l'environnement en conception*, Ph.D. thesis, Université du Sud Toulon-Var, 2007.

[Riel et al.(2010)] Riel, A., S. Tichkiewitch, et R. Messnarz, 2010, Qualification and certification for the competitive edge in integrated design, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, *2*, 279–289.

[Rifkin(2012)] Rifkin, J., *La troisième révolution industrielle, comment le pouvoir latéral va transformer l'énergie, l'économie et le monde*, Les liens qui libèrent, 2012.

[Rio et al.(2010)] Rio, M., L. Roucoules, et T. Reyes, 02-04 June 2010, A framework for eco-design : an interface between lca and design process, *Conference MOTSP 2010 : Management of Technology, Step to sustainable Production*, 1–8.

[Rio et al.(2011a)] Rio, M., T. Reyes, et L. Roucoules, 2011*a*, A framework for eco-design : an interface between lca and design process, *International Journal of Engineering*, *IX*, (1), 121–126.

[Rio et al.(2011b)] Rio, M., T. Reyes, et L. Roucoules, 2011*b*, Toward proactive eco-design based on engineering and eco-desiner's software interface modeling, *International conference on engineering design ICED11*.

[Rio et al.(2012a)] Rio, M., T. Reyes, et L. Roucoules, 2012*a*, Toward proactive (eco)design process : modeling information transformations among designers activities, *Journal of Cleaner Production*, *(accepted)*.

[Rio et al.(2012b)] Rio, M., T. Reyes, et L. Roucoules, 27-30 Mars 2012*b*, Vers des processus d'éco-conception proactif via la modélisation des connaissances d'interface entre les acteurs de la conception, *13ème Colloque National AIP PRIMECA*.

[Rio(2012)] Rio, M., 31 Mai - 1er Juin 2012, Improving design to environment, modeling knowledge transformations within product designers and environmental engineers activities, *9èmes Journées des doctorants du LSIS*, 100–113.

[Robèrt et al.(2002)] Robèrt, K. H., B. Schmidt-Bleek, J. Aloisi de Larderel, G. Basile, J. L. Jansen, R. Kuehr, P. Price Thomas, M. Suzuki, P. Hawken, et M. Wackernagel, 2002, Strategic sustainable development —selection, design and synergies of applied tools, *Journal of Cleaner Production*, *10*, (3), 197–214.

[Rockström et al.(2009)] Rockström, J., W. Steffen, K. Noone, Å. Persson, F. S. Chapin, E. F. Lambin, T. M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H. J. Schellnhuber, B. Nykvist, C. A. de Wit, T. Hughes, S. van der Leeuw, H. Rodhe, S. Sörlin, P. K. Snyder, R. Costanza, U. Svedin, M. Falkenmark, L. Karlberg, R. W. Corell, V. J. Fabry, J. Hansen, B. Walker, D. Liverman, K. Richardson, P. Crutzen, et J. A. Foley, 2009, A safe operating space for humanity, *NATURE*, *461*, (24).

[Rosnay(1977)] Rosnay, J. D., *Le macroscope - Vers une vision globale*, number Français ISBN-10 : 2020045672 ISBN-13 : 978-2020045674, Poche, points édition, 1 février 1977.

[Scaravetti(2004)] Scaravetti, D., *Formalisation préalable d'un problème de conception, pour l'aide à la décision en conception préliminaire*, Mécanique des métiers de l'ingénieur spécialité : Mécanique, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux, 2004.

[Segonds et al.(2010)] Segonds, F., M. Iraqi-Houssaini, L. Roucoules, P. Véron, et A. Aoussat, 2010, The use of early design tools in engineering processes : a comparative case studies, *International Journal of Design and Innovation Research*, *5*, (3).

[Segonds(2011)] Segonds, F., *Contribution à l'intégration d'un environnement collaboratif en conception amont de produits*, Ph.D. thesis, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Décembre 2011.

[Simon(1981)] Simon, H. A., *The Science of the Artificial*, MIT Press, Cambridge Massachusetts, 1981.

[Solhenius(1992)] Solhenius, G., 1992, Concurrent engineering, *Annals of the CIRP*, *41*, (2).

[Steffen et al.(2004)] Steffen, W., A. Sanderson, P. D. Tyson, J. Jäger, P. A. Matson, B. M. III, F. Oldfield, K. Richardson, H. J. Schellnhuber, B. L. T. II, et R. J. Wasson, *Global Change and the Earth System : A Planet Under Pressure, executive summary*, number ISBN 91-631-5380-7, IGBP Secretariat Royal Swedish Academy of Sciences PO, Box 50005 S-104 05 Stockholm SWEDEN, 2004.

[Sundin(2004)] Sundin, E., *Product and Process Design for Successful Remanufacturing*, Ph.D. thesis, Linkopings Universitet, Linkoping, 2004.

[Tanuro(2012)] Tanuro, D., *L'impossible capitalisme vert*, La Découverte / Poche, Paris, 2012.

[Theret et al.(2011)] Theret, J.-P., P. Zwolinski, et F. Mathieux, March 2011, Integrating cad, plm and lca : a new architecture and integration proposal, *International Confe-*

rence on Renewable Energy and Eco-Design in Electrical Engineering (Lille), 1–16.

[Théroude(2002)] Théroude, F., *Formalisme et système pour la représentation et la mise en oeuvre des processus de pilotage des relations entre donneurs d'ordres et fournisseurs*, Ph.D. thesis, Université de Savoie, 2002.

[Tichkiewitch et Brissaud(2000)] Tichkiewitch, S., et D. Brissaud, 2000, Co-ordination between product and process definitions in a concurrent engineering environment, *CIRP Annals*, *49*, (1), 75–78.

[Tichkiewitch et Brissaud(2002)] Tichkiewitch, S., et D. Brissaud, *From knowledge intensive CAD to knowledge intensive engineering*, chapter Integration of Life-Cycle Constraints in Design Activity, 119–130, Kluwer academic publishers, 2002.

[Tichkiewitch et Brissaud(2004)] Tichkiewitch, S., et D. Brissaud, *Methods and Tools for Co-operative and Integrated Design*, Academic Publishers, 2004.

[Tichkiewitch et Riel(2010)] Tichkiewitch, S., et A. Riel, Cours de idesigner, Grenoble, 2010.

[Tukker et Jansen(2006)] Tukker, A., et B. Jansen, 2006, Environmental impacts of products a detailed review of studies, *Journal of Industrial Ecology*, *10*, (3).

[Tyl et al.(2010)] Tyl, B., J. Legardeur, D. Millet, et F. Vallet, October 20-22 2010, Stimulate creative ideas generation for eco-innovation : an experimentation to compare eco-design and creativity tools, *Proceedings of IDMME - Virtual Concept 2010*.

[Tyl(2011)] Tyl, B., *L'apport de la créativité dans les processus d'éco-innovation Proposition de l'outil EcoASIT pour favoriser l'éco-idéation de systèmes durables*, Ph.D. thesis, Université Bordeaux 1, Décembre 2011.

[Ullman(2003)] Ullman, D. G., *The mechanical design process*, McGraw-Hill Higher Education, New York, 3rd édition, 2003.

[Ulrich et Eppinger(2003)] Ulrich, K., et S. D. Eppinger, *Product Design and Development*, McGraw Hill Higher Education, 3rd revised édition, September 2003.

[Unger et al.(2008)] Unger, N., F. Schneider, et S. Salhofer, 2008, A review of ecodesign and environmental assessment tools and their appropriateness for electircal and electronic equipment, *Journal of Industrial Ecology*.

[Vallet et al.(2009)] Vallet, F., D. Millet, et B. Eynard, 2009, Investivating the use of eco-design guides : presentation of two case studies, *ICED*.

[Vallet et al.(2010)] Vallet, F., D. Millet, et B. Eynard, 2010, How ecodesign tools are really used- requirements list for a context-related ecodesign tool, *CIRP 2010*.

[Vicky(2006)] Vicky, L., 2006, Ecodesign tools for designers : defining the requirements, *Journal of Cleaner Production*, *14*, (15-16), 1386–1395.

[Wijk(2011)] Wijk, D. V., Contribution à l'amélioration de la collaboration plm dans la chaîne de sous- traitance aéronautique, 2011.

[Willems et al.(2008)] Willems, B., W. Dewulf, et J. Duflou, 2008, A method to assess the lifetime prolon- gation capabilities of products, *International Journal of Sustainable Manufacturing*, *1*, (1/2), 122–144.

[Winner et al.(1988)] Winner, R., J.P.Pennell, H.E.Bertrand, et M.M.G.Slusarezuk, The role of concurrent engineering in weapons system acquisition., technical report, IDA Report R-338. Alexandria Va. : Institute for Defense Analyses, 1988.

[Xu et al.(2010)] Xu, J., R. Houssin, E. Caillaud, et M. Gardoni, 2010, Innovation in design by using the approach of knowledge management, *IDMME - Virtual Concept 2010*, 1–6.

[Yvars(2009)] Yvars, P.-A., 2009, A csp approach for the network of product lifecycle constraints consistency in a collaborative design context, *Engineering Applications of Artificial Intelligence, Elsevier Ltd*, *22*, (961–970).

[Zhang et al.(submited)] Zhang, F., M. Rio, et R. Allais, (submited), Toward a systemic navigation framework to integrate sustainable development into the company.

[Zhang et Zwolinski(2012)] Zhang, F., et P. Zwolinski, Toward unified environmental activities in entreprise, in *International design conference - Design 2012*, Dubrovnik, Croatia, May 21-24 2012.

[Zwolinski et Brissaud(2008)] Zwolinski, P., et D. Brissaud, 2008, Remanufacturing strategies to support product design and redesign, *Journal of Engineering Design*, *19*, (4), 321–335.

Annexe A

Annexe du document

A.1 Annexe sur le concept du développement durable

Fondements du concepts du développement durable

La *prise de conscience environnementale* trouve ses fondements bien avant que la société considère cette question comme centrale. Puisque les courants malthusiens ou naturalistes du XVIIIe siècle soulèvent la question de l'épuisement des ressources non renouvelables et l'influence majeure de l'espèce humaine sur celles-ci, et prônent la préservation de l'environnement.

Jusqu'au XXe siècle, la montée en puissance de l'industrialisation camoufle sous la croyance au progrès technique cette prise en conscience environnementale. L'union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN) publie en 1951 le premier rapport sur *l'état de l'environnement dans le monde* visant à réconcilier économie et écologie. Il faudra attendre un des éléments déclencheur, comme celui du 23 août 1966 lorsqu'un vaisseau de la NASA transmettra la première image de la terre vue du ciel [1], pour que cette vision du monde fini aux ressources limitées marque les esprits de l'époque et remette le sujet sur la table. Le *Club de Rome* [2] publie cinq ans plus tard le *rapport Meadows "The Limits To Growth* [3] *"* [Meadows et al.(1973)] dénonçant les effets irréversibles des activités anthropiques sur les écosystèmes naturels. C'est l'époque où les impacts environnementaux sont locaux et visibles (pollutions des cours d'eau avec des poissons morts qui flottent à la surface, etc.). Les mesures déployées sont plus curatives que préventives. En réponse aux pressions locales et vis-à-vis d'un domaine technique isolé, comme le rejet chimique de l'activité d'une entreprise dans une rivière.

A cette époque la dimension environnementale commence à être considérée d'une manière institutionnelle. Le Ministère de la Protection de la Nature et de l'Environnement est créé en France le 27 janvier 197 et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement [4] (PNUE) en 1973.

En 1972 a lieu la première conférence mondiale sur l'environnement à Stockholm reprenant les réflexions du rapport *Meadows* [Meadows et al.(1973)]. Celle-ci ne débouche pas encore sur une adhésion des 113 pays participants à un agenda environnemental commun.

Il faudra attendre le *Sommet de Rio* en 1992, presque vingt ans plus tard, pour que 173 Etats (sur 178 pays participants) s'engagent à suivre les 27 principes de la *déclaration de Rio*, plus modérés que les travaux du *Club de Rome*. Bien que la naissance du concept du "**Sustainable Development**" au travers du rapport *Our Common Future*, de la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement (appelée commission Brundtland) eût lieu en 1987. C'est lors de ce sommet que ce concept fut médiatisé internationalement et traduit en français par *développement durable*. Le terme "durable"

1. Image visible sur le site de National Géographique 2012
2. le Club de Rome est un groupe de réflexion créé en 1968 (de type association internationale) réunissant scientifiques, économistes, fonctionnaires et industriels de 53 pays, autour de la question du devenir de l'humanité et de la planète Terre. La réflexion est menée d'une manière systémique et interdisciplinaire. http ://www.clubofrome.org/, 2012
3. Cette appellation est due aux noms de deux de ses auteurs
4. Le PNUE complète le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD)

est parfois remplacé par "soutenable". Le programme "Action 21" est alors adopté avec *l'Agenda 21*[5].

En France, le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD) est créé en 2002, puis en 2003 est adoptée une Stratégie Nationale de Développement Durable (SNDD) et en 2004, une délégation interministérielle au développement durable voit le jour. La charte de l'environnement est votée en 2005 (modifiant la Constitution), responsabilisant les politiques publiques vis-à-vis du développement durable. Il s'en suivit le Grenelle de l'environnement (2007), puis la loi Grenelle I, adoptée en 2009 et mise en pratique dans le Grenelle II.

Nous passons donc des *mesures curatives* des années 1960-1980 aux *mesures préventives* dans les années 2000 de plus en plus concernées par les impacts globaux, à l'aspiration aux *mesures soutenables* d'aujourd'hui à l'horizon 2020.

Application des mesures des Etats membres de l'ONU

Cependant il existe toujours un différend entre les aspirations et la réalité. En 1987 le *Protocole de Montréal* visait à interdire la production des chlorofluorocarbures[6] (CFC : sous-classe de gaz fluorés), pour leur impact sur la couche d'ozone. Mais il a fallu attendre 2009 pour que les 196 membres de l'ONU signent l'accord. La mise en place des lois se fait donc lentement et leur application est encore plus longue par rapport à la croissance exponentielle de la population. Une population qui même si elle n'augmente pas, continue de consommer et rejeter dans les milieux naturels, des flux de matière et d'énergie en quantité croissante par individu. Il existe un décalage entre actions et phénomènes réels qui nécessiterait des mesures de plus en plus drastiques pour être réajusté.

Une autre illustration des avancées chronologiques en matière de protection du milieu naturel est celui du *protocole de Kyoto*. Dans le cadre de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, le protocole de Kyoto fut signé le 11 décembre 1997. Entré en vigueur en 2005 et ratifié en 2010 par 168 pays, ce traité international vise la diminution des émissions de gaz à effet de serre, en fixant des objectifs par pays. Il visait à réduire entre 2008 et 2012 5,2% des émissions de six catégories de gaz (dioxyde de carbone, méthane, dioxyde d'azote et trois substituts des chlorofluorocarbones) par rapport au niveau d'émission de ces gaz de 1990. La conférence des Nations Unies sur le climat réunie à Copenhague en décembre 2009 a été un échec vis-à-vis de l'adoption d'un nouvel accord censé succéder au Protocole de Kyoto après la fin de cette année. Elle s'est terminée sur un texte juridiquement non contraignant, sans engagement chiffré de réduction des émissions de gaz à effet de serre. [Rifkin(2012)] qualifie cet événement de "honteux". Et d'ajouter que "bien que le changement climatique induit par les activités humaines soit la plus grande menace contre la survie de l'humanité depuis l'apparition

5. L'Agenda 21 a pour objectif de mobiliser la prise en compte des vues du public en faveur du développement durable, via l'action des collectivités. Les avancées des résolutions adoptées lors du somment de Rio, seront évaluées par l'Assemblée des Nations Unies en 1997.

6. Dans les années 1930, les CFC avaient des applications diverses (isolation, aérosols, réfrigération), leurs caractéristiques non toxiques, résistants, non-inflammables en faisaient des atouts majeurs dans la grande distribution. Ce n'est que 30 à 40 ans plus tard que des accords internationaux sont signés pour arrêter leur production face aux dommages qu'ils causent sur la couche d'ozone. Cependant, il faut plusieurs décennies pour que ces impacts générés depuis les années 1990 disparaissent.

de notre espèce sur Terre, nos dirigeants ont été incapables de s'entendre sur un moyen de sauver le monde". En 2011, à l'issue de la 17e conférence des Nations Unies sur le climat à Durban en Afrique du Sud, une feuille de route a été rédigée prévoyant d'établir un accord d'ici à 2015 un pacte global de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour une entrée en vigueur en 2020. Si ce texte a l'avantage d'englober pour la première fois tous les pays dans cette lutte (par exemple US, Chine, Inde), l'absence de contraintes juridiques est inquiétante. Nous ne notons en effet aucune mesures plus sévère pour réduire les émissions. Cette feuille de route rend également possible la prolongation du protocole de Kyoto.

Ces échecs de négociations et d'accords sur des sujets internationaux sont assez symptomatiques de la situation politique dans le monde. D'un côté le concept du *développement durable* est extrêmement médiatisé, donnant l'impression aux populations qu'il guide une des seules voies possibles pour le salut de l'humanité. Mais dans les faits, il est source d'incompréhension et peine à se décliner au niveau de l'action collective d'une population, la laissant incapable, tels que les chefs d'Etats à s'accorder sur un sens commun. Le problème vient éventuellement du fait que le développement durable n'est pas encore un concept très stable. Il conviendrait donc tout d'abord de l'analyser.

Le développement durable, un concept instable

En étudiant de près le rapport Brundtland [Brundtland(1987)], [Buclet(2011b)] démontre les contradictions internes présentes, notamment vis-à-vis de la notion de croissance. Il montre en effet, que telle qu'elle est explicitée dans ce rapport, la notion de croissance "serait donc différente non en ce que le système économique produirait, mais en ce que l'industrie se fonderait sur des technologies redoutablement plus efficaces en terme de consommation de ressources nécessaires". Et de conclure que cela revient en réalité à "optimiser le système industriel (...) produire plus avec moins" [Buclet(2011b)]. Mais est-ce possible dans un monde qui voit sa population croître d'une manière exponentielle ? Il montre un peu plus loin que "les changements préconisés [dans le rapport Brundtland] ne reposent pas sur les leçons tirées des modes de pensées et de fonctionnement sociétaux ayant engendré les problèmes posés" [Buclet(2011b)]. Il synthétise alors les cinq moyens préconisés dans le rapport (*cf.* tableaux A.1) et il apparaît assez clairement que cela "aboutit à la fois à poursuivre les évolutions actuelles en matière de mondialisation de l'économie, tout en souhaitant en éliminer les travers, c'est-à-dire les deux grands déséquilibres systémiques à la base même de la réflexion lancée en matière de développement durable" [Buclet(2011b)].

Il semble donc assez flagrant que la notion de développement durable porte en elle des contradictions fortes. Ce qui d'une certaine manière justifie les critiques intarissables émises à son sujet par rapport à son caractère paradoxal puisqu'il n'en n'est pas exempt. En conclusion "faut-il considérer que les évolutions du concept du développement durable au sein des discours ne représentent que le dernier avatar visant à sauver le système économique dominant, ou qu'il s'agit du signe d'une évolution effective des valeurs véhiculées dans le discours" [Buclet(2011b)] ? Restons donc vigilant à l'évolution de ce concept et à la signification que l'on lui donne, notamment lors de sa mise en pratique au niveau des industriels. Ceci afin de veiller spécifiquement à ce que la déclinaison de ce

TABLE A.1 – Moyens énoncés pour contribuer à l'amélioration du bien-être des populations humaines préconisées dans le rapport Brundtland [Brundtland(1987)], d'après [Buclet(2011b)]

Contribution à l'amélioration du bien-être des populations humaines d'après l'étude du rapport Brundtland par N. Buclet (2011)
- la libéralisation des échanges marchands entre régions du monde - un emploi plus rationnel des ressources disponibles - une accélération mondiale de la production industrielle et agricole - une attention accrue quant aux réponses aux besoins des populations les plus pauvres - le respect des équilibres écologiques indispensables aux sociétés humaines

concept dans le processus de conception des produits ne soit pas cantonnée à l'optimisation de l'existant.

A.2 Annexe : norme XPE 01-005 sur les produits mécaniques

– **Fonctionnement général de la norme et exigences**

La norme intègre aux étapes du processus de conception des exigences en matière d'éco-conception. Du besoin (exprimé dans le cahier des charges fonctionnel) jusqu'à l'industrialisation du produit, la méthode propose cinq étapes : l'étape 1 de détermination du profil environnemental, l'étape 2 de sélection et hiérarchisation des lignes directrices en conception, l'étape 3 de choix des indicateurs de performance environnementale, l'étape 4 de suivi des indicateurs et l'étape 5 de bilan et de capitalisation. La figure A.1 correspond à l'annexe E du document normatif. Ce schéma présente les étapes du processus de conception (à comparer au processus horizontal qui est présenté dans ce document), et en particulier, les revues de conception qui sont les supports techniques utilisés pour suivre le développement du produit mécanique. A chaque étape de revue du produit sont associées des revues axées éco-conception, préconisant la réalisation de documents supports, tels que le profil environnemental du produit, la liste des lignes directrices prioritaires (cahier des charges d'éco-conception), etc.

La méthodologie se base sur sept aspects environnementaux du produit à concevoir : les matières premières, la fabrication, l'utilisation, la recyclabilité en fin de vie, les substances dangereuses, le transport et l'emballage. Pour la première étape de détermination du profil environnemental, les aspects environnementaux sont hiérarchisés à partir des réponses au questionnaire proposé et l'utilisation conjointe de l'algorithme d'analyse. L'annexe C donne les lignes directrices à suivre pour les aspects environnementaux jugés prioritaires. Pour chaque ligne directrice, des indicateurs de suivi et des indicateurs de référentiel sont proposés.

Les lignes directrices proposées pour chaque aspect environnemental sont assez générales. L'objectif étant que l'entreprise se les approprie. En d'autres termes, les métiers de la conception *traduisent* ces lignes directrices dans le jargon métier qui leur est familier, et en *déduisent* les actions appropriées.

La dernière étape capitalise les résultats d'*essais-erreur* émanant des projets qui ont précédé, ce qui favorise l'appropriation des lignes directrices par les métiers. Les indicateurs de suivi et de référentiels sont particulièrement intéressants par rapport à nos travaux. L'interface pourrait proposer ce type d'indicateurs et notamment dans les phases amonts de la conception. Ils pourraient guider les activités de créativité.

– **Mise en parallèle des outils spécifiques Environnement et des outils classiques de la conception**

L'annexe D (figure A.2) du document normatif fournit une liste non exhaustive d'outils adaptés à la mise en oeuvre de la norme, classés en fonction des aspects environnementaux.

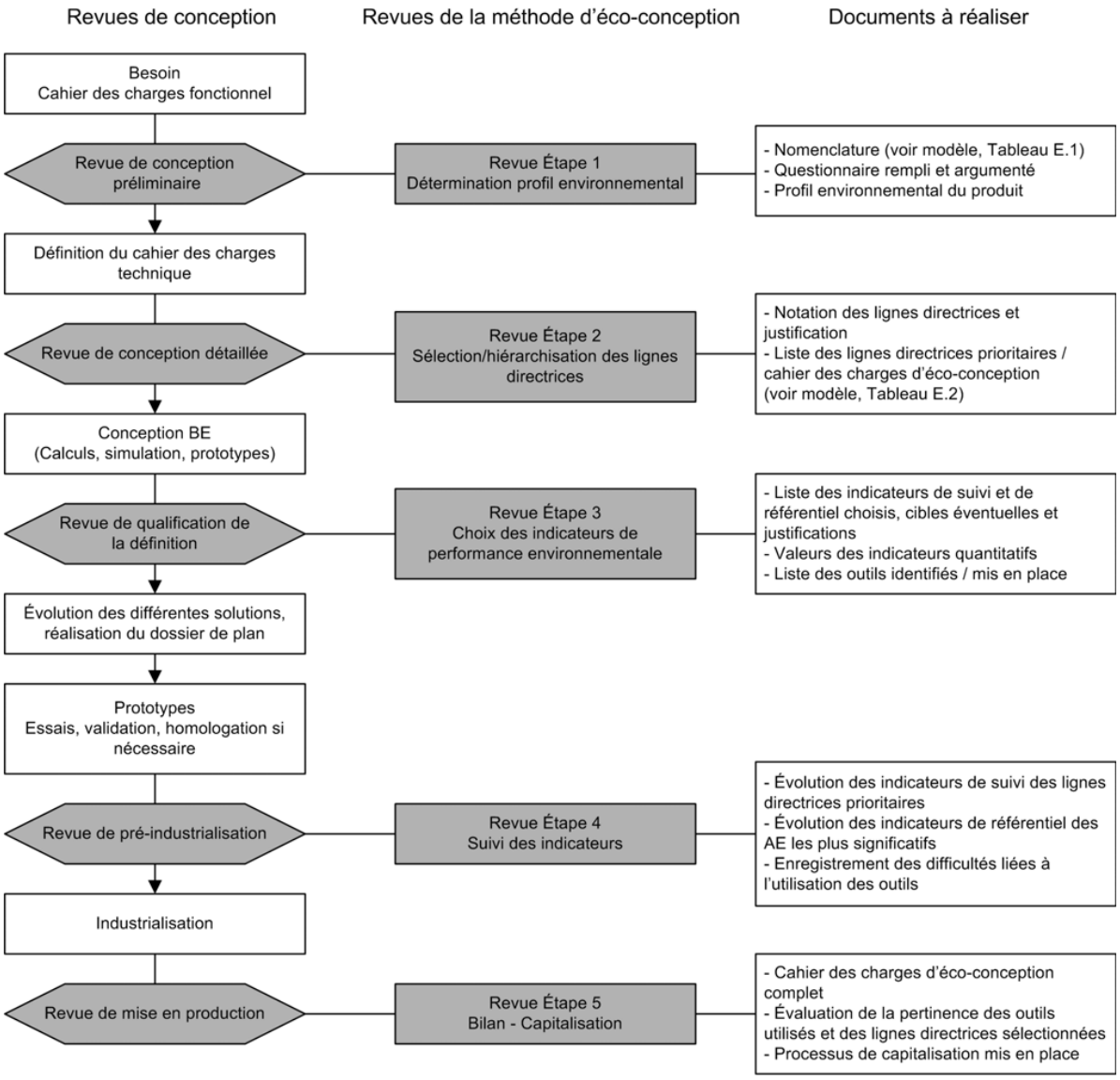


FIGURE A.1 – Intégration de l'éco-conception dans les pratiques classiques : les cinq étapes et leur support respectif

D'après la norme XPE 01-005 sur les produits mécaniques.

Par rapport à nos travaux, ces outils spécifiques peuvent être séparés en outils *globaux* et outils *locaux*.

Dans le cas des outils *locaux*, ils peuvent s'associer à l'outil métier local (par exemple le contenu énergétique des matériaux avec les logiciels de sélection des matériaux). Ainsi, ces outils spécifiques Environnement possèdent les indicateurs environnementaux (ou les paramètres impliquant des modifications liées aux impacts du produit sur l'environnement), nécessaires à l'intégration pratique de l'*éco*-conception dans chaque métier.

Les outils *globaux* font typiquement partie de la bibliothèque de GEA que l'interface propose : par exemple, le logiciel ECODIS qui est présent à différents stade du processus de conception (via les modules X-Pro, X-Rec, X-Mat).

Indicateurs de suivi et leur appropriation par les métiers de la conception
Un des aspects tout à fait intéressant de la norme est le fait de proposer des lignes directrices avec des indicateurs de suivi et des indicateurs de référentiel.

La hiérarchisation des aspects environnementaux permet de définir des stratégies adaptées qui sont encadrées par des indicateurs. Dans le cas de l'interfaçage entre le global et le local, nous avons besoin de ce type d'indicateurs. Nous pourrions donc nous inspirer des travaux de Stéphane Le Pochat.

AE	Outils spécifiques Environnement	Outils classiques
Tous	— Directives, réglementations portant sur le produit — etc.	
MP	— Contenu énergétique des matériaux — Liste des matériaux rares — Liste des matériaux recyclables — Liste des matériaux renouvelables — Table du contenu moyen en matériau recyclé — Impacts environnementaux des matériaux — Logiciel X-Pro (ECODIS), etc. — etc.	— Logiciels de conception — Logiciels de sélection des matériaux — Analyse fonctionnelle, cahier des charges fonctionnel — Conception pour l'assemblage (Design For Assembly) — Outils de créativité : TRIZ, brainstorming, etc. — etc.
F	— Impacts environnementaux des procédés et consommables : logiciel X-Pro (ECODIS), etc. — etc.	— Analyse de risque — Cahier des charges fournisseurs — Méthodes d'organisation de la production — Ingénierie simultanée — Documents européens sur les Best Available Technologies (BAT) ou meilleures technologies disponibles (MTD) — etc.
U	— Impacts environnementaux des modes d'énergie — etc.	— Analyse fonctionnelle, cahier des charges fonctionnel — Conception pour l'assemblage (Design For Assembly) — AMDEC produit, analyse fiabiliste — Calculs, essais, simulations (étanchéité, isolation, rendement, efficacité/précision, maîtrise/contrôle, etc.) — etc.
FV-R	— Liste des matériaux recyclables — Table de tri densimétrique des plastiques — Tableau de compatibilité chimique des plastiques — Mode de calcul du taux de recyclabilité — Logiciel X-Rec (ECODIS) — etc.	— Conception pour l'assemblage (Design For Assembly) — AMDEC produit, analyse fiabiliste — etc.
S	— Liste des substances interdites et/ou limitées (produit, process, fin de vie incinération/décharge) — Logiciel X-Mat (ECODIS) — etc.	— Fiche de données sécurité — etc.
T	— Impacts environnementaux des modes de transport — etc.	— Cahier des charges achats — Outils d'organisation de la logistique — Plan de palettisation — etc.
Emb	— Impacts environnementaux des matériaux d'emballage — Informations sur les filières de recyclage des emballages — etc.	— Cahier des charges fournisseurs — etc.

FIGURE A.2 – Outils spécifiques Environnement et outils classiques en fonction des aspects environnementaux considérés

Selon la norme XPE 01-005 sur les produits mécaniques.

A.3 Annexe : exemple de mise en correspondance d'outils de conception et d'analyse environnementale

Le tableau Fig. A.3 présente un classement d'outils fondé sur des références bibliographiques d'articles scientifiques [Navarro et al.(2005)],[Kota et Chakrabarti(2007)], [ISO(2009)] qui proposent une classification suivant les deux critères contextuels suivants :

1. Les phases du processus de conception : faisant référence à Fig. 2.4, avec parfois l'ajout d'étapes supplémentaires, suivant les auteurs ;
2. Le niveau d'utilisation de l'outil : niveau management et niveau opérationnel.

Exemple de classement d'outils suivant le processus de conception
- Les chiffres font référence à la liste d'outils -

Etapes du processus	**Expression du besoin**		**Conception préliminaire**		**Conception détaillée**		
[Navarro et al., 2005]	Preparing the project objectives	Id. Env. impacts	Improve. ideas	Conceptual design	Detail design	Action plan (promotion, env. Reports)	Evaluation of the process
N. manag.	X					X	X
N. opé.		X	X	X	X		
Outils proposés	1-7, 25,30, 31,63,64	8-24, 27-29, 45,46, 54,61	14,22,23,25-33,38,45,46, 51,57	31, 34-44, 47,48, 52,53,55	34-47,50, 52,53,55, 58	1, 20,25,36, 63-65	1,4,5,28, 29, 62, 65

[Kota et Charkrabarti, 2007]		Phases amont			Conception détaillée		
N. manag.							
N. opé.			X		X		
Outils proposés	Globaux: Specifiques:		66-69	73-76	70-72,77		

[Norme XPE 01005]			Conception préliminaire		Conception détaillée		
N. manag.		X					
N. opé.			X		X		
Outils proposés	Globaux Spécifiques Matériaux: Autre:	78	 79-83 87-92 84,85		 94,95 93		

Outils classiques	A,B	C	D-G	H-S			

Etapes du processus	**Expression du besoin**		**Conception préliminaire**		**Conception détaillée**		

FIGURE A.3 – Comparaisons basées sur des articles bibliographiques d'outils pour la prise en compte de l'environnement dans les phases du processus de conception.
Classements réalisés au niveau management ou opérationnel, et les propositions d'outils des auteurs [Navarro et al.(2005)],[Kota et Chakrabarti(2007)], [ISO(2009)]

Liste d'outils analysés par [Navarro et al.(2005)] :

1. Environemental Management System (EMS) : ISO 14000

2. Environmental Market Prospective (Boks, C.B. and Tempelman, E., Delphi Forecasting of Recycling Technology to Support Design for End-of-Life of Consumer Electronic Products, in Proceedings of the 11th International Conference on Engineering Design, Tampere, Finland, Tampere University of Technology, 1997)

3. Forecast and Back-Cast (Jakobsen, M.M. and Ernzer, M., How to get Sustainable Thinking into the Students Head, in Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED), Glasgow, 2001)

4. Sustainability Indexes

5. Ecoindicators (Goedkoop, M. and Spriensma, R., The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Methodology Report, PRé Consultants B.V., Amersfoort, Netherlands, 1999)

6. Life Cycle Costing (LCC). Environmental Accounting (US-EPA (United States Environmental Protection Agency) "Environmental Accounting Resource Listing, Office of Pollution Prevention and Toxics", Washington DC, 1996.)

7. Willingness To Pay Assessment (WTPA) (US-EPA (United States Environmental Protection Agency) "Environmental Accounting Resource Listing, Office of Pollution Prevention and Toxics", Washington DC, 1996)

8. MET Matrix (Matter, Energy y Toxicity) (IHOBE (Sociedad Pública Vasca de Gestión Ambiental), Manual Práctico de Ecodiseño : Operativa de Implantación en 7 Pasos, Ihobe S. A, Bilbao, 2000.)

9. Design for Environment Matrix System (DfE-MS) (Allenby, B.R., "Integrating Environment and Technology : Design for Environment", in The Greening of Industrial Ecosystems, National Academy Press, Washington DC, 1994, pp. 137- 148.)

10. Environmental Risk Evaluation ERE–Toolkit (Klöcker, S. and Müller, D. H., "Ecological Classification and Risk Analysis to Evaluate Environmental Impact of New Products", in Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED), Munich, 1999.)

11. Environmental Auditing (ISO (International Organization for Standardization), ISO-19011. Guidelines for Quality and Environmental Management Systems Auditing, ISO/TC 176/SC 3, Ginebra, 2002)

12. Checklists (Behrendt, S., Jasch, C., et al. (Eds.), "Life Cycle Design. A Manual for Small and Medium Sized Enterprises", Springer-Verlag, Berlin, 1997)

13. Ecodesign Product Investigation, Learning and Optimization Tool (ECOPILOT) (Wimmer, W., "Environmental Improvements of a Citruspress Using the Ecodesign Checklist Method", in Proceedings of the 12th International Conference on Engineering Design, München, Germany, 1999, pp. 465-468)

15. Life Cycle Assessment (LCA). Series ISO 14040 (ISO (International Organization for Standardization), ISO 14040 :1997. Environmental Management. Life Cycle Assessment. Principles and Framework, ISO/TC 207, Ginebra, 1997)

16. Economic Input–Output Life Cycle Assessment (EIO–LCA) Model (Rosenblum J. and Horvath A. et. al., "Environmental Implications of Service Industries", Environmental

science and Techonology, vol. 34, no. 22, 2000, pp. 4669-4676.)

17. Environmental Policy Strategies (EPS) (Wendel, A. and Louis, S.; Life Cycle Assessment and Design. Experience from Volvo car Corporation, Soc. Automotive Engineers Inc.; 1998)

18. Life Cycle Data Acquisition (LCDA) (Simon, M. and Bee, G. et al., "Modelling of the Life Cycle of Products with Data Aquisition Features", Computers in Industry, vol. 45, 2001, pp. 111-122)

19. Bibling (Abramovici, M. and Gayk, K., "Bibling ? An Information-Broker for the Product Development", in Proceedings of the 12th International Conference on Engineering Design, München, Germany, 1999, pp. 1587-1592)

20. Green Concurrent Engineering (Karlsson, M. Green Concurrent Engineering. A Model For DFE Management Programs, Ph.D. Thesis, Lund University, Lund, 2001)

21. Environmental SWOT (Gutowski, T.G.and Murphy, C.F. et al., "Environmentally Benign Manufacturing. Final Report", International Technology Research Institute, Loyola College, Baltimore, 2001)

22. Good Practice Guide on Pollution Prevention (GPG-P2) (US-DOE (United States Department of Energy), GPG-P2. Good Practice Guide on Pollution Prevention, 2002)

23. Pollution Prevention Environmental Design Guide for Engineers (P2-EDGE) (US-DOE (United States Department of Energy), P2-EDGE. Pollution Prevention Environmental Design Guide for Engineers, 2001)

24. Cleaner Technology Substitutes Assessment (CTSA) (US-EPA (United States Environmental Protection Agency) and RF (Resources for the Future), Searching for the Profit in Pollution Prevention : Case Studies in the Corporate Evaluation of Environmental Opportunities, Office of Pollution Prevention and Toxics, Washington DC, 1998)

25. Life Cycle Design manual (Behrendt, S., Jasch, C., et al. (Eds.), "Life Cycle Design. A Manual for Small and Medium Sized Enterprises", Springer-Verlag, Berlin, 1997)

26. Spider web Diagrams (Van Hemel, C.G., EcoDesign Empirically Explored, Thesis Delft University of Technology, Delft, 1998)

27. Quality and Environment Function Deployment (QEFD), Green Quality Function Deployment (Green QFD) (Zhang, Y.; Wang, H.P. and Zhang, C., "Green QFD -II : A Life-Cycle Approach for Environmentally Conscious Manufacturing by Integrating LCA and LCC into QFD Matrices", International Journal of Production Research, vol. 37, no. 5, 1999, pp. 1075-1091)

28. Value and Environmental Impact Analysis (Lagerstedt, J. and Luttropp, C., "Functional Priorities in Eco-Design–Quality Function Deployment, Value Analysis and Functional Profile", in Proceedings of the 13th International Conference on Engineering Design, Glasgow, 2001)

29. Utility Functions (UF) (Mangun, D and Thurston, D.L., "Decision Making for Component Remanufacturing within Product Families", in Proceedings of the 13th International Conference on Engineering Design, Glasgow, 2001)

30. Method–Mix Procedure (Ernzer, M. Oberender, Ch. et al., "DFE for Companies. An Easy To Use Individualized Method- mix for DFE," in Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED), Glasgow, 2001)

31. On-line tutor-facilitated Ecodesign learning tools (Vezzoli, C., "A New Generation of Designers : Perspectives for Education and Training in the Field of Sustainable Design.

Experiences and Projects at the Politecnico di Milano University", Journal of Cleaner Production, vol.11, 2003, pp. 1-9)

32. Life Cycle Planning (LCP) (Kobayashi, H., "Life Cycle Planning for Strategic Evolution of Eco-Products", in Proceedings of the 13th International Conference on Engineering Design, Glasgow, 2001)

33. Decision Aid Techniques based on multi-attribute techniques (Mangun, D and Thurston, D.L., "Decision Making for Component Remanufacturing within Product Families", in Proceedings of the 13th International Conference on Engineering Design, Glasgow, 2001)

34. Distributed Object-based Modelling and Evaluation (DOME) (Borland, N. and Wallace, D., "Environmentally Conscious Product Design : A Collaborative Internet-Based Modelling Approach", Journal of Industrial Ecology, vol. 3, no. 2 and 3, 2000)

35. Common Object Request Broker Architecture (CORBA) (Borland, N. and Wallace, D., "Environmentally Conscious Product Design : A Collaborative Internet-Based Modelling Approach", Journal of Industrial Ecology, vol. 3, no. 2 and 3, 2000)

36. Life Cycle Modeler (Anderl, R. and Weissmantel, H. et al., "Life Cycle Modelling : A Cooperative Method Supports Experts in the Entire Product Life Cycle", in Proceedings of the 12th International Conference on Engineering Design, München, Germany, 1999, pp. 1801-1804)

37. CAD Modules that include environmental aspects (Gungor, A. and Gupta, S.M., "Issues in Environmentally Conscious Manufacturing and Product Recovery : A Survey", Computers and Industrial Engineering, vol. 36, no. 4, 1999, pp. 811-853)

38. ISO 14062 (ISO (International Organization for Standardization), ISO/PDTR 14062)

39. Design for Disassembly (DfD) (Gungor, A. and Gupta, S.M., "Issues in Environmentally Conscious Manufacturing and Product Recovery : A Survey", Computers and Industrial Engineering, vol. 36, no. 4, 1999, pp. 811-853)

40. Design for Modularity, Variety (DfMo) (Ishii, K., "Modularity : A Key Concept in Product Life-Cycle Engineering", in Handbook of Life Cycle Engineering, eds A. Molina, A. Kusiak and J. Sanchez, Kluwer Academic Publishers, 1998, pp. 511-531)

41. Design for Recycling (DfRc)

42. Design for Remanufacturing (DfR) (Sundin, E., "Enhanced Product Design Facilitating Remanufacturing of Two Household Appliances–A Case Study", in Proceedings of the 13th International Conference on Engineering Design, Glasgow, 2001)

43. Design for Recovery (DfRe) (Guidice, F. ; La Rosa, G. and Risitano, A., "Optimisation and Cost-Benefit Analysis of Product Recovery-Cycles", in Proceedings of the 13th International Conference on Engineering Design, Glasgow, 2001)

44. Design for X (DfX) (Gungor, A. and Gupta, S.M., "Issues in Environmentally Conscious Manufacturing and Product Recovery : A Survey", Computers and Industrial Engineering, vol. 36, no. 4, 1999, pp. 811-853)

45. End-of-Life Design Advisor (ELDA) (Rose, C.M. and Stevels, A., "ELDA and EVCA : Tools for Building Product End-of-Life Strategy", Journal of Sustainable Product Design, September 2000)

46. Environmental Value Chain Assessment (EVCA) (Rose, C.M. and Stevels, A., "ELDA and EVCA : Tools for Building Product End-of-Life Strategy", Journal of Sustainable Product Design, September 2000. 14)

47. Expert System for Engineering Sustainable Development in Product-Process Design (ESESPD) (Cristofari, M. ; Caron, F. et al., "Expert System for Engineering Sustainable-Development in Product-Progress Design (ESESPD)", in Proceedings of the 11th International Conference on Engineering Design, Tampere, Finland, 1997, Tampere University of Technology)

48. Ecodesign Tool for industrial designers (Lofthouse, V. and Bhamra, T., "A Creative Element–Ecodesign Tools for Industrial Design", in Proceedings of International Conference on Engineering Design, ICED, Glasgow, Scotland, 2001)

49. Ecological Failures Modes and Effects Analysis (Eco- FMEA) (Dannheim, F. ; Schott, H. and Birkhofer, H., "The Significance of the Product's Usage Phase for Design for Environment", in Proceedings of the 12th International Conference on Engineering Design, München, Germany, 1999, pp. 641-646)

50. Materials Ecoevaluator (Shibaike, N., "Environmentally Conscious Materials Selection Tool with Process Assessment", in Proceedings of the 13th International Conference on Engineering Design, Glasgow, 2001)

51. Petri nets evaluation methods (Gungor, A. and Gupta, S.M., "Issues in Environmentally Conscious Manufacturing and Product Recovery : A Survey", Computers and Industrial Engineering, vol. 36, no. 4, 1999, pp. 811-853)

52. ReStar (Navin-Chandra, D., "ReStar : A Design Tool for Environmental Recovery Analysis", in Proceedings of the 9th International Conference on Engineering Design, The Hague, France, 1993, pp. 780 - 787)

53. Ecological Classification and Risk Analysis (ECRA) (Klöcker, S. and Müller, D. H., "Ecological Classification and Risk Analysis to Evaluate Environmental Impact of New Products", in Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED), Munich, 1999)

54. Technical Product Analysis (TPA) (Jansen, A.J. ; Ram, A.A.P. and Stevels, A.L.N., "Renewable Energy and the Road towards "Green" Portable Audio Products", in Proceedings of the 11th International Conference on Engineering Design, Tampere, Finland, Tampere University of Technology, 1997, pp. 577-582)

55. LINKER (Ishii, K., "Incorporating End-of-Life Strategy in Product Definition", in EcoDesign'99 : 1st Int. Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokyo, Japan, 1999)

56. Product Ideas Tree (PIT) Diagram (Jones, E. ; Stanton, N.A. and Harrison, D., "Applying Structured Methods to Eco-Innovation. An Evaluation of the Product Ideas Tree Diagram", Design Studies, vol. 22, 2001, pp. 519-542)

57. Selection of Strategic Environmental Challenges (STRETCH) Methodology from Phillips (Cramer, J. and Stevels, A., "STRETCH : strategic environmental product planning with Philips Sound and Vision" Journal of Environmental Quality Management, Autum Issue, 1997, 91-101)

58. Product Lifecycle Extension Technique/Process Selection (PLETS) (Dunmade, I., "Development of System Models for Industrial Processes Selection with regard to Product Lifecycle Extension (PLETS Models)", dissertation, Technical University Cottbus, Germany, 2001)

59. Product Business Model (Harrison, L.A.J. ; Blount, G.N. and Bush, S.A., "Automotive Design for Recyclability–A Business Model Approach", in Proceedings of the 12th

International Conference on Engineering Design, München, Germany, 1999, pp. 1085-1088)

60. Environmental Evaluation Methods (Maeder-Nehls, B. and Leidich, E., "Evaluation Method to Identify the Most Environmentally Compatible Solution Variant within the Design Process", in Proceedings of the 11th International Conference on Engineering Design, Tampere, Finland, 1997, Tampere University of Technology)

61. Eco-Portfolio (Spath, D.; Hartel, M. and Tritsch, C., "Life Cycle Assessment : Tools to Support Environmental Product Design and Economical Disassembly of Technical Consumer Products", in Proceedings of the 10th International Conference on Engineering Design, Praha, Czech Republik, 1995, pp. 1066 - 1072)

62. Extension of Useful Life (EUL) (Guidice, F.; La Rosa, G. and Risitano, A., "Optimisation and Cost-Benefit Analysis of Product Recovery-Cycles", in Proceedings of the 13th International Conference on Engineering Design, Glasgow, 2001)

63. Green Marketing (Charter, M. and Tischner, U. (eds.), "Sustainable Solutions : Developing Products and Services for the Future", Greenleaf Publishing Limited, Sheffield, 2001)

64. ISO 14020 series

65. ISO 14030 series

Liste d'outils par [Kota et Chakrabarti(2007)] :

66. QFDE : (Keijiro Masui, Tomohiko Sakao and Atsushi Inaba, Quality Function Deployment for Environment : QFDE (1st Report)–A methodology in Early Stage of DfE, In Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Ecodesign '01, Tokyo, December 2001, pp.852-857. (IEEE Computer Society, Los Alamitos).)

67. EEA : (Mattias Lindahl, Environmental Effect Analysis–How does the method stand in relation to lessons learned from the use of other design for environment methods, In Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Ecodesign '01, Tokyo, December 2001, pp.864-869. (IEEE Computer Society, Los Alamitos))

68. ECRA : (Klöcker S. and Müller H., Ecological classification and risk analysis to evaluate environmental impact of new products, In International Conference on Engineering Design ICED '99, Vol.3, Munich, August 1999, pp.1483-1488. (Technische Universität München, Garching))

69. QFD : (Jesper Olesen, Environmental QFD–The Creation of Project focus, In International Conference on Engineering Design, ICED '97, Vol.1, Tampare, August 1997, pp. 323-328)

70. LCA : (Roche T, Development of a CAD integrated DFE Workbench tool, In International Symposium on Electronics and the Environment, Denver, 2001. (IEEE Computer Society, Los Alamitos))

71. DFE Workbench : (Reiner Anderl, et, al., Life cycle modeling–a cooperative method supports experts in the entire product life cycle, In International Conference on Engineering Design ICED '99, Vol.3, Munich, August 1999, pp.1801-1804. (Technische Universität München, Garching))

72. Oil points : (Niki Bey, Torben Lenau, and Michael Holm Larson, Oil Points–Life Cycle Evaluations without the data problem, In International Conference on Engineering Design ICED '99, Vol.1 , Munich, August 1999, pp.469-472. (Technische Universität München, Garching))

73. Use stage : (O wager, C Oberender, H Birkhofer and J sauer, Designing for ecological consumer use : A case study of a interdisciplinary approach to eco-effective product design, In International Conference on Engineering Design, ICED '01, Vol.1 , Glasgow, August 2001, pp.701-708)

74. DF EnEf : (T Gómez-Navarro et. al., Design for energy efficiency, In International Conference on Engineering Design, ICED '01, Vol.1, Glasgow, August 2001, pp.613-620)

75. DFRecovery : (P Tonnelier, D Millet, M le Coq and P Michaud, Design for recovery–evaluation of recovery aptitude of a vehicle, In International Conference on Engineering Design, ICED '01, Vol.1, Glasgow, August 2001, pp.661-668. (Professional Engineering Publishing, Bury St Edmunds))

76. DFR data management system : (B Rosemann, H Meerkamm, St. Trautner, and K Feldmann, Design for recycling, recycling data management and optimal end-of-life planning based on recycling-graphs, In International Conference on Engineering Design ICED '99, Vol.3, Munich, August 1999. pp. 1471-1476)

77. Uncertainty estimation method : (Srinivas Kota and Amaresh Chakrabarti, Development of a method for estimating uncertainty in evaluation of Environmental Impacts during design, In International Conference on Engineering Design, ICED '07, Paris, August 2007)

Liste des outils selon la norme XPE 01005 [ISO(2009)] :

78. Directives, réglementations portant sur le produit

79. Contenu énergétique des matériaux

80. Liste des matériaux rares, recyclables, renouvelables

81. Table du contenu moyen en matériau recyclé

82. Impacts environnementaux des matériaux

83. Logiciel X-Pro (ECODIS)

84. Impacts environnementaux des procédés et consommables : ex. Le logiciel X-Pro (ECODIS)

85. Impacts environnementaux des modes d'énergie

86. Liste des matériaux recyclables

87. Table de tri densimétrique des plastiques

88. Tableau de compatibilité chimique des plastiques

89. Mode de calcul du taux de recyclabilité

90. Logiciel X-Rec (ECODIS)

91. Liste des substances interdites et/ou limitées (produit, process, fin de vie incinération/décharge)

92. Logiciel X-Mat (ECODIS)

93. Impacts environnementaux des modes de transport

94. Impacts environnementaux des matériaux d'emballage

95. Informations sur les filières de recyclage des emballages

Exemple d'outils de conception classiques :

A. Analyse fonctionnelle, cahier des charges fonctionnel
B. Analyse de risque
C. Outils de créativité : ASIT, TRIZ, brainstorming, etc.
D. Logiciels de sélection des matériaux
E. Documents européens sur les Best Available
F. Technologies (BAT) ou meilleures technologies disponibles (MTD)
G. AMDEC produit, analyse fiabiliste
H. Logiciels de conception (CAO)
I. Logiciels de dimensionnement, simulation numérique calcul de structure (EF)
J. Outils de DFM (FAO)
K. Outils de conception pour l'assemblage (Design For Assembly)
L. Calculs, essais, simulations (étanchéité, isolation,rendement, efficacité/précision, maîtrise/contrôle, etc.)
M. Cahier des charges fournisseurs
N. Méthodes d'organisation de la production
O. Méthodes d'ingénierie simultanée
P. Fiche de données sécurité
Q. Cahier des charges achats
R. Outils d'organisation de la logistique, Plan de palettisation
S. Cahier des charges fournisseurs, audit des fournisseurs

A.4 Annexe : Illustration d'un modèle d'activité en UML

La Fig. A.4 illustre l'ébauche d'un modèle d'activité réalisé *a posteriori*, à partir des données récoltées par les enquêtes. Les bulles de couleur claire (roses), sont les questions posées par l'interviewant aux différents métiers qui étaient impliqués dans ce processus de conception. Plus le processus sera précis, plus il sera facile d'établir les liens entre méta-modèles, pour ensuite définir les cartes de correspondances.

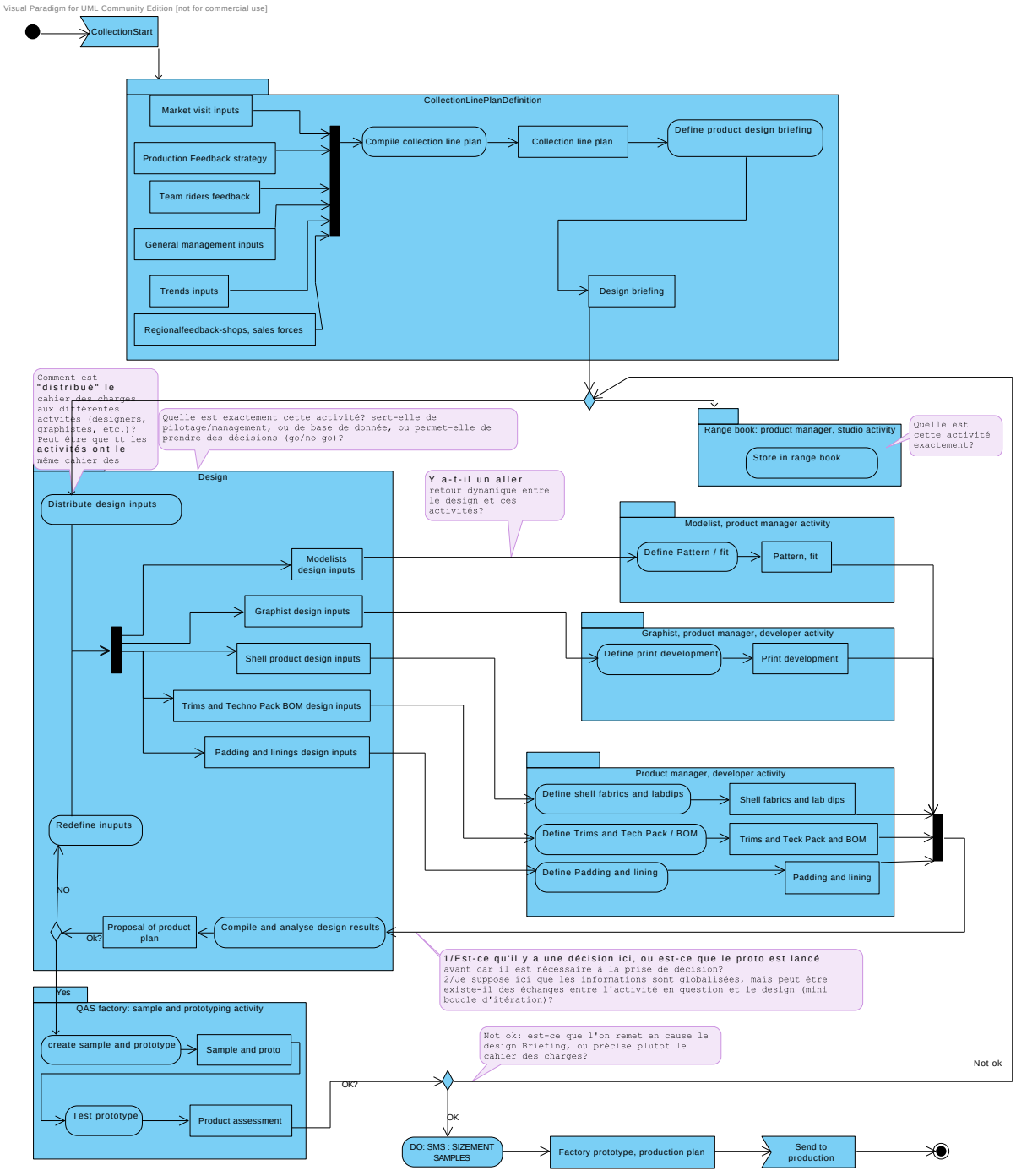


FIGURE A.4 – Exemple d'ébauche de modèle d'activité en UML, suite à l'enquête (support : questionnaire 4.2.4, appliqué à la société Quiksilver), dans le cadre de l'ANR Convergence

A.5 Annexe : questionnaire d'enquêtes

Caractéristique de l'enquête

Objet :

- Définir la structure et les activités de l'entreprise sur un projet donné :
  - Cartographier les éléments (parties prenantes internes et externes, activités)
  - Cartographier et comprendre la dynamique d'échange de flux sur un projet : qualifier les données d'entrée et de sortie ; canaux de communication ; commandes.
- Comprendre le fonctionnement normal de l'entreprise et voir le fonctionnement sur des cas particuliers (illustration)

Déroulement : en deux temps

- Première partie : observation de l'activité des agents
- Deuxième partie : interview

Durée de l'interview : 1h par participant

Déroulement : dialogue individuel, et anonyme, prise de notes, prise de son selon accord.

Note : ce support n'a pas vocation a être distribué. Il sera utilisé comme support par la personne posant les questions lors de l'entretien.

Interview des managers

Profil associé :

Q1 - Pourriez-vous m'expliquer votre métier (fonction) : activités types, illustration sur schéma structurel (avec échelle fournie).

Q2 - [Objectif : identifier les différents acteurs métiers intervenants (chronologie)] : quels sont les principaux métiers qui interviennent dans ces activités ? *Annoter sur le schéma principal.* En quoi consiste ces activités métier ?

Q3 - [Objectif : identifier les différents documents supportant les choix des différents métiers] : selon vous, quels types de supports servent de base aux métiers (fichiers de travail) ; Quels supports servent à véhiculer les informations entre les métiers (fichiers d'échanges, fichiers justifiant les choix de conception) ? ; En tant que chef Y, sur quelle autre base (interface outil, verbale (réunions formelles, informelles, etc.)) prenez-vous en compte les choix des différents métiers ? (appel à la question en 1....) ; Quelles sont les données que vous obtenez directement en données de sortie (une maquette CAO, un prototype...), est-ce une activité automatique ou une activité qui nécessite des données externes et une collaboration importante avec d'autres métiers ? Où sont ces documents et par qui sont-ils gérés (recouper avec administrateurs du Système d'Information) ? *Annoter sur le schéma principal*

Q2 - [Objectif : interconnexions entre les métiers, prise de décision] : quels types de liens, de relations, existent-ils entre ces activités (échanges de données via une plate-forme virtuelle, échanges de données informelles lors de réunions, etc.) ? Qui interagit avec qui ? Qui veut quoi (le pourquoi) ? Définir la nature des flux et le pourquoi du transfert ou de l'échange, *Annoter sur le schéma principal*; signaux d'arrêt ou de début d'activité.

Interview des "Métiers" *locaux*

Profil associé :

Q0 - Pourriez-vous m'expliquer votre métier (fonction) : activités types, illustration sur schéma structurel (avec échelle fournie).

Q1 - [Objectif : caractériser les activités métier] : Détailler les activités liées à votre métier ? *faire un schéma principal* ; Formuler par un verbe les actions principales dans votre activité (celles qui sont primordiales) [liste en suite logique]

Q2 - [Objectif : identification des outils] : Lister les outils que vous utilisez ? *Annoter sur le schéma principal* ;

Pour chaque outil : schématiser les données d'entrée et de sortie, les formats d'import et export possibles.

Q3 - [Objectif : identification et caractérisation des données échangées lors de ces tâches] : (prendre un exemple de projet si c'est plus facile) Quelles sont les données d'entrée nécessaires à la tâche, ou sous-activité (citer le titre de l'activité défini à l'étape précédente), les données créées ? *Annoter sur le schéma principal* ; Préciser les formats d'import et d'export pour chaque outil utilisé.

Q4 - [Objectif : l'intégration de la dimension environnementale] : êtes vous de près ou de loin concerné par l'environnement (projet, cahier des charges, normes, règlement, prospective, demandes spécifiques, etc.) ? Décrire les échanges d'information relatifs (cf. question précédente) ; forces - faiblesses - opportunités - menaces.

Q5 - [Objectif : réalisation des cartes de correspondance] : quels sont les échanges que vous avez entre les autres métiers (que ce soit au niveau local, que global), dans la prise en compte de l'environnement ? *Annoter sur le schéma principal* ; Pouvez-vous identifier les freins à l'éco-conception dans votre pratique courante ? Proposer des actions pour améliorer le transfert des connaissances et transformation des données ; formuler les opérations de "traduction" ou de "transformation" nécessaires pour relier les données issues des différentes expertises ; *idem* pour donner des retours aux métiers.

Interview de "l'Expert environnement"

Profil associé :

Q1 - [Déterminer où, comment et auprès de quelle activité métier, l'éco-conception est intégrée au travers des différentes phases du processus de conception de projet XX (diagramme d'activité)] : par rapport au schéma principal (réseau) (diagramme, schéma issu de l'interview des chefs) quelles sont les activités, les métiers, les départements (...) prenant en compte la dimension environnementale ? Quelles ont été ou sont, les actions majeures liées à l'environnement ? (trace du processus à faire éventuellement)

Q2 - [Déterminer les supports mis en place pour la prise en compte de l'environnement] : lister les outils que vous utilisez (outils d'analyses, et outils pour échanges des informations) ? Quelle est la maturité des outils (en cours de développement, retours, etc.) (explication sur les outils) ? Quels sont les critères environnementaux qu'ils utilisent ? *Annoter sur le schéma principal* ;

Après analyse et si besoin, formalisation des données dans des méta-modèles, avec l'interviewé

Q3 - [Objectif : établissement des cartes de correspondance] : proposer des actions pour améliorer le transfert des connaissances et transformation des données ; formuler les opérations de "traduction" ou de "transformation" nécessaires pour relier les données issues des différentes expertises et la vôtre (environnement) ; *idem* pour donner des retours aux métiers

Q4 : Quelle est votre vision d'une démarche d'EC idéale au sein de l'entreprise ?

Interview des informaticiens

Profil associé :

Q0 - Pourriez-vous m'expliquer votre métier (fonction) : activités types, illustration sur schéma structurel (avec échelle fournie).

Q1 - [Objectif : caractériser les activités métier] : détailler les activités liées à votre métier ? *faire un schéma principal* ; Formuler par un verbe les actions principales dans votre activité (celles qui sont primordiales) [liste en suite logique]

Q2 - Support et outils de gestion de l'information mis en place : PLM, PDM, ERP, etc. ; schéma du Système d'Information global ; problèmes rencontrés, avantages, exemples ; qu'est-ce que vous demandent les différents services pour faciliter la collaboration entre les services ou entre les métiers au sein d'un service ?

Q3 - [Objectif : les solutions d'interopérabilité] : utilisez-vous des solutions d'interopérabilité ? *Expliciter si besoin*

Comment voyez vous le système actuel dans 5, 10, 20 ans ? Quelles sont les solutions que vous aimeriez explorer ?

A.6 Annexe : informations sur les outils utilisés en tant que maquette dans le cas d'étude n°2

Les maquettes ont été réalisées à partir des outils métier utilisés par les concepteurs NTR. Il a été rajouté trois maquettes supplémentaires :

- **l'outil EcoTransIT** (pour *Ecological Transport Information Tool for Worlwide Transports*), outil de logistique libre de droit et à accès gratuit sur le web[7]. EcoTransIT est un outil qui permet de modéliser les trajets réalisés par la marchandise autravers le monde, en mesurant les impacts environnementaux en terme de consommation directe d'énergie et d'émission de gaz à effet de serre. Le calcul d'impact est le résultat d'une ACV, prenant donc en compte la consommation et les émissions directes liées à la production, au transport et à la distribution de l'énergie, ainsi que les opérations nécessaires pour créer et acheminer l'énergie finale aux véhicules [IFEU-Heidelberg et al.(2011)]. EcoTransIT est un outil métier, support au service logistique. Les modélisations permettent en effet de modéliser d'une manière précise les itinéraires empruntés, ainsi que de choisir le type de site de chargements, la longueur des trains par rapport à la densité de la marchandise, les calculs intègrent également les transbordements en frontières et lors des changements de mode de transport, intègre les différentes normes techniques des véhicules (en fonction des pays), etc. L'utilisateur de l'outil peut comparer les consommations d'énergie et les émissions de différents polluants pour chaque itinéraire comportant les modes de transport sélectionnés. Ainsi, c'est un outil fiable scientifiquement qui a été choisi pour réaliser des maquettes à l'attention des personnes du service logistique de Parkeon. Cet outil pourrait permettre d'échanger des informations avec les outils d'analyse environnementale globale.
- **l'outil de CAO SolidWorks**, présentant l'avantage d'avoir un "module sustainability". Ce module permet normalement au concepteur CAO de réaliser une ACV simplifiée. Dans notre scénario d'utilisation, ce n'est pas au concepteur CAO de réaliser l'analyse environnementale, le module sert donc de *viewer* ou comme un *plugin*, permettant de visualiser les résultats venant de l'analyse environnementale. Ainsi la maquette réalisée sur SolidWork permet d'illustrer l'outil de CAO usuel qui comporterait un *plugin* spécifique de visualisation des résultats d'analyse environnementale venant de l'activité d'expertise environnementale ;
- **l'outil Eclipse** (EMF, libre d'accès et de droits), permettant de faire le développement informatique des transformations. Le film réalisé est à l'attention des informaticiens de chez Parkeon, afin qu'ils expérimentent virtuellement l'utilisation d'EMF pour la réalisation de transformations. La maquette de cet outil présente donc le support utilisé pour réaliser le prototype.

Les informaticiens de Parkeon peuvent utiliser n'importe quelle autre plate-forme informatique utilisant l'UML et un autre langage informatique que ATL. Le film permet juste de se projeter dans un des outils adéquats.

7. Accès libre sur le site : http ://www.ecotransit.org/, réalisé par l'Institut de Recherche en Energie et en Environnemental (Ifeu), Heidelberg et la société de Consultants en Management Ferroviaire GmbH (RMCon).

A.7 Annexe : Précisions sur le code généré relatif aux transformations réalisées dans le cadre du prototype NTR

Les transformations ont été codées par l'informaticien à partir des cartes de correspondances réalisées par les métiers relatifs aux domaines auxquels font appel chaque correspondances. Les points suivants précisent quelques éléments du code correspondant aux transformations réalisées dans le cadre du projet NTR pour relier les données de sortie des activités métiers de *design, mécanique techno, ergonomie, logistique* avec les données d'entrée nécessaires à l'activité d'analyse environnementale globale :

- **Les helpers** [8] sont utilisés pour définir les transformations [Jouault et Kurtev(2006)].
  Il existe deux types de *helpers* : *operation* and *attribute*.
  Les *helpers* de type *operation* définissent des opérations dans le contexte d'un élément du modèle ou dans le contexte d'un module. Les *helpers* de type *attribute* sont utilisés pour associer des valeurs issues d'une lecture (*read-only named values*), aux éléments du modèle source [Jouault et Kurtev(2006)].
  La Fig A.5 illustre trois helpers intervenant dans la transformation permettant le calcul de la masse des pièces du produit en conception. Les explications sont écrites en vert (les premières lignes). Par exemple, le premier helper renvoie la valeur de la densité pour le même partName. La densité provient de la spécification du materialName dans le méta-modèle issu de l'activité de choix de matériaux. Dans le cas où il n'y aucune densité de spécifiée, la valeur "0" est renvoyée. Cette valeur sera ensuite utilisée pour le calcul de la masse.
- **Les règles de transformations** [Jouault et Kurtev(2006)], sont codées en faisant appel aux helpers.
  La Fig A.6 montre par exemple la règle de transformation permettant d'obtenir la masse des pièces à partir de la multiplication de la densité, du volume et de la quantité de ces pièces. Chaque règle est définie à partir d'un modèle source (noté *from "sNomdelaClasseSource : NomduMétaModelSource !NomdelaClasseSource"*, le "s" correspond à *source*), vers un modèle cible (noté *to "tNomdelaClasseCible : NomduMétaModelCible !NomdelaClasseCible"*, dont le nom est incrémenté de la lettre "t" comme *target*). La règle est écrite ensuite entre les parenthèses, et s'applique sur les attributs présents des classes *source* et *target*. Par exemple, sur la première ligne après l'ouverture de parenthèse est spécifié que : l'attribut (ici "PartName") issu de la source *sNomdelaClasseSource* (l'ensemble noté : "sPart.partName"), doit déverser son contenu dans l'attribut s'appelant "partName" (issu du modèle cible).
  La Fig. A.7 est un autre exemple de transformation. Cette règle de transformation permet de calculer le résultat (distance*masse) associé à chaque transport de composant du produit (données d'entrée de l'outil d'ACV). L'opération prend pour méta-modèles sources : les méta-modèles relatifs aux données de sorties de l'activité de logistique et du calcul de la masse, résultant de la règle de transformation Fig A.6.

8. Le terme *helper* vient des définitions données par l'OCL (Object Constraint Language), édité par l'OMG (OMG Document ptc/03-10-14)

```
--Helper qui renvoit la densité pour le meme partName.
--Renvoi la valeur 0 si pas de density trouvé
helper def : availableMatInfosDensity(partNameParam : String) : Real =
                if not MAT!Part.allInstances()->select(e | partNameParam = e.partName)->first
().oclIsUndefined() then
                    MAT!Part.allInstances()->select(e | partNameParam = e.partName)->first().density
                    else
                         0
                    endif
;

--Helper qui renvoit la quantité d'une part pour le meme partName.
--Renvoi la valeur 0 si pas de quantité
helper def : availableCAOInfosQuantity(partNameParam : String) : Real =
      if not CAO!PartTypeMonoMaterial.allInstances()->select(e | partNameParam = e.partName)->first
().oclIsUndefined() then
                    CAO!PartTypeMonoMaterial.allInstances()->select(e | partNameParam = e.partName)->first
().quantityOfThisPart
                    else
                         0
                    endif
;

--Helper qui renvoit la quantité d'une part pour le meme partName.
--Renvoi la valeur 0 si pas de volume
helper def : availableCAOInfosVolumeM3(partNameParam : String) : Real =
      if not CAO!PartTypeMonoMaterial.allInstances()->select(e | partNameParam = e.partName)->first
().oclIsUndefined() then
                    CAO!PartTypeMonoMaterial.allInstances()->select(e | partNameParam = e.partName)->first
().partVolumeM3
                    else
                         0
                    endif
;
```

FIGURE A.5 – Exemple d'helpers utilisés pour définir la transformation permettant le calcul de la masse

```
rule Part2Part {
     from
          sPart : CAO!PartTypeMonoMaterial
     to
          tPart : LCAI!Part (

               partName <- sPart.partName
               ,materialName <- thisModule.availableMatInfosMaterialName(sPart.partName)
               ,processName <- sPart.processName
               ,partMassKg <- sPart.partVolumeM3 * sPart.quantityOfThisPart *  thisModule.availableMatInfosDensity
(sPart.partName)
               ,clientTransport <- thisModule.availableSuppInfosSupptransp(sPart.partName)
          )
}
```

FIGURE A.6 – Illustration d'une règle de calcul établie dans le cadre du projet NTR. La règle permet le calcul de la masse à partir de la densité et du volume issus de méta-modèles différents.

```
rule SupplierTransport2ClientTransport{
from
          sTransp : SUPP!SupplierTransport
to
          tClientT : LCAI!ClientTransport(
               transportMode <- sTransp.transportMode
               ,transportDistanceKgKm <- thisModule.availableCAOInfosVolumeM3
(sTransp.supplier.partName) * thisModule.availableCAOInfosQuantity(sTransp.supplier.partName) *
sTransp.transportDistanceKm * thisModule.availableMatInfosDensity(sTransp.supplier.partName)
          )
}


rule ClientTransport2ProductTransport{
from
          sClientTra : SUPP!ClientTransport
to
          tProductT : LCAI!ProductTransport(
               transportMode <- sClientTra.transportMode
               ,transportDistanceKgKm <- thisModule.availableCAOInfosVolumeM3
(sTransp.supplier.partName) * thisModule.availableCAOInfosQuantity(sTransp.supplier.partName) *
sTransp.transportDistanceKm * thisModule.availableMatInfosDensity(sTransp.supplier.partName)
          )
}
```

FIGURE A.7 – Illustration d'une règle de calcul établie dans le cadre du projet NTR Permettant le calcul de la (masse*distance) à partir de la masse issue de la transformation précédente et de la distance par type de trajet, issus du méta-modèle des données de sortie de l'activité de logistique.

A.8 Annexe : Questions posées et réponses des métiers intervenant lors du projet NTR pour les expérimentations

Les réponses de type grille de Likert sont notées *pttd/pd/m/d/ttd*, pour :

1. Pas du tout d'accord
2. Pas d'accord
3. ni pas d'accord, ni d'accord
4. d'accord
5. tout à fait d'accord

Questions posées et réponses des métiers de la CAO, technologie et choix des matériaux :

- Rappel des besoins : *quelles sont les données que vous aimeriez avoir des autres métiers pour faciliter votre travail et celles que vous aimeriez donner aux autres métiers pour faciliter leur travail ?*
  Réponses : concernant les données à avoir : celles uniquement relatives aux critères environnementaux du cahier des charges (taux de recyclage, ...). Concernant les données que l'activité de CAO en phases amont ne peut pas donner à partir du fichier CAO : la peinture ; le traitement de surface ; les assemblages ne comprennent pas les colles, les joints adhésivés ; pour le mécano soudé, les soudures ne sont pas toujours spécifiées ; la câblerie qui est à spécifier par les câbleurs et les électroniciens.
- *Vous perdez du temps à rechercher les matériaux qui sont disponibles sur la base de données du PLM, par rapport à la dénomination du matériau dans votre base de données CAO. Vous aimeriez que cette équivalence + échanges se fassent automatiquement, juste en appuyant sur "actualiser les données en cours" ? pttd/pd/m/d/ttd.*
  Réponse : *Tout à fait d'accord*, permet une plus grande réactivité et ne fait pas perdre du temps à aller donner les informations par mail, ou à récupérer les informations. Car la recherche ou l'envoi de données n'est pas normalement un travail pour le concepteur CAO (temps de perdu par rapport à son activité de mécanicien).
- *L'action que vous avez à faire pour publier les données est facile et rapide ?*
  Réponse : *Tout à fait d'accord.*
- *Est-ce que l'échange dynamique vous paraît un moyen rapide et efficace d'échange d'informations avec l'ingénieur environnement ?*
  Réponse : *Tout à fait d'accord*, si c'est bien en dynamique (principe du "plug and play")
- *Est-ce que l'échange dynamique vous fait gagner du temps par rapport au système PLM pour l'échange des données nomenclature ?*
  Réponse : *Tout à fait d'accord*, car aujourd'hui pour des raisons internes, la saisie de données sur le PLM peut s'avérer contraignante.
- *Est-ce que l'échange dynamique (réalisé en parallèle) vous ennuie moins que de rentrer les données sur le PLM ?*

Réponse : *Tout à fait d'accord.* Le projet est un travail collaboratif, donc il faut faciliter au maximum l'échange de donnée (pas de "blocage" à avoir). Plus de problèmes sont générés lorsque les informations ne sont pas partagées. C'est la base d'un projet de conception.

- *Est-ce cet échange vous rend plus réactif dans un cycle d'itération ?*
  Réponse : *D'accord.* Les informations venant du service environnement sont faciles à comprendre et correspondent au critère obligatoire du cahier des charges. Cela ne nous prend pas de temps et est adapté à notre activité et à notre outil.
- *Vous permet d'anticiper les besoins de l'autre plus facilement ?*
  Réponse : *Tout à fait d'accord.* C'est l'idée du co-apprentissage et de l'implémentation progressive, petit à petit, du système d'échanges de données.

Questions posées et réponses des experts environnement et énergétique :

- *Est-ce que l'échange dynamique vous paraît un moyen rapide et efficace d'échanger des informations avec les autres métiers ?*
  Réponse : *Tout à fait d'accord*, si on ne compte pas le temps de mise en oeuvre des modèles et des transformations
- *Est-ce que l'échange dynamique vous fait gagner du temps par rapport au système PLM pour l'échange des données nomenclature ?*
  Réponse : *Tout à fait d'accord*, oui car pour l'analyse environnementale, ce qui prend du temps c'est de compiler les informations venant des nomenclatures, donc c'est l'élément crucial (par exemple, pour le reporting RSE, il faut pouvoir générer les rapports d'une manière efficace). De plus, réaliser un bilan environnemental sans derrière faire du pilotage avec un outil stratégique ne sert à rien.
- *Est-ce que cet échange vous rend plus réactif dans un cycle d'itération ? Réactif dans le sens où il est possible de répondre d'une manière adaptée rapidement aux métiers de l'autre (sur une itération).*
  Réponse : *Tout à fait d'accord.* Sur une échelle de 1 à 5, ce serait 4,5 en terme d'amélioration de la réactivité, par rapport au système existant.
- *Est-ce que l'échange dynamique vous permet d'anticiper les besoins de l'autre plus facilement ?*
  Réponse : *Tout à fait d'accord.* Oui, si les cycles d'itération sont très courts. Sur le choix par exemple de la méthode de mise en forme, il faut un minimum d'informations. On va pouvoir anticiper par exemple sur le troisième cycle d'itération rapide (les trois premiers on va être réactifs, et ensuite on va pouvoir anticiper).
- *Quel échange de données pourrait être automatisé comme cela plus facilement ?*
  Réponse : les calculs énergétiques et les calculs des taux de recyclages pourraient se faire automatiquement en fédérant les outils liés à d'autre services. Par exemple le calcul énergétique nécessite des données d'usage (profil des utilisateurs). Ces données sont disponibles dans d'autres services de Parkeon.
  L'anticipation sur les approximations, sur l'évolution des données, pourraient être automatisée pour nous dire où nous en sommes dans la complétude de notre ICV, quelles sont les données qui manquent, ou est-ce que nous sommes toujours dans le cas d'un phénomène très instable, ou nous arrivons à une convergence des résultats vers une complétude de 100%.

Cela nécessite de pouvoir modéliser l'évolution de la complétude des données de l'ICV, ou données d'entrée, relatives à l'outil choisi, puis, de pouvoir implémenter cette modélisation en fonction des projets qui évoluent. On pourrait, en effet, capitaliser les connaissances relatives au type de produit ou projet.

Questions posées et réponses de l'informaticien administrateur CAO :

- *Par rapport à votre connaissance des besoins des concepteurs CAO et du système d'information de l'entreprise, la fédération des outils de CAO avec les outils de l'analyse environnementale et d'autres outils métiers, correspond à un besoin*
  Réponse : *Tout à fait d'accord*
- *Est-ce que l'échange dynamique vous paraît un moyen rapide et efficace d'échanger des informations entre les concepteurs CAO et l'ingénieur environnement ?*
  Réponse : *D'accord*
- *Est-ce que l'échange dynamique vous fait gagner du temps par rapport au système PLM pour l'échange des données nomenclature ?*
  Réponse : *D'accord*, si les cartes de correspondances ne sont pas trop difficiles à définir, et si les transformations prises séparément ne sont pas trop complexes. Elles doivent rester simples au maximum.
- *Est-ce que l'échange dynamique (réalisé en parallèle) vous ennuie moins que de rentrer les données sur le PLM ?*
  Réponse : *Tout à fait d'accord*. Ce n'est pas le métier du concepteur de rentrer des données dans le PLM ou de donner des infos à tout le monde, il perd du temps (surtout s'il n'a pas de retours des personnes à qui il donne les informations). Avec la fédération, l'avantage est que l'on a un retour dynamique sur des itérations courtes donc on est tenu au courant des aspects environnementaux au fur et à mesure de notre avancement dans la conception.
- *Est-ce cet échange vous rend plus réactif dans un cycle d'itération ?*
  Réponse : *Tout à fait d'accord*. Lorsque la dimension environnementale est à prendre en compte dans le cahier des charges dès les phases amont du projet, cela permet aux concepteurs d'y répondre d'une manière plus efficace, notamment avec les liens vers des sites web informatifs, guidelines, autres infos qui peuvent les aider à générer des choix pertinents.
- *Vous permet d'anticiper les besoins de l'autre plus facilement ?*
  Réponse : *Ni en désaccord ni d'accord*. Dans le cas d'une seule itération ... Pas forcément. Le concepteur sera plutôt en train de réagir.
  D'accord : dans le cas de plusieurs itérations et dans le cas de plusieurs projets, les concepteurs CAO co-construisent leur connaissance et ils savent ce qu'il faut qu'ils développent un peu à l'avance, et ce qui va sans doute poser problème.
- *Avez-vous déjà développé la fédération entre outils ? De quelle manière ?*
  Réponse : Oui, en quelque sorte... Pour l'échange de données entre les fichiers de la CAO et du Design. Mais cela reste le même outil métier, donc pas vraiment la même chose.
- *Quel échange de données pourrait être automatisé avec la fédération ?*
  Réponse : la génération des fichiers "production" à partir des fichiers "produits" de la CAO, ainsi que les données nomenclatures pour l'activité d'analyse environnemen-

tale.

Questions posées et réponses de l'informaticien général :

- *Avez-vous déjà développé la fédération entre outils ? De quelle manière ? Connaissez-vous des cas où cela a été développé ?*
  Réponse : On utilise les ETL pour récupérer des données stockées dans les machines que nous avons un peu partout dans le monde. Ce n'est pas la même échelle et ça n'a pas les mêmes avantages que la fédération proposée ici, mais c'est un peu le même principe : récupérations de données hétérogènes de plusieurs endroits différents. Les ETL permettent de faire des mises en relations et transformations fondées sur des règles de transformations. Elles offrent aussi la possibilité de faire des traitements de rejet (nécessite d'analyser pourquoi telle transformation est rejetée). C'est une boîte à outils qui permet de lire toutes les informations venant des outils métiers (stockées temporairement localement) et de les transformer pour les acheminer et les organiser (par exemple par famille) dans une bases de données cible. Chez Parkeon les ETL sont utilisés pour récupérer un ensemble de données relatives aux utilisateurs des 160 000 horodateurs en activité dans le monde, stockées localement, et les acheminer dans les serveurs de Parkeon. L'ensemble de ces données constitue une base centrale relative aux utilisateurs des machines.
- *Quel est votre avis sur la fédération des outils ? Avantages et défauts techniques*
  Réponse : c'est une solution intéressante. Vis-à-vis des applications existantes, qui ne sont pas des applications récentes, la mise en oeuvre peut être un frein. Car il y aura besoin de beaucoup de "connecteurs" différents, d'API. Surtout que le renouvellement ne se fera peut être pas tout de suite. J'y vois certains intérêts que l'on peut disposer via les "Web services" : échanges en temps réels.
- *La méthode de création pourrait être techniquement utilisée chez Parkeon ?*
  Réponse : *D'accord*, c'est possible, localement à développer au besoin des concepteurs.
- *Cette méthode serait difficile à mettre en oeuvre ?*
  Réponse : *D'accord*, car il faudrait pouvoir avoir les connecteurs pour un parc informatique qui est hétérogène, qui comporte des logiciels qui sont assez vieux et donc qui ne permettent pas toujours d'exporter les données soit en XML, soit en Step ou Xcel. Il faut donc réaliser un API (un bout de code qui permet d'extraire du code propriétaire des éditeurs de logiciel).

A.9 Annexe : Illustration de la cartographie des activités de Quiksilver

La Fig. A.8 présente la première page de la restitution d'enquête effectuée en janvier 2012, devant les membres du consortium du projet de l'ANR *Convergence*. La cartographie propose pour chaque interviewé, une "fiche personnelle" décrivant leur activité **textuellement** (liste de sous-activités, supports utilisés, métiers avec qui l'interviewé collabore, remarques), et **graphiquement** en faisant apparaître les "sous-activités", les "données échangées" entre les sous-activités ou avec d'autres "métiers" (à gauche sur la Fig. A.9 présentant l'activité d'un designer). Chaque élément de la cartographie est également présenté sous la forme systémique globale (*cf.* section 4.2.4), sur le site Web "Prezi.com". La Fig. A.10, présente la même activité de designer, mais sur le Prezi.com.

FIGURE A.8 – Présentation du dossier de restitution de la cartographie issue de l'enquête effectuée au sein de Quiksilver, ANR *Convergence*
Ici : présentation des personnes interviewées.

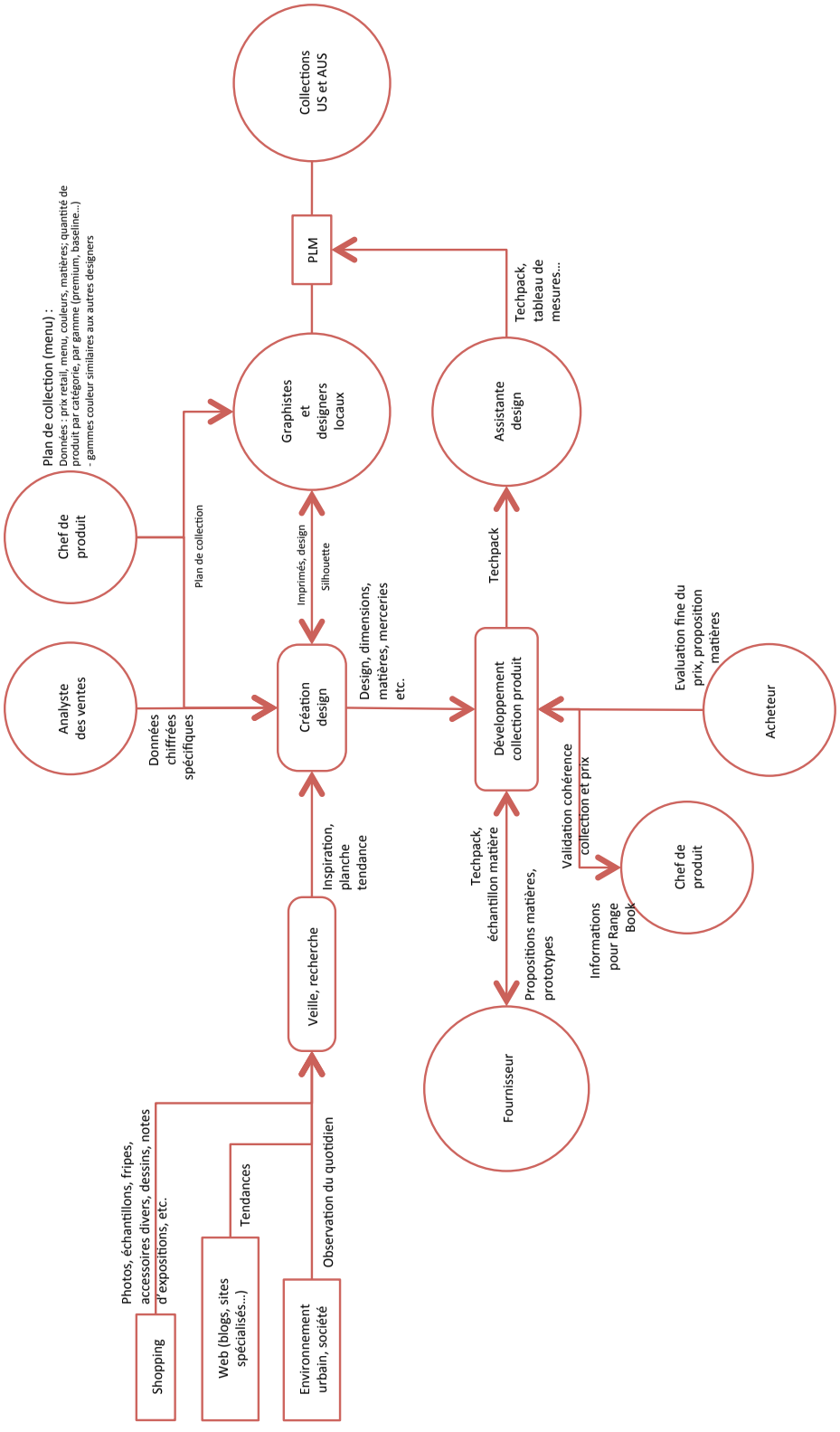


FIGURE A.9 – Exemple d'éléments de la cartographie issue de l'enquête effectuée au sein de Quiksilver, ANR *Convergence*

Ici : présentation de l'activité du designer

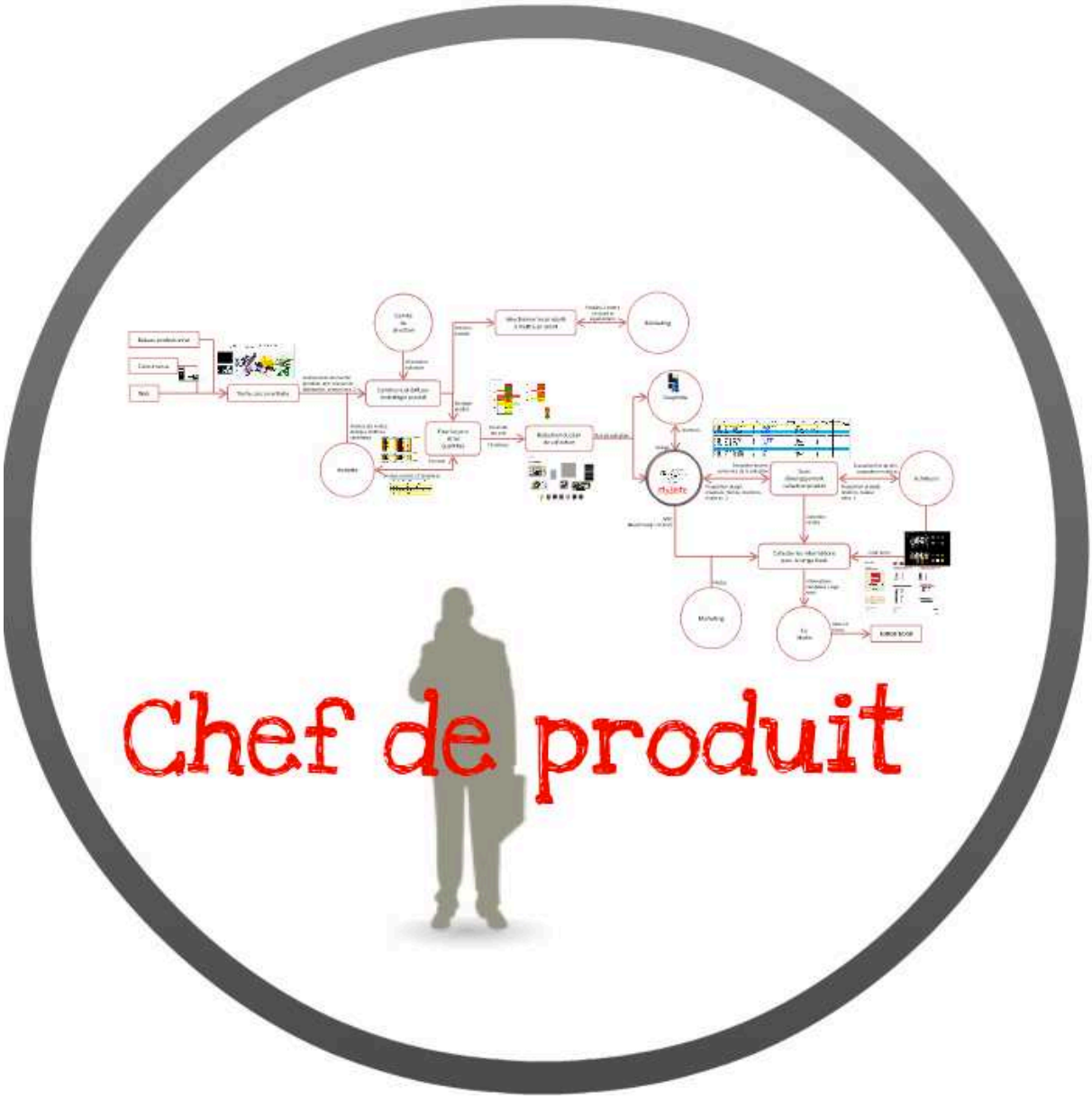


FIGURE A.10 – Exemple d'éléments de la cartographie issue de l'enquête effectuée au sein de Quiksilver, ANR *Convergence*
Ici : présentation de l'activité du designer sur Prezi.com

A.10 Annexe : Diagrammes de classe du prototype NTR

Les diagrammes suivants représentent les méta-modèles d'E ou de S des activités étudiées dans la réalisation du prototype (projet NTR de l'entreprise Parkeon) :

- La Fig. A.11 présente l'exemple choisi pour représenter le méta-modèle des données de sortie de l'activité de CAO
- La Fig. A.12 présente l'exemple choisi pour représenter le méta-modèle des données de sortie de l'activité de choix des matériaux
- La Fig. A.13 présente l'exemple choisi pour représenter le méta-modèle des données de sortie de la logistique
- La Fig. A.14 présente l'exemple choisi pour représenter le méta-modèle de données d'entrée de l'activité d'analyse environnementale de type Analyse du Cycle de Vie [ISO(2006)]
- La Fig. A.15 présente l'exemple choisi pour représenter le méta-modèle de données de sortie de l'activité d'analyse environnementale de type Analyse du Cycle de Vie [ISO(2006)]

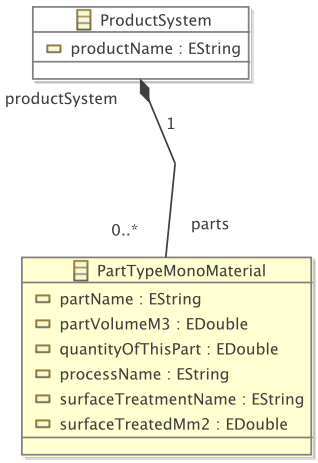


FIGURE A.11 – Exemple de méta-modèle des données de sortie de l'activité de CAO

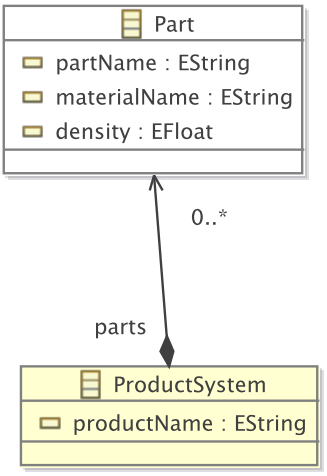


FIGURE A.12 – Exemple de méta-modèle des données de sortie de l'activité de choix des matériaux

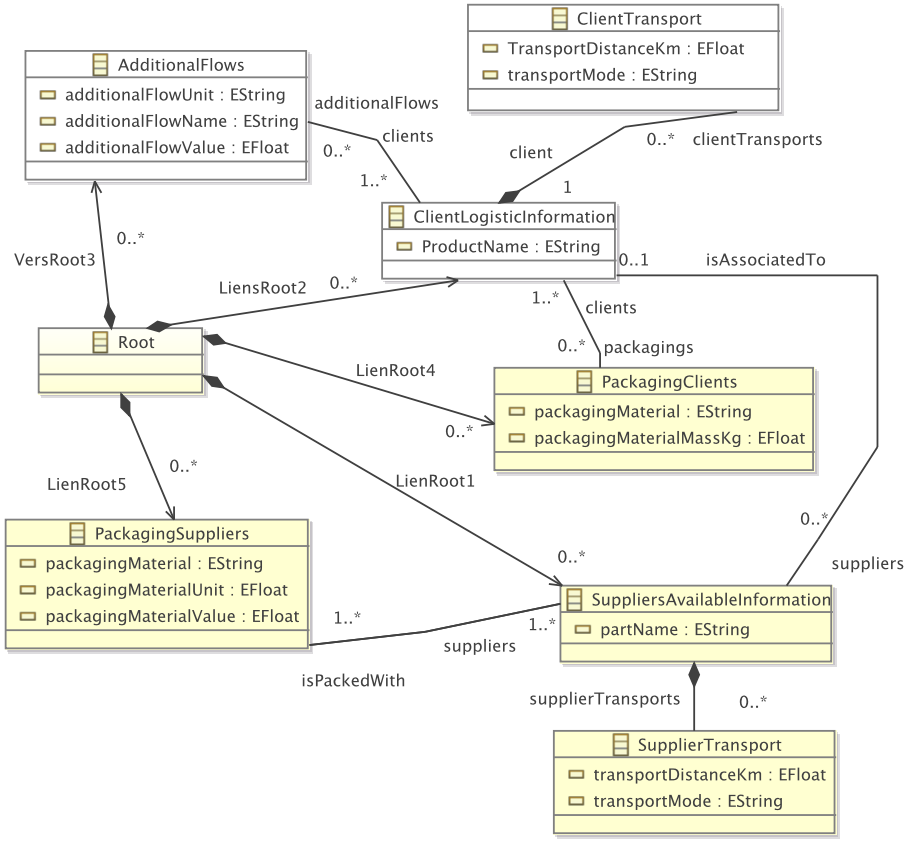


FIGURE A.13 – Exemple de méta-modèle des données de sortie de la logistique

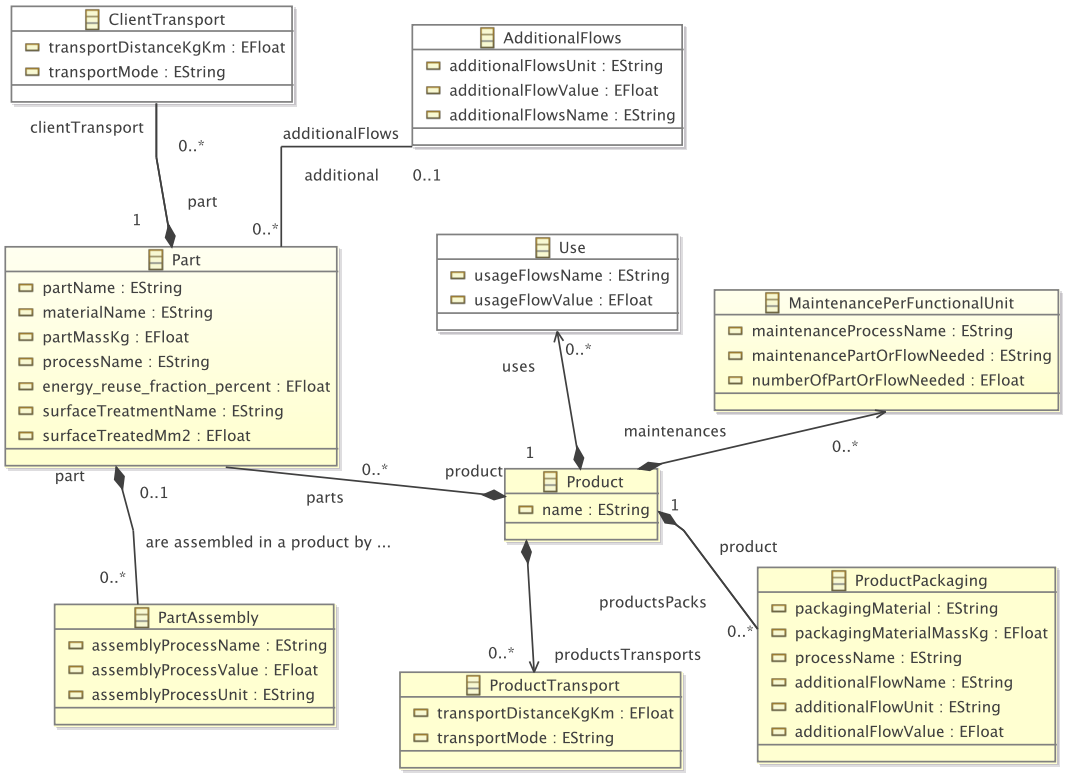


FIGURE A.14 – Exemple de méta-modèle des données d'entrée de l'activité d'analyse environnementale de type Analyse du Cycle de Vie [ISO(2006)]

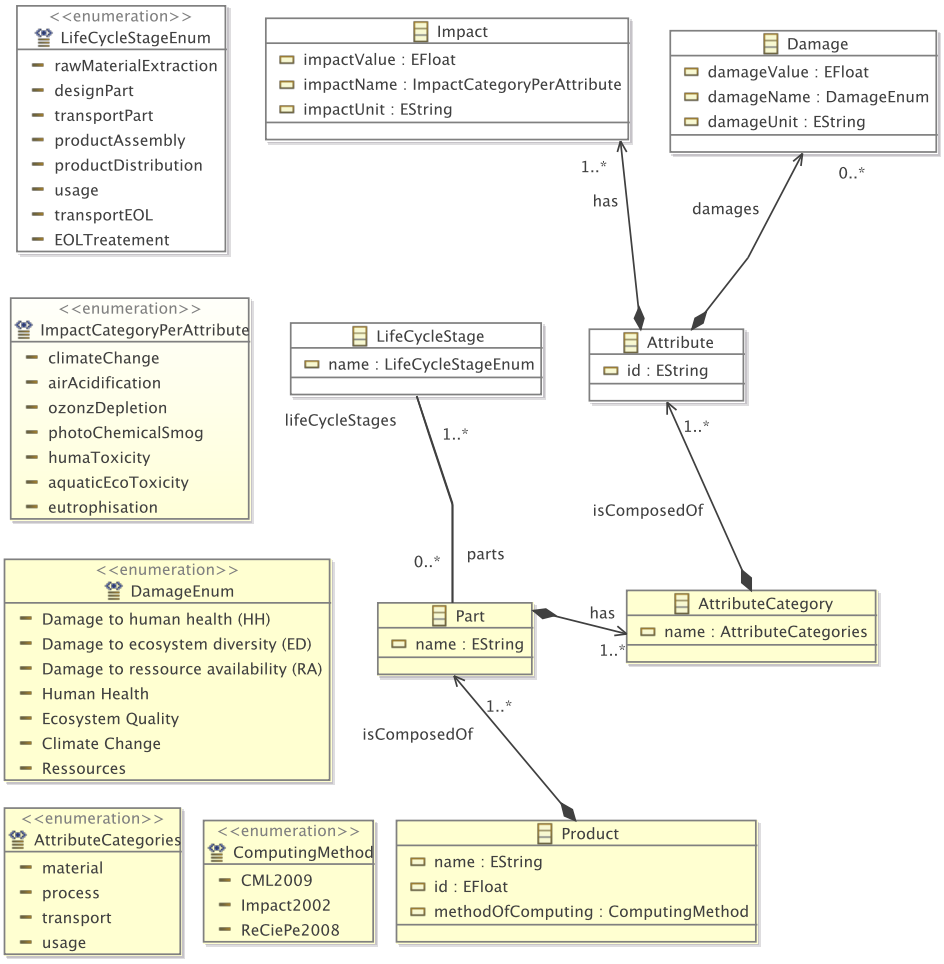


FIGURE A.15 – Exemple de méta-modèle des données de sortie de l'activité d'analyse environnementale de type Analyse du Cycle de Vie [ISO(2006)]

A.11 Annexe : Fluctuation de la valeur extra-financière et financière du capital immatériel de l'entreprise

A tout moment, l'entreprise peut réaliser un bilan financier et extra financier de ces actifs matériels et immatériels. Le tableau de bord, basé sur le Thésaurus Bercy[9], est étudié dans les travaux de Romain Allais dans le module stratégique de *Convergence*.

Comme valeur d'exemple et non exhaustive, dans cette annexe, notre étude se fonde sur le *Thésaurus-Bercy* qui propose un moyen de mesure du patrimoine global d'une entreprise. L'objectif est d'étudier quels facteurs du niveau opérationnel influencés par nos préconisations, pourraient à leur tour faire varier la valeur des actifs immatériels de l'entreprise.

Le Thésaurus-Bercy [Fustec et al.(2011)] se positionne[10] "comme référentiel pratique de mesure du capital immatériel des entreprises". Les auteurs présentent deux façons de mesurer la valeur d'une entreprise à partir des cash flows futurs : soit en faisant une somme actualisée des profits futurs (apparaissant dans le business plan de l'entreprise), soit en analysant la capacité des actifs présents à générer des profits futurs. Constatant qu'il y a une différence de résultat par ces deux méthodes, les auteurs définissent le capital immatériel comme étant "la discipline économique qui vise à étudier la qualité (ou la valeur) de tous les facteurs de production de richesses de l'entreprise". Et les auteurs de rappeler que "les finances ne sont pas la source de la création de richesse mais son résultat, il est donc plus pertinent, pour analyser le potentiel d'une affaire de se focaliser sur les sources de création de richesses" et de pouvoir analyser leur qualités, solidités, etc.

Le capital immatériel peut être utilisé à des fins de management stratégique. Nous étudierons plus en détail l'impact éventuel de nos préconisations au niveau opérationnel, sur les capitaux présentés en gras dans le Tableau A.2.

Le Thésaurus Bercy définit chaque catégorie de capitaux par une arborescence de critères qui le déterminent. Chaque critère est évalué selon une grille d'indicateurs, où chaque niveau atteint par le critère fait l'objet d'une note. **Les paragraphes suivants étudient les apports potentiels de l'utilisation des interfaces dynamiques et**

9. Le Thésaurus est présenté ci-dessous, pour plus d'informations, *cf.* l'observatoire de l'immatériel, site internet : http ://www.observatoire-immateriel.com/, qui propose une méthode d'évaluation du capital immatériel couplée à un outil logiciel permettant de réaliser un diagnostic et une mesure des différents actifs immatériels.

10. Produit le 7 octobre 2011 à la demande du ministère de l'économie, des finances et de l'industrie. Fondé sur de nombreuses références scientifiques, il a deux vocations. Sa première vocation est de proposer un bilan étendu adossé aux normes IFRS-IAS (International Financial Reporting Standard - International Accounting Standard, sur la transparence, lisibilité des comptes). Permettant "de réconcilier : la mesure de la valeur de rendement des entreprises (...), la mesure de la valeur patrimoniale globale (valeur historique de tous les actifs matériels, financiers et immatériels), et la valeur comptable" [Fustec et al.(2011)]. Sa seconde vocation est d'établir une relation robuste entre les actifs du bilan étendu et la génération de cash flows.

TABLE A.2 – Capitaux immatériels définis dans le Thésaurus Bercy [Fustec et al.(2011)]
Note : **en gras** les capitaux pouvant être impactés par nos préconisations

Catégories de capitaux immatériels
Le Capital Client
Le Capital **Humain**
Le Capital **Organisationnel**
Le Capital de **Système d'Information**
Le Capital de **Savoir**
Le Capital de Marque
Le Capital partenaires
Le Capital actionnaire
Le Capital Sociétal
Le Capital **Naturel**

flexibles au niveau opérationnel, en terme de Capitaux Humain, Organisationnel, Système d'Information, Savoir et Naturel.

Le Capital Humain

Fig. A.16, le Capital Humain est divisé en capital dirigeants et capital collaborateurs. Le capital dirigeant varie selon les critères de stratégie, compétence, leadership, responsabilité et stabilité des directeurs et du DG. Le capital collaborateur est évalué selon la compétence, l'engagement, la sérénité ou encore d'encadrement des collaborateurs.

Le tableau Fig. A.17 présente l'évaluation de certains de ces critères par le Thésaurus et les met en correspondance avec les apports des interfaces de transformations de connaissances. Par exemple, sur le critère *Compétence*, le Thésaurus indique la note la plus haute dans le cas où les collaborateurs experts sont clairement identifiés, et la part de la masse salariale en formation est élevée (plus de 6 pourcent). Or, nos travaux de recherche permettent d'une part d'identifier clairement les expertises métier. D'autre part, les tests effectués avec le démonstrateur et les travaux de comparaison des solutions d'interopérabilité (TDC-Catia), montrent que les transformations aux interfaces permettent de capitaliser des connaissances expertes et de mieux les exploiter. La perte subie par la masse salariale en cours de formation est donc compensée par une prise en compte efficace par la suite, des nouvelles compétences acquises. Sur le critère *Fidélité*, la capitalisation des connaissances aux interfaces évite de perdre des compétences essentielles lors d'un remplacement de personnel. Les périodes de transition sont aussi améliorées par les caractéristiques techniques de l'implémentation : son caractère incrémental, sa modularité, pouvant permettre toutes les combinaisons possibles et entre les méta-modèles. Le code peut être généré d'une manière hétérogène (ajout de transformations codées dans un autre langage de programmation par exemple). Enfin, l'*Engagement* des salariés est directement dépendant de leur motivation au travail. Les interviews effectuées sur le cas d'étude industriel de Parkeon, montrent qu'un des apports des interfaces est une baisse de frustration des concepteurs (notamment par une meilleure adéquation entre leur valeur

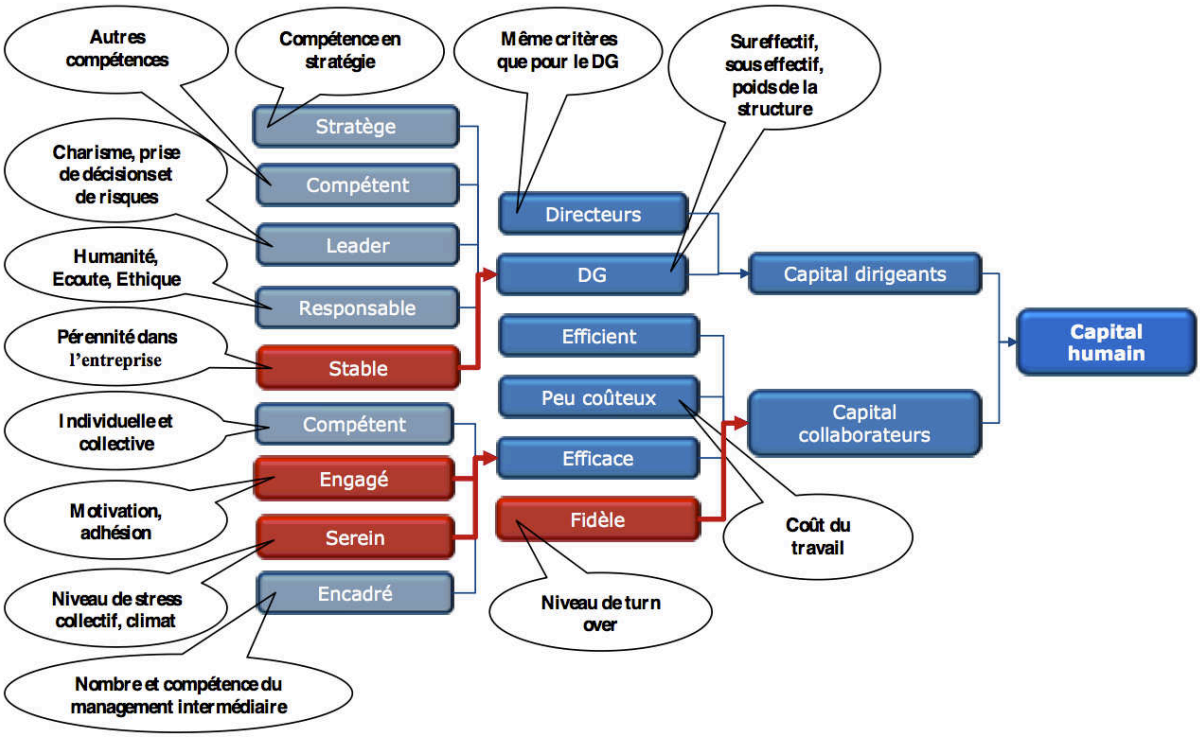


FIGURE A.16 – Arborescence des critères vis-à-vis du Capital Humain
Défini par [Fustec et al.(2011)].

ajouté et le travail qui leur est demandé, par rapport à l'échange de données) et de l'expert environnement (travail valorisé), ainsi qu'une meilleure communication et échanges entre les métiers.

Le Capital Organisationnel

[Fustec et al.(2011)] propose d'apprécier le Capital Organisationnel de l'entreprise en utilisant l'arbre Fig. A.18 pour chaque service : R&D, Production, etc. Les principaux critères influençants sont : la *Structure*, les *Processus*, la *Flexibilité* et les *Projets*.

Comme précédemment, le tableau Fig. A.19 présente l'évaluation de certains de ces critères par le Thésaurus et les met en correspondance avec les apports des préconisations et de la proposition. Les travaux menés dans Convergence (*cf.* Proposal : colonne vertébrale) ont en effet pour objectif d'améliorer la *flexibilité de la stratégie et de sa mise en oeuvre*, grâce aux liens dynamiques avec les deux autres niveaux *Tactiques et Opérationnels*.

Les travaux sur le démonstrateur (Parkeon) montrent que la proposition permet d'améliorer en permanence les modèles de processus, et d'augmenter la *maturité des processus*, en alimentant la bibliothèque de modèles associés aux outils. Par nature même des interfaces, le système d'informations est plus *flexible* vis-à-vis des choix des outils et des échanges d'informations.

Critère	Indicateur correspondant à la note la plus haute	Apports des préconisations, en particulier la fédération des outils	Preuve-tests effectués
Compétence des collaborateurs	- « Pour toutes les fonctions clés de l'entreprise, il y a des collaborateurs experts et des remplaçants experts » - Part de la masse salariale en formation, collaborateurs formés.	- Compétences et expertises clairement identifiées - Capitalisation des connaissances aux interface des outils métiers (dans les cartes de correspondance) - Exploitation des compétences disponibles	- Démonstrateur Parkeon - Cartographie des activités de Quiksilver + préconisations - capitalisation sur le PLM et aux transformations - Ressources optimisées (collaboration)
Engagement	- « baromètre social »: 100% de motivés - Faible turn over, faible absentéisme - Peu de tension sociale	- Meilleure prise en compte de l'expertise de chacun - Moins de frustration - Meilleure communication	Interview, cas d'études industriels : - travail de concepteur valorisé : prise en compte de sa valeur ajoutée réelle - Plus de reconnaissance du travail des techniciennes - Travail valorisé de l'expert environnement
Fidélité	« l'organigramme de remplacement et les périodes de transition marchent à merveille »	- Flexibilité des branchements entre supports - La capitalisation des connaissances experts aux interfaces facilite la transition - La fédération : implémentation incrémentale et modulaire, adapté au turnover des informaticiens	- Démonstrateur (propriétés de la proposition) - Caractéristiques techniques de l'implémentation - Capitalisation dans les cartes de correspondances

FIGURE A.17 – Apport de la thèse sur les indicateurs du Capital Humain Défini par [Fustec et al.(2011)].

Le Capital Système d'Information

Le A.20 selon le même thésaurus est relatif au *coût d'investissement et de fonctionnement*, au *niveau de service* (sécurité, disponibilité, robustesse, ergonomie par la facilité d'usage et le temps de réponse), à la *couverture métier* (de l'utilisateur, la flexibilité ou l'adaptabilité aux évolutions) et aux *limites techniques* (le vieillissement des technologies, les durées de traitements de nuit/jour).

Les tests effectués sur le démonstrateur Parkeon et les travaux scientifiques sur la fédération, montrent que la proposition peut avoir une influence positive sur les indicateurs de performance de ces critères. La tableau Fig. A.21 montre par exemple, que la *flexibilité* du système proposé dans cette thèse (composé d'outils métiers fédérés) permet de s'adapter vite à l'évolution des métiers. Il en résulte (d'après le thésaurus) à une meilleure *réactivité face aux évolutions fonctionnelles*, ce qui augmente le Capital Informatique. Autre exemple, dans ces travaux de thèse, l'utilisateur expert de l'outil informatique, définit avec l'informaticien les données d'entrée, de sortie et les fonctionnalités souhaitées entre son outil et les autres. Ce n'est pas lui qui code. Ces éléments correspondent aux indicateurs relatifs aux *données, fonctionnalités et sorties*, dans la tranche la plus haute pour évaluer le Capital Informatique. De même que le type d'interopérabilité proposé est plus flexible que ceux basés sur les standards (normes standardisées pour échanger des fichiers entre domaines différents), ce qui facilite l'évolution des échanges de données entres outils, et réduit le risque d'une *obsolescence* accélérée du système.

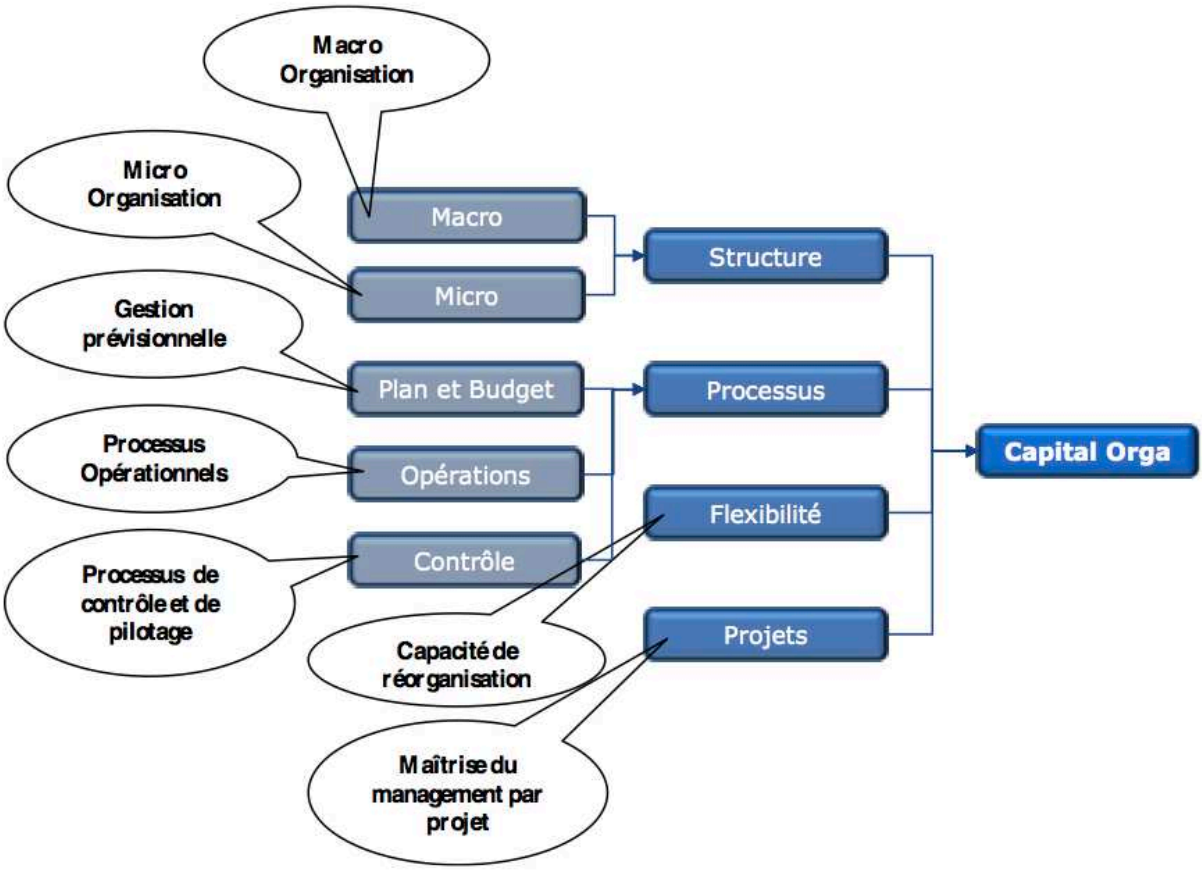


FIGURE A.18 – Arborescence des critères vis-à-vis du Capital Organisationnel
Défini par [Fustec et al.(2011)]

Critère	Indicateur correspondant à la note la plus haute	Apports des transformations de connaissances aux interfaces des activités métiers	Preuve-tests effectués
Plan stratégique	- « Fait l'objet d'amélioration et d'innovation permanente »	- Flexibilité de la structure, permet d'intégrer les innovations - Au niveau de l'outil Convergence : déclinaison des indicateurs du niveau stratégique au niveau tactique (supporté par une feuille de route)	- Démonstrateur Parkeon - Travaux de Convergence entre les niveaux stratégique et tactique
Processus	Degré de maturité du processus élevé : « Suivi de performance et amélioration permanente des meilleures pratiques de la profession »	La proposition est fondée sur l'ingénierie dirigée par les modèles de processus : amélioration permanente des modèles de processus au cours des projets	- Démonstrateur Parkeon - Travaux [Iraqi et al. 2011, 2012] sur les modèles de processus dans EMF
Suivit-contrôle	Au niveau du tableau de bord et du plan annuel: « Le pilotage est rigoureux, un tableau de bord complet et une réunion mensuelle »	Au niveau de Convergence, suivit du tableau de bord permanent (via la feuille de route, support au pilotage dynamique entre les trois niveaux)	- Travaux de Convergence
Flexibilité	« Direction très décentralisée composée de petite unités autonomes, système de reporting et de contrôle léger »	Flexibilité de l'organisation au niveau opérationnel, due à la nature même des interfaces (fédération)	- Démonstrateur Parkeon, propriétés de la proposition
Projet	« Forte culture de la gestion de projet, maîtrise par les chefs de projet de la méthode de l'entreprise, les membres de l'équipe sont vraiment détachés au projet pendant sa durée et ne rapportent plus à leur manager habituel mais au CP. Les dépassements sont exceptionnels »	- Au niveau de convergence : le module tactique permet aux chefs de projet une gestion maîtrisée des ressources nécessaires à l'application de la stratégie - Déploiement efficace du processus de conception favorisé par les préconisations, pour atteindre les objectifs tactiques (env.)	- Démonstrateur Parkeon : pro-activité - Travaux de Convergence : prise en compte la variation des ressources au niveau tactique [Zhang et al. 2012]

FIGURE A.19 – Apport de la thèse sur les indicateurs du Capital Organisationnel Défini par [Fustec et al.(2011)].

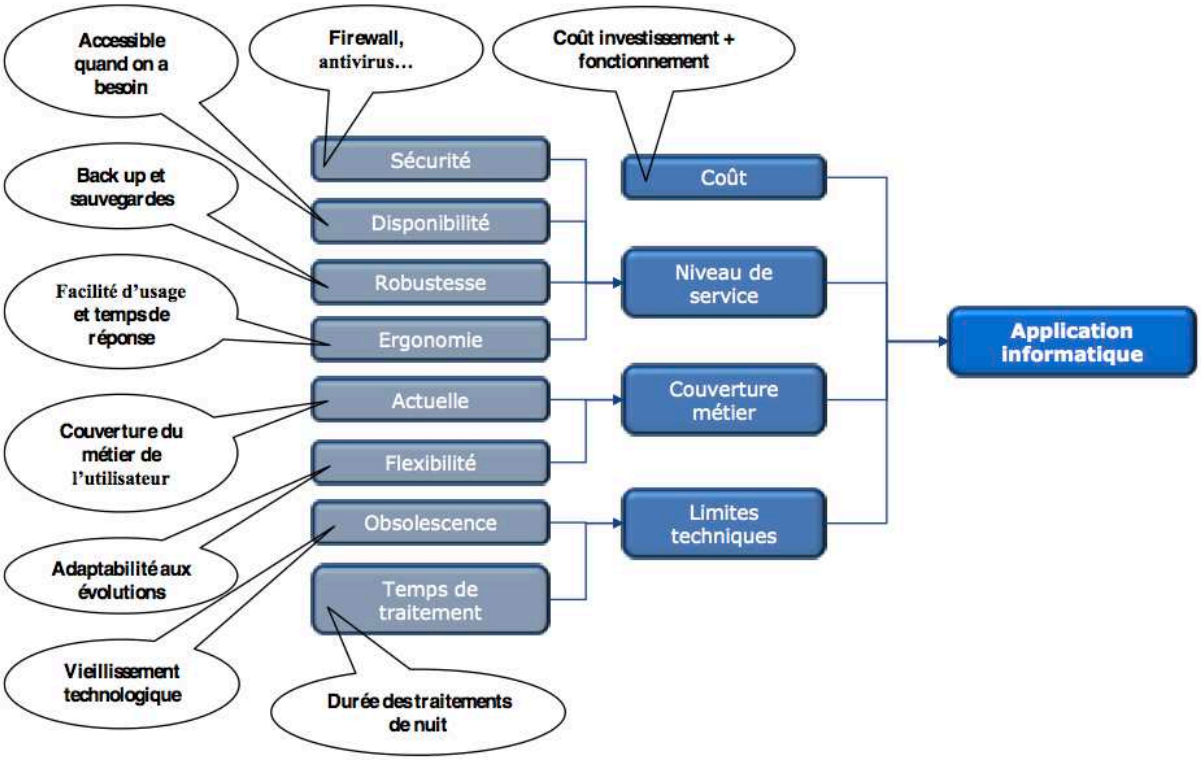


FIGURE A.20 – Arborescence des critères vis-à-vis du Capital Informatique (évaluation d'une application)

Défini par [Fustec et al.(2011)].

Critère	Indicateur correspondant à la note la plus haute	Apports des transformations de connaissances aux interfaces des activités métiers	Preuve-tests effectués
Coût	100 % des solutions alternatives coûteraient plus cher	Baisse des coût d'implémentation à prévoir avec la démocratisation des solutions fédératives sur le long terme	Pas d'équivalent aujourd'hui en terme de propriétés
Taux de disponibilité	99,9 % des heures service/heures travaillées[1]	L'anticipation possible des besoins limite les arrêts involontaires	- Démonstrateur (pro-activité)
Ergonomie	«Interface utilisateur intuitive»	L'outil expert est son outil, dans lequel éventuellement un plugin représente des données au « plus » compréhensible et intuitif	- Démonstrateur (maquettes)
Couverture métier	- **Données**: toutes gérées par l'utilisateur, peut créer de nouvelles table; - **Fonctionnalités souhaitées par l'utilisateur**: existent toutes, peut en rajouter sans programmation - **Sorties:** interface d'export paramétrable et éditions paramétrables	L'utilisateur expert, définit avec l'informaticien les données d'entrée, de sortie et les fonctionnalités souhaitées entre son outil et les autres. Ce n'est pas lui qui code.	- Démonstrateur : modularité, développement incrémental, tourné vers l'utilisateur (type de développement Spiral)
Flexibilité	Réactivité pour une évolution fonctionnelle: « application très flexible, s'adapte très vite à l'évolution du métier »	Flexibilité du système, due à la nature des interfaces basées sur une fédération des outils métiers	- Démonstrateur - Travaux sur la fédération[Iraqi et al. 2011] - Les avantages de l'IDM [Bézivin et al. 2005]
Obsolescence	Hardware, logiciels de base, prologiciel, basés sur des Standards	Interopérabilité plus flexible que celles basées standards, meilleure évolutions	- Démonstrateur et Travaux [Iraqi et al. 2011, 2012]

[1]**Heures service** = **heures ouverture** – nombre d'heures d'arrêts involontaires – nombre d'heures d'arrêts volontaires sur plage d'ouverture
Heures d'ouverture = (heure départ utilisateurs ou heure arrêt service si antérieure) – (heure arrivée employés matin ou démarrage matin si postérieure)

FIGURE A.21 – Apport de la thèse sur les indicateurs du Capital Informatique Défini par [Fustec et al.(2011)].

Le Capital Savoir

Le Thésaurus fait la distinction entre la valeur du savoir qui est exploité et la valeur du savoir en développement au sein du service R&D (à un moment t). La Fig. A.22 présente l'arborescence des critères relatifs au Capital Savoir, d'après [Fustec et al.(2011)]. C'est un Capital qui peut s'évaluer par "segment" : par ligne de produit ou de service. Pour les auteurs, la valeur des *savoirs actuels* est fonction du *potentiel* (intensité de la demande par rapport à la taille du marché accessible, et potentiel d'innovation), et de la *pérennité* (liée au degré d'obsolescence de l'invention, de la maîtrise de l'entreprise de son savoir, du temps requis pour devenir concurrent et de la protection des savoir faire). La valeur des *savoirs futurs* est quant à elle relative à ce qu'ils nomment la *quantité* (importance de la R&D), de *l'alignement stratégique* (la cohérence entre la R&D et la stratégie), et enfin, du *degré d'innovation*.

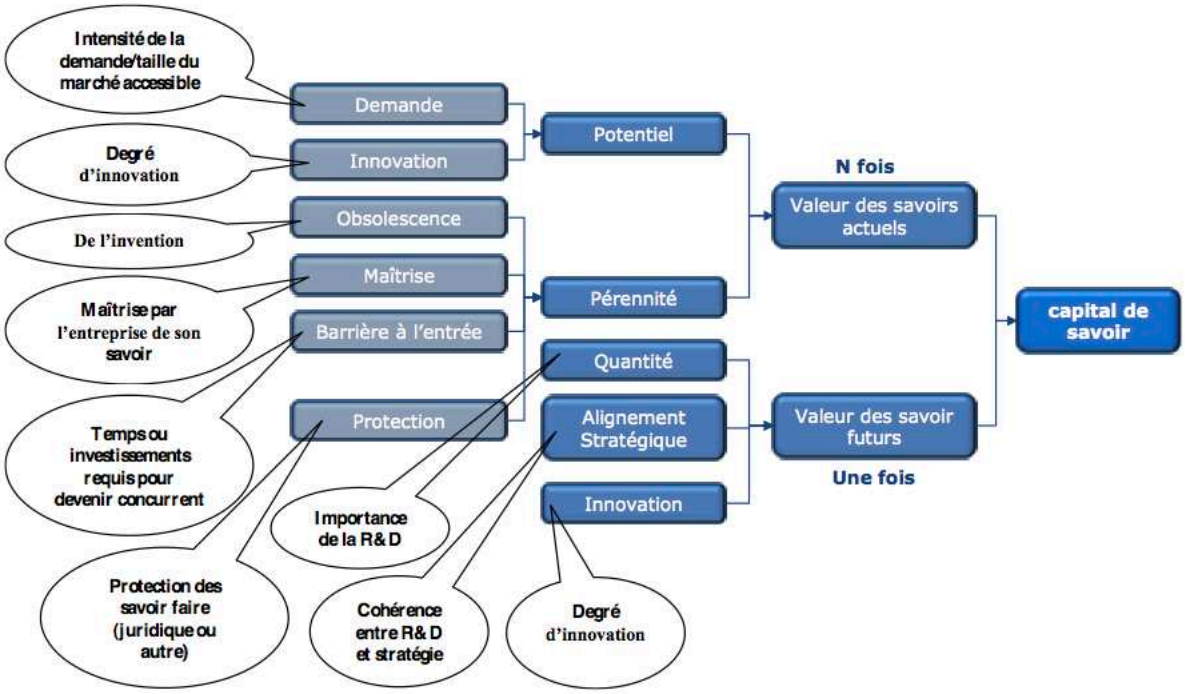


FIGURE A.22 – Arborescence des critères vis-à-vis du Capital Savoir (évaluation par segment)

Défini par [Fustec et al.(2011)].

La proposition de l'outil Convergence a justement pour but d'aligner la cohérence des niveaux stratégiques-tactiques-opérationnels. La feuille de route devrait permettre une meilleure cohérence entre la politique R&D et la stratégie de l'entreprise (ce qui augmenterait le Capital Savoir). De même qu'idéalement utilisée, la proposition de Convergence devrait pouvoir favoriser l'émergence de nouveautés pouvant être à l'origine d'innovations majeures. Enfin, au niveau opérationnel, les préconisations faites dans et entre les activités métier favorisent une gestion maîtrisée des données échangées entre les activités dans le déploiement du processus de conception. Ceci devrait pouvoir aider la détection de documents obsolètes et manquants. Ces apports potentiels sont résumés dans le tableau

Fig. A.23.

Critère	Indicateur correspondant à la note la plus haute	Apports des transformations de connaissances aux interfaces des activités métiers	Preuve-tests effectués
Innovation	- Degré : « Apporte des innovations majeures sur plusieurs fonctions » - Nouveauté ou innovation? « Les projets de R&D sont à très haut potentiels. En outre, la politique d'innovation a fait ses preuves, l'entreprise a déjà par le passé produit de grandes innovations couronnées de succès commercial. Les mécanistes et les personnes l'ayant permis sont toujours actifs »	- La proposition de Convergence, idéalement utilisée dans l'entreprise devrait pouvoir favoriser l'émergence de nouveautés pouvant être à l'origine d'innovations majeures. - La fédération permet de garder la sémantique associée aux données échangées, favorisant la prise en compte simultanée de plusieurs contraintes liées à différents domaines. Ceci peut être un vecteur d'innovation (meilleure vision systémique).	- Besoin de cette cohérence, exprimé par l'expert environnement de Parkeon, manque d'outils permettant cette cohérence [Zhang et al. 2011, 2012] - Démonstrateur : lien sémantique conservé
Maîtrise	- Des produits et services: - Des lignes de fabrication ou moyens de production : « 100 % documentation à jour et 100 % des cours existent »	- Une meilleure gestion des données échangées entre les activités dans le déploiement du processus de conception, devrait pouvoir aider la détection de documents obsolètes et manquants. - Gestion des ressources au niveau tactique, à l'écoute de l'évolution du niveau opérationnel.	- Identification de facteurs influençant les ressources au niveau opérationnel, relayées au niveau tactique
Alignement stratégique	Cohérence entre la politique R&D et la stratégie: « les investissements vont permettre d'assurer la relève des produits vieillissants et de lancer de nombreux nouveaux produits en phase avec la stratégie de l'entreprise »	Au niveau de Convergence la feuille de route est spécifiquement mise en place pour rendre cohérente la politique R&D et la stratégie de l'entreprise.	Travaux de Convergence en cours de développement (2012-2015)

FIGURE A.23 – Apport de la thèse sur les indicateurs du Capital Savoir Défini par [Fustec et al.(2011)].

Le Capital Naturel

Force est de constater que l'évaluation du Capital Naturel par [Fustec et al.(2011)], est tournée vers le bien-être des collaborateurs, dans une approche anthropocentrique du milieu (la nature existe pour servir l'Homme). Ce qui n'est pas tout à fait satisfaisant de notre point de vue. Fig. A.24 présente les critères pris en compte par les auteurs du Thésaurus : le *lieu géographique ou la région* d'implantation de l'entreprise, le *climat*, le risque lié à l'utilisation de *matières premières rares* (ou pouvant subir des pénuries), *l'eau* et *l'air* (pollution et rareté). Leur évaluation manque de critères et d'indicateurs pertinents. Par exemple, ils évaluent le capital naturel en attribuant la note la plus élevée au critère *climat*, si l'entreprise est implantée dans une région ayant un climat attractif (genre ensoleillé, sec,...). Ce n'est pas vraiment sous cet angle que nous voyons l'évaluation du Capital Naturel. Le critère de risque lié aux matières rares est sans doute le plus pertinent, mais la grille d'évaluation de l'indicateur est très peu précise.

On ne se référera donc pas en priorité aux travaux de [Fustec et al.(2011)] pour évaluer le Capital Naturel, mais plutôt aux communautés d'experts en la matière (le SETAC : the Society of Environmental Toxicology and Chemistry [11], ou au *Global Reporting Ini-*

11. organisation à but non lucratif, constituée d'institutions et de professionnels et non professionnels engagés dans l'étude et l'analyse de solutions aux problèmes environnementaux majeurs, dans la gestion

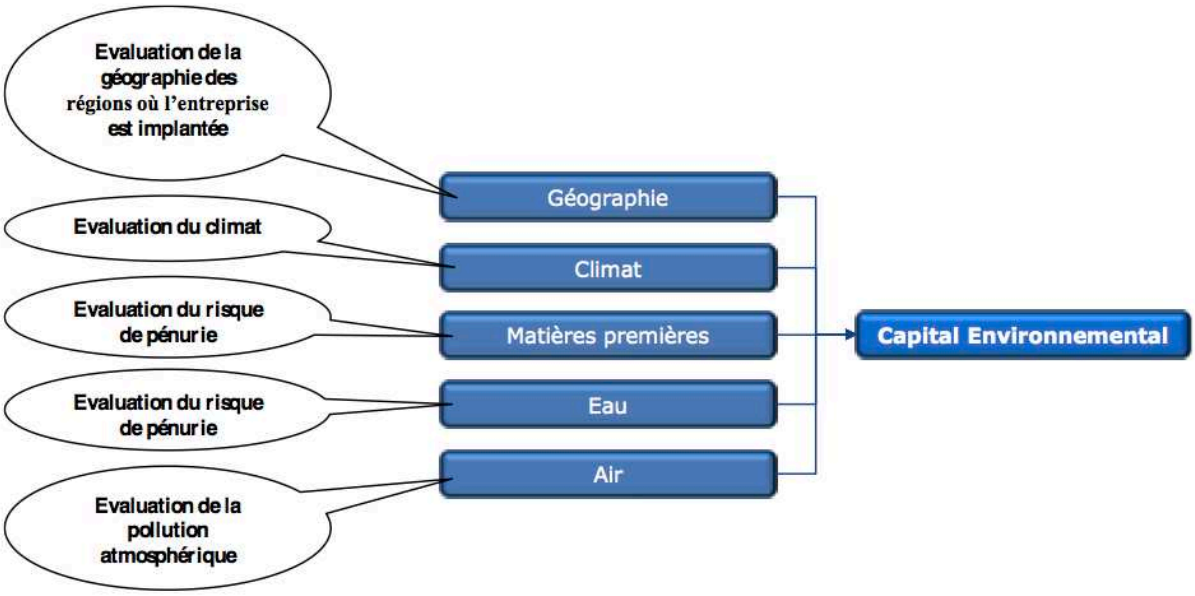


FIGURE A.24 – Arborescence des critères vis-à-vis du Capital naturel.
Défini par [Fustec et al.(2011)].

tiative (GRI) [GRI(2000 2011)] proposant d'une manière détaillée des indicateurs de développement durable, notamment dans le secteur du textile [GRI(2000 2008)].

Evolution des méthode de calculs des capitaux à partir d'indicateurs spécifiques

La définition des méthodes de calcul des indicateurs sur les capitaux immatériels est en cours d'évolution avec les membres de l'observatoire de l'immatériel. Les travaux de thèse de Romain Allais, actuellement en cours, au travers de Convergence, contribuent d'une part à proposer des calculs d'évaluation des capitaux environnementaux et sociaux basé sur d'autres référentiels internationaux que le thésaurus Bercy (par exemple le [GRI(2000 2008)]). D'autre part, ses travaux participent au développement d'un questionnaire portant sur l'intégration des actifs immatériels dans la gouvernance des entreprises, en participant à un groupe international d'experts de l'observatoire de l'immatériel. L'objectif est de déterminer des niveaux de maturité d'intégration des immatériels.

et la régularisation des ressources naturelles, dans l'éducation à l'environnement, et dans la recherche et le développement. La mission du SETAC est de développer des supports aux principes et à l'application de la protection, l'amélioration et la gestion de la qualité environnementale, et de l'intégrité vis-à-vis de la soutenabilité des écosystèmes que nos activités perturbent.