HAL
open science

ECO-CONCEPTION ET CAO PARAMETRIQUE

Raoudha Gaha

To cite this version:

Raoudha Gaha. ECO-CONCEPTION ET CAO PARAMETRIQUE. Génie mécanique [physics.class-ph]. Ecole Nationale d'ingénieurs de Monastir (Tunisie), 2014. Français. NNT : . tel-01822365

HAL Id: tel-01822365

https://theses.hal.science/tel-01822365

Submitted on 25 Jun 2018

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.

Année 2014

MEMOIRE

Présenté à

L'ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE MONASTIR

Pour obtenir le diplôme de

DOCTORAT

Spécialité **« GÉNIE MÉCANIQUE »**

Par

RAOUDHA GAHA ELKAMEL

Mastère en Génie Mécanique (Septembre 2008)

Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir

ECO-CONCEPTION ET CAO PARAMETRIQUE

Soutenu le 20/11/2014 devant le jury :

M. Mnaouar CHOUCHENE Professeur, École Nationale d'Ingénieurs Monastir –LGM-Tunisie	**Président**
M. Lionel ROUCOULES Professeur, Arts et Métiers Paris Tech-LSIS -France	**Rapporteur**
M. Abdelfattah MLIKA Maitre de conférences, École Nationale d'Ingénieurs Sousse – LMS-Tunisie	**Rapporteur**
M. Abdelmajid BENAMARA Professeur, École Nationale d'Ingénieurs Monastir –LGM-Tunisie	**Directeur de Thèse**
M. Bernard YANNOU Professeur, École Centrale Paris-LGI- France	**Co-directeur de Thèse**
M. Nizar AIFAOUI Maitre de conférences, Institut préparatoire aux études d'Ingénieurs Monastir-LGM-Tunisie	**Examinateur**

Laboratoire de Génie Mécanique (LGM)

Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir (ENIM)

Avenue Ibn El Jazzar – Monastir 5019

A mes parents, que dieu leur donne vie et bonne santé, pour le soutien, la patience et le sacrifice suprême dont ils ont fait preuve pendant toutes les longues années de mes études. Acceptez ici l'hommage de mon affection et ma gratitude, qui si grandes soient elles, ne sont jamais à la hauteur de votre dévouement.

A mes beaux parents pour leur présence si précieuse et leurs encouragements,

A mon mari, Mohamed Adnene, qui a supporté mes caprices et mes crises de nerfs, pour sa patience et ses sacrifices infinis

A mes deux petites princesses ***Eya*** *et* ***Yosr****, pour leurs rires qui m'ont apportés le bonheur aux moments difficiles. Mes cadeaux de dieu, je m'excuse de prendre, beaucoup, de votre temps pour l'élaboration de cette thèse.*

A tous mes amis pour m'avoir changé les idées quand j'en avais besoin et particulièrement Maila , Sawsen et Fayrouz.

Je dédie ce mémoire.

Mes pensées vont aussi à tous ceux qui m'ont aidé de proche ou de loin à mener à bien ce travail

Résumé

Pour évaluer et tenter de juguler l'augmentation continue des impacts environnementaux (IEx) des produits industriels tout au long de leur cycle de vie, des solutions d'éco-conception ont été mises en œuvre et ont considérablement évolué durant cette dernière décennie. La prise en compte des IEx dès les premières phases de conception fait l'objet d'un grand nombre des travaux de recherche. Cependant, peu de recherches se sont intéressées à la réduction des IEx lors des dernières phases de conception comme celle de la phase de conception de détail en CAO (conception assistée par ordinateur). Cela est probablement dû à la zone d'action assez réduite du concepteur pour agir et réduire les IEx de son produit. Pourtant, la phase de conception de détails est une phase clé dans la réalisation des écoproduits ; d'une part parce que les choix effectués lors de cette phase sont responsables de la génération de plus de 60% des IEx d'un produit tout au long de son cycle de vie et, d'autre part, parce que cette phase contient une grande quantité d'informations qui permet une quantification précise des IEx. L'objectif de cette thèse est, par conséquent, de développer une nouvelle méthodologie d'éco-conception ayant pour but de réduire les IEx d'un produit lors de la phase de CAO. Une méthodologie générale est présentée, qui est basée sur le processus « ***ELA*** » (Evaluer-Localiser, Agir). Cette méthodologie consiste, d'abord, à évaluer environnementallement une géométrie donnée et, par la suite, à localiser les sources d'impacts et, enfin, à agir sur les zones cibles pour aboutir à une géométrie éco-conçue avec un scénario de vie optimal en termes d'environnement. L'évaluation environnementale d'une géométrie est basée essentiellement sur les informations attribuées aux différents *features* qui la composent. De ce fait, le concept d'*éco-feature* ainsi que le modèle d'évaluation environnementale basée sur ces éco-features ont été développés. Ce modèle permet au concepteur d'évaluer en temps réel les impacts environnementaux de son modèle géométrique avec les différents scénarios de vie possibles tout en lui permettant de localiser les paramètres liés aux éco-features les plus influençant sur l'éco-conception de son produit. Ce modèle forme la première partie du processus « ***ELA*** », puisqu'il est nécessaire d'agir sur les sources d'impacts afin d'aboutir à un modèle géométrique éco-conçu, une fois les sources localisées. Pour cela un modèle déterminant les degrés de liberté orientés éco-conception est développé. Ce modèle forme la deuxième partie du processus « ***ELA*** ». Une Plateforme de validation du processus d'éco-conception basée sur les features est développée sous forme d'une interface homme/machine. Cette plateforme, dénommée ELA Green-CAD, rassemble les modèles développés en un seul logiciel.

Mots clés: Eco-conception, CAO, Evaluation environnementale, Eco-feature, Degrés de liberté, scénario.

Abstract

To assess and attempt to curb the ever-increasing environmental impacts (EIs) of industrial products throughout their life cycle, eco- design solutions have been implemented and have evolved considerably during the last decade. A lot of research works have taken EIs into account in the early design stages. However, few studies have focused on the reduction of EIs in the final stages of design such as the detailed design phase of CAD (Computer Aided Design). This is probably due to the few possibilities of designers to practically act so as to reduce EIs of its product. However, the detailed design phase is a key step in the realization of eco-products. On the one hand, the choices made during this phase are responsible for generating more than 60 % of EIs of a product throughout of its life cycle and, on the other hand, this phase embeds a large amount of information that allows accurate quantifications of EIs. The objective of this thesis is therefore to develop a new eco-design methodology aimed at reducing the EIs of a product during CAD phase. A general methodology is presented, which is based on the «ELA» process (Evaluate - Locate, Act). This methodology consists in, first, environmentally assessing a given geometry and, then, locating impactful sources for finally acting on target areas to result in an eco- designed geometry with an optimal life cycle scenario in terms of ecology. The geometry's environmental evaluation is primarily based on the information linked to different assigned features. Therefore, *eco-feature* concept and the corresponding environmental assessment model based on the *eco-features* have been developed. This model allows the designer to evaluate in real time the environmental impacts of its geometric model with possible life scenarios by allowing him/her to locate the most influence parameters related to *eco-features* on the eco-design of its product. This model forms the first part of the «ELA» process, since it is necessary to act on the sources of impacts in order to achieve an eco-designed geometric model, once sources have been located. To that end, a model determining the degrees of freedom oriented eco-design is developed. This model forms the second part of the «ELA» process. A software platform named ELA Green-CAD has been developed based on these models.

Keywords: eco-design, CAD, environmental assessment, eco-feature, degrees of freedom, scenarios.

Table des matières

Table des matières III
Liste des figures VIII
Liste des tableaux XI
Liste des Abréviations XIII
Remerciements XV
Chapitre 1: Contexte, bibliographie et questions de recherche 8
1.1. Contexte général 8
1.1.1. Eco-conception et définitions 8
Type 10
Evaluation environnementale 10
Amélioration environnementale 10
Evaluation Amélioration 10
1.1.2. L'analyse de cycle de vie (ACV) 10
1.1.3. Les systèmes CAO 12
1.2. Etat de l'art des couplages CAO/ACV 14
1.2.1. Méthodologies et concepts intégrant CAO-ACV 15
1.2.2. Outils prototypes et interfaces intégrant CAO-ACV développés dans les laboratoires 19
1.2.3. Outils commerciaux intégrant CAO-ACV 21
1.2.4. Synthèse bibliographique 23
1.3. Aperçu général sur les features 24
1.3.1. Définitions des features 24
1.3.2. Types de features 25
1.3.3. Représentation des features 25
1.3.4. Techniques de création des features 25
1.4. Eco-concevoir avec les features : Etat de l'art 26
1.4.1. Sélection des matériaux 26
1.4.2. Prise en compte des IEx de la phase du transport 28
1.4.3. Prise en compte des IEx du processus de fabrication 28
1.4.4. Evaluation des IEx des plans de processus et sélection du plus écologique 29

1.4.5. Sélection des paramètres verts d'une gamme de fabrication 31
1.4.6. Conception orientée vers une fin de vie écologique 32
1.5. Orientation de la recherche issue de la revue de littérature 33
1.5.1. Influence des caractéristiques géométriques sur la phase d'extraction des matières premières 34
1.5.2. Influence des caractéristiques géométriques sur la phase de fabrication 34
1.5.3. Influence des caractéristiques géométriques sur la phase d'utilisation 35
1.5.4. Influence des caractéristiques géométriques sur la phase de fin de vie 36
1.5.5. Influence des caractéristiques géométriques sur la phase de transport 36
1.6. Problématique et objectifs de la recherche 40
1.6.1. Problématique 40
1.6.2. Objectifs de la recherche 40
1.6.3. Synthèse 41
1.7. Questions de la recherche 42
1.7.1. Est-il possible d'éco-concevoir lors de la phase de modélisation géométrique et comment ? 42
1.7.2. Est-il possible d'avoir un modèle de features enrichi permettant au concepteur CAO de prendre conscience des impacts environnementaux de ses choix ? 42
1.7.3. Est-il possible d'avoir des résultats parlants permettant au concepteur de réduire les impacts environnementaux de ses choix ? 42
1.7.4. Synthèse 43
1.8. Conclusion 43
Chapitre 2- Proposition d'une méthodologie générale 45
2.1. Méthodologie Générale 45
2.1.1. Généralités 45
2.1.2. Axe 1 : Processus d'éco-conception lors de la conception de détails en CAO 45
2.1.3. Axe 2 : Modèle de *feature* enrichi orienté éco-conception (Evaluer-Localiser) 47
2.1.4. Axe 3 : Modèle de DDLs en CAO orienté éco-conception 49
2.2. Application et validation sur un mitigeur de lavabo 50
2.2.1. Analyse du Cycle de Vie d'un mitigeur et localisation des sources d'impacts 51
2.2.2. Proposition d'une nouvelle conception du mitigeur et analyse ACV comparative de des mitigeurs proposés (Action sur les DDLs cibles) 61
Conclusion 63
Chapitre 3 : Proposition d'une nouvelle démarche d'éco-conception lors de la conception de détails en CAO 65

Introduction 65
3.1. Description de la démarche 65
3.1.1 Modèle général 66
3.1.2 Présentation de « E.L.A.» 66
3.1.3 Détermination des étapes de la démarche 68
3.2. Application et validation sur le corps d'un mitigeur de lavabo 75
3.2.1. Détermination de la zone d'action du concepteur CAO 76
3.2. 2 Identification des problèmes de la conception CAO d'un mitigeur par une construction séquentielle du modèle géométrique 77
3.2.3 Evaluation et localisation des sources d'impacts par une ACV simplifiée 78
3.2.4 Détermination des paramètres influençant l'éco-conception introduits dans les features par une analyse de sensibilité (Les DDLs). 80
3.2.5 Proposition d'une nouvelle conception du mitigeur : Action 81
3.3. Validation de la méthodologie sur un deuxième cas d'étude 83
3.4. Apport de la méthodologie proposée par rapport à Solidworks Sustainability 85
Conclusion 87
Chapitre 4 : Proposition d'une démarche d'évaluation environnementale basée sur les éco-features 88
4.1. Le concept d'éco-feature 88
4.2. La scénarisation à travers les éco-features 90
4.2.1 Recherche des données pour la génération des scénarios et inventaire du cycle de vie . 91
4.2.2 Expérimentation d'un scénario matériau / volume 95
4.2.3 Expérimentation d'un scénario procédé/énergie 97
4.3. Identification des problèmes d'évaluation environnementale par les éco-features 98
4.3.1. Problème de localisation des données 99
4.3.2 Problème d'additivité des résultats 99
4.4. Génération des éco-features 101
4.4.1. Identification des éco-features 102
4.4.2. Modélisation des éco-features 108
4.4.3. Modèle de génération des éco-features 114
4.5. Proposition d'un modèle de processus d'évaluation environnementale basé sur des éco-features 115
4.5.1. Application de la première étape du processus « ELA » : EVALUER 117
4.5.2. Application de la deuxième étape du processus « ELA » : LOCALISER 119

4.6. Application sur le corps du mitigeur de lavabo 119

4.6.1. Localisation des features 119

4.6.2. Génération des éco-features 120

4.6.3. Evaluation environnementale des scénarios portés par l'éco-trou.6 127

4.6.4. Localisation des phases de vie les plus impactantes de l'éco-trou.6 et identification des paramètres responsables des impacts environnementaux 128

4.7. Conclusion 129

Chapitre 5: Proposition d'un processus d'action pour une amélioration environnementale en CAO des éco-features 130

Introduction 130

5.1. Le concept des DDLs orientés éco-conception 130

5.1.1. Identification des DDLs du concepteur CAO 133

5.1.2. Identification des DDLs liés aux sources d'impacts 133

5.1.3. Identification des DDLs présentant une zone d'action possible 134

5.2. Proposition d'un modèle des DDLs en vue de son application dans l'amélioration environnementale des produits 135

5.2.1. Proposition d'un modèle de DDLs orienté éco-conception 135

5.2.2. Processus de Liaison des impacts environnementaux aux DDLs CAO 137

5.2.3. Proposition d'un nouveau processus d'amélioration environnementale basé sur le modèle de DDLs 141

5.3. Application sur le corps du mitigeur de lavabo 142

5.3.1. Détermination de la matrice d'impact de la phase matières premières en fonction des impacts des DDLs 144

5.3.2. Détermination de la matrice d'impact de la phase de production en fonction des impacts des DDLs 145

5.3.3. Détermination de la matrice d'impact de la phase du transport en fonction des impacts des DDLs 147

5.3.4. Détermination de la matrice d'impact de la phase d'usage en fonction des impacts des DDLs 149

5.3.6. Détermination de la matrice globale d'impact et identification du DDL le plus impactant 152

Conclusion 153

Chapitre 6: Plateforme de validation de la méthodologie d'éco-conception basée sur les features et les DDLs (ELA) 154

Introduction 154

6.1. Développement de la méthodologie générale « E.L.A » 154

6.1.1. Etablissement de l'objectif 154
6.1.2. Définition du cycle de vie dans ELA-GreenCAD 155
6.1.3. Exécution des étapes d'ELA 155
6.2. Implémentation de « ELA-GreenCAD 156
6.2.1. Démarrage 156
6.2.2. Extraction des données CAO 157
6.2.3. Extraction des Données PPAO 158
6.2.4. Extraction des données d'un système PLM 159
6.2.5. Classification des données dans un système ACV 164
6.2.6. Exécution de la méthodologie « ELA » 166
6.3. Validation sur le cas du mitigeur 167
6.4. Conclusions et limitations 170
Conclusions et perspectives 172
Liste des publications dans le cadre de la thèse 175
Références bibliographiques 177
Annexe 1 192
Annexe 2 199
Résumé étendu 0

Liste des figures

Figure 1 Structure de la thèse 7
Figure 1. 1 L'éco-conception une démarche multi-critères, multi-étapes (Puaut, 2004) 9
Figure 1. 2 Les étapes du cycle de vie d'un produit (Puaut, 2004) 10
Figure 1. 3 Les étapes d'une ACV (ISO, 2006a) 11
Figure 1. 4 Evolution du nombre des données d'ACV en fonction du temps (Bhander et al., 2003) 12
Figure 1. 5 Architecture de l'EcoDesign Helper (EDH) proposé par Capelli (Capelli, 2006) 17
Figure 1. 6 Concept proposé par Hagström et Ritzén (2004) pour analyser l'impact environnemental durant le processus de développement d'un produit 18
Figure 1. 7 Captures d'écrans de "CAST Tool" (a) et "Eco-fit" (b) deux outils prototypes proposés intégrant CAO et ACV (Morbidoni, 2012 ; Jain, 2009) 21
Figure 1. 8 Captures d'écrans de "Solidworks sustainability" (a) et "Sustainable Minds" (b) deux logiciels integrant CAO et ACV 23
Figure 1. 9 Approche AICV proposé par SETAC (Sridhar, 2007) 27
Figure 1. 10 Capture d'écran de l'outil "CES Selector" de Granta Design 28
Figure 1. 12 Scénarios possible des séquences de désassemblage (Capelli, 2007b) 33
Figure 1. 13 Influence de la géométrie sur l'environnement sur toutes les étapes du cycle de vie (Gaha et al., 2010) 35
Figure 1. 14 Processus de développement d'un produit (Masoudi et al., 2012) 37
Figure 1. 15 Méthodologie proposée pour l'intégration de l'éco-conception dans le processus de conception 38
Figure 1. 18 Positionnement des modèles proposés pour un processus simplifié d'éco-conception 43
Figure 2. 3 Positionnement du 2ème et 3ème axes de recherche dans le premier axe 47
Figure 2. 4 Les étapes du 2ème axe de recherche 48
Figure 2. 5 Identification des paramètres définissant l'Eco-feature 48
Figure 2. 6 Les étapes d'éco-conception d'un feature 50
Figure 2. 7 Mitigeur Carthage de la société AMS (AMS, 2001) 51
Figure 2. 8 Inventaire des intrants sortants de la phase de production du mitigeur 54
Figure 2. 9 Inventaire des intrants sortants de la phase du transport 54
Figure 2. 10 Inventaire des intrants sortants de la phase de production du mitigeur 55
Figure 2. 11 Inventaire des intrants sortants de fin de vie 56
Figure 2. 12 Impacts du mitigeur par phase de vie 59
Figure 2. 13 Impacts par sous-ensemble : Phase de Production 60
Figure 2. 14 Principe de la solution technologique (vue en coupe) 61
Figure 2. 15 Mitigeur proposé 62
Figure 2. 16 Impacts par phase de vie du mitigeur modifié proposé 62
Figure 2. 17 Comparaison des résultats d'ACV entre le mitigeur Carthage et les mitigeurs proposés 1 et 2 63
Figure 2. 18 Les niveaux éco-conçus d'un modèle CAO en fonction du temps .....

Figure 3. 3 Méthodologie d'éco-conception proposée pour la conception de détails 74
La figure 3.4 traduit la méthodologie proposée et représente un modèle d'un nouvel outil d'éco-conception, que l'on nomme « *ELA-GreenCAD* ». Il est composé d'un connecteur qui recueille les données nécessaires pour l'outil d'EE à partir des systèmes CAO, FAO, PPAO, PLM et ACV. Une fois l'évaluation environnementale effectuée, une représentation graphique est affichée pour le concepteur. Le graphique permet de voir, à travers l'interface utilisateur, le scénario optimal de différents scénarios de vie proposés ainsi que les DDLs responsables des IE majeurs..... 74
Figure 3. 4 Modèle d'interface de la méthodologie d'éco-conception proposée 75
Figure 3. 6 Arbre de construction CAO du mitigeur de lavabo..... 77
Figure 3. 7 Les IEx générés par phase de vie du corps du mitigeur 79
Figure 3. 8 Impacts par sous-ensembles 80
Figure 3. 9 Comparaison entre le scénario de vie initial du mitigeur et de deux scénarios basés sur le changement de DDLs..... 81
Figure 3. 10 Corps proposé..... 82
Figure 3. 11 Les IEx générés par les sous-ensembles du nouveau corps du mitigeur 82
Figure 3. 12 Pièce cas d'étude 83
Figure 3. 13 Comparaison des IEx entre les trios scenarios de procédés de fabrication proposés pour la pièce considérée 84
Figure 3. 14 Les IEx du premier scenario (moulage) par sous-ensembles 84
Figure 4. 1 Les composants d'un scénario lié à un feature 91
Figure 4. 2 Les volumes générés par un modèle CAO..... 92
Figure 4. 3 Relation volume conçu / matériau dans la génération de l'impact environnemental lié au matériau 93
Figure 4. 4 Scénario de fabrication d'un volume de matière 94
Figure 4. 5 Inventaire du processus de fabrication d'une pièce pour calculer son impact environnemental..... 95
Figure 4. 6 Comparaison de l'impact environnemental entre une unité de volume d'Al et un volume avec plus 30%..... 96
Figure 4. 7 Comparaison simplifiée d'aluminium et du laiton utilisés en fonderie pour le corps du mitigeur..... 97
Figure 4. 8 Modèle de calcul de l'impact environnemental d'une pièce en CAO..... 100
Figure 4. 9 Algorithme d'extraction des données d'un feature..... 107
Figure 4. 10 Types des modèles de features (feature de forme/de fabrication)..... 109
Figure 4. 11 La modélisation par scénarisation à travers les éco-features 110
Figure 4. 12 Les étapes de génération d'un éco-feature..... 111
Figure 4. 13 Modèle de niveau pour la génération d'un éco-feature 114
Figure 4. 14 Modèle de processus d'évaluation environnementale basé sur les éco-features 116
Figure 4. 15 Les étapes de la première phase d'"ELA" 117
Figure 4. 16 Les étapes de la deuxième phase d'ELA 119
Figure 4. 17 Corps du mitigeur cas d'étude 120
Figure 4. 18 Arbre de construction CAO sur CATIA du corps du mitigeur..... 120

Figure 4. 19 Ensemble des éco-features à utiliser pour l'éco-conception du corps du mitigeur 121
Figure 4. 20 Modèle de l'éco-trou.6 126
Figure 4. 22 Comparaison des Impacts environnementaux des scénarios par l'éco-trou.6 . 127
Figure 4. 21 Combinaison de différents scénarios de vie du trou.6 127
Figure 4. 23 Impacts par phase de vie pour le scénario 1 de l'éco-trou6 128
Figure 5. 1 Figure Les degrés de liberté du processus de conception selon Andreasen et Hein (1987) 131
Figure 5. 2 Modèle Simplifié de la conception consciente de l'environnement selon Bhander et Hauschild (2003) 131
Figure 5. 3 Le paradoxe de l'éco-conception (Bhander et Hauschild, 2003) 132
Figure 5. 4 Emplacement du rôle de DDLs dans un processus d'éco-conception 134
Figure 5. 5 Modèle relationnel entre les paramètres d'un feature et des DDLs 135
Figure 5. 6 Diagramme de relation entre les paramètres d'un feature et son IE total 140
Figure 5. 7 Méthodologie de calcul des impacts de chaque DDL 140
Figure 5. 8 Processus d'amélioration environnementale basé sur les DDLs CAO 141
Figure 6. 1 Fenêtre de démarrage ELA-GreenCAD dans CATIA 157
Figure 6. 2 Onglet des données CAO 158
Figure 6. 3 Onglet « Extraction des données » à partir d'un système PPAO 159
Figure 6. 4 Sous-onglet extraction des données relatives à l'extraction des matières premières à partir d'un système PLM 160
Figure 6. 5 Sous-onglet extraction des données relatives à la phase de fabrication à partir d'un système PLM 161
Figure 6. 6 Sous-onglet extraction des données relatives à la phase d'usage à partir d'un système PLM 162
Figure 6. 7 Sous-onglet extraction des données relatives à la phase du transport à partir d'un système PLM 163
Figure 6. 8 Sous-onglet extraction des données relatives à la phase de fin de vie à partir d'un système PLM 164
Figure 6. 9 Onglet Classification des données nécessaires à une ACV 165
Figure 6. 10 Fenêtre d'exécution d'ELA 166
Figure 6. 11 Onglet données CAO du trou6 167
Figure 6. 12 Onglet données PPAO du trou 6 167
Figure 6. 13 Sous-Onglet données Matières premières dans un système PLM du trou 6 168
Figure 6. 14 Sous-Onglet données Fabrication dans un système PLM du trou 6 168
Figure 6. 15 Sous-Onglet données Usage dans un système PLM du trou 6 168
Figure 6. 16 Sous-Onglet données Transport dans un système PLM du trou 6 168
Figure 6. 17 Sous-Onglet données Fin de vie dans un système PLM du trou 6 169
Figure 6. 18 Onglet données ACV du trou 6 168
Figure 6. 19 Onglet fenêtre d'éxécution ELA du trou 6 168

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Classement d'outils d'éco-conception selon Le Pochat (Le Pochat, 2005).....10
Tableau 1. 2 Comparaison entre l'existant et les objectifs à atteindre.....41
Tableau 3. 1 Relation entre les systèmes d'information et les DDLs.....70
Tableau 3. 2 Comparaison entre « ELA-GreenCAD » et « *SolidWorks Sustainability* ».....86
Tableau 3. 3 Résultats de la comparaison d'ACV générés par « ELA-GreenCAD », SimaPro (GeodKoop et Oele, 2004) et « SolidWorks Sustainability » pour le corps du mitigeur 86
Tableau 4. 1 L'ensemble des features dans le modeleur géométrique « TOP Solid » (TopSolid, 2005) 104
Tableau 4. 2 Relations entre les données portées par un feature avec les phases de son cycle de vie 106
Tableau 4. 3 Différences entre les modèles de processus et de produit 109
Tableau 4. 4 Classification des données d'un feature selon chaque phase de vie 112
Tableau 4. 5 Fiche élémentaire du processus de fonderie.....118
Tableau 4. 6 Effet de l'ajout des différents features du corps du mitigeur sur la variation du volume, de la masse et de la surface 122
Tableau 4. 7 Classification des données du Trou.6 123
Tableau 4. 8 Exemple des scénarios de fabrication possibles pour les features attribués au corps du mitigeur 124
Tableau 4. 9 Données du trou liées aux phases de Matière première, du transport et d'utilisation.....125
Tableau 4. 10 Données du trou liées aux phases de fabrication et de fin de vie 125
Tableau 5. 1 Exemple d'une liste à aspect relationnel entre les DDLs et les données environnementales d'un modèle géométrique.....136
Tableau 5. 2 Résultats des impacts environnementaux de chaque phase en fonction des types d'impacts.....142
Tableau 5. 3 Données d'entrée de la phase de matière première 143
Tableau 5. 4 Données d'entrée de la phase de production.....143
Tableau 5. 5 Données d'entrée de la phase de transport 143
Tableau 5. 6 Données d'entrée de la phase d'utilisation 143
Tableau 5. 7 Données d'entrée de la phase de fin de vie 144
Tableau 5. 8 Liste relationnelle des paramètres de la phase de matière première et les DDLs qui leurs sont liés 144
Tableau 5. 9 Résultats des impacts de la phase de matière première, dus aux paramètres du corps introduits.....145
Tableau 5. 10 Liste relationnelle des paramètres de la phase d'usage et les DDLs qui leurs sont liés 146
Tableau 5. 11 Résultats d'impact de la phase du transport dus aux paramètres du corps introduits 146
Tableau 5. 12 Liste relationnelle des paramètres de la phase d'usage et les DDLs qui leurs sont liés 147

Tableau 5. 13 Résultats d'impact de la phase du transport dus aux paramètres du corps introduits 148
Tableau 5. 14 Liste relationnelle des paramètres de la phase d'usage et les DDLs qui leurs sont liés 149
Tableau 5. 15 Résultats d'impacts de la phase d'usage dus aux paramètres du corps introduits 150
Tableau 5. 16 Liste relationnelle des paramètres fin de vie et les DDLs qui leurs sont liés .. 151

Liste des Abréviations

ACV	Analyse du Cycle de Vie
ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie
ANP	Analytic Network Process
BDD	Base des données
CAO	Conception assistée par ordinateur
CCE	Conception consciente de l'environnement
CDCF	Cahier des charges fonctionnel
CFAO	Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur
DDLs	Degrés De Liberté
DfD	Design for Disassembly
EE	Evaluation Environnementale
ELA	Evaluer, Localiser, Agir
ESQCV	Evaluation Simplifiée et Qualitative du Cycle de vie
F	Fabrication
FAO	Fabrication Assistée par Ordinateur
FV	Fin de Vie
ICV	Inventaire du Cycle de Vie
IHMs	Interfaces Hommes-Machines
IE	Impact Environnemental
IEx	Impacts Environnementaux

MP	Matière Première
NFR	Nombre de Flux de Référence
PAH	Plan Analytique Hiérarchique
PLM	Product Lifecycle Management
GFAO	Gamme de Fabrication Assistée par Ordinateur
RAP	Réseau Analytique des Processus
T	Transport
TF	Technologie des Features
U	Usage
UF	Unité Fonctionnelle

Remerciements

A l'issue de la rédaction de cette recherche, je suis convaincue que la thèse est loin d'être un travail solitaire. En effet, je n'aurais jamais pu réaliser ce travail doctoral sans le soutien d'un grand nombre de personnes dont la générosité, la bonne humeur et l'intérêt manifestés à l'égard de ma recherche m'ont permis de progresser dans cette phase délicate de « *l'apprenti -chercheur*».

En premier lieu, je tiens à remercier mes directeurs de thèse, dont je suis très honorée de travailler sous leur direction, messieurs ; Bernard YANNOU, *Professeur à l'Ecole Centrale de Paris*, et Abdelmajid BENAMARA, *Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir*, pour leur confiance qu'ils m'ont accordée en acceptant d'encadrer ce travail doctoral, pour leurs multiples conseils et pour toutes les heures qu'ils ont consacrées à diriger cette recherche. J'ai été extrêmement sensible à leurs qualités humaines d'écoute et de compréhension tout au long de ce travail doctoral. La justesse des critiques du professeur YANNOU qui ont été très constructives et utiles. Mises à part ses contributions de fond, il a eu la pénible tâche de corriger mon français maladroit ! Je lui exprime ma très profonde gratitude. J'aimerais également lui dire à quel point j'ai apprécié sa grande disponibilité et son respect sans faille des délais serrés de relecture des documents que je lui ai adressés. Enfin je le remercie, pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire de génie Industriel à l'ECP, et de m'offrir l'occasion d'assister aux formations continues en Eco-conception et Eco-innovation ainsi qu'au séminaire annuel du laboratoire.

Je tiens à remercier aussi, les membres du Jury d'avoir accepté de juger mon travail, messieurs ; Lionel Roucoules, *Professeur à « Arts et Métiers Paris-Tech »*, Abdelfattah Mlika, *Maitre Assistant à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sousse*, comme rapporteurs.

Je remercie également les membres du laboratoire LGM qui m'ont aidé à faire cette thèse dans des bonnes conditions et qui n'ont pas cessé de me donner des conseils et des informations utiles. Je pense particulièrement à Saoussen Belgith, Ated, Hind, etc.

Merci de m’avoir aidé et encouragé. Je n’oublie pas de remercier Hana et Amine, pour leurs aides particulières durant la période de ce travail.

Avant de finir, je tiens à remercier tous mes collègues du Centre Sectoriel « Plasturgie Sousse » pour leurs encouragements et leur soutien, Ines, Haifa, Mr Abdelaziz, etc.

Pour finir, je voudrais remercier les gens qu'on oublie souvent mais qui ont énormément contribué pour la communauté scientifique en assurant le développement et la distribution de nombreux outils puissants et gratuits et en mettant leurs travaux de recherche à notre disposition.

Introduction générale

1.1. *Contexte de la recherche*

Aujourd'hui, les activités humaines dégradent l'environnement par le prélèvement des ressources sans souci de leur renouvellement, l'éradication des espèces animales et végétales, la pollution de l'eau, des sols, de l'air et plusieurs autres impacts menacent la survie de la biodiversité terrestre et marine constituant l'ensemble des éléments de l'environnement.

L'évolution constante des réglementations environnementales ainsi que les directives et pénalités environnementales, ont poussé les industriels à réduire les impacts environnementaux, qui s'additionnent d'une étape à une autre du cycle de vie d'un produit ou d'un service, pour garder leurs places sur le marché. L'augmentation des impacts environnementaux causés par l'industrie d'aujourd'hui exigent une nouvelle démarche de conception intégrant des contraintes environnementales.

Une fois que la conception du produit est achevée et qu'il est lancé sur le marché, il y a une marge de manœuvre très limitée et il devient difficile, dans des cas impossible, de réduire les impacts. L'engagement sur la voie du développement durable (Schmidheiny, 1992) conduit les entreprises à adopter une démarche intégrant des paramètres écologiques dès la phase de conception des produits. Cette démarche vise à anticiper les impacts environnementaux dans l'objectif de les éviter ou de les minimiser dès la conception des produits. Aujourd'hui elle se répand dans les pratiques industrielles. Les changements effectués dès la phase de conception, montrent des résultats optimaux au niveau de performances environnementales. Des études ont montré que jusqu'à 80 % des impacts environnementaux d'un produit tout au long de son cycle de vie sont détectés à la phase de conception (De Winter & Kals, 1994), de ce fait une grande importance est accordée à l'intégration des paramètres environnementaux dès cette phase. Différentes appellations traduisent cette démarche « Design for Environnement » en anglais ou éco-conception, conception durable en français ou encore intégration de l'environnement dans la conception de produits.

En outre, au cours de ces dernières années, les politiques publiques, surtout en Europe, ne cessent d'encourager l'éco-conception comme un moyen de

développement durable ayant pour but d'améliorer la qualité écologique des produits sur toutes les phases de leur cycle de vie. De nombreuses réglementations accompagnent cette politique d'encouragement à l'éco-conception. De plus la considération de l'éco-conception est devenue une opportunité d'innovation et non plus seulement vécue comme une contrainte supplémentaire, permettant d'accéder à un meilleur statut commercial dans un marché concurrentiel.

Dans ce contexte, on trouve sur le marché de nombreux logiciels d'analyse environnementale qui facilitent la manipulation des différents types de données présents dans un cycle de vie d'un produit comme la nature du matériau à utiliser, le processus de fabrication adopté, le type de transport entre les différentes phases, ou encore l'énergie consommée à tous les stades, etc.

Ces logiciels sont des interfaces fondées sur des bases de données d'ACV et des méthodes d'évaluation, ils sont surtout développés en Europe. Parmi ces logiciels on peut citer *Team, SimaPro, Gabi, EcoPro, EIME, EMIS, KCL-ECO, UMBERTO, Bilan Produit,…*

L'objectif des analyses environnementales est d'identifier l'emplacement des impacts majeurs engendrés tout au long du cycle de vie, viser autant que possible leur réduction et éviter le transfert de pollution d'une étape à une autre.

Aujourd'hui, une demande importante existe pour l'intégration d'un module environnemental au sein des modeleurs géométriques afin de permettre au concepteur de continuer à éco-concevoir lors de la modélisation géométrique en absence d'expert environnemental.

La conception assistée par ordinateur (CAO), qui assure la phase de la modélisation géométrique dans le processus de conception, est très répandue dans tous les types d'industries. Sans doute, un système CAO présente un grand bénéfice au service des industriels en permettant la définition de détail des pièces et des assemblages en commençant par leur définition géométrique, de matière, de tolérancement, en assurant leurs propriétés cinématique et dynamique. Un modèle CAO assiste les concepteurs lors des étapes avancées de la conception/validation détaillée d'un produit et de ses process. Ces étapes se distinguent par l'intervention

des différents acteurs contribuant à la conception du produit et de ses process : le designer donne les formes globales, l'ergonome apporte des données et validations anthropométriques, le spécialiste en résistance des matériaux cote les pièces, le mouliste donne les contraintes liées à l'injection plastique, l'expert fabrication effectue le tolérancement et la conception des process, le représentant du marketing donne les échelles de coût,… On est appelé à faire appel à un expert environnemental pour évaluer les différents impacts environnementaux générés sur toutes les étapes du cycle de vie de ce produit (extraction des matières premières, fabrication, logistique, utilisation et fin de vie) et proposer une amélioration de la qualité écologique.

A l'heure actuelle, l'objectif des logiciels de CAO a dépassé largement la seule modélisation géométrique. Plusieurs d'entre eux permettent maintenant la modélisation sous contraintes, la simulation de fabrication, la simulation cinématique et dynamique, le calcul de structures, l'imagerie de synthèse, etc. sous la forme de modules intégrés pour faciliter l'intervention du concepteur sans avoir recours à d'autres logiciels spécialisés (Mekhilef et Yannou, 1998).

Notre objectif est de permettre au modélisateur CAO une analyse environnementale simplifiée pour une conception plus écologique avec une compréhension aisée des résultats en utilisant les *features*. L'objectif de notre travail est l'enrichissement sémantique de ces features CAO pour aider le modélisateur CAO à déterminer les impacts environnementaux afin de les éviter ou au moins de les réduire.

La réponse à un tel besoin doit permettre une manipulation simple et compréhensible par les différents acteurs de l'entreprise pour intégrer l'environnement dans leur travail. Les recherches dans ce contexte se sont multipliées depuis une dizaine d'années, vues la nouveauté du thème et la dégradation rapide de l'environnement.

1.2. *Objectifs de la recherche*

L'intégration des contraintes « réduction du prix », « amélioration de la qualité » et « réduction de temps de production » dans le processus de conception ont été les objectifs majeurs des recherches dans les années 1980-2000. Dans cette optique,

différents outils ont été développés dans le but de présenter une aide à la décision pour le concepteur afin de choisir la solution optimale. Aujourd'hui, vue la dégradation de la dimension écologique de l'environnement due notamment à la production industrielle de produits, une nouvelle contrainte s'est rajoutée aux contraintes classiques dans le processus de conception. L'aspect environnemental représente un facteur de succès supplémentaire sur le marché ; En effet, les consommateurs ont montré pendant cette dernière décennie une préférence pour les produits verts.

De ce fait, il est nécessaire de développer des outils permettant d'analyser la qualité environnementale des produits, de détecter les impacts générés sur toutes les étapes de cycle de vie, et notamment dans la phase de conception de formes géométriques et d'assemblages, en exploitant les connaissances du concepteur et les fonctionnalités des modeleurs géométriques afin de permettre un choix de la solution écologique optimale. Il est très important de prendre les mesures nécessaires dès les premières phases de conception d'un produit, vu que 80% de l'impact environnemental des produits industriels sont déterminés dans la phase de conception. D'où, les chercheurs ont commencé à présenter des méthodologies et des outils intégrant la contrainte environnementale (méthodes, techniques et outils) en phase de conception. Une revue de littérature sera présentée sur cet aspect dans le chapitre suivant.

Dans le but d'aider le concepteur CAO à éco-concevoir les modèles géométriques de ses produits, on propose de lui présenter une assistance en temps réel pour ses choix (dès l'attribution des *features*), vu que la phase de modélisation géométrique présente une part notable dans la réduction de impacts environnementaux d'un produit qu'il pourra générer sur toutes les étapes de son cycle de vie malgré qu'elle présente une zone d'action déjà restreinte pour le concepteur environ 20% (Song and Liu 2003).

L'assistance environnementale suggérée consiste à évaluer les impacts environnementaux dans une première étape puis localiser les paramètres sources d'impacts dans une seconde étape.

Les IEx calculés par l'une des méthodes de calcul simplifié, seront liés dans une troisième étape aux différents degrés de liberté (DDLs) du concepteur dans la phase de conception de détail en CAO. Ainsi la visualisation sera fonction de ces DDLs et traduira la zone d'action du concepteur pour réduire les IEx de son produit.

Les objectifs de la recherche peuvent être synthétisés dans la définition d'une nouvelle approche, méthodologie et outil intégrant la contrainte environnementale dans le processus de conception. Cette thèse est un pas en avant dans le développement d'une approche et d'un outil innovant d'éco-conception par l'enrichissement sémantique des *feature*s CAO, que nous baptiserons eco-*feature*s. L'outil finalement développé permet au concepteur d'évaluer des alternatives de conception en temps réel facilement et rapidement dès l'attribution des *feature*s. De cette manière, il est possible de concevoir des produits verts tenant compte des impacts environnementaux susceptibles d'être générés.

1.3. *Aperçu de la thèse*

Le thème de la thèse est la définition d'une méthode d'éco-conception permettant de mettre en œuvre l'approche proposée. Dans ce paragraphe un aperçu de la thèse est donné.

Le premier chapitre, présente une brève description du contexte général, une analyse bibliographique sur l'utilisation des *feature*s dans l'éco-conception des produits. A l'issue de cette analyse des problématiques sont dégagées et des questions de recherche sont posées. Le second chapitre présente la méthodologie générale proposée pour répondre aux questions posées précédemment et définir les trois axes de recherche à développer. Le troisième chapitre présente le premier axe de recherche dans lequel une nouvelle méthodologie d'éco-conception est développée. Cette méthodologie est basée sur la triptyque suivante : Evaluer-Localiser et Agir (ELA). Les deux premières phases de « ELA » correspondent au deuxième axe de recherche qui est développé dans le quatrième chapitre. Ce chapitre commence par une présentation du concept d'Eco-*feature*. Ce concept est basé sur les différents paramètres et données qui peuvent être liés à un *feature* afin de générer les différents scénarios de vie possibles pour pouvoir les évaluer environnementallement et localiser parmi eux les sources d'impacts. Une fois la localisation réalisée, il est nécessaire

d'agir pour éco-concevoir. Pour cela, un modèle de DDLs est développé afin de présenter au concepteur les degrés de liberté qui définissent la zone d'action possible. Ce modèle est développé dans le cinquième chapitre et il présente le troisième axe de recherche d'une part, et la troisième phase du processus « ELA » d'autre part. Le sixième chapitre présente le développement d'une plateforme numérique qui valide nos approches et modèles sur un produit industriel (un mitigeur de lavabo), en utilisant CATIA comme logiciel de CAO/GFAO/FAO, Enovia comme système PLM et Bilan Produit comme logiciel d'ACV. Nous terminons par une conclusion générale de la recherche effectuée ainsi que les différentes perspectives de poursuite de notre travail. La figure 7 décrit la structure du document que nous venons de formuler.

1.4. *Innovation proposée*

Considérant les objectifs de cette recherche et d'après l'état de l'art des méthodes et outils d'éco-conception basés sur les *feature*s, nous pouvons dégager certains aspects innovants de cette thèse :

- Une nouvelle approche d'éco-conception intégrant la contrainte environnement dans le processus de conception au stade de la modélisation CAO.
- Une extension des méthodes existantes dans l'intégration CAO/Evaluation environnementale en générant des scénarios alternatifs de conception.
- Un choix de la solution écologique optimale en temps réel dès l'attribution des *feature*s de CAO.
- Des résultats environnementaux parlants pour le concepteur CAO en fonction des paramètres du domaine de connaissance du concepteur (les DDLs tels que la masse, les dimensions, le matériau, etc.).
- Une nouvelle architecture système est développée pour mettre en œuvre la méthodologie proposée en Visual Basic.
- Un cas d'étude est mis en œuvre avec l'approche proposée et l'outil développé afin de prendre conscience et de chiffrer les avantages et limitations possibles.

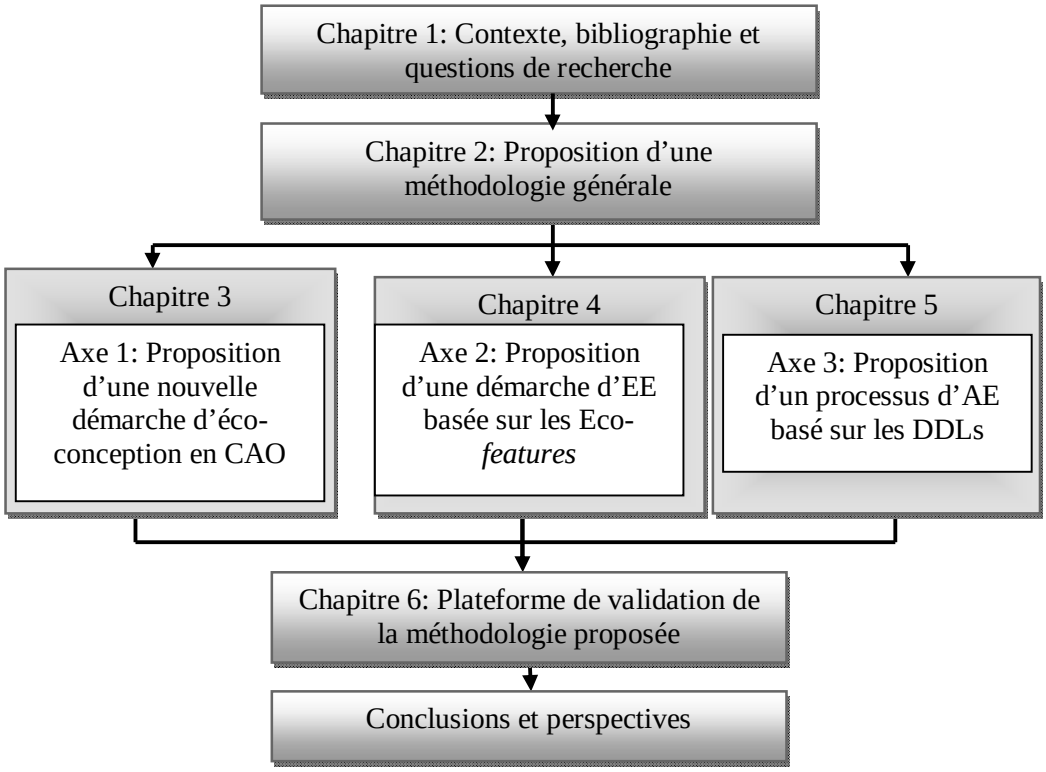


Figure 1 Structure de la thèse

Chapitre 1: Contexte, bibliographie et questions de recherche

1.1. Contexte général

1.1.1. Eco-conception et définitions

Aujourd'hui, préserver la qualité écologique de l'environnement est devenu une préoccupation mondiale. L'intégration de la dimension environnement dans le développement des produits a donné naissance à l'éco-conception qui est une démarche qui tient compte des impacts environnementaux d'un produit générés tout au long de son cycle de vie dès la phase de conception. L'éco-conception présente alors une alternative intéressante pour la maîtrise de la pollution en optimisant le design, le choix des matériaux, la consommation énergétique, les procédés de fabrication, la gestion de la fin de vie, la logistique, etc. Cette démarche est devenue, aussi, un objectif de la majorité des entreprises qui visent à se positionner sur un marché concurrentiel, devant obéir aux différentes législations mises en œuvre au profit de l'environnement, tels que les directives WEEE, RoHS et EuP (Union européenne, 2003a, 2003b, 2005) ou la réglementation REACH (Union européenne, 2006).

La démarche d'éco-conception (en anglais Ecodesign), comme le montre la figure 1.1, se présente, d'une part, comme une approche multicritères prenant en compte tous les impacts environnementaux et d'autre part, elle est aussi une approche multi-étapes qui tient compte de toutes les étapes du cycle de vie (du berceau à la tombe).

Selon Le Pochat (Le Pochat, 2005), le processus d'éco-conception s'articule sur deux phases « pivot » qui sont :

- L'évaluation environnementale,
- l'amélioration environnementale.

Nombreux sont les outils d'éco-conception ; Janin (Janin, 2000) a choisi de les classer en deux catégories principales :

- Les outils d'évaluation environnementale qui peuvent être, quant à eux, divisés en trois sous catégories :

- Les outils quantitatifs, tels que l'analyse de cycle de vie (ACV) et l'analyse coût-bénéfice (ACB), qui sont des analyses, qui nécessitent une grande quantité d'informations, de temps, et d'efforts,
- les outils semi-quantitatifs tels que MET Matrix, MET Boeing processus environnemental.
- les outils qualitatifs tels que des listes de contrôle (Cheklists), des lignes directrices (guidelines), des stratégies, et des diagrammes de réseau sont plus simples et nécessitent moins d'information et du temps.

- Les outils d'amélioration environnementale telles que les normes, les lignes directrices, check-lists, approches Ecolabel, logiciels, etc.

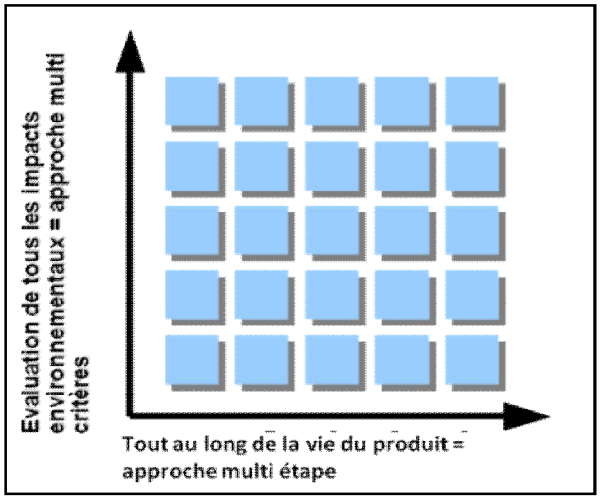


Figure 1. 1 L'éco-conception une démarche multi-critères, multi-étapes (Puaut, 2004)

A ces deux catégories principales Janin, dans son travail de thèse, a présenté d'autres types d'outils pour servir l'éco-conception (Janin, 2000) tels que les outils de stratégie, les outils de sensibilisation et les outils de communication. Le Pochat propose, quant à lui, un classement comportant trois catégories (Le Pochat, 2005) ; en plus de l'évaluation et l'amélioration environnementales il présente une troisième catégorie qui combine les deux premières. Une brève description de ce classement est présentée dans le tableau 1.1.

Malgré la multitude des outils d'éco-conception, l'ACV est l'outil le plus reconnu et complet. Il est utilisé dans une grande quantité d'entreprises industrielles, bien qu'à petites doses. C'est pour ces raisons que nous lui consacrons la section suivante.

Tableau 1. 1 Classement d'outils d'éco-conception selon Le Pochat (Le Pochat, 2005)

Type	Evaluation environnementale	Amélioration environnementale	Evaluation Amélioration
Familles	- ACV - ACV simplifiée - Matrice - Checklist	- Lignes directrices - Manuels - Créativité « E », aides au choix de solution de conception	- Logiciels (ACV) - Eco-indicateurs - Outils paramétriques

1.1.2. L'analyse de cycle de vie (ACV)

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est une méthode permettant d'évaluer les impacts environnementaux potentiels d'un produit, aussi elle présente au concepteur un outil d'aide à la décision. C'est une méthode qui prend en compte toutes les étapes du cycle de vie du produit, présentées dans la figure 1.2 (extraction des matières premières, fabrication, usage transport et fin de vie), tout en évitant les déplacements de pollution d'une étape à une autre. En outre, c'est une approche multicritères qui considère les consommations ainsi que les autres différentes classes d'impacts (dommages écosystèmes, santé humaine, ressources).

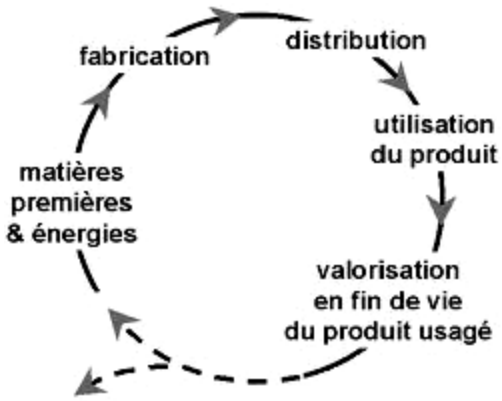


Figure 1. 2 Les étapes du cycle de vie d'un produit (Puaut, 2004)

L'ACV suit une méthodologie itérative composée de quatre phases, comme régi par les normes de la série ISO 14044 et illustré dans la figure 1.3.

- **La définition des objectifs et du champ de l'étude :** à travers cette phase on définit l'objectif de l'étude (sert à préciser la sélection des données nécessaires

à l'étude), l'unité fonctionnelle (une performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence (ISO, 2006)) et les frontières du système d'étude (définissent les processus élémentaires qui sont inclus dans le système à modéliser). Cette première phase fournit le plan initial pour réaliser l'Inventaire du Cycle de Vie (ICV) (ISO, 2006),

- **l'analyse de l'inventaire (AICV) :** C'est la deuxième phase de l'ACV. Au niveau méthodologique, c'est la phase la plus développée puisqu'il y a compilation et quantification des entrants et des sortants pour un système de produit donné au cours de son cycle de vie (ISO 14041),
- **l'évaluation de l'impact :** C'est la troisième étape d'une étude ACV, qui consiste à interpréter les résultats obtenus au cours de l'inventaire. Elle vise à relier les extractions et les émissions de l'inventaire aux dommages. Elle se compose de trois sous étapes : La classification, la caractérisation et l'évaluation globale,
- **l'interprétation :** C'est la dernière étape. Elle consiste à interpréter des résultats obtenus en fonction des objectifs initiaux et sert à identifier les options de réduction des impacts environnementaux du produit analysé. Ce stade est lié avec les trois phases précédentes.

La figure 1.4 établie par Bhander et al. (Bhander et al., 2003) montre que la pratique de l'ACV devient plus aisée en avançant dans le processus du développement d'un produit vue l'augmentation de la quantité de données nécessaire à sa réalisation

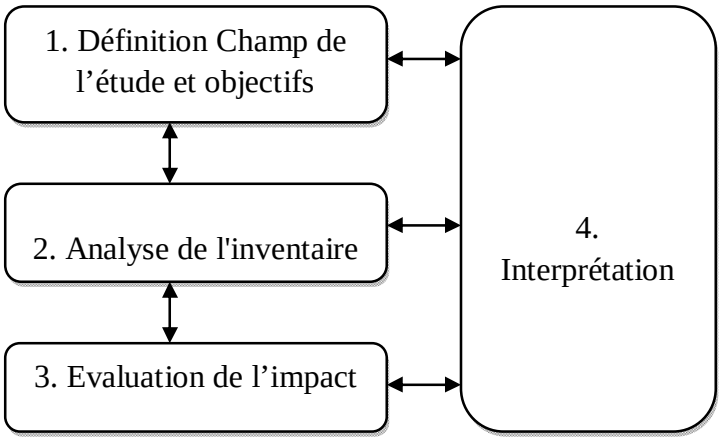


Figure 1. 3 Les étapes d'une ACV (ISO, 2006a)

En effet, la quantité d'information présente lors de la phase de conception de détails est assez importante pour réaliser une ACV, essentiellement lorsqu'il s'agit d'un modèle géométrique CAO, qui contient des données numériques de conception. Notre hypothèse est ici qu'au stade de la définition de détail (géométrie, matériaux, tolérancement) des pièces et des assemblages, il y a suffisamment de données pour commencer à mener des ACVs et donner des résultats d'impacts environnementaux déjà pertinents même en absence de certaines informations process (transports, scénarios détaillés d'utilisation etd e fin de vie…). Les systèmes CAO ont connu une évolution remarquable et offrent maintenant aux concepteurs une manipulation aisée de leurs modèles. La section suivante se focalise sur ces systèmes.

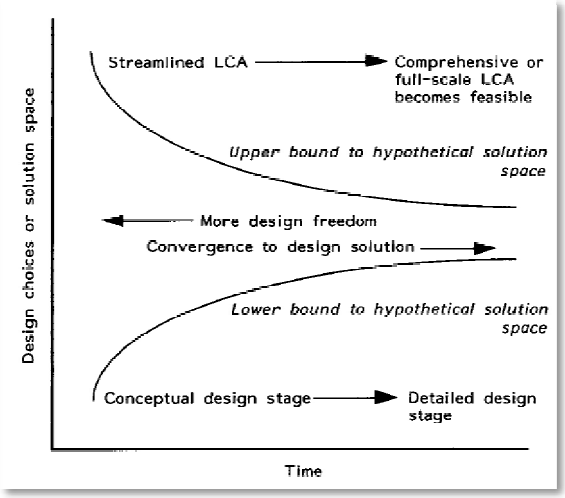


Figure 1. 4 Evolution du nombre des données d'ACV en fonction du temps (Bhander et al., 2003)

1.1.3. Les systèmes CAO

L'utilisation des systèmes CAO dans la phase de conception a énormément aidé le concepteur à réaliser des produits en un temps réduit tout en ayant la possibilité d'effectuer un très grand nombre de modifications sans avoir recours à une re-modélisation complète vue l'existence de la fonctionnalité « paramétrage » qui existe pour relier les différents paramètres géométriques établis. Les modeleurs géométriques, n'ont pas cessé d'évoluer au cours du temps depuis leur première apparition, pour faciliter la tâche du concepteur en présence des produits complexes avec des caractéristiques sophistiquées. Confrontées quotidiennement à une

conjoncture internationale de plus en plus difficile, à l'émergence de nouveaux marchés et à la pression croissante de la compétition, les entreprises soucieuses d'accroître leur productivité demandent des outils CAO améliorés combinant différentes fonctions tels que la fabrication, l'estimation du coût, l'évaluation environnementale, etc.

Les modeleurs CAO actuels permettent de plus en plus une mise à jour automatique du modèle après modification d'une partie ainsi qu'une modélisation des intentions du concepteur. La tendance d'évolution des systèmes CAO est d'intégrer au modèle purement géométrique d'autres informations non géométriques et à des niveaux différents, comme la prise en compte des contraintes d'ingénierie et l'utilisation des *features*.

Plusieurs intégrations, des fonctions ou des outils, ont été développées au sein des outils CAO. Selon ses besoins, le concepteur fait appel à différents spécialistes concernés pour l'obtention d'un produit compétitif sur le marché. Ce produit subit l'intervention des différents métiers comme le designer qui donne les formes globales, l'ergonome qui conforte certaines dimensions à partir de données anthropométriques, le spécialiste en résistance des matériaux dimensionne certaines cotes, le mouliste qui fournit les contraintes liées à l'injection plastique, le représentant marketing qui estime des échelles de coût, etc. Ces intégrations sont réalisées essentiellement sur la base d'un échange des données des modèles CAO en utilisant les standards actuels (par exemple STEP ou IGES). Bianconi et al (2006) distinguent deux domaines principaux d'échange de données : l'échange horizontal et l'échange vertical.

- L'échange horizontal : Il concerne les données des différents systèmes situés au même niveau de développement de produit, par exemple la CAO (comme l'échange entre SolidWorks et CATIA). Dans l'échange horizontal, un des majeurs problèmes porte essentiellement sur les difficultés d'édition du modèle dans le système cible après son transfert.
- l'échange vertical : il s'agit particulièrement d'échanger des données entre des systèmes de niveaux différents de développement de produit, tel que l'échange effectué entre un système CAO et une application de phase ultérieure dans le cycle de vie du produit, comme la fabrication ou les outils de prototypage, *etc.*

Dans l'échange vertical, il est beaucoup moins fréquent que les modèles aient besoin d'être modifiés.

Dans ce travail, nous avons choisi de porter un intérêt spécifique aux modèles à base des features. Ce dernier concerne essentiellement l'échange vertical puisqu'il s'agit de transmettre les données des modèles CAO à base de *features* aux systèmes d'ACV afin de permettre une première évaluation environnementale (on parlera d'évaluation ACV simplifiée). Cette évaluation environnementale rapide a pour but d'améliorer de manière effective les performances environnementales du produit par bouclages rapides sur les formes, dimensions, choix de matériaux, alors que les ACV classiques se faisant tardivement ne permettent plus ces modifications. Dans la section suivante nous présentons un état de l'art sur les différents travaux réalisés intégrant les systèmes CAO et ACV.

1.2. Etat de l'art des couplages CAO/ACV

Afin d'aider les entreprises à concevoir des produits «verts» et durables, il est nécessaire de mettre en œuvre l'intégration entre les outils de CAO et les outils d'éco-conception, qui sont tous deux liés au cycle de vie du produit. Cette intégration numérique permet au processus d'éco-conception d'être pris en charge dès les premières phases de développement du produit. La réduction des impacts environnementaux (IEx) dès les premières phases du processus de conception, a été l'objectif de nombreuses recherches. Cela est dû à la demande croissante des produits verts. La quantité d'information fournie par les systèmes CAO permet une analyse du cycle de vie (ACV) parfois simplifiée, parfois complète. Les différents travaux évoqués par la suite ont essayé de coupler les deux types de logiciel pour aider le concepteur à prendre des décisions. Nous les avons classés en trois catégories ; la première concerne les méthodologies et concepts couplant CAO-ACV, la deuxième rassemble les prototypes d'outils CAO-ACV qui ont été proposés et la troisième comporte les outils intégrés CAO-ACV qui ont développés.

1.2.1. Méthodologies et concepts intégrant CAO-ACV

L'histoire d'intégration des systèmes CAO avec les outils d'éco-conception n'est pas un nouvel axe de recherche. En 1995, Poyner (1995), propose un concept d'outil en éco-conception qui présente au concepteur CAO un ensemble de stratégies en matière d'éco-conception et des aides à la gestion des propositions d'amélioration, y compris un effort pour exporter les informations des logiciels ACV.

Roche, également en 1999 (Roche 99) a développé un assistant CAO intégré qui fournit des conseils sur l'éco-conception.

L'échange de données est une étape importante dans l'intégration. Pour cette raison, l'extraction, le transfert et l'échange de données sont des problématiques adressées dans les recherches de Otto (2001 ; 2003). Otto présente une méthodologie où un transfert de données entre les deux systèmes est effectué. Les données d'ACV requises sont extraites à partir d'un modèle géométrique en fonction des *features*.

Dans l'approche adoptée, un accès efficace aux données ICV nécessaires est réalisé en utilisant un index de recherche afin d'en extraire les *features* utiles à la mise en œuvre d'une ACV. La Technologie des Features (TF) prend en charge la migration de données afin d'identifier les entités d'entrée-sortie lors de la phase de conception (Erenzer et Birkhofer, 2002) et lors de la phase de conception détaillée (Germani et al., 2004).

Capelli en 2006 a proposé une méthodologie ayant pour but le développement d'un outil CAO capable de guider le concepteur vers la conception des produits verts (EDH) (Capelli, 2006). Cette méthodologie tient compte de :

- La réduction des matériaux,
- la réduction de l'énergie,
- la sécurité,
- l'environnement hostile,
- la réutilisation du produit,
- la réduction de nombre des pièces et de leurs dimensions.

Le fonctionnement de la méthodologie est traduit par l'algorithme de la figure 1.5 qui saisit les informations relatives au modèle CAO. Ces données vont servir à calculer l'impact initial. A partir des résultats trouvés, des directives d'amélioration

en fonction des paramètres d'éco-conception choisis sont proposées au concepteur qui pourra essayer de modifier son produit et recalculer son impact final.

pour but d'initier et supporter le développement des interfaces de transfert de données entre la CAO et les outils d'analyses environnementales. Il a été élaboré en effectuant, manuellement, une étude de cas. Cette étude a permis de définir cinq étapes nécessaires au transfert de données entre SolidEdge et SimaPro pour aider le concepteur à créer un produit plus écologique. Ces étapes sont les suivantes:

- Extraire les données nécessaires à l'analyse environnementale d'un fichier CAO et les exporter vers une interface.
- Sélectionner les données nécessaires (extraites des *features* attribués) et calculer les données manquantes par la suite, les adapter au format nécessaire pour les transférer dans un logiciel d'ACV à travers une interface.
- Réaliser une ACV en fonction des données introduites.
- Traduire les résultats obtenus par des graphes à travers une deuxième interface pour visualiser les « points chauds » du produit.
- Optimiser une conception plus écologique par le concepteur.

Les données extraites d'un modèle CAO (à partir des *features*) peuvent être divisées en informations explicites, qui sont liées à la géométrie, et en informations implicites, qui sont liées à la partie processus (Otto, 2001; Ryu, 2003; Marosky, 2007). La réussite est obtenue lorsque l'extraction de données et la migration entre les deux différents types de logiciels sont effectuées ; Marosky (2007) exploite ces résultats et présente un algorithme qui permet le transfert de données mutuel entre un système CAO (SolidEdge) et outil d'ACV (SimaPro). Ce transfert est basé sur l'extraction de données à partir d'un modèle de produit en CAO qui constitué d'assemblages, sous-assemblages, des composants et des *features.* Cet algorithme a pour but d'initier et supporter le développement des interfaces de transfert de données entre la CAO et les outils d'analyses environnementales. Il a été élaboré en effectuant, manuellement, une étude de cas. Cette étude a permis de définir cinq étapes nécessaires au transfert de données entre SolidEdge et SimaPro pour aider le concepteur à créer un produit plus écologique. Ces étapes sont les suivantes:

- Extraire les données nécessaires à l'analyse environnementale d'un fichier CAO et les exporter vers une interface

- Sélectionner les données nécessaires (extraites des *features* attribués)et calculer les données manquantes par la suite les adapter au format nécessaire pour les transférer dans un logiciel d'ACV à travers une interface.
- Réaliser une ACV en fonction des données introduites
- Traduire les résultats obtenus par des graphes à travers une deuxième interface pour visualiser les points chauds du produit
- Optimiser une conception plus écologique par le concepteur

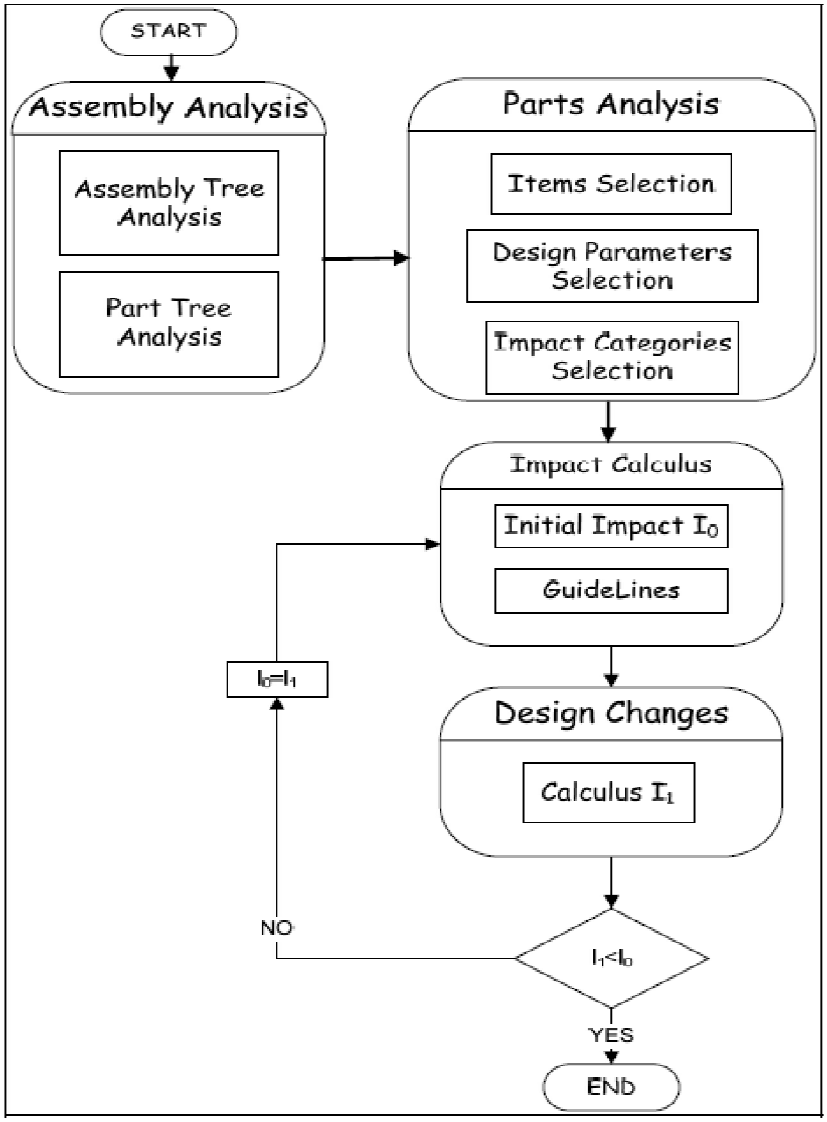


Figure 1. 5 Architecture de l'EcoDesign Helper (EDH) proposé par Capelli (Capelli, 2006)

En 2004, Hagström et Ritzén (2004) ont proposé un concept d'un outil environnemental basé sur les outils CAO, *Product Data Management* (PDM) et ACV. Ce concept vise à réduire le temps de modélisation d'un produit écologique en utilisant des analyses simplifiées et fournissant au concepteur des indications sur la valeur de l'impact environnemental. Le concept de la structure vise à intégrer les fonctions de l'environnement dans le processus de conception. Les systèmes utilisés pour réaliser ce concept sont les systèmes PDM, SmarTeam et SolidWorks. La base de données des matériaux est exportée à partir d'un fichier Excel. Le système PDM est utilisé comme un archive des documents et des informations relatives au produit. L'outil environnemental est intégré au système PDM. La liaison entre les différents systèmes est modélisée par la figure 1.6.

Melk aussi en 2007 a présenté une structure générique basée sur la technologie du système PDM (Melk, 2007). Ce système permet de fournir toutes les informations concernant les coûts, les matériaux, les processus de production et la structure du produit à partir des données CAO. D'où, la structure développée permet de combiner les données sources relatives au produit et les applications du cycle de vie pour aider les concepteurs à créer des produits écologiques.

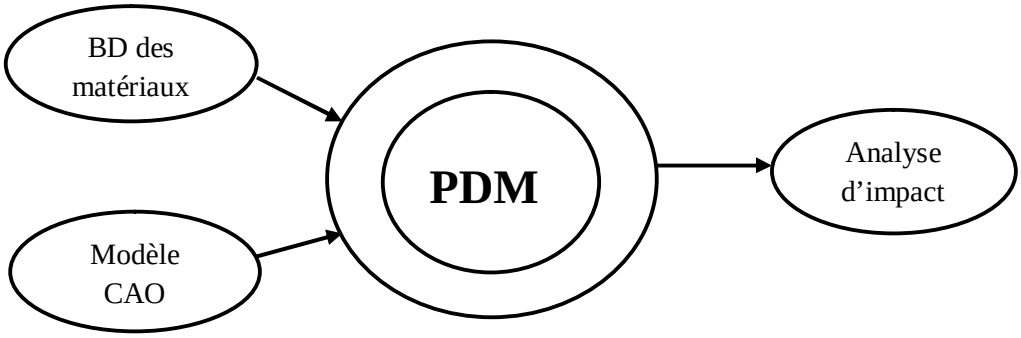


Figure 1. 6 Concept proposé par Hagström et Ritzén (2004) pour analyser l'impact environnemental durant le processus de développement d'un produit

Les données extraites des systèmes CAO représentent un modèle d'ACV, ce modèle nous permet d'approximer l'impact environnemental d'un produit virtuel. Bien qu'un modèle ACV complet n'a pas encore été mis au point, on peut trouver le travail de (Yang et al., 2012) qui présente un nouveau modèle d'évaluation du Cycle de Vie

rapide (ACVR) basé sur les *features*, dans lequel les paramètres de conception d'un produit sont identifiés sur la base de la relation de correspondance entre les «*green features*» et les informations de conception. Les «*green features*» présentent un groupe d'informations de conception verte couvrant l'ensemble du cycle de vie des produits (Xin et al. 2012). Les «*green features*» sont caractérisés par des attributs écologiques qui diffèrent d'un feature à l'autre. Par exemple, un *feature* matériau a des attributs tels que le type de matériau et la quantité de matière; un *feature* de fabrication a des attributs tels que la consommation énergétique le processus de fabrication nécessaire et les émissions.

1.2.2. Outils prototypes et interfaces intégrant CAO-ACV développés dans les laboratoires

Réaliser un outil intégré de CAO-ACV est un objectif des chercheurs pour aider les concepteurs non experts en termes d'environnement à éco-concevoir leurs produits. Dans la littérature, nous avons identifié des prototypes d'outils.

En 1999, Takao et al, ont présenté un système support de conception qui lie la construction d'un produit à sa recyclabilité (Takao et al, 1999). Ce système permet d'extraire les données d'un modèle CAO et de les introduire avec d'autres données introduites manuellement dans une interface. Par la suite, ce système évalue les impacts environnementaux en utilisant une évaluation complète basée sur des indices propres à l'Europe. Ces indices sont les différents types d'impact générés comme l'impact de chaque matériau, la détérioration de la couche d'ozone, l'acidification de l'air et de l'eau, etc.

Ce prototype a visé essentiellement la réduction des déchets d'un produit dans la dernière phase de son cycle de vie ainsi qu'une réduction du temps de désassemblage. Mais, l'impact ne provient pas toujours de la nature du matériau utilisé. Il est nécessaire de prendre en compte toutes les étapes tout en communiquant au fur et à mesure les résultats obtenus avec l'amélioration des caractéristiques environnementales du produit.

Cependant cette amélioration est confrontée au problème de synchronisation entre les concepteurs et les experts environnementaux. Pahng et al, en 2000 ont proposé une

méthode basée sur les modèles d'ACV paramétrés (Pahng et al, 2000). Ces modèles sont inspirés des produits existants et ils pourront fournir au concepteur une analyse environnementale en temps réel. Le système prototype développé dans le MIT CADLab, appelé DOME, permet la collaboration entre le concepteur et l'expert environnemental à travers une interface qui traduit les données du modèle CAO en données d'entrées pour les modèles ACV paramétrés introduits.

Mathieux et al. en 2007 ont développé le «Démonstrateur» (Mathieux et al., 2007). Cet outil prototype lie CATIA (un logiciel de CAO) et EIME (un logiciel d'ACV). CATIA est connecté à un système *Product Life Management* (PLM) qui extrait toutes les données fournies par les différents *features* utilisés. Le système mis en place sélectionne ensuite les données ACV nécessaires et les transfère à EIME pour calculer et afficher l'impact environnemental. Le démonstrateur permet d'exporter efficacement les caractéristiques du produit de CATIA vers EIME, et de réduire le temps du transfert automatique par rapport à un transfert manuel des données.

Il y a aussi "EcoCAD" présenté par Capelli et al. (2007a) qui est basé sur l'analyse de l'arbre de structure d'un projet CAO composé d'assemblages, de sous-assemblages, de pièces et de *features*.

En 2008, une macro sur Microsoft Excel a été développée par Abad et al. (2008). Cette macro permet d'extraire les données du modèle CAO développé sur SolidWorks et les résultats ACV fournis par SimaPro. Une ontologie par la suite à été développée pour communiquer les différents types de données relatives à chaque composant et pour guider le concepteur vers une conception plus écologique.

Jain (2009), en se basant sur les systèmes *PLM*, présente un plugin (*Eco-fit*) conçu pour *3DS-MAX* en utilisant la méthode de calcul des impacts environnementaux Eco-indicateur99 (EI99) ; c'est une méthodologie d'éco-analyse et une base de données destinée à évaluer les modèles CAO des produits. Une capture d'écran de cet outil apparait dans la figure 1.7.

Morbidoni, en 2012, propose un outil prototype appelé « CAST Tool » (Computer aided sustainable tool) (Morbidoni, 2012). « CAST Tool » est un outil prototype avec une base de données en accès libre, permettant d'analyser les produits indépendamment des systèmes CAO ou ACV utilisés. Ce travail est comparé essentiellement au module « SolidWorks Sustainability » du modeleur géométrique

Solidworks2010 (Solidworks, 2010). Une capture d'écran de cet outil apparait dans la figure 1.7.

Les avantages de « CAST Tool » sont essentiellement dûs à la sélection de plus d'un processus de production , à l'introduction de scénarios de cycle de vie et à l'extraction de données géométriques et non géométriques nécessaires à partir de l'arbre de structure CAO et des bases de données PLM . « CAST Tool » surmonte de nombreuses faiblesses de certains autres outils intégrés CAO/ACV, tel que le scénario unique. En effet il permet l'évaluation des différents scénarios de cycle de vie possibles. Cependant, l'évaluation est post-modélisation c'est-à-dire qu'elle est pratiquée sur une pièce finie où les modifications sont difficiles à remettre en œuvre, surtout quand il s'agit d'une pièce complexe. C'est ce qui explique la nécessité d'un outil d'évaluation en temps réel. Un outil fonctionnel intégré CAO-ACV est également nécessaire.

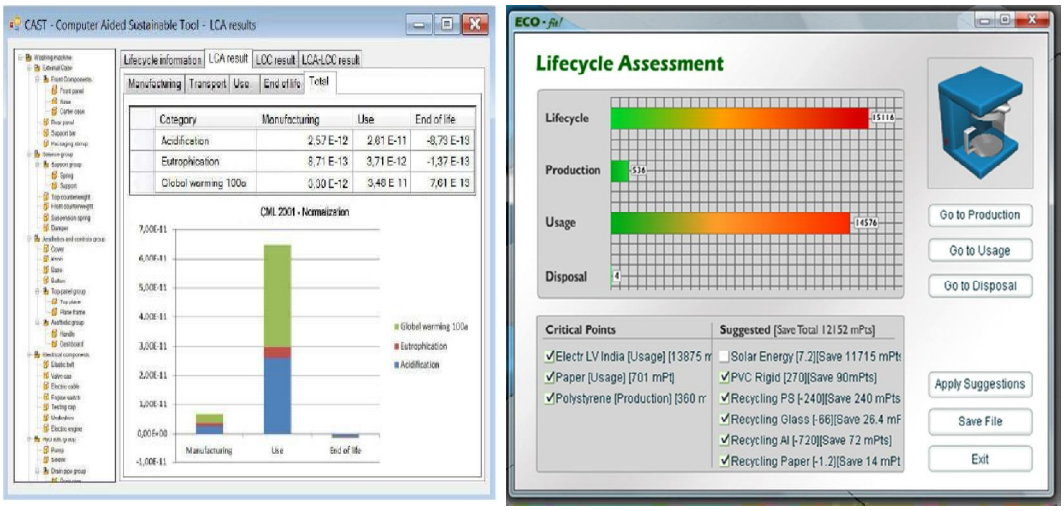


Figure 1. 7 Captures d'écrans de "CAST Tool" (a) et "Eco-fit" (b) deux outils prototypes proposés intégrant CAO et ACV (Morbidoni, 2012 ; Jain, 2009)

1.2.3. Outils commerciaux intégrant CAO-ACV

Les outils intégrés CAO-ACV fonctionnels développés sont essentiellement basés sur l'échange de données entre deux systèmes différents (CAO et ACV). Les données de sortie provenant du système CAO représentent les données d'entrée pour le système ACV. Ces données sont essentiellement les informations fournies à partir de différents types de *features* attribués par le concepteur. « EcologiCAD » est un outil

intégré CAO-ACV, développé par Leibrecht (Leibrecht, 2005), qui vise à l'évaluation environnementale des modèles CAO des produits. Il est basé sur un concept client-serveur, où le modèle d'informations représente le serveur. Le modèle de l'information fournit également des fonctionnalités à d'autres applications via une application d'interface programmable (API).

On trouve aussi « SolidWorks Sustainability 2010 » (Solidworks, 2010), qui présente un plug-in développé par Dassault Systèmes, permettant l'évaluation environnementale en temps réel d'un modèle CAO dès qu'un *feature* est attribué. Il évalue les impacts environnementaux associés aux choix de matériaux et de fabrication choisis par le concepteur. Les concepteurs peuvent effectuer des analyses d'ACV sur les pièces ou les assemblages directement dans la fenêtre de conception *SolidWorks* (logiciel de CAO), ils peuvent aussi rechercher des matériaux comparables et de voir en temps réel l'impact environnemental de chaque pièce. *SolidWorks Sustainability* est le premier outil intégré CAO/ACV, mais la qualité des résultats obtenus avec cette approche simplifiée est très pauvre. De plus, pour estimer l'empreinte écologique d'un autre produit avec les mêmes exigences de conception, il est nécessaire de fournir un nouveau modèle CAO.

Sustainable Minds® est un autre outil d'ACV intégré avec le système CAO *Autodesk Inventor* offre une interface graphique (Graphical User Interface). Son avantage par rapport à un autre logiciel est d'avoir la capacité de comparer différentes conceptions d'un produit. Il peut être utilisé à toutes les étapes de conception préliminaire, sur la base des informations extraites à partir des *features*. Les sorties sont en équivalent émissions CO2 pour l'évaluation d'impact (Sustainable Minds, 2012). Dans la figure 1.8, nous présentons les captures d'écran de « SolidWorks Sustainability » et « Sustainable Minds ».

Dans cette catégorie, nous trouvons également Eco Materials Advisor, l'outil développé par Granta design entièrement intégré dans le logiciel CAO Autodesk Inventor. Il a accès à la base de données Granta de matières et de processus qui contient plus de 3000 matériaux. L'avantage de ce logiciel, contrairement à de nombreux autres outils d'ACV, est qu'il permet d'analyser des assemblages complexes (Granta Design Ltd, 2012).

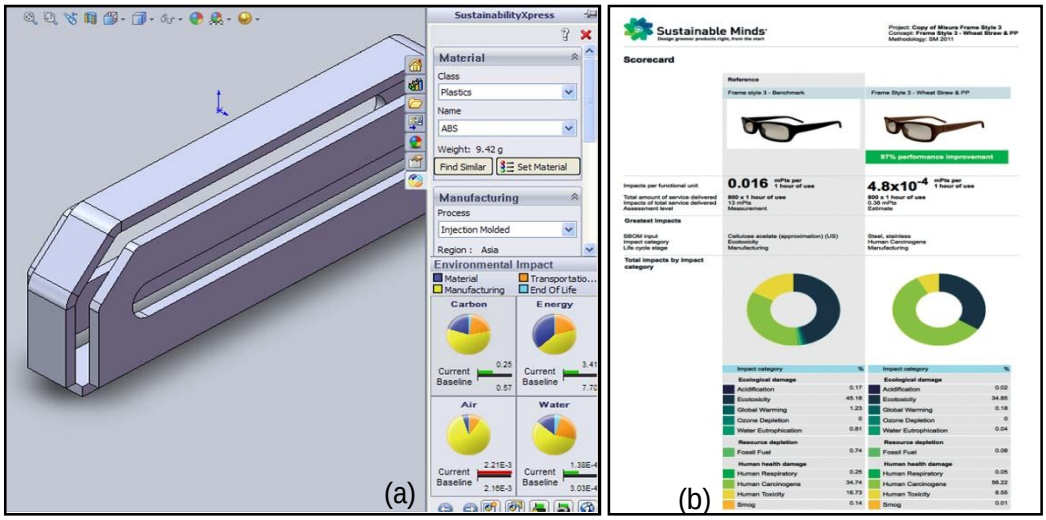


Figure 1. 8 Captures d'écrans de "Solidworks sustainability" (a) et "Sustainable Minds" (b) deux logiciels integrant CAO et ACV

Enfin, on trouve *ECOdesigner* qui est un outil intégré avec le logiciel de CAO *SolidEdge*. Il fournit une analyse rapide, soit au début du processus de conception ou lors des itérations de re-conception. La version standard peut accéder à certaines bases de données communes telles que Swiss EcoInvent v.2. Toutefois, la version entreprise permet d'accéder aux bases de données SimaPro (CAMLOGIC, 2012). La base de données de matériaux est la bibliothèque matériaux de *SolidEdge*, développée par Siemens (Trayak LLC., 2012).

1.2.4. Synthèse bibliographique

L'absence d'un format commun entre les systèmes CAO et ACV, la collection, la migration et l'échange de données sont des problématiques qui ont été résolues grâce à la Technologie des *features* (TF). En effet, on a trouvé, dans les méthodologies ou les outils prototypes ou les outils développés intégrant CAO et ACV, que les *features* CAO présentent la source des données d'entrée pour les différents modèles ACV établis. Dans la section suivante, nous présentons un aperçu général sur les *features* et dans celle qui suit nous poussons la recherche sur l'utilisation des *features* au profit de l'environnement.

1.3. Aperçu général sur les features

Les *features* ont été introduites dans les systèmes de CAO les plus courants. Shah et Mantyla (1995) ont montré les besoins actuels et les avantages des *features* par rapport aux modèles géométriques. Ils configurent certaines fonctions comme des objets qui représentent l'intention du concepteur, cette intention est maintenue pendant les différentes phases de développement du produit. Selon Bidarra et Bronsvoort (2000), les *features*, permettent de combiner des informations fonctionnelles et techniques de la forme dans un modèle de produit par rapport à la modélisation géométrique classique. Pour Ghodous, cette TF facilite l'intégration entre les différentes phases du développement d'un produit telles que la conception et la fabrication (Ghodous, 1996). En effet, Mantyla et al. montrent que les *features* sont généralement destinés à former une base de liaison entre la CAO et les applications de fabrication en aval, et à organiser des bases de données pour les données de conception (Mantyla et al., 1996). Dans l'approche des *features,* les objets géométriques sont formés par un assemblage d'éléments simples, comme un chanfrein dans une pièce mécanique. La forme géométrique finale de la pièce résulte de l'application d'une séquence de *features* configurée et intégrée dans le modèle 3D qui décrit une pièce selon Bonvoisin et Thiede (2012). Ce modèle est utilisé pour la réalisation d'un egamme de fabrication qui est définie par un ensemble d'opérations. Une opération est une unité d'une ou plusieurs caractéristiques de traitement par une machine. Un *feature* peut être réalisé par une ou plusieurs opérations (Bonvoisin et Thiede, 2012).

1.3.1. Définitions des features

Différentes définitions ont été proposées pour les features. Pour Wilson et Pratt, les *features* présentent un domaine d'intérêt dans un modèle de produit (Wilson et Pratt, 1988). Dans l'étude de Smith et Dagli (1995), les *features* sont définies comme étant des primitives de conception de haut niveau avec leurs attributs , leurs qualificatifs et les restrictions qui affectent la fonctionnalité et / ou la capacité du produit à fabriquer, c'est-à-dire qu'ils peuvent décrire la forme (taille et les dimensions), la précision (tolérances et finition), ou d'un matériau (type, propriétés et le traitement) et varient

selon le processus de fabrication du produit (Smith et Dagli, 1995). Dans le domaine de la conception, selon Shah et Mathew (1991), les *features* sont des éléments utilisés dans la production, l'analyse et l'évaluation d'un modèle de produit. Dans le secteur manufacturier, Salomons (2000) définit un *feature* en tant que données de produits, liés à des spécifications fonctionnelles, des procédés de fabrication ou les propriétés physiques de conception. Dans la conception et la fabrication, Pratt et Bedford (1991) considèrent les *features* de forme comme des éléments conformes aux règles qui permettent leur reconnaissance et leur classification.

1.3.2. Types de features

Différents types de *features* ont été élaborés : *features* de forme, *features* de contraintes, *features* de précision (ou la tolérance), *features* d'assemblage, *features* fonctionnelles (ensembles de *features* liées aux fonctions spécifiques qui peuvent inclure des informations sur les intentions du concepteur, les paramètres non géométriques liés à la fonction ou à la performance, etc), *features* liées aux matériaux et *features* de primitives de forme.

1.3.3. Représentation des features

La plupart des recherches sur la représentation géométrique des *features* de forme sont orientées vers la représentation volumique (3D) en combinaison avec une représentation surfacique. Par exemple, nous pouvons citer la représentation basée sur B-REP (Représentation de la frontière, le CSG (Constructive Solid Geometry), ainsi que la représentation hybride comme indiqué dans le travail de Wang et Ozsoy (1991).

1.3.4. Techniques de création des features

Plusieurs techniques ont été développées pour la création de modèles basés sur les *features*. Ces techniques sont divisées en deux approches principales selon le travail de Shah et Mantyla (1995):

- Reconnaissance des *features* : Les *features* sont comptabilisés à partir d'un modèle géométrique appliquant des règles de reconnaissance. Plusieurs

modèles de *features* possibles pour décrire un même produit peuvent donc être déduites.

- Les *features* de conception : un modèle de produit est élaboré à partir des *features* prédéfinies. Dans ce cas, la géométrie explicite d'un produit est directement créée à partir du modèle de *features*.

Afin d'obtenir un modèle basé sur les *features*, la reconnaissance des *features* et la conception basée sur les *features* sont les deux principales approches utilisées. Pour évaluer environnementallement une pièce, les données non géométriques doivent être attachées à l'objet conçu. Toutefois, l'approche de reconnaissance entraîne la perte de toutes les données non géométriques qui auraient été fournies par une approche directe de conception basée sur les *features*. Par conséquent, l'intérêt est plus grand d'adopter une modélisation directe par les features pour aborder des analyses d'éco-conception dans la phase de conception détaillée.

1.4. Eco-concevoir avec les features : Etat de l'art

Comme décrit dans la norme ISO 14040, une ACV nécessite plusieurs itérations telles que la définition des objectifs et du champ de l'étude, analyse de l'inventaire et l'analyse d'impact (ISO, 14040). Ainsi, l'inventaire du cycle de vie (ICV) est fortement lié aux *features* CAO, essentiellement dans la récupération de données nécessaires. La figure1.9 présente un modèle simplifié pour la phase analyse de l'ICV. La TF est alors le cœur de la plupart des intégrations de l'environnement lors de la conception en CAO. Dans certaines recherches l'ICV englobe toutes les phases du cycle de vie du produit (par exemple, (Morbidoni et al, 2011)) et d'autres considèrent uniquement une seule phase (par exemple la phase de fabrication (Sheng et Srinivasan, 1995) ou celle de fin de vie (Takao et Niall, 1999), etc.). Dans cette section on présente un état de l'art du rôle des *features* dans la réduction des IEx d'une phase du cycle de vie d'un produit.

1.4.1. Sélection des matériaux

La première étape du cycle de vie du produit est de la sélection des matériaux. L'attention se porte sur la réduction des ressources extraites, en utilisant des matériaux

recyclables et beaucoup d'autres précautions peuvent être prises à cette étape. Abdalla et Ebeid (2011) proposent de diviser le choix des matériaux en deux étapes, la quantité de matériau et le type de matériau. La quantité de matière est dédiée à la conservation des ressources environnementales où les concepteurs tentent de minimiser la quantité de matériaux utilisés dans la fabrication du produit (Abdalla et Ebeid, 2011). La quantité de matière d'une pièce est déterminée en additionnant les différents *features* géométriques attribués.

Tenir compte des aspects environnementaux dès la phase de conception implique l'optimisation du volume de la forme conçue et la sélection du matériau le plus écologique et adéquat. D'où, l'objectif de cette phase de conception est la réduction de la quantité des ressources utilisées, par exemple choisir des matériaux recyclables. Pour cela, des outils tels que «Eco - Audit» ont été développés. Cet outil est surtout utile pour la conception détaillée. Les avantages de ce logiciel est qu'il est possible d'explorer d'autres options facilement dans les phases de conception, et il peut s'appliquer à 19 processus de mise en forme des matériaux.

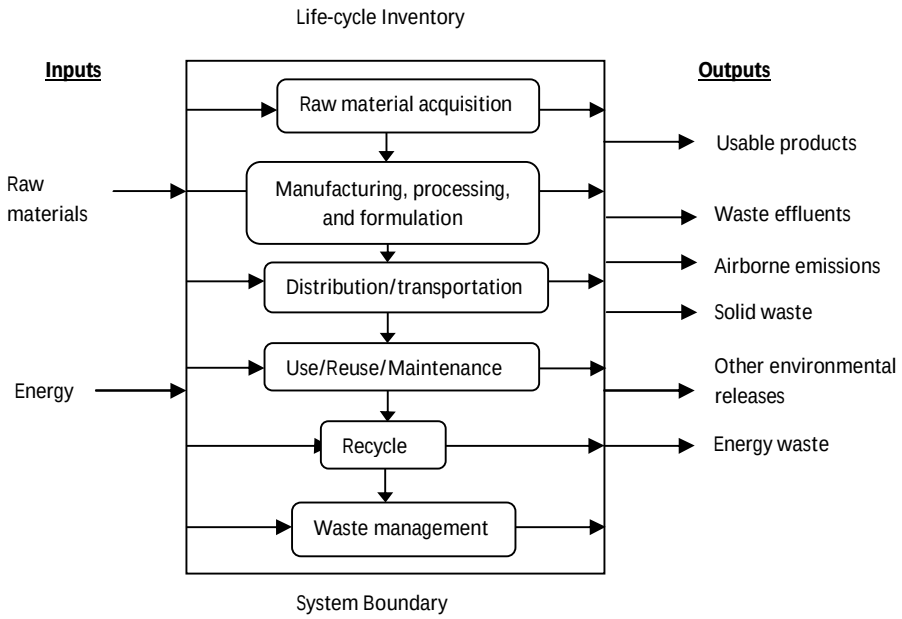


Figure 1. 9 Approche AICV proposé par SETAC (Sridhar, 2007)

Granta design (Granta Design, 2009) et le logiciel de CAO *Autodesk Inventor* sont intégrés. De la même manière, Granta design a développé «*Eco Materials Advisor*» avec lequel il est possible de proposer des matériaux à caractéristiques similaires. *CES-Selector* est aussi un logiciel développé par Granta Design en collaboration avec

l'Université de Cambridge (Ashby, 2005). C'est un logiciel de sélection des matériaux et des processus de fabrication en utilisant une procédure systémique fondée sur des contraintes de conception (*features* de contraintes). Une capture d'écran de cet outil est présentée à la figure 1.10.

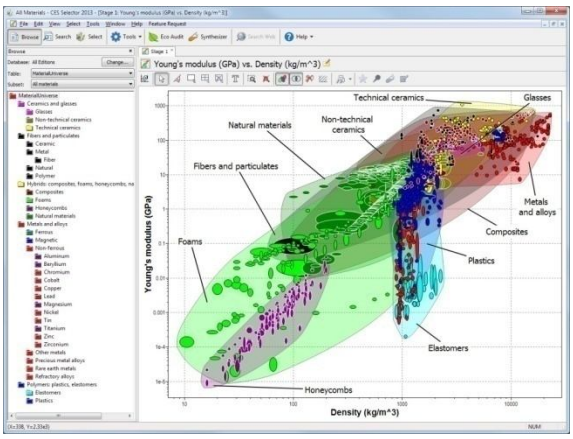


Figure 1. 10 Capture d'écran de l'outil "CES Selector" de Granta Design

1.4.2. Prise en compte des IEx de la phase du transport

La géométrie d'un produit a une influence sur la phase de transport. En effet, pour calculer les impacts de transport, il est nécessaire d'introduire deux paramètres essentiels (Gaha, et al, 2010.) : le poids du produit et le volume englobant. En effet, lorsque le poids et le volume englobant sont réduits, la quantité du produit à transporter pour la distribution est augmentée. Par suite, le nombre des transports nécessaires à la distribution se trouve réduit. Par exemple, pour un ancien modèle géométrique la quantité à transporter, lors d'un voyage, est "X" et pour un modèle géométrique, ayant un volume et un poids réduits, la quantité du produit à transporter est "a * X" où (a>1). L'étude de l'impact environnemental de cette phase lors de la modélisation géométrique est clairement un domaine de recherche dans le futur.

1.4.3. Prise en compte des IEx du processus de fabrication

Un *feature* est une forme locale d'un produit directement lié au processus de fabrication. Il est utilisé pour réduire l'impact environnemental des différents paramètres de la phase de production. La majorité des études dans la littérature prennent en compte les trois axes suivants : l'évaluation des processus, la sélection

d'un processus de planification vert parmi différentes alternatives existantes, et la sélection de paramètres de processus verts tels que ceux concernant le choix du lubrifiant et de l'outil de coupe. L'intégration de la CAO et d'un gamme de fabrication assistée par ordinateur planification (PPAO) réussit à générer les scénarios possibles des plans de processus en temps réel et leurs IEx. En outre, il est possible de sélectionner l'outil d'usinage le plus approprié à faible IE ainsi que le scénario optimal du gamme de fabrication. Ces avantages sont possibles grâce à des modèles de *features* qui fournissent les données nécessaires à un ICV. Nous présentons ci-dessous les travaux les plus importants que nous avons trouvés.

1.4.4. Evaluation des IEx des plans de processus et sélection du plus écologique

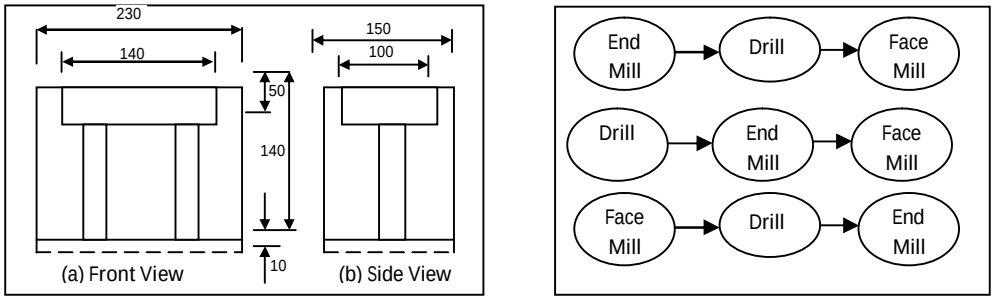
L'évaluation des impacts environnementaux du processus de fabrication fait l'objet de nombreuses recherches. Il s'agit de réduire ou éviter les processus qui ont un impact sur les écosystèmes, la santé humaine, etc. Sheng et al. (1995) et Munoz et al. (1995) analysent dans leurs travaux respectifs, l'impact environnemental de différents flux de déchets. Ils appliquent un système de notation qui évalue certains facteurs (la toxicité, la carcenogeneité, l'irritation, l'inflammabilité, et la réactivité) pour réduire la complexité des solutions de traitement à travers une approche basée sur les *features*. Une stratégie de planification hiérarchique de pièces pour un usinage respectueux de l'environnement est développée dans (Sheng et al., 1996), où il est montré qu'un *feature* peut être usiné avec différents scénarios. Le but est de choisir le scénario d'usinage le moins impactant. La figure 1.11 montre l'exemple considéré par Sheng et al. pour démontrer l'influence de la modification de l'ordre des séquences d'usinage sur les impacts environnementaux du processus de fabrication. L'usinage d'une pièce peut être réalisé *feature* par *feature* ou par un ensemble de *features*. Dans le travail de Sheng et al .(1995), le calcul de l'impact environnemental peut se faire, au sein d'une pièce, soit au niveau de chaque feature indépendamment des autres (micro-planification) (Srinivasan et al., 1999a), soit au niveau d'un ensemble des features qui sont en interaction (macro-planification) (Srinivasan et al., 1999b). Pour évaluer les ressources et les attributs environnementaux d'un processus de fabrication, Zhang, H.et al. (2010) présentent un modèle IPO (Input-Process-Output) et un système d'index d'évaluation basé sur une méthode d'évaluation de la combinaison de

degré de dispersion afin de sélectionner le gamme de fabrication la plus verte. Cette problématique représente le cœur de plusieurs travaux de recherche.

En plus de l'évaluation des IEx, les *features* sont utiles pour sélectionner le gamme de fabrication la plus verte, tel que le modèle d'optimisation multi-objectif de prise de décision du gamme de fabrication la plus écologique établi par Cao et al. (2002) dans le but de mettre dès le début une gamme de fabrication verte et de développer un logiciel de PPAO. En 2006, dans le travail de Tan et al. (2006) une nouvelle procédure de production durable basée sur le raisonnement à base de cas d'étude, les systèmes experts, et la TF pour la conception de flux de processus d'un nouveau composant, a été développée.

Les méthodes développées par Cao et Tan pour la sélection d'un PPAO vert doivent être développées sous forme d'un outil numérique afin qu'elles soient intégrées dans les systèmes CAO. Zhao et al., (2012) proposent également une méthode pour établir une Gamme de fabrication (GF) respectueuse de l'environnement. La méthode commence par le traitement d'un PP existant, puis identifie les étapes impactantes du processus, et les *features* de conception associés, en termes de coût de fabrication et d'impact environnemental.

Les GFs assurant ces fonctions sont alors considérés pour générer d'autres alternatives de GF. Cela pourrait être introduit dans les systèmes intégrés CAO-ACV pour aider le concepteur à comparer différentes alternatives dès l'attribution des *features*. Nawata et al. (2003) proposent un nouveau système de conception du cycle de vie spécifiquement applicable aux pièces usinées. Le système génère automatiquement un retour d'information issu de l'ACV à travers un lien efficace entre les données d'ICV et les données des systèmes intégrant la conception assistée par ordinateur et la fabrication assistée par ordinateur (CAO-FAO) données en se basant sur la modélisation par les *features* (*Feature-based-modeling)*. Par conséquent, la déduction importante qui peut être retenue de l'intégration CAO-FAO-PPAO est de permettre la génération de différents scénarios de fabrication possibles. Chaque scénario a des impacts environnementaux liés aux paramètres du PP attribués. En CAO, la TF peut aider le concepteur à choisir le processus le plus écologique, à partir des alternatives possibles.



Sequence	1	2	3
Energy(MJ)	4.7	5.5	4.8
Weighted Mass	15.3	16.4	14.4
Process time (min)	12.1	10.2	13

Figure 1. 11 Influence de l'ordre des séquences de fabrication sur la génération des IEx d'une pièce constituée de trois features : perçage, lamage, surfaçage (Sheng et al., 1995)

1.4.5. Sélection des paramètres verts d'une gamme de fabrication

L'élaboration d'un gamme de fabrication est basée sur un ensemble de paramètres tels que l'outil de coupe, les lubrifiants, ou la machine outil. Tan et al (2002) utilisent la TF dans le choix du lubrifiant et la machine outil les plus écologiques, parce qu'ils sont des paramètres importants dans le développement de produits verts. Dans le même cadre, le choix d'une machine-outil écologique est le but de l'étude de Jiang et Zhang (2006) où ils développent le modèle appelé « Méthode Vecteur de Projection ». Cette méthode, basée sur la TF, crée un système d'indices de référence pour justifier le choix de la machine-outil, en tenant compte de la consommation des ressources et de l'impact environnemental liés aux *features* de la pièce qui a besoin d'un apport d'énergie-coût (mécanique, électrique, pneumatique, etc) pour qu'elle soit réalisée**.** L'estimation et l'optimisation de l'énergie nécessaire présentent un défi pour la production verte. Les scénarios de consommation d'énergie de la production au niveau des *features* sont étudiés par Deshpande et al. (2011) et évalués en utilisant la méthode MTConnect. D'autres paramètres d'un procédé de fabrication, tels que la finition et la vitesse de coupe, génèrent des IEx liés à la qualité de la pièce. Helu et al. (2012), utilisent la TF pour développer une méthodologie pour évaluer l'impact de la prise en compte des stratégies d'usinage vertes sur la qualité de surface obtenue. L'amélioration de la qualité d'une pièce permet de retarder l'apparition des modes de

défaillance d'un système donné et augmenter sa durée ; cela permet de réduire les IEx générés.

Les intégrations CAO et PPAO sont en mesure de fournir plus de scénarios de cycle de vie pour la pièce en temps réel (lors de la modélisation géométrique). Il est donc nécessaire d'intégrer ces prestations dans les outils intégrés CAO-ACV pour réaliser une évaluation environnementale en temps réel et aussi choisir le plan de production le plus vert parmi les scénarios possibles existants. Ces contributions peuvent être accompagnées par une fin de vie verte avec la prévention d'une facilité de démontage lors de la phase de conception et la recyclabilité.

1.4.6. Conception orientée vers une fin de vie écologique

Pour de nombreux produits, la phase de fin de vie (FV) est une phase déterminante pour conclure sur l'impact environnemental global. Au cours de la dernière décennie, beaucoup de recherches ont cherché la réduction de l'impact environnemental de cette phase dès la phase de conception. La TF est utilisée dans la phase de CAO pour sélectionner une structure optimale du produit à partir des solutions de conception correspondantes en termes du coût de montage-démontage, tout en tenant compte des taux du recyclage et de récupération spécifiés. Chu et al. (2009) choisissent également de considérer des petits ensembles de pièces à démonter pour répondre aux directives vertes et suggèrent un processus de démontage économique. Zhang et Kuo (1996) développent une approche heuristique basée sur les graphes pour générer un arbre de démontage afin d'entreprendre l'analyse de démontage et d'étudier la structure du produit et son démontage, en enregistrant les propriétés physiques des composants tels que le poids et le volume. Güngör (2006) propose une méthode qui est applicable à la phase de conception détaillée. L'importance de connections entre les différents *features* géométriques attribués dans la conception orientée pour le démontage (Design for Disassembly (DfD)) est indiquée. Ces *features* sont évalués par la méthode d'aide à la décision ANP pour Analytic Network Process.

L'optimisation des séquences de démontage des systèmes mécaniques est très utile pour améliorer la maintenance et le recyclage (c'est à dire de réduire les coûts, le temps et le nombre d'opérations). Un nouvel environnement de démontage virtuel, sur

la base de deux algorithmes différents, est présenté par Capelli et al. (2007b) en utilisant des *features* tels que ceux représentés dans la figure 1.12.

Takao et al. (1999) avec la conception de leur logiciel envisagent le recyclage dès le début en se basant sur les features, pour réduire la quantité de déchets à la fin de vie le temps de démontage. Sur le même thème, Bakar et Rahimifard (2007) présentent un plan du processus de recyclage assisté par ordinateur (PPRAO) pour la fin de vie des équipements électriques et électroniques.

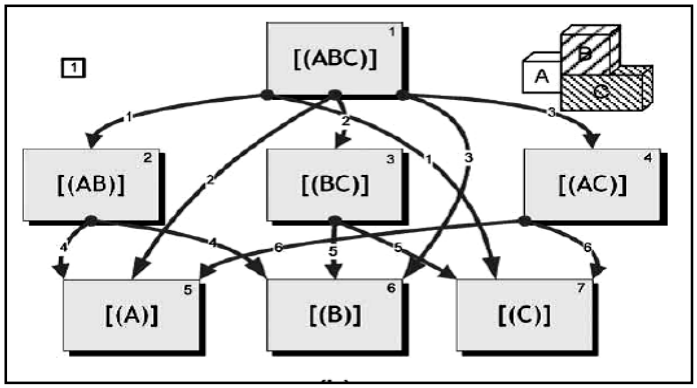


Figure 1. 12 Scénarios possible des séquences de désassemblage (Capelli, 2007b)

1.5. Orientation de la recherche issue de la revue de littérature

A partir de la revue de littérature de l'intégration de l'environnement lors de la phase de modélisation géométrique, on en déduit que la définition de la géométrie des produits doit déjà répondre à un caractère écologique, vue son influence sur toutes les étapes du cycle de vie du produit. La figure 1.13 présente les leviers de la géométrie des pièces et assemblages qui peuvent générer des impacts tout au long du cycle de vie d'un produit. L'environnement est une dimension supplémentaire appliquée à la conception d'un modèle géométrique en plus des différentes contraintes établies par les autres métiers intervenant dans le processus de conception. 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 du juste besoin) (Rio, 2012) présente un objectif de cette recherche.

1.5.1. Influence des caractéristiques géométriques sur la phase d'extraction des matières premières

La première phase dans un cycle de vie d'un produit est l'extraction des matières premières. Le concepteur pourra remédier aux impacts de cette phase à travers les choix des caractéristiques géométriques de son modèle de produit en suivant les directives suivantes :

- favoriser la conception mono-matériau ou, si ceci n'est pas envisageable, optimiser le nombre de matériaux utilisés,
- regrouper des fonctions dans un élément pour économiser la matière,
- optimiser des formes et des volumes qui peuvent permettre, à résistance mécanique égale, de réduire la quantité de matériaux nécessaires (les ressources primaires extraites sont diminuées),
- utiliser des matériaux issus de matières premières renouvelables à caractéristiques mécaniques égales ou proches en jouant sur les dimensions (les bio-polymères atteignent des performances similaires à celles du polyéthylène),
- utiliser des matériaux recyclables.

1.5.2. Influence des caractéristiques géométriques sur la phase de fabrication

La phase de fabrication, consiste à réaliser la forme géométrique élaborée par le concepteur. Cela implique qu'il peut influencer cette phase par ses choix géométriques. Il est alors nécessaire de suivre les directives suivantes :

- optimiser des solutions technologiques avec des conditions de coupe (vitesse de coupe, profondeur de passe, vitesse d'avance, etc.) qui prennent en compte les phénomènes d'usure, de diffusion d'adhésion; cela augmente la durée de vie des outils utilisés,
- choisir une forme ne nécessitant pas une machine de grande puissance, ni des paramètres d'usinages qui conduisent à une consommation d'énergie élevée tels que l'effort de coupe, la vitesse de coupe, la profondeur d'avance, etc.
- opter pour des solutions technologiques nécessitant des processus de fabrication sans utilisation de produits toxiques,

- optimiser la forme géométrique peut générer moins de déchets pendant sa production.

1.5.3. Influence des caractéristiques géométriques sur la phase d'utilisation

Tout produit a une fonction principale à remplir. Cette fonction est la base de la phase d'utilisation. Le modèle à concevoir doit la mettre en évidence, mais avec moins d'impacts :

- Prévoir un produit utilisant moins des ressources naturelles,
- prévoir sa démontabilité pour favoriser l'utilisation des pièces de rechange.
- choisir des solutions technologiques plus résistantes aux contraintes appliquées le plus longtemps possible,
- prévoir des solutions multi-fonctions,
- prévoir un mode d'emploi générant moins des déchets,
- créer des formes présentant une aisance de manipulation pour éviter l'apparition des modes de défaillance et, par suite, augmenter la durée de vie du produit.

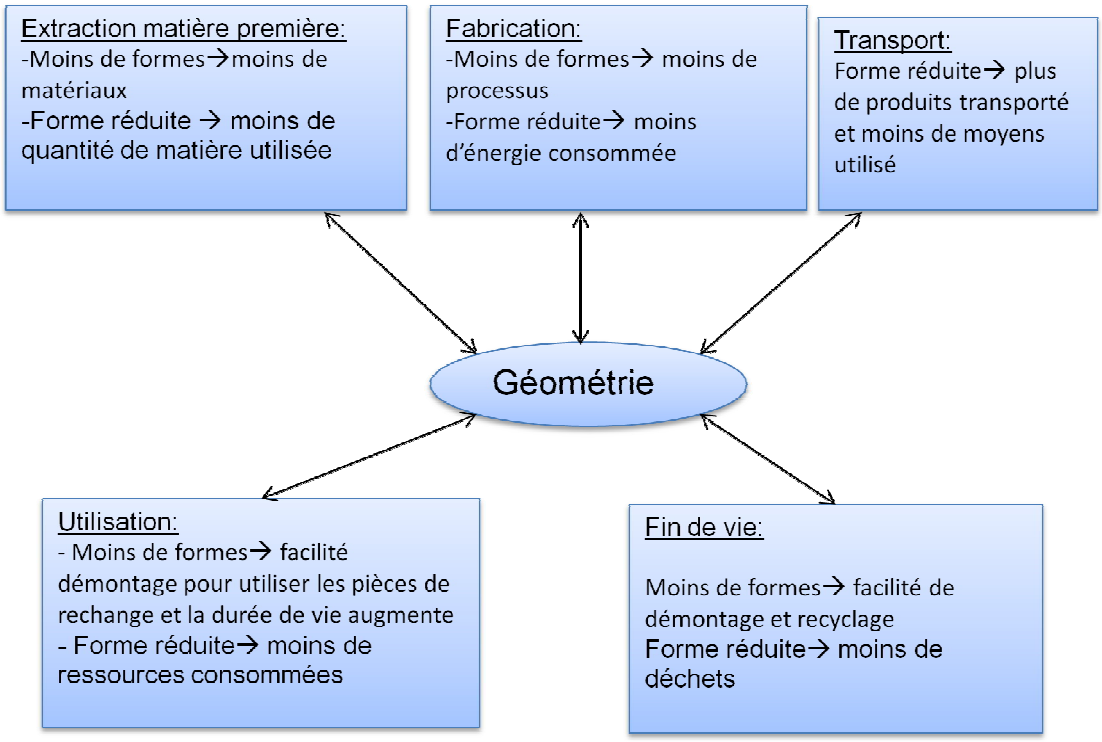


Figure 1. 13 Influence de la géométrie sur l'environnement sur toutes les étapes du cycle de vie (Gaha et al., 2010)

Le concepteur peut influer sur l'utilisateur dans l'emploi de son produit tout en répondant à ses besoins avec moins d'impact sur l'environnement.

1.5.4. Influence des caractéristiques géométriques sur la phase de fin de vie

Le concepteur pourra imposer, avec sa conception, des scénarios de fin de vie moins impactants. Cela peut se faire en :

- Favorisant la réutilisation de certaines pièces,
- augmentant le nombre des pièces recyclables dans un produit,
- optimisant un désassemblage facile pour éviter des processus impactants ainsi que réduire le temps du démontage et donc consommer moins d'énergie,
- réduisant le nombre de composants d'un produit pour permettre une diminution de la quantité des déchets.

  L'augmentation de la quantité des déchets a déclenché les motivations vers l'adoption de l'éco-conception. Un produit rend service à l'homme mais génère des quantités importantes des déchets en fin de vie. La réduction des volumes diminue la quantité de matières non valorisées.

1.5.5. Influence des caractéristiques géométriques sur la phase de transport

La pollution produite par les moyens de transport est très élevée. D'où la nécessité de réduire ses effets impactants lors des phases de transport tout au long du cycle de vie d'un produit.

Le concepteur, en manipulant les dimensions de son modèle peut favoriser l'utilisation d'un matériau de la région que d'utiliser un autre avec des caractéristiques mécaniques similaires

La forme géométrique doit être la plus compacte possible pour qu'elle occupe moins de volume afin de transporter plus avec moins de moyens, d'où une réduction importante d'énergie consommée.

Le concepteur, dans la prise de décision des aspects géométriques, influe énormément sur les aspects environnementaux générés suite à ses choix. D'où, il est nécessaire de lui fournir un outil d'aide à la décision lors de la phase de conception en CAO, pour lui permettre de visualiser l'influence de ses choix sur l'environnement.

La phase de la CAO (ou conception détaillée) est une phase avancée dans le processus de conception selon la figure 1.14 et elle est riche en données numériques. Cela a conduit les chercheurs dans le domaine de l'éco-conception à exploiter cette richesse afin d'améliorer autant que possible les aspects environnementaux des produits.

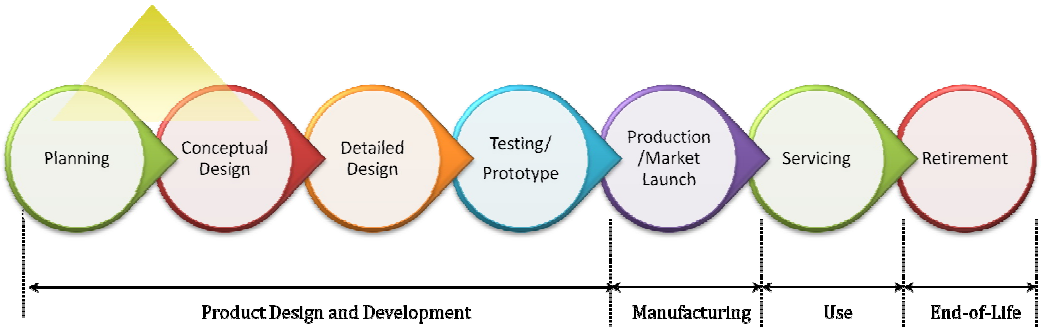


Figure 1. 14 Processus de développement d'un produit (Masoudi et al., 2012)

La détection et la localisation des impacts que pourra générer un produit sur toutes les étapes de son cycle de vie est possible avec les outils quantitatifs de l'éco-conception. La pratique d'une évaluation environnementale quantitative devient plus aisée en avançant dans l'axe du temps de développement du produit vue l'augmentation de la quantité de données nécessaire à sa réalisation (figure 1.15).

Dans l'intégration de l'évaluation environnementale dans la CAO, on vise à intégrer l'éco-conception dans le processus de conception classique uniquement dans la conception de détails. En utilisant la technologie des features, le concepteur peut créer plusieurs géométries et donc différents scénarios possibles d'un modèle géométrique qu'il faut évaluer environnementallement pour choisir une géométrie « écologique ».

Résultant de la revue de littérature réalisée, la figure 1.16 montre un résumé des travaux d'éco-conception lors de la phase de CAO basés sur la FT. L'éco - conception pourrait se concentrer sur une étape du cycle de vie ou de prendre en compte toutes les étapes du cycle de vie. Un cadre de quatre avantages les plus importants trouvés dans l'état de l'art au-dessus sur la base de FT est illustré à la figure 1.17.

Le transfert de données de la majorité des CAD - LCA outils et méthodologies intégrées, dans la littérature, est basé sur FT. Cette technologie a été utilisée pour générer des scénarios de l'ACPP et pour le choix des scénarios / solutions optimales en termes de coût. Basé sur les fonctionnalités offertes par FT et intégrations CAO / PLM

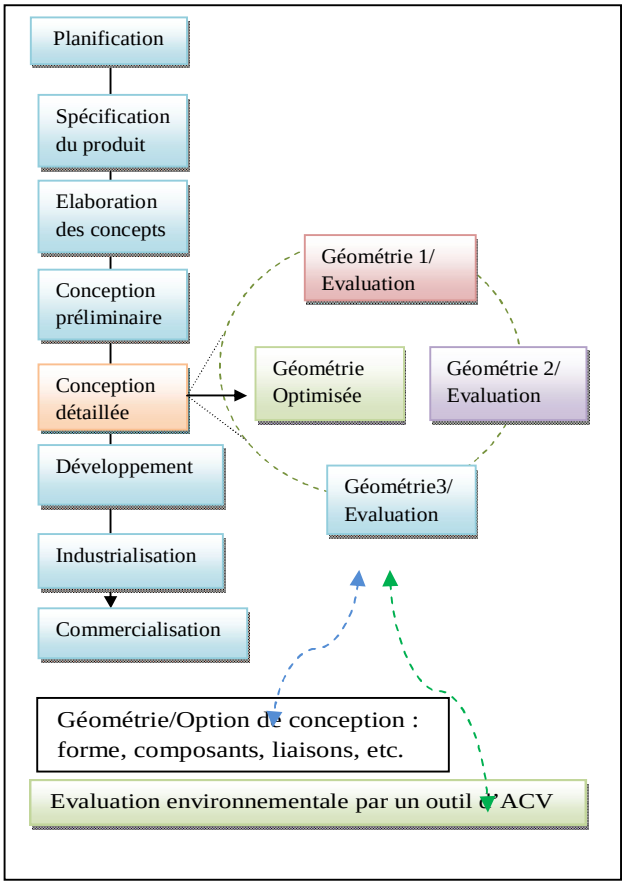


Figure 1. 15 Méthodologie proposée pour l'intégration de l'éco-conception dans le processus de conception

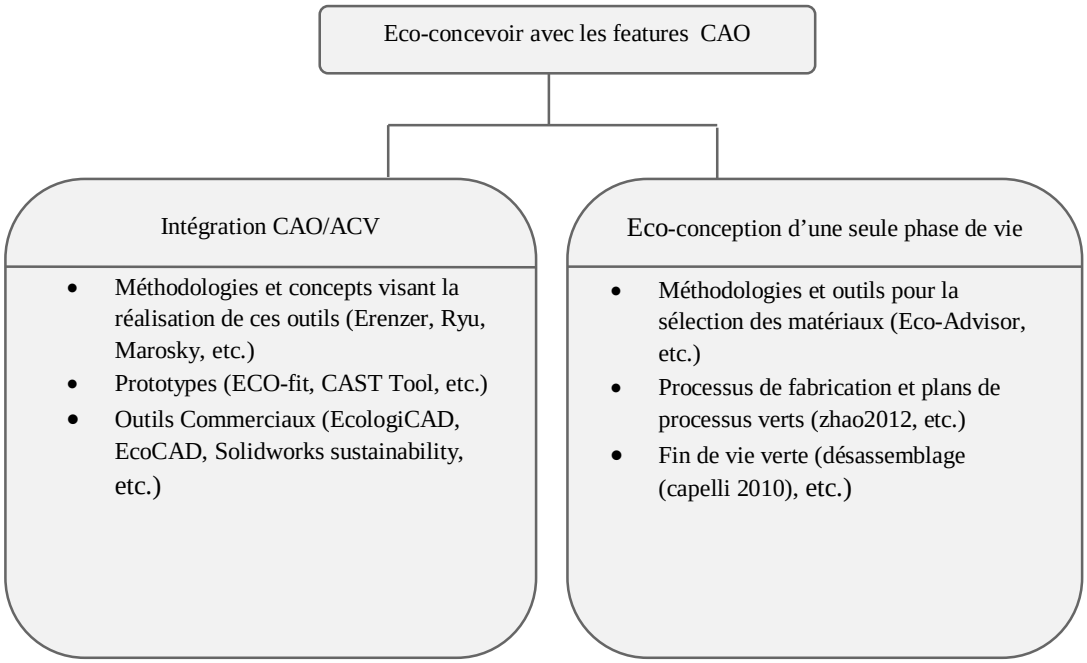


Figure 1. 16 Axes essentiels sur le thème "Eco-concevoir avec les features CAO"

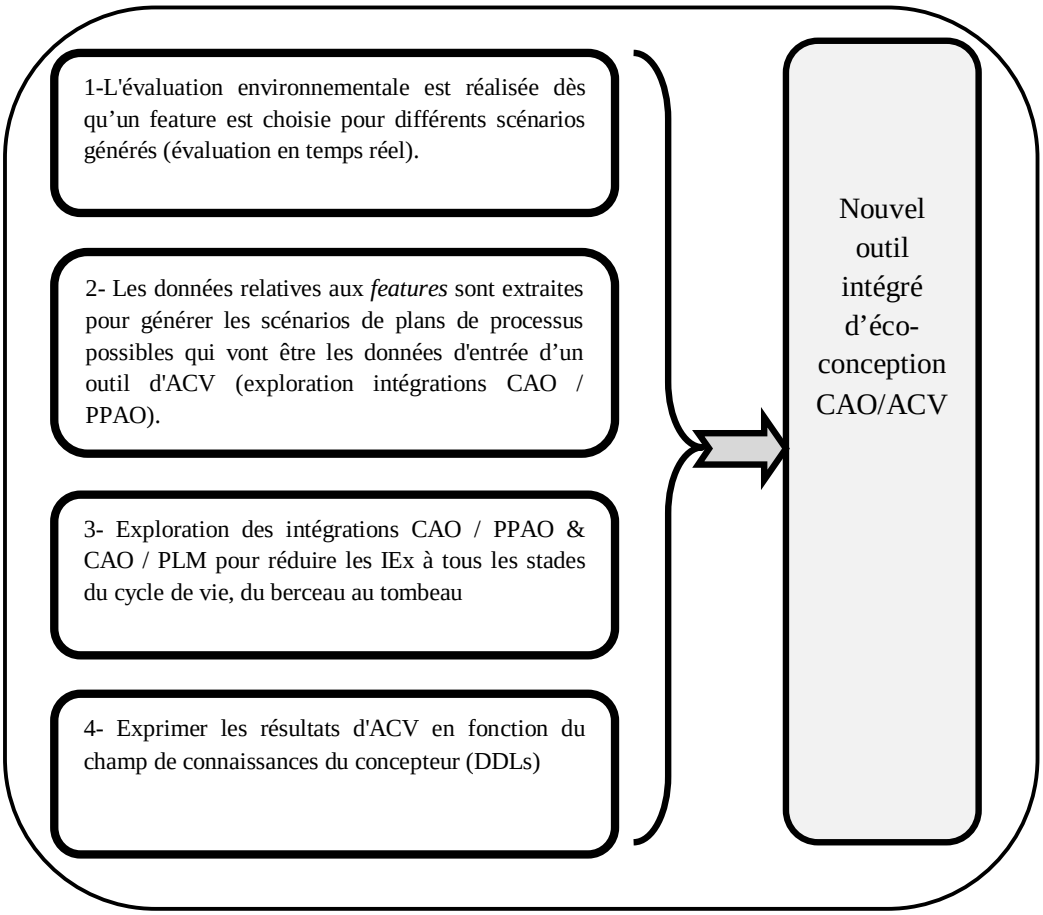


Figure 1. 17 Les avantages de la TF dans l'éco-conception des produits

1.6. Problématique et objectifs de la recherche

1.6.1. Problématique

De la vue d'ensemble des derniers travaux présentées dans l'intégration CAO et évaluation environnementale en temps réel, nous avons dégagé quatre lacunes majeures : d'abord, les méthodologies et outil présents ne peuvent considérer qu'un seul processus de fabrication pour tous les features de la pièce, malgré qu'ils peuvent être réalisés par différents processus. Deuxièmement, l'objectif commun de ces travaux est l'extraction des données d'entrée nécessaires à une ACV. L'ensemble des données extraites ne peuvent former qu'un seul scénario de vie pour la pièce à évaluer. Or la technologie des features est capable de fournir davantage de scénarios de CV pour la pièce en temps réel. Troisièmement, les travaux basés sur l'exploitation des features, pour éco-concevoir, se sont concentrés sur l'une des phases de vie d'une géométrie, tel que le processus de fabrication à adopter pour la réalisation du feature ou la récupération des déchets après sa réalisation, ou encore la sélection d'un matériau etc. Cependant les différentes phases de vie peuvent être prises en considération, en se basant sur les features, en réalisant une ACV complète. Enfin, ces travaux proposés présentent des résultats d'impacts environnementaux peu lisibles au concepteur, qui ne sait pas bien non plus comment s'y prendre pour réaliser les modifications nécessaires. Ceci, nous a conduit à proposer une approche qui permet de surmonter ces lacunes. L'approche proposée peut fournir une évaluation environnementale (EE) dès l'attribution des features. Elle est basée sur les scénarios de fabrication possibles fournis par les données géométriques contenus dans les features d'un côté et sur les données non-géométriques d'un autre côté. En outre, les résultats d'EE sont exprimés en fonctions des connaissances du concepteur (choix de conception).

1.6.2. Objectifs de la recherche

La technologie des *features* (TF), aujourd'hui, est largement utilisée dans la conception des produits. Cette technologie fournit différentes informations géométrique et non-géométriques sur la géométrie. La connaissance de ces données est nécessaire pour pouvoir sélectionner celles qui peuvent présenter des données

d'entrée pour les outils d'analyse environnementale afin de calculer les impacts environnementaux des produits industriels.

Dans le but d'aider le concepteur à éco-concevoir ses produits, on propose de lui présenter une assistance en temps réel pour ses choix géométriques (dès l'attribution des *features*). L'assistance environnementale suggérée est accompagnée de l'ensemble de scénarios possibles générés à partir des *features*. Les IEx calculés par l'une des méthodes de calcul, tel que Eco-Indicateur99, seront liés aux différents degrés de liberté (DDLs) du concepteur dans la phase de conception de détail en CAO. Ainsi la visualisation se fera en fonction de ces DDLs et traduira la zone d'action du concepteur pour réduire les IEx de son produit.

1.6.3. Synthèse

L'intégration de l'environnement dans les systèmes d'informations de l'industrie est devenue une exigence incontournable pour les industriels de manière à rester attractif sur le marché. C'est ainsi que différents outils couplant la CAO avec l'ACV ont été développés pour aider le concepteur sauf que certaines lacunes ont été dégagés de ces travaux et certaines acquisitions n'ont pas été exploitées dans le domaine de l'éco-conception. Nous proposons donc de remédier à ces lacunes Le tableau suivant récapitule les lacunes dégagées ainsi que les objectifs à atteindre à la fin de cette thèse.

Tableau 1. 2 Comparaison entre l'existant et les objectifs à atteindre

Lacunes des travaux précédents	**Les objectifs à atteindre**
L'analyse environnementale est réalisée lors de la phase de conception conceptuelle	L'analyse environnementale sera réalisée lors de la conception de détails. (dès qu'un feature est attribué les différents scénarios seront générés (analyse en temps réel)).
Les modèles des données pour l'EE sont relatives à un scénario unique.	Le modèle des données à développer sera basé sur la scénarisation. (exploitation des intégrations CAO / PPAO pour évaluer les scénarios de vie possibles).
Les travaux utilisant les intégrations CAO/PPAO dans l'éco-conception ne localisent que les IEx liés à la phase de	Les intégrations CAO/PPAO et CAO/PLM seront exploités pour localiser les IEx à toutes les étapes du cycle de vie du berceau au

fabrication	tombeau.
Les résultats d'ACV ne sont pas évidents pour le concepteur pour améliorer son modèle écologiquement.	Les résultats d'ACV seront reportés au domaine de connaissances du concepteur (calcul d'impact en fonction des DDLs).

1.7. Questions de la recherche

L'évaluation environnementale de la géométrie en temps réel, la localisation des sources d'impacts avec les différents scénarios de conception possibles, le champ d'action avec le nombre restreint des degrés de libertés qui restent dans la phase de conception de détails, sont les axes de progrès pour notre travail de recherche. Pour cela, nous cherchons à répondre à trois questions de recherche énoncées dans ce qui suit et récapitulées en Figure 1.18.

1.7.1. Est-il possible d'éco-concevoir lors de la phase de modélisation géométrique et comment ?

Avec la seule géométrie, peut-on réaliser une évaluation environnementale temporairement qui soit utile au sens qu'elle pourra avoir une influence sur l'éco-conception finale d'un produit ?

1.7.2. Est-il possible d'avoir un modèle de features enrichi permettant au concepteur CAO de prendre conscience des impacts environnementaux de ses choix ?

Si l'éco-conception de la géométrie est possible, il est nécessaire de comprendre la manière d'y arriver d'une part et de localiser les sources d'impacts d'autre part pour mieux agir dessus rapidement ?

1.7.3. Est-il possible d'avoir des résultats parlants permettant au concepteur de réduire les impacts environnementaux de ses choix ?

Si l'évaluation environnementale temps réel par les features est possible, peut-on alors réduire les impacts une fois les sources d'IEx localisées et les degrés de liberté sur lesquels il faut agir définis ?

1.7.4. Synthèse

La structure de ce mémoire de thèse est représentée dans la figure 1.18. D'abord on présente la nouvelle méthodologie d'éco-conception à adopter lors de la conception détaillée. Par la suite, on présente le modèle d'évaluation environnementale et de localisation des sources d'impacts basé sur les features. Puis, on présente le modèle des DDLs qui va permettre de définir la zone d'action du concepteur pour améliorer les performances environnementales de ses produits.

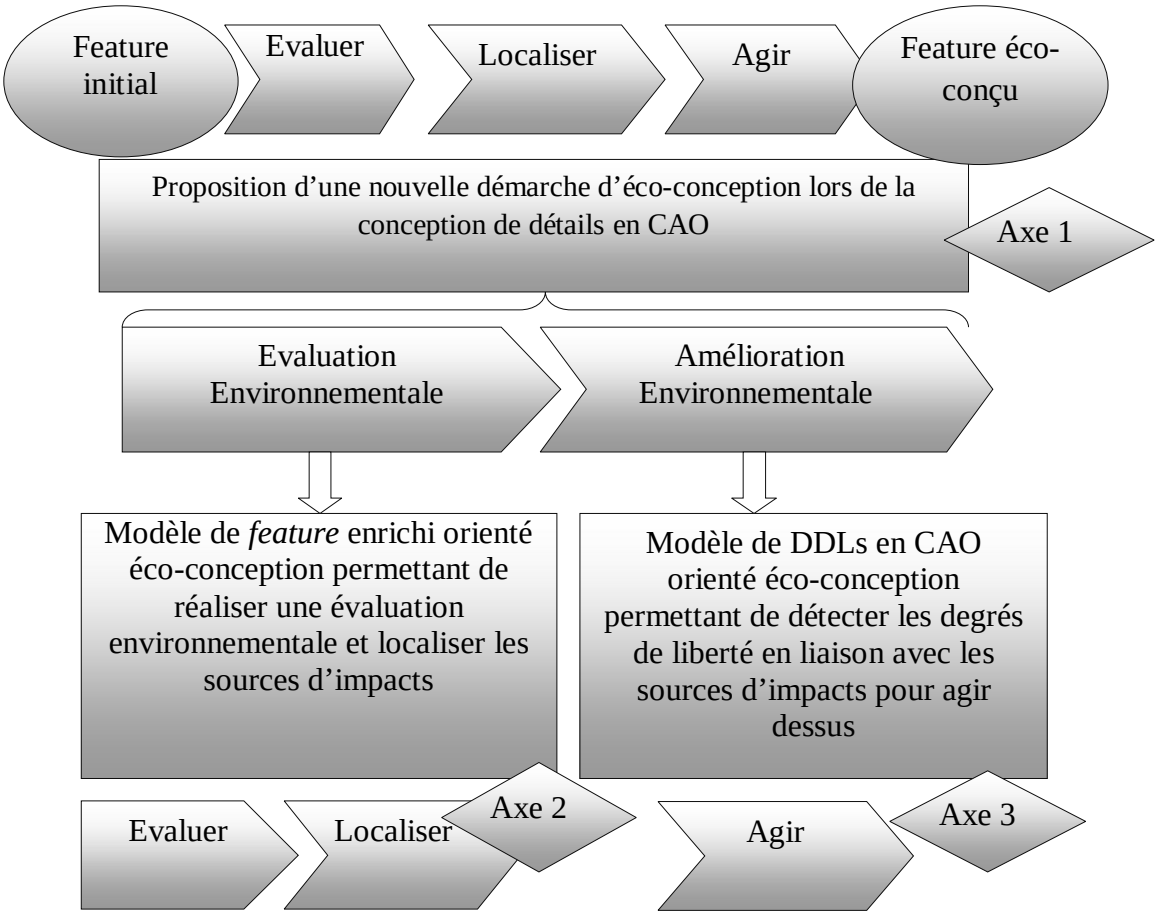


Figure 1. 18 Positionnement des modèles proposés pour un processus simplifié d'éco-conception

1.8. Conclusion

Dans ce chapitre, en reprenant le contexte de travail, nous avons présenté un état de l'art général sur le sujet (éco-conception, cycle de vie et analyse du cycle de vie, les systèmes CAO). L'état de l'art se poursuit alors plus précisément sur le lien entre CAO et ACV et montre les solutions commerciales (même si elles restent parfois à

l'état de prototypes) ainsi que les solutions de laboratoire. A l'issue de cet état de l'art une analyse du concept de feature et particulièrement son application à l'éco-conception (choix des matériaux, des processus de fabrication, des processus de fin de vie). L'influence des paramètres géométriques sur les autres choix (matériaux, processus, fin de vie, transport…) est alors présentée et synthétisée par des grandes règles qui peuvent piloter les choix de conception. De plus certaines lacunes sont dégagées, dont la plus importante est que l'analyse environnementale est réalisée après la modélisation géométrique. Ceci a conduit à la définition de la problématique de la thèse qui s'articule sur trois points : l'intégration de l'évaluation environnementale dans la phase de modélisation géométrique, le développement d'un modèle d'évaluation environnementale basée sur les features et l'identification des zones d'action pour améliorer les performances environnementales des produits.

Chapitre 2- Proposition d'une méthodologie générale

2.1. Méthodologie Générale

2.1.1. Généralités

A partir des trois questions de recherche proposées dans le chapitre précédent ; on définit trois axes de recherche qui apportent des réponses à ces questions. Le manque de connaissances du concepteur en termes d'environnement est pris en compte**.** Les entrants du processus proposé sont :

- Un modèle géométrique d'une pièce,
- constitué par un ensemble de *features*,
- un nombre défini de degrés de liberté restants lors de la phase CAO,
- un concepteur avec un champ des connaissances environnementales réduit.

Dès que le processus est appliqué on obtient comme sortants :

- Différents scénarios de modèle géométrique sont présentés à l'aide des Eco-features,
- le scénario le plus écologique est montré,
- les sources d'impacts les plus influençants pour l'éco-conception sont localisés,
- la zone d'action en fonction des degrés de liberté du concepteur pour réduire les impacts de son modèle géométrique est définie sans qu'il soit expert en environnement,
- une géométrie éco-conçue est proposée avec ses différents paramètres.

Pour voir comment atteindre ces résultats, les trois axes de cette recherche sont plus détaillés dans les chapitres 3, 4 et 5. Une description étendue de chaque axe est réalisée dans les paragraphes suivants de ce chapitre.

2.1.2. Axe 1 : Processus d'éco-conception lors de la conception de détails en CAO

Le premier axe de recherche présente une démarche pour répondre à la première question de recherche : Est-il possible d'éco-concevoir lors de la phase de modélisation géométrique et comment ? L'explication complète de cette démarche est élaborée dans le chapitre 3. C'est une démarche constituée essentiellement de 3

étapes : Evaluer, Localiser et Agir, son objectif est de permettre au concepteur CAO de chercher les sources d'impacts dans un modèle géométrique afin d'agir avec les degrés de liberté qui lui restent.

La méthodologie proposée est un nouveau processus d'éco-conception centré sur la phase de conception de détails, comme le montre la figure 2.1. L'étape de départ est un *feature* classique attribué par le concepteur à l'état initial, quand on lui applique l'approche « ELA » on obtient à l'étape finale un *feature* éco-conçu.

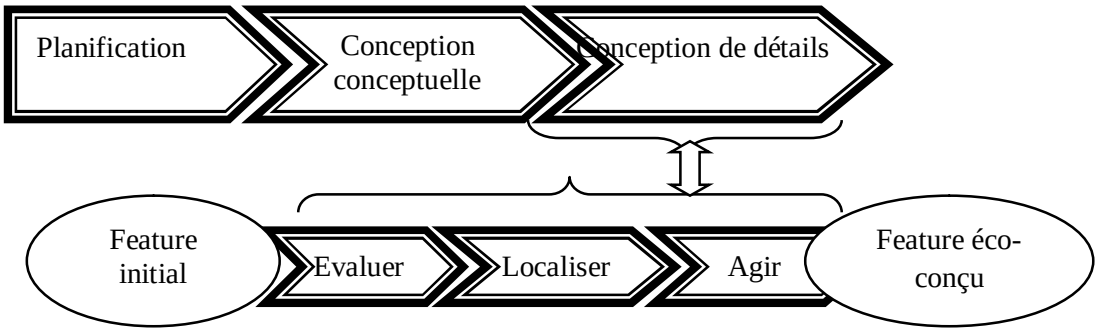


Figure 2. 1 Evolution par étapes du processus" ELA"

Notre approche, comme le montre la figure 2.2, permet d'éco-concevoir trois niveaux d'un modèle CAO au cours du temps. On commence par l'éco-conception des *features* constituant les pièces puis celle des pièces en conception de détails et par la suite l'éco-conception de tout un assemblage. On commence donc par présenter notre approche spécifique, qui consiste à appliquer notre méthodologie d'éco-conception proposée « ELA » pour chaque *feature*, puis pour chaque pièce pour passer à une approche globale qui concerne son application sur un produit en totalité.

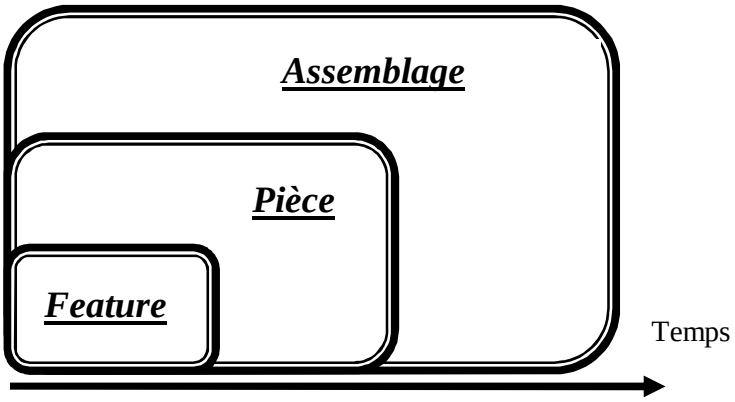


Figure 2. 2 Les niveaux éco-conçus d'un modèle CAO en fonction du temps

Dans ce mémoire, on se restreint uniquement à l'approche spécifique, vue la complexité de la tâche en présence d'un grand nombre de données qui ne peuvent être pilotées que numériquement et auraient nécessité des développements d'une plateforme informatisée pour appliquer l'approche globale. Nous évoquerons bien entendu les perspectives de ces extensions à la pièce et au système à la fin de ce mémoire.

L'axe 2 comporte les premières étapes de la méthodologie « ELA » tandis que l'axe 3 présente la dernière étape. La figure 2.3 illustre le positionnement du 2ème et 3éme axes de recherche dans le premier.

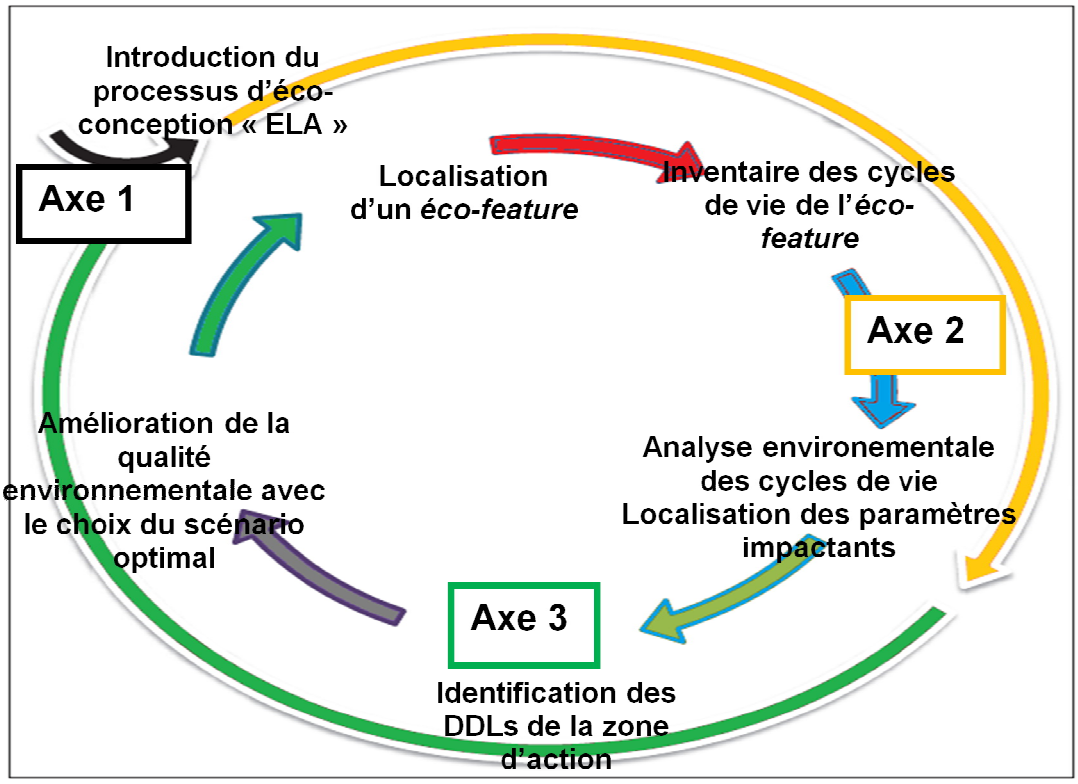


Figure 2. 3 Positionnement du 2ème et 3ème axes de recherche dans le premier axe

2.1.3. Axe 2 : Modèle de *feature* enrichi orienté éco-conception (Evaluer-Localiser)

Pour réaliser les deux étapes de l'axe 2, un modèle basé sur les *features* est développé. Ce modèle doit permettre de réaliser un inventaire du cycle de vie d'un *feature* ou d'un ensemble de *features* afin de pratiquer une analyse environnementale en premier lieu et localiser les sources d'impacts en second lieu.

La figure 2.4présente les deux étapes du 2ème axe qui transforment l'état du *feature* d'un *feature* classique à un *feature* évalué environnementallement pour différents scénarios de cycle de vie.

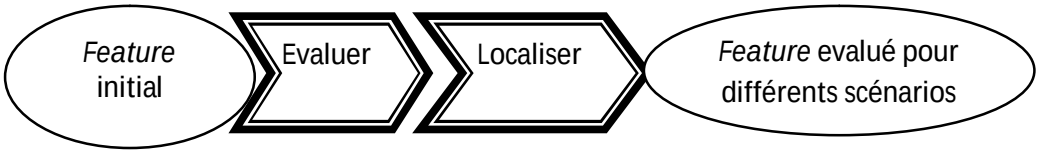


Figure 2. 4 Les étapes du 2ème axe de recherche

La figure 2.5 illustre le concept d'éco-feature, qu'on propose. Cet éco-feature est un feature qui est enrichi par les différentes informations qui peuvent servir dans l'évaluation environnementale à travers toutes les étapes de son cycle de vie. Par exemple, pour la phase fabrication, lorsqu'on attribue le procédé de fabrication au feature, il sera lié au volume et au matériau pour donner la quantité d'énergie consommée. Pour la phase du transport, le moyen à utiliser sera lié aux types et quantités d'émissions.

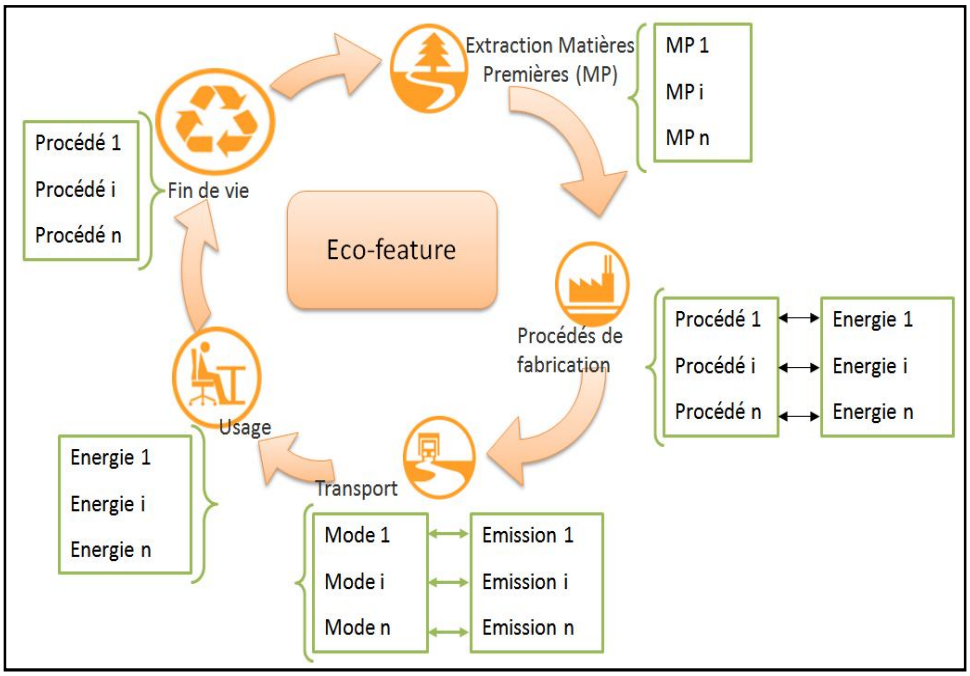


Figure 2. 5 Identification des paramètres définissant l'Eco-feature

Dans le chapitre 4, deux scénarios sont expérimentés (scénario volume/matériau et scénario procédé/énergie) pour valider le développement du concept d'*éco-feature*.

En outre, des hypothèses sont établies pour éviter les problèmes qui peuvent être rencontrés lors de l'évaluation environnementale d'un ensemble des *features*.

Une fois que l'ensemble des *éco-feature*s présents dans une géométrie sont générés, un processus d'évaluation environnementale basé sur des *éco-features* peut être lancé. Dans ce processus, en plus de l'évaluation environnementale il y a une identification des différentes sources d'impacts. Cela va servir comme introduction pour le troisième axe de recherche. Une fois une localisation des sources d'impacts réalisée, on peut déterminer la zone d'action du concepteur pour améliorer la qualité écologique de son modèle géométrique.

2.1.4. Axe 3 : Modèle de DDLs en CAO orienté éco-conception

L'axe 3 présente la deuxième phase du processus d'éco-conception proposé. Cette phase consiste à améliorer la qualité environnementale d'un *feature* ou de l'ensemble des *features* évalués en fonction des degrés de liberté restants pour le concepteur pour une amélioration significative dans le sens de l'éco-conception.

Tout un processus d'action pour une amélioration environnementale en CAO des modèles géométriques des produits est développé. Ce processus est basé sur le modèle de DDLs.

Ce modèle permet de détecter les différents degrés de liberté en relation avec les sources d'impacts et permettant au concepteur d'agir sur le modèle géométrique initial afin de l'éco-concevoir. Ce modèle est basé sur les résultats trouvés à partir de l'évaluation environnementale basée sur les *éco-features*.

En effet, un *éco-feature* représente un ensemble de paramètres liés à une géométrie. Ces paramètres sont en relation avec les zones d'action du concepteur CAO.

Le modèle dit de DDLs permet de jouer beaucoup de scenarios de choix de conception (on va changer des matières très rapidement et de dimensions de manière couplée pour voir pour une même résistance mécanique qui a l'IE le moins faible). Ces scénarios sont plus détaillés dans le chapitre 5.

La figure 2.6 montre les étapes de transformation d'un *feature* classique en *feature* éco-conçu. Le processus développé dans l'axe 3 présente la phase pré-éco-conception.

Pour valider le modèle de DDLs, deux scénarios de validation sont réalisés. Le premier scénario consiste en un changement matière/dimensions pour une résistance mécanique donnée et un autre scénario consiste à un changement procédé/énergie pour une résistance mécanique donnée aussi.

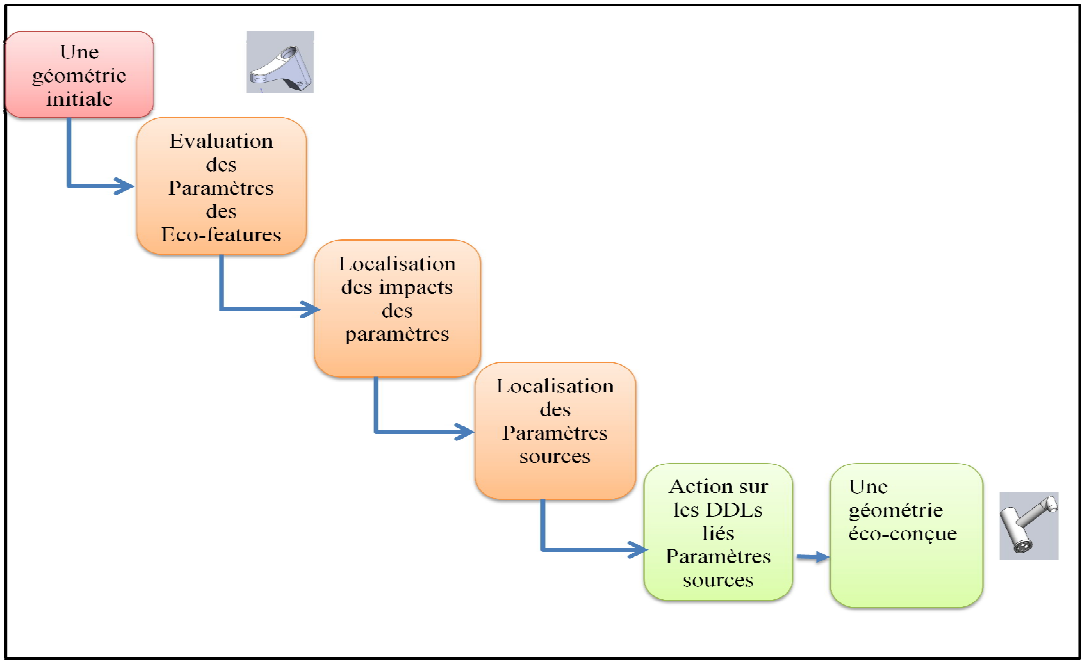


Figure 2. 6 Les étapes d'éco-conception d'un feature

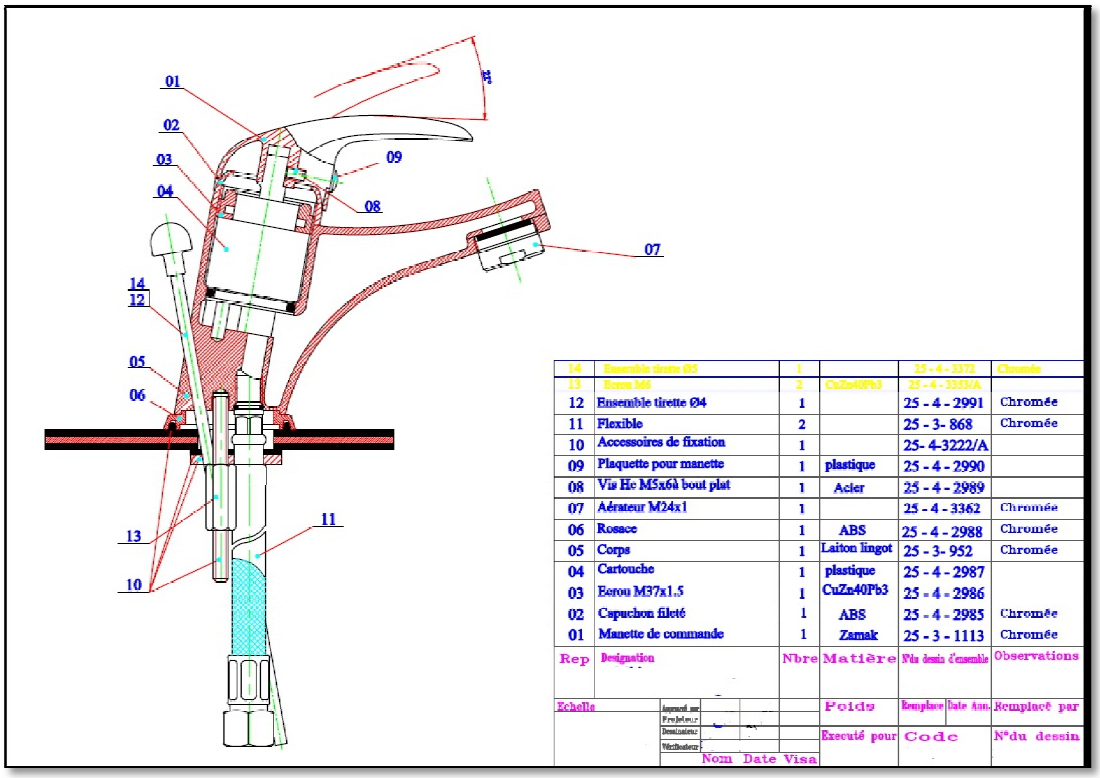
2.2. Application et validation sur un mitigeur de lavabo

Le produit étudié est le mitigeur de lavabo d'une salle de bain développé par la société «AMS[1]» et mis sur le marché depuis 1998, il est produit par année en 11000 exemplaires avec un prix de 48,481DT l'unité. Son dessin d'ensemble est représenté par la figure 2.7 et ses différents composants sont présentés dans le tableau 1 de l'annexe 1. Le mitigeur est un robinet domestique particulier qui permet le dosage de l'eau chaude et de l'eau froide à l'aide d'une manette. Tout comme pour le robinet mélangeur, il est conseillé de placer un clapet anti-retour sur le circuit eau froide, avant le robinet. Le fonctionnement du système de mélange de l'eau est assuré par la cartouche (4) du mitigeur qui est intégrée dans le mitigeur en métal.

Cette cartouche contient généralement 3 voies : entrée eau chaude et entrée eau froide, et une sortie eau mitigée. Le mélange se fait en déplaçant un disque céramique sur un autre. Les trous présents sur ces disques permettent de gérer les sections de passage d'eau. Sa masse est d'environ 1500 grammes, le produit pesant 1450 grammes et l'emballage 50 grammes.

[1] AMS : Les ateliers mécaniques du Sahel, Sousse, Tunisie

On applique la méthodologie globale proposée sur le mitigeur pour localiser les sources d'impacts les plus influençants sur l'éco-conception du produit, puis on se propose d'agir sur les degrés de liberté restant pour améliorer sa qualité environnementale.



Rep	Designation	Nbre	Matière		Observations
14	Ensemble tirette Ø3	1		25 - 4 - 3372	Chromée
13	Serre tête	2	CuZn40Pb3	25 - 4 - 3555A	
12	Ensemble tirette Ø4	1		25 - 4 - 2991	Chromée
11	Flexible	2		25 - 3- 868	Chromée
10	Accessoires de fixation	1		25- 4-3222/A	
09	Plaquette pour manette	1	plastique	25 - 4 - 2990	
08	Vis Hc M5x6à bout plat	1	Acier	25 - 4 - 2989	
07	Aérateur M24x1	1		25 - 4 - 3362	Chromée
06	Rosace	1	ABS	25 - 4 - 2988	Chromée
05	Corps	1	Laiton lingot	25 - 3- 952	Chromée
04	Cartouche	1	plastique	25 - 4 - 2987	
03	Berou M37x1.5	1	CuZn40Pb3	25 - 4 - 2986	
02	Capuchon fileté	1	ABS	25 - 4 - 2985	Chromée
01	Manette de commande	1	Zamak	25 - 3 - 1113	Chromée

Figure 2. 7 Mitigeur Carthage de la société AMS (AMS, 2001)

2.2.1. Analyse du Cycle de Vie d'un mitigeur et localisation des sources d'impacts

L'analyse du cycle de vie du mitigeur a été réalisée selon les principes de la norme ISO 14040 (ISO, 2006) telle qu'elle est expliquée auparavant. Les objectifs de cette étude consistent en premier, à modéliser et évaluer les étapes du cycle de vie du mitigeur afin de localiser les impacts majeurs sur l'environnement. En second lieu, comparer plusieurs alternatives et distinguer les meilleures du point de vue environnemental. Cette phase correspond aux deux premières étapes du processus « ELA » (Evaluer et Localiser).

2.2.1.1. Définition du champ de l'étude

- *La fonction du système, l'unité fonctionnelle et le flux de référence*

Pour le robinet, cas d'étude, le scénario de référence considéré est un robinet mitigeur de lavabo d'une salle de bain d'une famille de 4 personnes tel que le robinet est utilisé en moyenne 16 fois par une personne en une journée pendant cinq ans en restant en très bon état sans apparition d'aucune sorte de mode de défaillance. D'où, l'entreprise prévoit que leur produit dure 120000 lavages de mains en moyenne.

Dans le cas du robinet mitigeur de lavabo utilisé dans une salle de bain on va considérer que la fonction principale du mitigeur est de « fournir de l'eau pour laver les mains ». L'unité fonctionnelle est une quantité de service pendant une durée de temps, on va donc considérer le nombre de cycles d'ouverture-fermeture du robinet pour permettre de mouiller et rincer les mains. Par exemple, on va considérer comme U.F 300000 lavages de mains (sachant qu'un lavage de main peut nécessiter un ou plusieurs ouverture-fermeture de robinet selon la conception et les habitudes des personnes, la conception influençant ou modifiant les habitudes). En se référant à cette unité, on pourra comparer plusieurs robinets entre eux pour cette quantité de services donnée. Cette comparaison va nous amener à définir le flux de référence, qui est la quantité du produit qui permet de répondre à l'unité fonctionnelle établie au début. La durée de vie moyenne d'un robinet d'un type donné est alors très importante. Nous entendons, ici, par durée de vie le temps d'utilisation du robinet en première ou seconde main, mais quelques soient les raisons de sa fin de vie (obsolescence réelle : défaillances, non fiabilités, non maintenance ; ou obsolescence perçue : changement pour suivre la mode, pour changer de style, pour rénover, etc.). Pour cet exemple du robinet, nous avons estimé qu'il dure 120000 lavages de main donc le nombre du flux de référence est 2.5 car c'est le nombre de robinets nécessaires pour assurer ce service. L'estimation du flux de référence nécessite de la part de l'entreprise, d'une part, une bonne connaissance des utilisateurs et de l'utilisation de ses produits (fréquences d'utilisation, modes d'utilisation (processus réel d'utilisation du robinet, habitudes des utilisateurs) et d'une autre part, une connaissance des données marketing (ventes en magasin et Service Après Vente) pour connaitre les taux de renouvellement des robinets chez les gens, les effets de mode, le nombre de personnes sachant maintenir un robinet, etc. L'entreprise dispose justement

de statistiques pour l'estimation de la moyenne de la durée de vie de ses produits. *Les hypothèses et les limitations*

D'une manière générale, la construction de l'infrastructure, la production et la maintenance des machines utilisées ne sont pas modélisées dans le système étudié. En outre, l'énergie de pompage de l'eau utilisée pour son arrivée aux habitats est supposée une donnée externe aux frontières du système étudié. Les produits chimiques utilisés pour les traitements de surface ont été modélisés, par contre leurs transports des pays de fabrication n'ont pas été considérés par manque des données. En ce qui concerne le savon ou tout autre produit pour accompagner le lavage des mains, ils ne sont pas modélisés et sont aussi considérés externes au système, c'est-à-dire que l'aptitude du robinet à « dé-savonner » rapidement les mains avec peu d'eau n'est pas pris en compte (il faudrait lancer des expérimentations après coup avec des prototypes).

2.2.1.2. Analyse de l'inventaire du cycle de vie

Pour réaliser une ACV du mitigeur on doit chercher les différentes données qui interviennent sur chaque étape de son cycle de vie. C'est l'étape d'analyse de l'inventaire de cycle de vie qui se caractérise par l'évaluation des intrants et des extrants des procédés unitaires qui composent le système global. Dans notre cas, les données relatives au mitigeur sont introduites dans le logiciel d'analyse environnementale simplifiée « Bilan Produit » diffusé par l'ADEME (ADEME, 2008).

Les données de la phase de production ont été extraites directement de l'entreprise fabricante. Pour cette phase l'inventaire inclut le carburant et l'électricité consommés par toutes les opérations unitaires : fusion du laiton, tournage, fraisage, perçage, chromage, etc. (voir Annexe 1). L'inventaire idéal inclurait les informations liées à l'extraction et au raffinage des carburants fossiles utilisés pour la production de l'électricité achetée par la mine. Il inclurait aussi tous les déchets et l'ensemble des émissions atmosphériques causées par le raffinage et la combustion dans une centrale du carburant pour produire cette énergie. Le mitigeur de lavabo considéré passe, lors de la phase de production, par différentes étapes. Chacune de ces étapes génère un certain nombre d'impacts.

L'inventaire de la Phase de production du robinet est présenté dans la figure 2.8. Les données utilisées pour cette ACV sont illustrées dans le tableau 2 de l'Annexe 1).

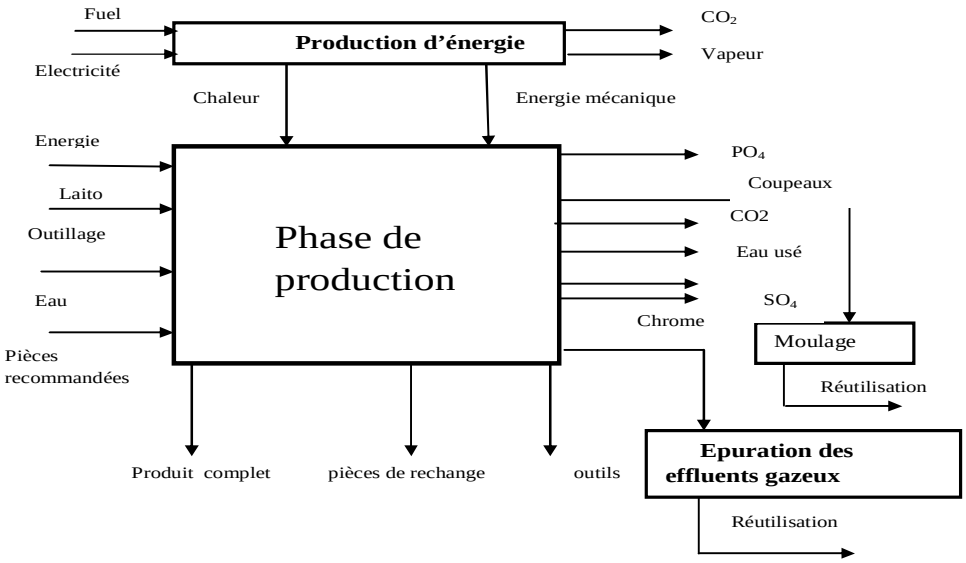


Figure 2. 8 Inventaire des intrants sortants de la phase de production du mitigeur

Pour la phase de transport ; la matière première est transportée d'un atelier à une vingtaine de kilomètres de l'entreprise du mitigeur étudié, mais la distribution est orientée vers le marché local (environ 80%) et au marché Algérien (environ 20%). Le tableau 3 de l'annexe 1 illustre les données introduites. L'inventaire de cette phase est présenté dans la figure 2.9.

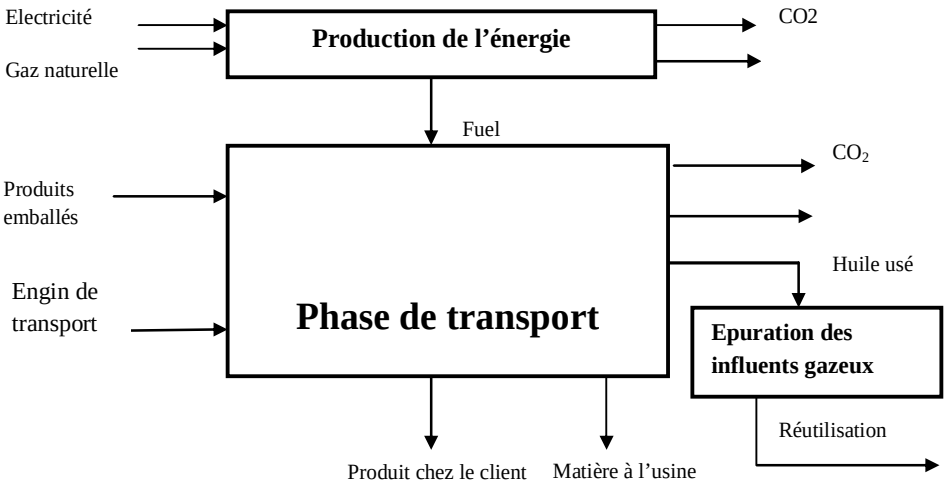


Figure 2. 9 Inventaire des intrants sortants de la phase du transport

Concernant la phase d'usage, les données que nous avons introduites sont déterminées à partir d'une expérience réalisée sur une trentaine de personnes de différents âges avec une utilisation journalière moyenne. Environ 900L/personne en

une année représente la quantité d'eau délivrée par le mitigeur étudié. On considère en moyenne une famille de 4 personnes, leur consommation annuelle est de 3600 L/an. Cette consommation est présentée dans le tableau 4 de l'annexe 1 et l'inventaire est présenté dans la figure 2.10.

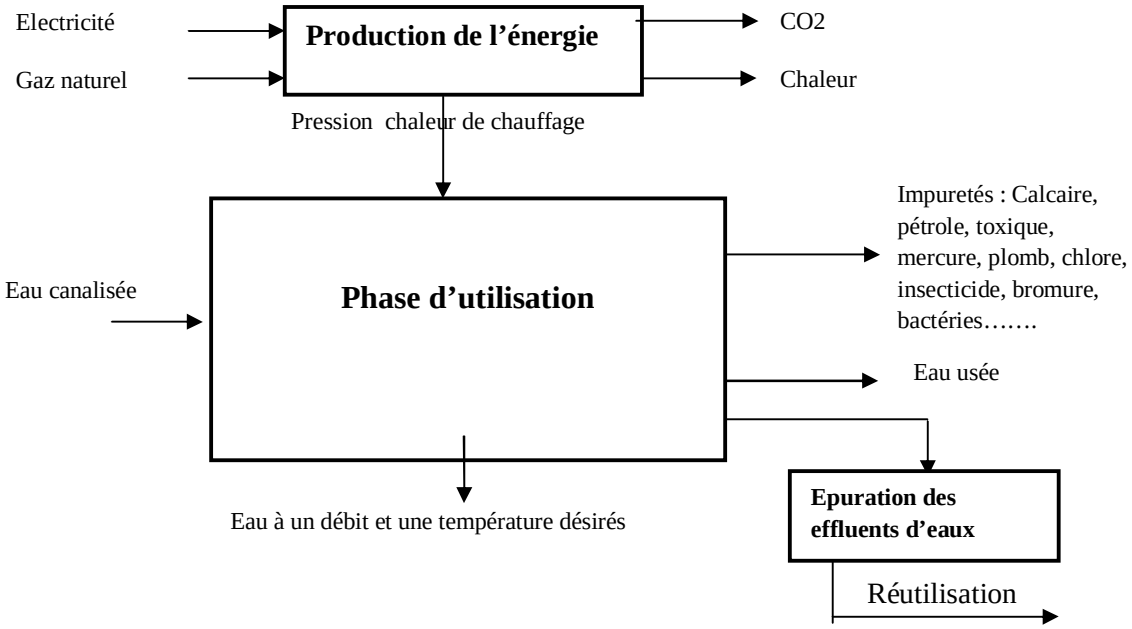


Figure 2. 10 Inventaire des intrants sortants de la phase de production du mitigeur

Quant à la phase de fin de vie, les données sont fournies par l'industriel, par l'Institut National de la Statistique et certains ferrailleurs en Tunisie. Les pourcentages de fin de vie sont des valeurs moyennes relatives à chaque matériau des différents composants du mitigeur.

Dans « Bilan Produit » Il existe 3 scénarios possibles : scénario déchets ménagers, scénario déchets encombrants enfin le scénario « pas de fin de vie ». A partir de la quantité de recyclage estimée précédemment nous avons choisi le scénario de « déchets encombrants » et nous avons établi le tableau 5 de l'annexe 1 et l'inventaire est présenté dans la figure 2.11.

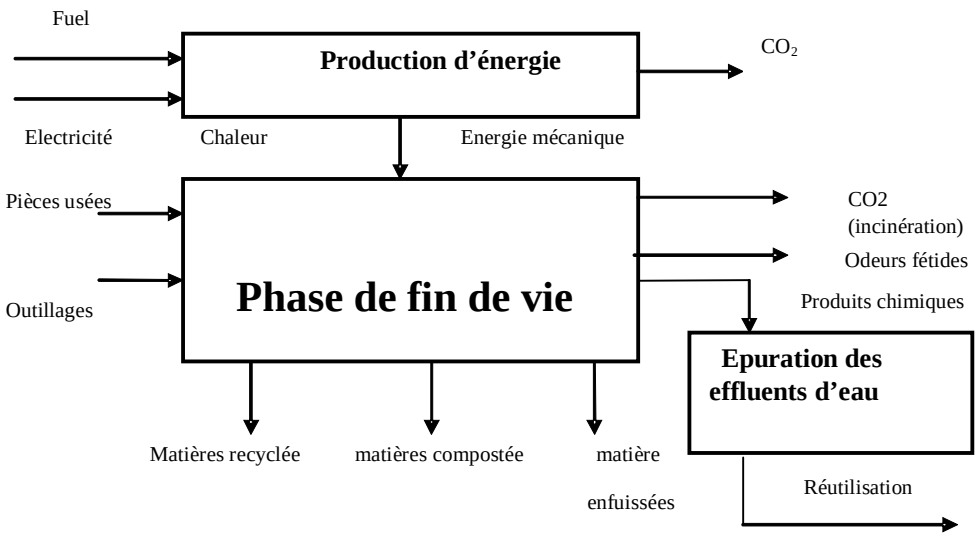


Figure 2. 11 Inventaire des intrants sortants de fin de vie

2.2.1.3. Evaluation des impacts sur l'environnement

Pour rendre les chiffres donnés suite à un inventaire du cycle de vie (ICV) compréhensibles et réduits en nombre pour les non experts environnementaux, il est nécessaire de transformer les flux environnementaux en indicateurs d'impacts environnementaux potentiels. Cela présente l'objectif de la troisième étape d'une ACV. Pour se faire de nombreuses méthodes de calcul d'impacts ont été élaborées. Ces différentes méthodes ont été classées dans deux grandes catégories ; les méthodes « orientées problème » (Mid-point), (impact au milieu de la chaîne de causalité) qui quantifient les effets globaux des substances émises ou consommées et les méthodes « orientées dommage » (End-point) à la fin de la chaîne de causalité) qui se proposent de quantifier les dommages potentiels qui pourraient en résulter.

- *Les méthodes « orientées problème » (Mid-point)*

Ces méthodes modélisent l'impact relativement proche du flux environnemental et ne concernent donc qu'une partie du mécanisme environnemental. Leur avantage est de limiter l'incertitude, cependant la pertinence des indicateurs en termes de communication est relativement faible. Exemple de méthodes mid-point : CML (Guinée et Heijungs, 1992), baseline 2001 (Guinée et al, 2002), EDIP 97 ou 2003 (Hauschild et al, 2009), etc. Les catégories d'impact communément prises en compte dans les méthodes Mid- point sont :

- ✓ Le réchauffement climatique,
- ✓ l'appauvrissement de la couche d'ozone,
- ✓ la formation d'ozone troposphérique,
- ✓ l'acidification,
- ✓ l'eutrophisation,
- ✓ la toxicité,
- ✓ l'écotoxicité,
- ✓ l'épuisement des ressources,
- ✓ l'occupation des sols.

- *Les méthodes dites « orientées dommage » (end-point)*

Ces méthodes modélisent l'impact relativement loin dans le mécanisme environnemental, c'est-à-dire directement en tant que dommages sur la santé humaine, les écosystèmes et les ressources. Ces indicateurs présentent plus de pertinence en matière de communication et sont donc plus facilement utilisables, mais leur modélisation est plus incertaine du fait de la complexité du mécanisme et des difficultés à le modéliser entièrement. Les méthodes end-point sont souvent utilisées en interne par l'entreprise. Les catégories d'impact communément prises en compte dans les méthodes end- point sont :

- ✓ La santé humaine,
- ✓ la qualité des écosystèmes,
- ✓ l'épuisement des ressources.

Exemple de méthodes end-point : Eco-Indicateur 99 (Geodkoop, et Sprienxma, 1999), EPS (Steen, 2000). Cependant il existe quelques méthodes d'évaluation environnementale qui modélisent les impacts à la fois au niveau mid-point et end-point (Goedkoop et al, 2009) mais très peu sont réellement exhaustives en fournissant des indicateurs pour toutes les catégories d'impact (IMPACT 2002+ (Humbert et al, 2005), etc.).

- *Evaluation environnementale avec Bilan Produit*

La réalisation d'une ACV du mitigeur avec « Bilan Produit ». Les résultats s'affichent sous forme d'une série de tableaux, dans lesquels les résultats sont exprimés de manière brute et d'une série d'histogramme dans lesquels les résultats sont normés. Bilan produit génère les résultats suivants :

- ✓ Impacts par phase de vie,
- ✓ impacts par Sous-ensemble - Phase de Production,
- ✓ impacts par Sous-ensemble - Phase de Transports,
- ✓ impacts par Sous-ensemble - Phase Utilisation,
- ✓ impacts par Sous-ensemble – Phase de Fin de vie.

Pour Bilan Produit la méthode utilisée pour le calcul d'impacts environnementaux est la méthode CML qui est une méthode de type « Mid-point » qui respecte la procédure de normation lors de l'évaluation environnementale. Dans cette méthode, les impacts environnementaux sont calculés en quatre étapes : la classification, la caractérisation, l'évaluation et normation (Guinée et Heijungs, 1992). La représentation graphique est en Mid-points dans un score unique. Les impacts considérés pour chaque composant et chaque phase sont les suivants :

- ✓ Consommation énergie NR (MJ eq),
- ✓ consommation ressources (kg Sb eq),
- ✓ effet de serre GWP 100 mod (kg CO2 eq),
- ✓ acidification (kg SO2 eq),
- ✓ eutrophisation (air eau sol) (kg PO4 eq),
- ✓ pollution photochimique (kg C2H4),
- ✓ ecotoxicité aquatique (kg 1,4-DB eq),
- ✓ toxicité humaine (kg 1,4-DB eq).

Les indicateurs d'impacts sont exprimés dans des unités difficilement compréhensibles en elles-mêmes (kg CO2 éq., kg SO2 éq...). La normation s'effectue en effectuant le rapport entre la valeur de l'impact du produit et la valeur de référence de la normation.

La normation retenue dans ce logiciel prend pour référence la consommation quotidienne moyenne d'un européen (Europe des Quinze). Les résultats sont alors exprimés en point.Il est possible de modifier ces paramètres pour changer de zone géographique, ou de période.

Cela nécessite d'y réfléchir sérieusement et commence une importante recherche documentaire pour s'assurer que les valeurs retenues sont bien homogènes entre elles (même zone géographique, même période temporelle, même méthode de comptabilisation des flux d'un indicateur à l'autre).

La figure 2.12 présente les résultats de l'ACV pour les différentes phases du cycle de vie considérées.

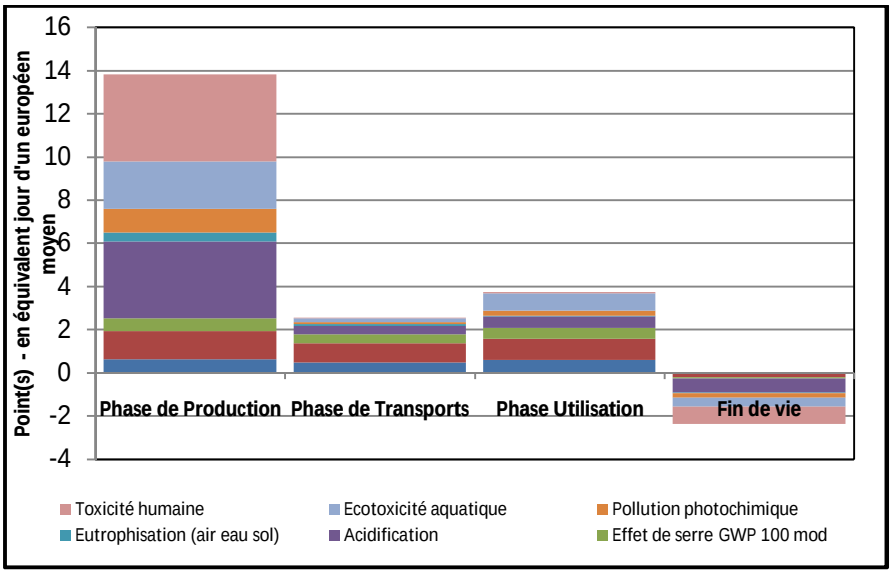


Figure 2. 12 Impacts du mitigeur par phase de vie

2.2.1.4. Interprétation et localisation des sources d'impacts

En se référant à la figure 2.12, on constate que la phase de production est la phase la plus impactante en tant que rejets dans la nature sous forme des déchets ou des produits chimiques.

Pour l'étape du transport il y a plus de consommation de carburant qui engendre un dégagement de CO2 dans l'air.

Quant à la phase d'utilisation la consommation d'eau est importante tout au long du cycle de vie du produit ainsi que la matière rejetée dans le fluide qui présente un menace sur la santé de l'utilisateur dans lequel des particules novices telle que les bactéries, le calcaire, le plomb, etc.

Enfin pour la phase de fin de vie la plupart des impacts sont sous formes des rejets dans l'air et dans le sol, d'où il est nécessaire de réduire ces rejets.

A partir des résultats d'ACV trouvés sur « Bilan Produit » il est clair que la phase de production est la plus impactante suivie de la phase d'utilisation (les IEx sont dus à la quantité d'eau consommée) puis la phase fin de vie et la phase du transport. Pour localiser l'élément qui contribue le plus à la génération des IEx durant la phase de

production, une illustration, dans la figure 2.13, des impacts générés par les différents composants lors de la phase de production montre que le composant le plus impactant est le corps du mitigeur et, plus précisément, la quantité du laiton utilisée, qu'on localise comme le paramètre le plus influençant sur l'éco-conception du mitigeur . Le paramètre matière est lié au paramètre quantité liée aux dimensions du mitigeur. Les dimensions utilisées pour réaliser le corps du mitigeur ne sont pas optimisées et elles peuvent certainement être réduites sans influencer le fonctionnement du système (mitigeur assemblé) global.

On constate que les phases les plus impactantes durant le cycle de vie d'un mitigeur sont : la phase de production (par la quantité de matière utilisée dans la réalisation du corps) et la phase d'utilisation (par la quantité d'eau moyenne consommée par une famille de 4 personnes pendant sa durée de vie). D'où on cherche à minimiser ces impacts par des modifications dans la conception qui sert à minimiser la quantité consommée durant la phase d'utilisation, de notre produit. De plus, il est aussi nécessaire d'agir sur la phase de production en jouant sur la quantité de la matière utilisée, les procédés de fabrications et les solutions technologiques.

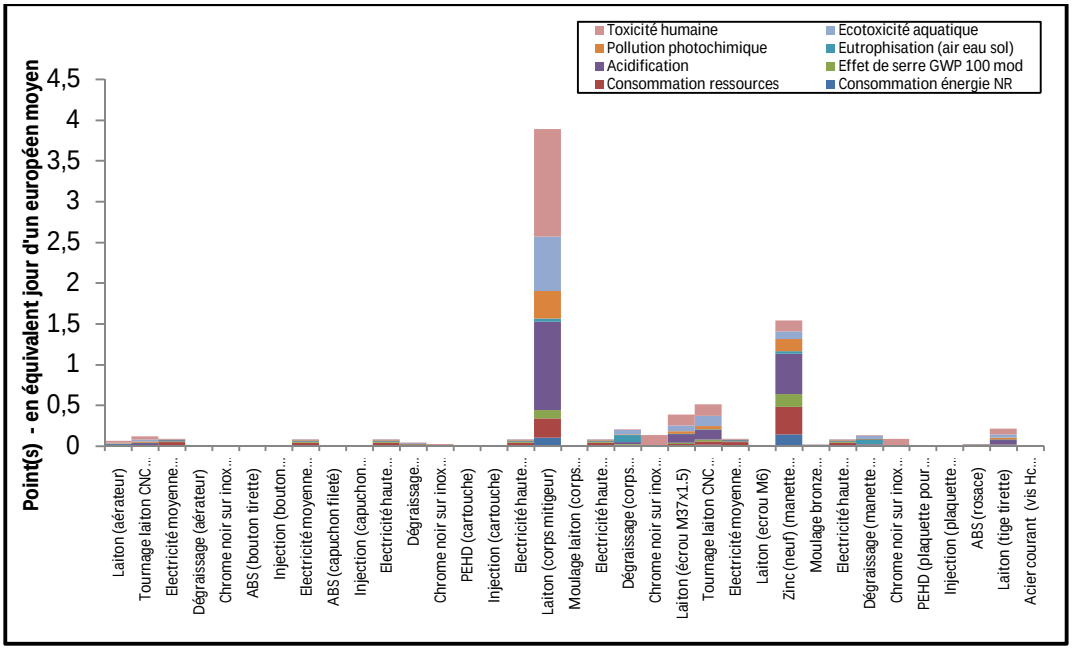


Figure 2. 13 Impacts par sous-ensemble : Phase de Production

Cela nous emmène à agir sur les DDLs nécessaires pour préciser la zone d'action exacte du concepteur afin de réduire les centres d'impacts environnementaux du

produit étudié. D'où, les directives d'amélioration environnementale à suivre sont les suivantes : Réduire la masse du corps du mitigeur et le débit d'eau maximal (le débit ne pas être modifié s'il est imposé dans le CDCF. Dans notre cas, on suppose qu'on peut agir la dessus).

2.2.2. Proposition d'une nouvelle conception du mitigeur et analyse ACV comparative de des mitigeurs proposés (Action sur les DDLs cibles)

D'après la section précédente, des directives d'amélioration environnementale ont été proposées ; la première est la réduction de la masse du corps du mitigeur et la deuxième la réduction du débit d'eau maximal. Cela modélise bien la troisième phase du processus « ELA » qui est l'étape d'action (Agir).

Nous avons alors apporté des modifications à la géométrie (DDL_{volume}, $DDL_{dimensions}$ et DDL_{formes}) qui ont permis de réduire la masse du corps du mitigeur de 1.101kg à 0,469kg. Tout en supposant que la durée de vie est constante et qu'elle est donnée dans le cahier des charges fonctionnel. En effet, les pièces sont supposées respecter cette durée de vie et ne pas la changer. Dans cette solution, comme le montre la figure 2.14, on a choisi de limiter le débit d'eau par la réduction de l'angle d'ouverture des orifices de la cartouche (commandé par la manette) par des obstacles sur le capuchon fileté d'un angle de 60° à une ouverture de 30°, ce qui réduit le débit de 6litres/minute jusqu'à 3litres/minute ($DDL_{dimensions}$).

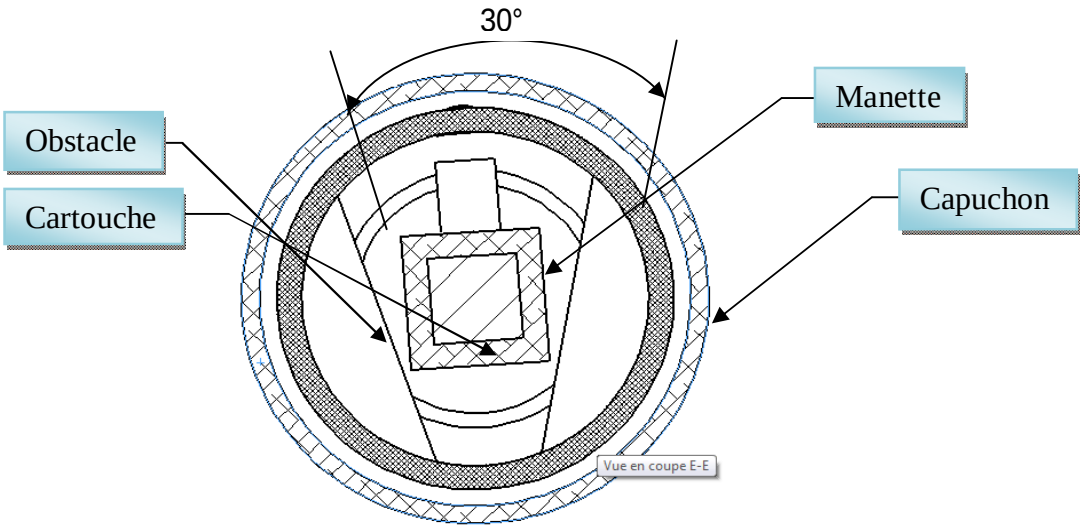


Figure 2. 14 Principe de la solution technologique (vue en coupe)

En appliquant les changements sur le mitigeur initial on obtient la nouvelle solution illustrée dans la figure 2.15 qui présente le modèle géométrique éco-conçu qu'on a développé.

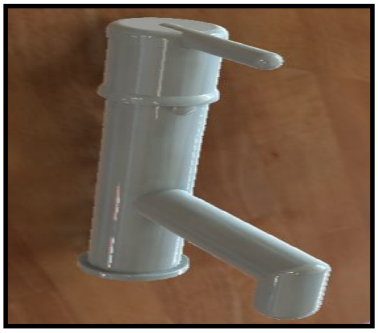


Figure 2. 15 Mitigeur proposé

Une ACV, pour la nouvelle conception proposée, a été réalisée avec les nouvelles valeurs concernant la géométrie modifiée. La figure 2.16 présente l'ensemble des impacts générés sur toutes les étapes du cycle de vie du mitigeur proposé ou il y a prise en considération de directives proposées (réduction de la quantité du laiton et du débit d'eau).

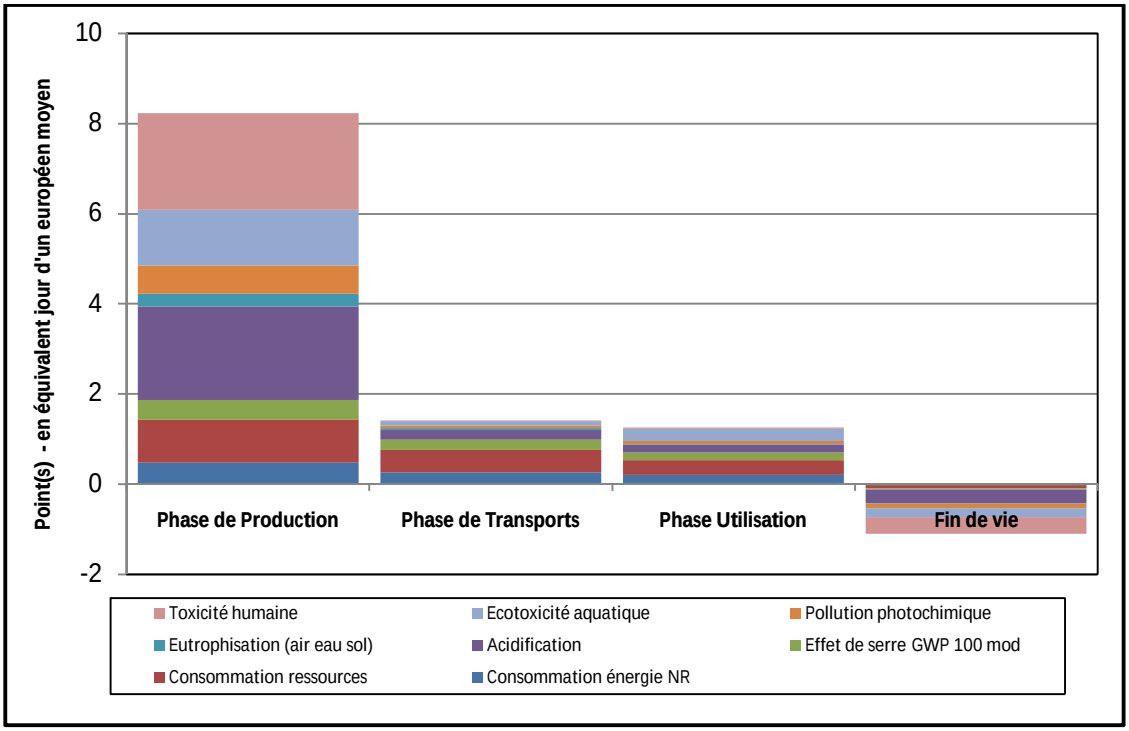


Figure 2. 16 Impacts par phase de vie du mitigeur modifié proposé

L'IE dû à la masse du corps, impact principal, a été réduit d'environ 6 points (de 14 points vers 8 points). De même pour la phase d'utilisation l'impact est réduit d'environ 50% (de ≃4 points vers ≃2 points). La figure 2.17, qui est une comparaison de trois ACVs de trois mitigeurs, est établie pour visualiser l'effet des optimisations effectuées en termes d'amélioration environnementale. Les trois mitigeurs considérés sont le mitigeur initial (Carthage), le mitigeur proposé avec moins de quantité de matière et à débit initial et le mitigeur proposé avec moins de matière et à débit réduit.

Dans cette comparaison on constate une diminution des valeurs d'impacts pour chaque phase de vie par rapport au produit fabriqué par les AMS. De plus, d'après la figure 2.17, on remarque que l'amélioration environnementale consiste à la réduction de l'impact environnemental total (de≃ 18 points vers≃ 12 points), pour seulement la réduction de la quantité de matière du corps u mitigeur. Cependant, la réduction des IEs est plus importante (de ≃18 points vers ≃10 points) lorsque, d'une part, la masse du corps est diminuée et d'une autre part l'angle d'ouverture du mitigeur est réduit.

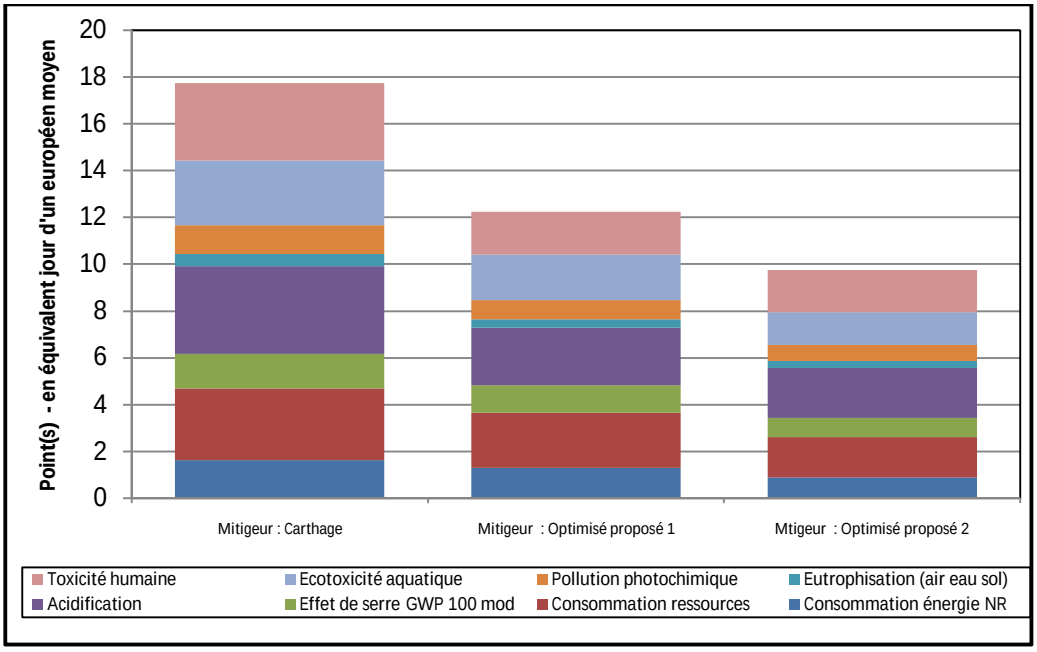


Figure 2. 17 Comparaison des résultats d'ACV entre le mitigeur Carthage et les mitigeurs proposés 1 et 2

Conclusion

Dans ce chapitre on présente la démarche d'éco-conception (ELA) dans sa globalité considérant :

- une étape d'évaluation (E) : analyse du cycle de vie de la solution à l'état 1 en considérant plusieurs phases : production, transport, utilisation et fin de vie du produit
- une étape de localisation (L) pour identifier quelles sont les variables de conception sur lesquelles on peut agir
- une étape d'action (A) : durant laquelle une analyse de la « meilleure solution » est réalisée

Cette démarche se base sur la notion d'eco-feature et de DDL (degrés de liberté).

Chapitre 3 : Proposition d'une nouvelle démarche d'éco-conception lors de la conception de détails en CAO

Introduction

A une étape avancée dans le processus de conception et lors de la phase de modélisation géométrique en CAO, les choix de conception sont déjà effectués à 80%. D'où ça devient difficile d'intégrer la contrainte environnement et améliorer la qualité écologique des produits. Cependant, malgré la zone d'action assez restreinte à ce stade, la majorité des impacts environnementaux d'un produit sont dus aux choix effectués lors de cette phase.

Dans ce chapitre, on propose une méthodologie d'éco-conception adaptée à la phase de modélisation géométrique en CAO. Cette méthodologie permet d'évaluer les impacts environnementaux, localiser les sources de ces impacts et agir sur les degrés de liberté nécessaires pour améliorer les performances environnementales du produit en cours de modélisation. L'application de cette démarche à été réalisée sur un mitigeur de lavabo.

3.1. Description de la démarche

Le modèle proposé est conçu pour donner des informations d'éco-conception à partir des données géométriques et fonctionnalités présentes en CAO (matériau, processus de fabrication). Il est basé sur deux étapes. La première est une approche spécifique qui consiste à l'évaluation des impacts environnementaux d'une géométrie donnée et localiser leurs sources afin de pouvoir agir sur les degrés de liberté les plus influençants sur l'éco-conception des deux premiers niveaux de conception CAO (*feature* et pièce). La deuxième étape est une approche globale et qui est focalisée sur l'éco-conception d'un produit en totalité (assemblage).

3.1.1 Modèle général

L'objectif principal de la méthode est de permettre une intégration de l'éco-conception basée sur une scénarisation, en temps réel, dans la phase conception de détails en CAO des produits industriels.

Une démarche d'éco- conception classique est divisée en deux grandes étapes : l'évaluation environnementale et l'amélioration environnementale. D'une évaluation environnementale initiale (souvent basée sur des Analyses du cycle de vie ou ACV simplifiées pour localiser les sources d'impacts), émergent les recommandations de conception pour améliorer la performance environnementale globale du produit tout au long de son cycle de vie.

La méthodologie proposée maintient cette architecture globale, qui est mise en œuvre dans la phase de conception de détails, en utilisant les données portées par les *features*, pour passer, par la suite aux pièces et arriver jusqu'au produit en sa totalité. Pour cela la méthode est spécifiquement appliquée aux *features* (premier niveau) et aux pièces (second niveau) dans un premier temps et globalement pour un assemblage dans un second temps. Elle est conçue pour démarrer à partir de l'amélioration des performances environnementales d'un *feature* et évoluer vers l'amélioration des performances environnementales d'un produit. La figure 3.1 illustre les étapes de la méthodologie. Les sections suivantes détaillent les différentes phases de la méthodologie appliquée sur les *features* puis sur les pièces (Approche spécifique).

3.1.2 Présentation de « E.L.A.»

Pour répondre à la question de recherche : Est-il possible d'éco-concevoir lors de la phase de modélisation géométrique et comment ? Une démarche est élaborée. Cette démarche permet au concepteur CAO de chercher les sources d'impacts dans un modèle géométrique afin d'agir sur les degrés de liberté qui lui restent.

La méthodologie proposée est un nouveau processus d'éco-conception centré sur la phase de conception de détails. L'étape de départ est un *feature* classique attribué par le concepteur à l'état initial, quand on lui applique l'approche « ELA » on obtient à l'étape finale un *feature* éco-conçu.

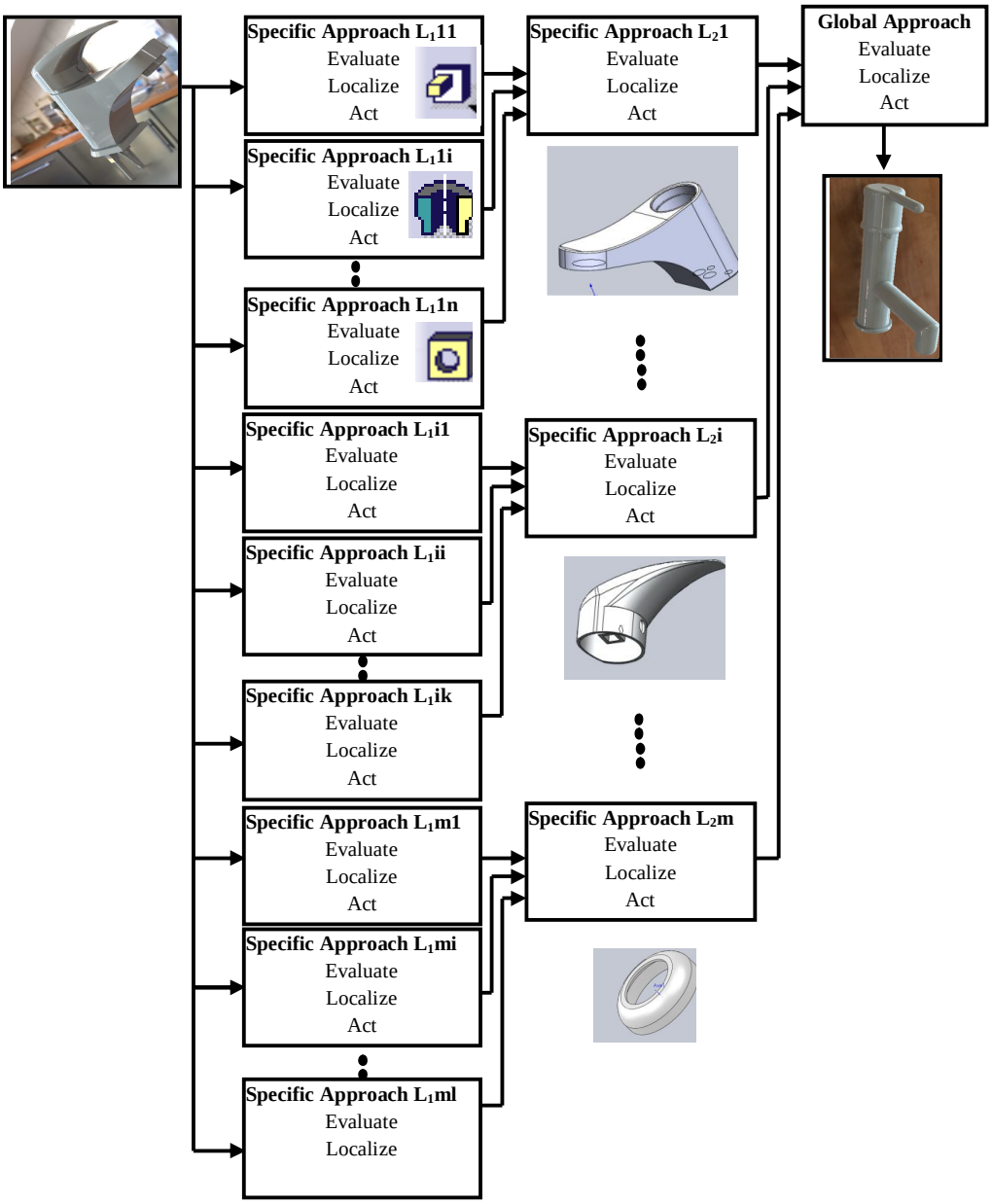


Figure 3. 1 L'approche spécifique par rapport à l'approche globale dans l'éco-conception des produits

La méthodologie « ELA » est divisée en trois étapes :

- Evaluer : Evaluer les impacts des différents scénarios possibles lors d'une conception séquentielle d'une pièce. Cette phase est divisée en trois sous-étapes pour sa part ; la première consiste à localiser un éco-feature, puis réaliser un inventaire des cycles de vie possibles de l'éco-feature considéré et enfin réaliser une analyse environnementale pour les différents scénarios.

- Localiser : Localiser les différents paramètres liés au feature représentant les sources d'impacts les plus élevés.
- Agir : Agir sur les différents degrés de liberté liés aux features sources d'impacts afin d'éco-concevoir la pièce. Cette phase est réalisée en deux étapes ; dans la première il y a identification des degrés de liberté de la zone d'action du concepteur ayant une influence signifiante sur la réduction des impacts environnementaux, et dans la deuxième étape il y a action sur ces DDLs pour améliorer les performances environnementales et choisir un scénario optimal.

3.1.3 Détermination des étapes de la démarche

Notre méthodologie consiste à explorer la technologie des *features* pour évaluer l'impact environnemental d'un produit lors de la phase de conception détaillée. L'influence des caractéristiques géométriques d'un produit sur la réduction de l'impact environnemental a été prouvé sur des travaux antérieurs (Gaha et al, 2011, 2014) où le concepteur a une zone d'action assez restreinte (figure 3.2), mais un impact environnemental important à réduire.

Nous caractérisons la zone d'action du concepteur au travers de 7 degrés de liberté (DDLs). Ce choix des DDLs lors d'un processus de conception de produit en CAO a été obtenu suite à une série de questionnaires remplis par les concepteurs utilisateurs des modeleurs géométriques. Seules les personnes de connaissances et de compétences spécifiques, dans la manipulation des environnements CAO, ont été interrogées car ils peuvent fournir une rétroaction significative aux questions posées, la taille de l'échantillon des utilisateurs interrogés était d'environ trente experts CAO. Les utilisateurs comprennent les designers industriels, les designers de bureau d'études, et les enseignants CAO / FAO.

Ces personnes ont des connaissances et des compétences dans la conception du produit en 3D lors de la CAO, dans les sciences des matériaux, dans l'élaboration des plans de processus de fabrication et dans l'ingénierie des logiciels et une connaissance minimale en éco-conception. Les questions ont porté sur leurs domaines d'action en

CAO et leurs degrés de liberté à ce stade dans le processus de conception du produit. Le nombre total d'utilisateurs impliqués dans l'étude est de 32 (voir Annexe 1).

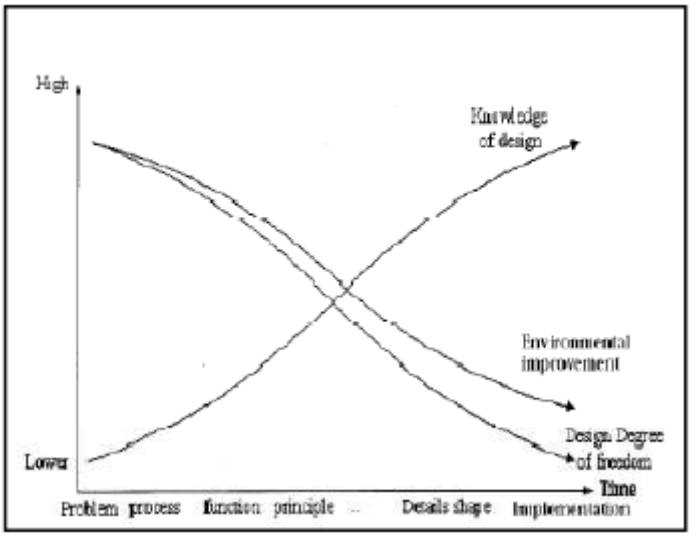


Figure 3. 2 Espace des solutions de conception en fonction du temps (Keoleian, 1993)

Voici les degrés de liberté de CAO restants pour le concepteur qui a été synthétisé à partir du questionnaire élaboré ; il s'agit d'une liste de 7 degrés de liberté (DDLs) qui sont spécifiques au produit d'étude « Mitigeur de lavabo » des AMS:

- DDL1 : Formes (nombre des faces, type de forme, etc.)
- DDL 2 : Dimensions (longueur, largeur, hauteur, diamètre, etc.)
- DDL 3 : Matériaux (type de matériau, densité, etc.)
- DDL 4 : Volumes (densité, dimensions, formes, etc.)
- DDL 5 : Processus de fabrication (type de procédé, temps d'usinage, vitesse de coupe, énergie consommée, machine outil, etc.)
- DDL 6 : Choix du « *make or buy* » (transport : faire localement si nous avons la technologie) (type de transport, distance, etc.)
- DDL 7 : Les traitements thermiques et de surface (type de traitement, durée, énergie, etc.)

Cette liste n'est pas exhaustive. Elle est spécifique à l'étude ainsi qu'aux acteurs impliqués dans cette étude. Le développement d'une approche plus générique pour l'identification de ces variables peut faire l'objet des futurs travaux en s'appuyant sur des modélisations des données qui permettent de formaliser les intervalles de valeurs

de chaque variable identifiée (en utilisant l'un des logiciels existants tels que CoDeMo, PPO, PPR, CPM, etc.).

Ces degrés de liberté peuvent être utilisés pour procéder à une éco-conception, car ils représentent les caractéristiques des *features*. Ils peuvent être reliés aux systèmes d'information tels les systèmes CAO, FAO, PPAO et PLM, comme indiqué dans le tableau 3.1.

Tableau 3. 1 Relation entre les systèmes d'information et les DDLs

systèmes d'information	**DDLs relatifs**
CAO	DDL1 : Formes DDL 2 : Dimensions DDL 3 : Matériaux DDL 4 : Volumes
FAO	DDL 5 : Processus de fabrication
PPAO	DDL 5 : Processus de fabrication
PLM	DDL 5 : Processus de fabrication DDL 3 : Matériaux DDL 6 : Choix du « make or buy » DDL 7 : Traitements thermiques et surfaciques

Le choix des DDLs implique une attribution d'un *feature*. Ce *feature* est le cœur d'un modèle CAO et la source de données d'entrée des systèmes d'ACV ou des interfaces de calcul environnemental intégrées dans les systèmes CAO. En se basant sur les différents travaux antérieurs qui ont exploré la technologie des *features* dans

des différents domaines, nous proposons une approche d'aide à la décision pour le concepteur pour pouvoir visualiser l'influence des paramètres choisis lors de la phase de conception de détails sur l'environnement.

En effet, Keoleian (1993) a montré qu'après une conception de détail d'un produit, une évaluation environnementale du cycle de vie complète (ACV) du produit peut être réalisée (Keoleian, 1993). A ce stade, les possibilités de modification de conception deviennent considérablement limitées. Cette condition est représentée graphiquement sur la figure 3.4. Dans la phase de conception préliminaire, l'espace de solution de conception est large, alors que dans la conception détaillée, l'espace de solution est restreint.

Le modèle qu'on propose, et qui s'applique à notre périmètre d'étude qui est le feature, consiste à montrer au concepteur l'impact environnemental du modèle CAO en temps réel dès qu'un *feature* est attribué. Ce *feature* porte les différentes informations sur les étapes de son cycle de vie ayant la possibilité de générer différents scénarios possibles. Cela introduit la notion *d'éco-feature* qui sera expliquée en détails dans le chapitre suivant. Cet *éco-feature* est la source d'information pour réaliser une évaluation environnementale et sur lequel se base la méthodologie présentée dans la figure 3.3. Elle présente un algorithme qui permet au concepteur de prendre conscience et visualiser, en temps réel, l'impact environnemental de chaque DDL choisi tout en lui présentant le scénario optimal en termes d'environnement. Cette méthodologie se compose de sept étapes (figure 3.3)

- La première étape se fait par le concepteur en sélectionnant un *feature* pour commencer la conception d'une pièce.
- A la deuxième étape, le concepteur attribue un matériau. Dans cette étape, le bon matériau peut ne pas être disponible ou représenté dans la base de données du système CAO utilisé, mais existe dans la base de données au sein du logiciel d'ACV. Dans ce cas, il a accès aux deux bases de données.
- La troisième étape est basée sur des systèmes CAO / FAO / PPAO. Dans cette étape, il y a une génération des scénarios possibles des différentes alternatives d'usinage. Où un scénario d'usinage est une description d'un procédé de fabrication dans lequel les changements d'états d'usinage sont décrits à la fois en termes des caractéristiques physiques et géométriques des procédés

d'usinage basés sur un modèle de la pièce produite par un système CAO (Takata et Shozo, 1993). Ce modèle est exploré par les systèmes FAO afin de générer automatiquement des scénarios d'usinage possibles et, par la suite, les systèmes PPAO sont basés sur la modélisation des données de conception en termes de *features* de fabrication afin de générer des plans de processus alternatifs pour chaque scénario d'usinage proposé (Deja et Siemiatkowski, 2012)).

- Dans la quatrième étape, l'évaluation environnementale (EE) est réalisée et le concepteur ne fournit que l'unité fonctionnelle (UF). Dans le cas d'étude de notre mémoire, nous proposons que l'UF soit liée à l'ensemble du produit et non pas à une pièce du produit malgré que certaines études ont montré que l'UF d'une pièce d'un système n'est pas forcément celle du produit en sa totalité (Collado-Ruiz et Ghorabi, 2009)) et les données nécessaires à la réalisation d'une évaluation simplifiée quantitative du cycle de vie (ESQCV) sont extraites automatiquement à partir des systèmes intégrés CAO / FAO / PPAO et les systèmes intégrés CAO / PLM. Ces données sont portées par les éco-features et peuvent être extraites à l'aide d'un algorithme générique qui sera décrit dans le chapitre suivant.
- La cinquième étape consiste à montrer graphiquement les résultats d'IEx, après avoir effectué un calcul d'impact environnemental avec la méthode CML qui est une méthode qui respecte la procédure de normation lors de l'évaluation environnementale. Dans cette méthode, les impacts environnementaux sont calculés en quatre étapes : la classification, la caractérisation, l'évaluation et la normation (Guinée, Heijungs, 1992). La représentation graphique est en *End-points impacts* (les ressources, la santé humaine et les dommages Ecosystème) dans un score unique. Cela permet au concepteur non expert en termes d'environnement de comprendre les impacts environnementaux (IEx). Cette étape est la dernière étape d'une ACV selon la norme ISO 14040.
- La sixième étape consiste à rapporter les IEx aux DDLs avec l'aide d'un modèle de plan hiérarchique analytique (PHA). En effet, chaque IE généré est

dû à un choix d'un ensemble de DDLs où chaque DDL a une influence sur un IE. C'est à dire un IE_i peut être calculé par l'équation (1) :

$$IE_i = \sum_{k=1}^{k=7} IE_{i\ DDLk} \qquad (Eq.\ 3.1)$$

Où $IE_{i\ DDLk}$ est la valeur de l'impact environnement généré par un des sept degrés de liberté déterminés). Grâce à une matrice de hiérarchisation du système en utilisant le processus du plan d'analyse hiérarchique (PAH), qui est une méthode de comparaison quantitative, développée par Saaty en 1980 (Saaty, 1980), les degrés de liberté les plus influents en termes d'éco-conception peuvent être mentionnés pour aider le concepteur CAO à prendre des décisions. Plus de détails sur cette étape sont décrits dans les chapitres suivants.

- La septième étape consiste à agir sur les DDLs les plus influençants restant possibles pour améliorer les performances environnementales de la pièce. Lors de cette phase une optimisation multi-critère pourra être déclenchée s'il y a une création ou une modification des features. Ce travail est envisageable dans des travaux futurs vue la contrainte temps allouée à l'étude.
- La huitième étape est atteinte lorsque le test « la conception de la pièce est terminée » est positif, sinon les étapes 3, 4, 5 et 6 sont refaites.

Cette nouvelle méthodologie d'éco-conception destinée pour la conception de détails est réalisée en se référant au processus « ELA ». En effet, les quatre premières étapes présentent la première phase d'ELA qui consiste en l'évaluation environnementale. La cinquième étape caractérise sa deuxième phase qui correspond à la localisation des sources d'impacts. Tandis que la sixième et la septième étapes présentent les étapes de sa dernière phase qui est la phase d'action et d'amélioration environnementale en fonction des DDLs les plus influençants sur l'éco-conception du produit en cours de modélisation géométrique.

Dans ce mémoire, pour la première phase de l'éco-conception et qui est l'évaluation environnementale nous procédons par la pratique d'une ESQCV sur la base du travail effectué par Morbidoni et al. (2011) où la base de données utilisée est une source ouverte.

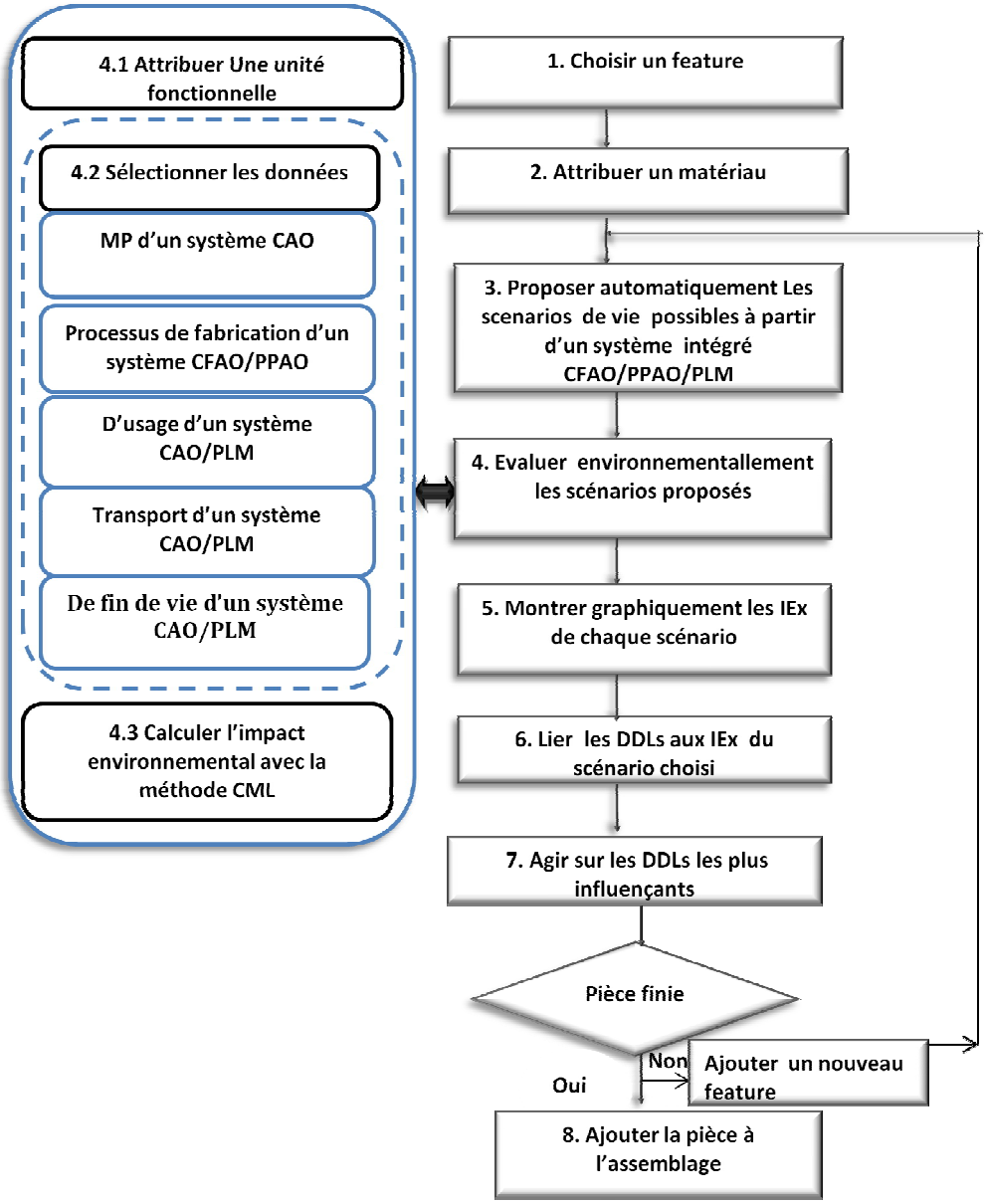


Figure 3. 3 Méthodologie d'éco-conception proposée pour la conception de détails

La figure 3.4 traduit la méthodologie proposée et représente un modèle d'un nouvel outil d'éco-conception, que l'on nomme « *ELA-GreenCAD* ». Il est composé d'un connecteur qui recueille les données nécessaires pour l'outil d'EE à partir des systèmes CAO, FAO, PPAO, PLM et ACV. Une fois l'évaluation environnementale effectuée, une représentation graphique est affichée pour le concepteur. Le graphique permet de

voir, à travers l'interface utilisateur, le scénario optimal de différents scénarios de vie proposés ainsi que les DDLs responsables des IE majeurs.

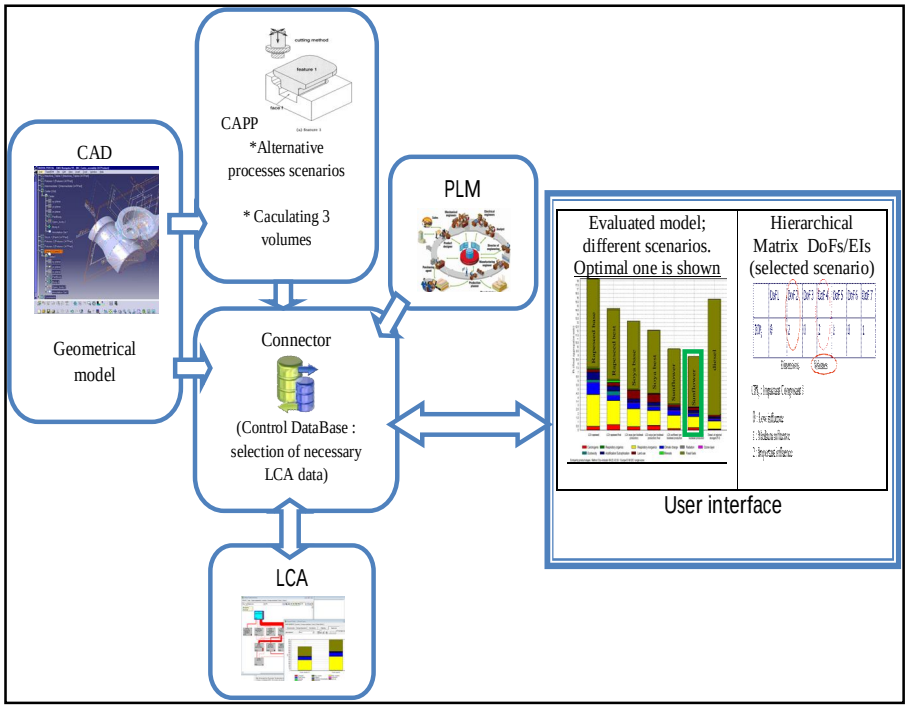


Figure 3. 4 Modèle d'interface de la méthodologie d'éco-conception proposée

3.2. Application et validation sur le corps d'un mitigeur de lavabo

Pour valider notre méthodologie on procède par l'illustration d'un cas d'étude. On considère la pièce présentée par la figure 3.5 qui est le corps du mitigeur étudié dans le chapitre 2.

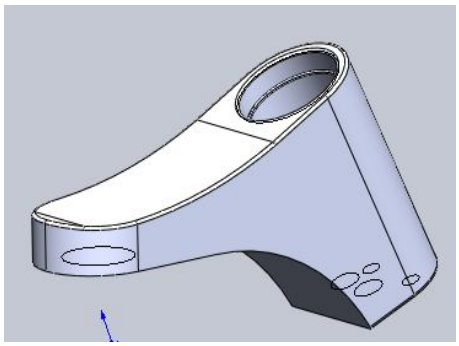


Figure 3. 5 La pièce corps du mitigeur

3.2.1. Détermination de la zone d'action du concepteur CAO

D'après les concepteurs du bureau d'étude de la société AMS, les DDLs qui leurs restent sont les suivants :

- DDL1 : Formes (cylindriques, prismatiques, quelconques, etc.)
- DDL 2 : Dimensions (longueur, largeur, diamètre, épaisseur, etc.)
- DDL 4 : Volumes

Des DDLs sont rapidement éliminés et les raisons de leur élimination sont les suivantes :

- DDL 3 qui présente le matériau est éliminé par sa définition dans le CDCF (cahier de charges fonctionnel) établie par l'industriel (Le laiton est très facile à usiner et on l'utilise depuis longtemps pour la fabrication de robinetterie).
- DDL 5 qui est le processus de fabrication est aussi utilisé de puis longtemps et qui consiste d'abord à réaliser la forme globale par moulage et les détails intérieurs par usinage.
- DDL 6 qui est le choix du « *make or buy* ». Le corps est réalisé en interne sauf que le lingot du laiton vient de l'extérieur, mais les 80% de la matière perdue lors de l'usinage sont recyclés en interne.
- DDL 7 qui présente les traitements thermiques et de surface. Pour le corps du mitigeur les traitements considérés sont des traitements de surface qui sont le dégraissage et le chromage.

Ces variables sont issues d'un questionnaire et elles sont spécifiques à l'étude du mitigeur et aux acteurs impliqués dans cette étude. Cependant la liste n'est pas exhaustive pour d'autres produits et de là une identification des variables à utiliser par une autre approche de manière plus générique sera une bonne perspective complémentaire de notre méthodologie.

L'espace des valeurs de chacune des variables est également spécifique au cas du mitigeur. S'appuyer sur des modélisations de données qui permettent de formaliser ces intervalles de valeurs (cf. CoDeMo, PPO, PPR, CPM…) pourra être une perspective pour des futurs travaux.

La zone d'action semble bien réduite pour le concepteur mais il peut tout de même encore agir sur les DDLs qui lui restent et réaliser une amélioration significative des performances environnementales. La section suivante illustre comment une identification des problèmes de conception, lors de la CAO, peut diriger le concepteur vers le bon choix de DDLs qui lui restent.

3.2. 2 Identification des problèmes de la conception CAO d'un mitigeur par une construction séquentielle du modèle géométrique

A partir de l'arbre de construction présenté dans la figure 3.6 du mitigeur, les *features* utilisés sont divisés en deux groupes ; le *feature* extrusion pour donner du volume et les *features*, trou, poche et congé pour enlever de la matière. A partir de ces données, le concepteur peut estimer la quantité du brut nécessaire pour obtenir la forme finale avec moins de matière perdue. Cependant, la quantité de matière utilisée n'est pas fonctionnelle et elle peut être réduite. Son influence sur la génération des impacts environnementaux peut être testée avec une ACV simplifiée sur toutes les étapes du cycle de vie du produit. Cette quantité de matière est liée aux DDL 1,2 et 3.

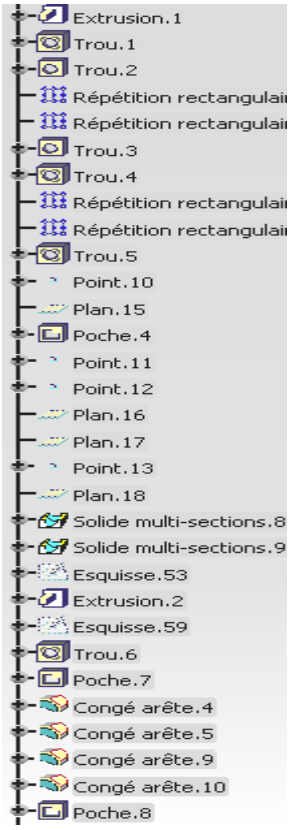


Figure 3. 6 Arbre de construction CAO du mitigeur de lavabo

En effet en agissant sur la forme, les dimensions ou encore les volumes, la quantité de matière peut varier. Le nombre de trous réalisés, s'il est réduit, peut réduire l'IE. De même, si la forme extrudée est réduite ou modifiée, cela peut aussi réduire l'IE.

Cette modélisation géométrique peut ainsi donner des informations qui peuvent servir à réaliser une évaluation environnementale simplifiée pour prévoir l'IE des choix faits en temps réel.

3.2.3 Evaluation et localisation des sources d'impacts par une ACV simplifiée

Dans notre étude, le calcul d'impact environnemental est réalisé avec la méthode de calcul CML utilisée dans le logiciel d'ACV simplifiée développé par l'ADEME « Bilan Produit » (ADEME, 2008) pour pratiquer des ACV simplifiées. La base de données utilisée est établie en collaboration avec le centre EcoInvent, Centre Suisse pour les inventaires du cycle de vie (Bilan produit, 2008), dans le but d'analyser l'impact environnemental de chaque scénario et de les comparer. En utilisant la méthode CML (Guinée, Heijungs, 1992), les impacts calculés sont présentés en fonction des catégories considérées suivantes pour chaque étape : La consommation d'énergie NR (MJ eq), les ressources (kgSb eq), l'effet de serre GWP 100 mod (kg CO2 eq), l'acidification (kg SO2 eq), l'eutrophication (air ground water) (kg PO4 eq), la pollution photochimique (kg C2H4), l'écotoxicité aquatique (kg1.4-DB eq) et la toxicité humaine (kg 1.4-DB eq). Ces indicateurs d'impacts sont exprimés en des unités compréhensibles par des concepteurs non experts en termes d'environnement. La normalisation se produit en prenant le rapport entre la valeur de l'impact du produit et de la valeur de référence de la normalisation. La normalisation retenue dans ce logiciel prend comme référence la consommation quotidienne d'un européen moyen. Les résultats sont exprimés en points.

Pour comparer deux alternatives iso-fonctionnelles en termes d'écologie, il est nécessaire de définir la notion d'unité fonctionnelle qui est établie à partir des principales caractéristiques techniques du produit étudié, ainsi que le coefficient de l'unité fonctionnelle (CUF) ou encore appelé nombre de flux de référence (NFR). Le NFR choisi pour cette étude est de 2,5 comme celui attribué au produit total précédemment.

De ce fait, on utilise ce logiciel pour calculer l'IE afin de localiser les sources de ces impacts. La figure 3.7 montre les impacts environnementaux générés par les différents sous-ensembles du corps du mitigeur sur toutes les étapes de son cycle de vie. On constate qu'au niveau des phases de production et celle d'utilisation, les impacts environnementaux sont relativement plus élevés. On peut donc conclure que ce produit consomme beaucoup des ressources et il est aussi un polluant aquatique. D'où on cherche à minimiser ces impacts par des modifications dans la conception qui sert à minimiser le débit d'eau, par suite minimiser la quantité consommée durant la durée de vie de notre produit. On doit aussi agir sur la phase de production en agissant sur la quantité de la matière utilisée, les procédés de fabrications et les solutions technologiques.

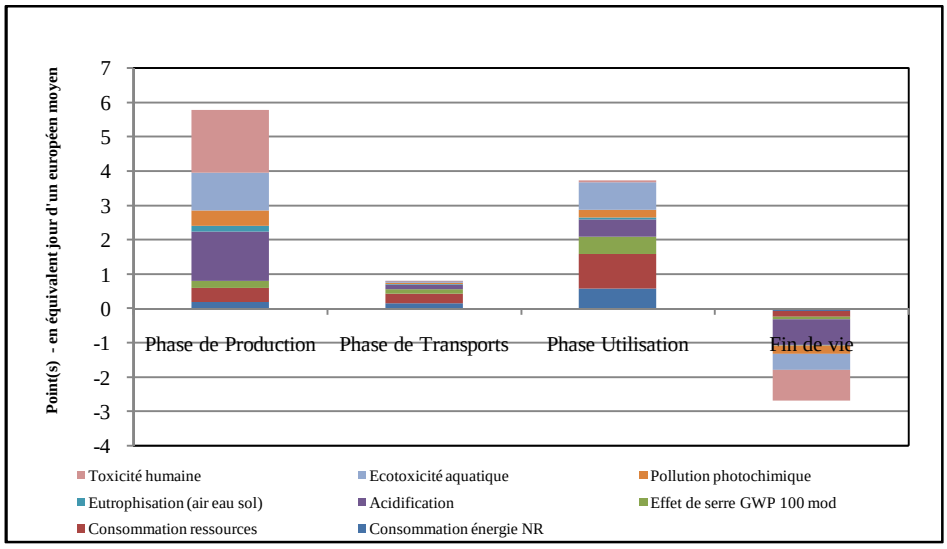


Figure 3. 7 Les IEx générés par phase de vie du corps du mitigeur

Pour localiser les sources d'impacts les plus influents, sur la phase la plus impactante qui est la phase de production, une analyse plus détaillée des sous-ensembles est réalisée et présentée dans la figure 3.8. Ces sous-ensembles sont les suivants :

- Laiton,
- moulage laiton,
- dégraissage,
- chrome sur noir,

- électricité haute tension,
- perçage CNC.

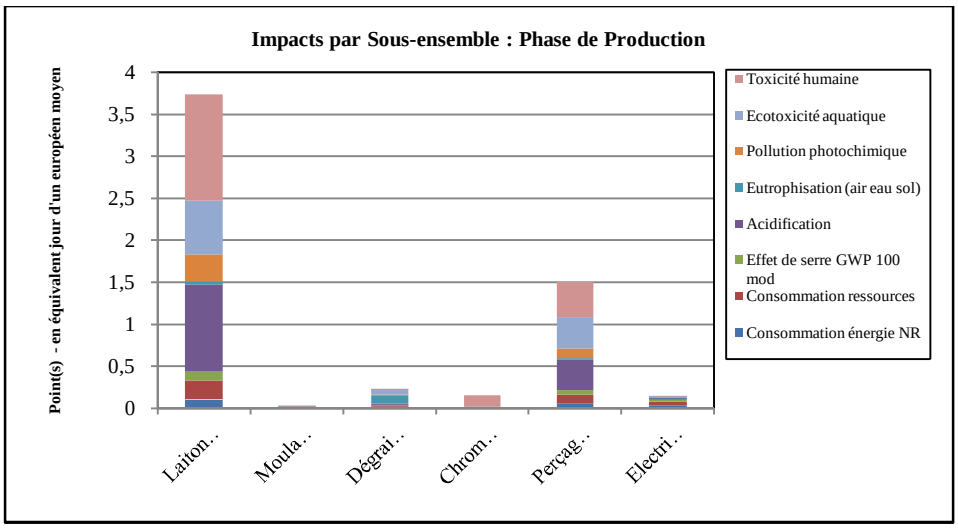


Figure 3. 8 Impacts par sous-ensembles

3.2.4 Détermination des paramètres influençant l'éco-conception introduits dans les features par une analyse de sensibilité (Les DDLs).

L'attribution d'un feature présente le choix d'un scénario donné des DDLs. Pour déterminer les DDLs qui ont une influence signifiante sur la réduction des IEx une analyse de sensibilité est réalisée. Cette analyse consiste à évaluer 3 scénarios qui sont les suivants :

- Scénario 1 : On garde la géométrie initiale du corps
- Scénario 2 : On change certaines formes et dimensions sans changer les volumes. Pour ce scénario le changement n'a qu'une influence sur la phase du transport puisque la quantité transportée sera plus importante générant donc moins d'émissions dans l'air.
- Scénario 3 : On change certains volumes et dimensions et sans changer les formes. Dans ce scénario, le changement de dimensions concerne la section du jet d'eau.

La figure 3. 9 présente une comparaison entre le scénario initial et les scénarios proposés en se basant sur le changement de certains DDLs.

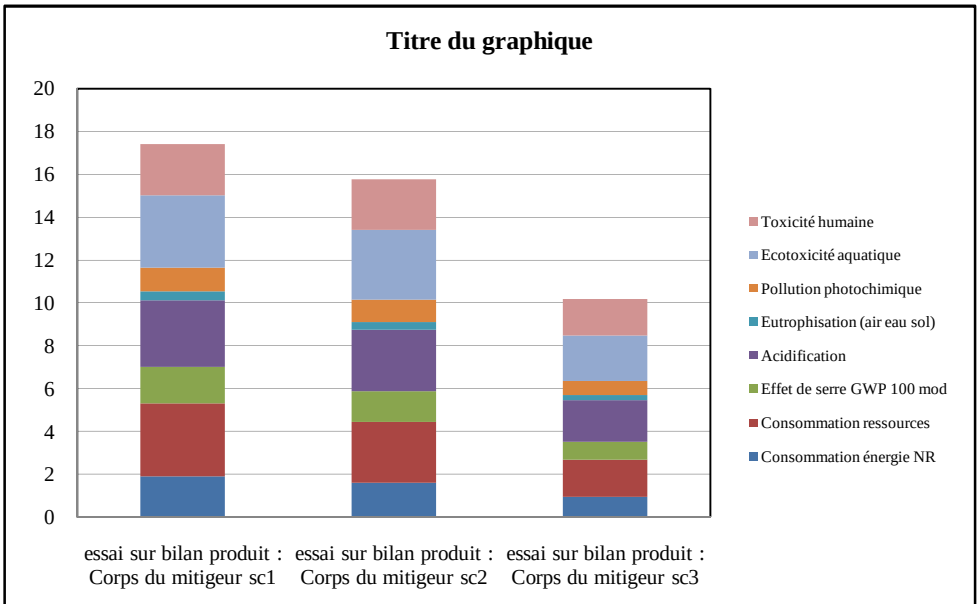


Figure 3. 9 Comparaison entre le scénario de vie initial du mitigeur et de deux scénarios basés sur le changement de DDLs

De ces trois scénarios on peut constater que le changement Dimensions/Volumes a une influence assez importante sur la réduction des IEx générés par le corps du mitigeur. D'une part, cette modification réduit la quantité d'eau potable perdue et, par suite, réduit les IEx générés lors de la phase d'utilisation jusqu'à la moitié. D'autre part, ça permet de réduire la quantité de matière utilisée d'où il y a réduction des IEx générés lors de la phase de fabrication, phase la plus impactante dans le cycle de vie du mitigeur. De plus, ça a une influence sur la phase du transport, où la même quantité transportée mais avec un poids réduit jusqu'à 30% en moins par rapport au poids initial donc moins d'IE sur la phase de transport.

3.2.5 Proposition d'une nouvelle conception du mitigeur : Action

Dans cette partie on tiendra compte des dimensions des pièces standards utilisées pour la fabrication des mitigeurs chez l'industriel :

- Cartouche ø 35mm
- Joint toriques 33x1.5
- Flexibles M10
- Vis HC à bout plat
- Plaquette pour manette
- Ensemble aérateur

En tenant compte des données standards on effectue les changements suivants sur le corps qui doit respecter une épaisseur minimale de moulage de 2,5mm d'où on choisit un diamètre minimal du corps de 40 mm et une hauteur de 120 mm (Hauteur : H = hauteur de la cartouche + hauteur de fixation des flexibles contenants l'eau). Pour la conduite d'eau, la distance entre la position de fixation du robinet sur le lavabo et la position minimale d'aérateur est de 70mm. La figure 3.10 illustre le nouveau design du corps du mitigeur éco-conçu, proposé suite à une action sur les 3 DDLs restant (formes, volumes et dimensions).

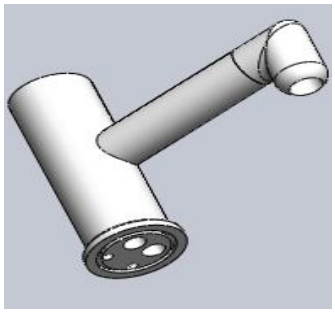


Figure 3. 10 Corps proposé

Les résultats de l'évaluation environnementale des sous-ensembles du nouveau corps sont présentés dans la figure 3.11.

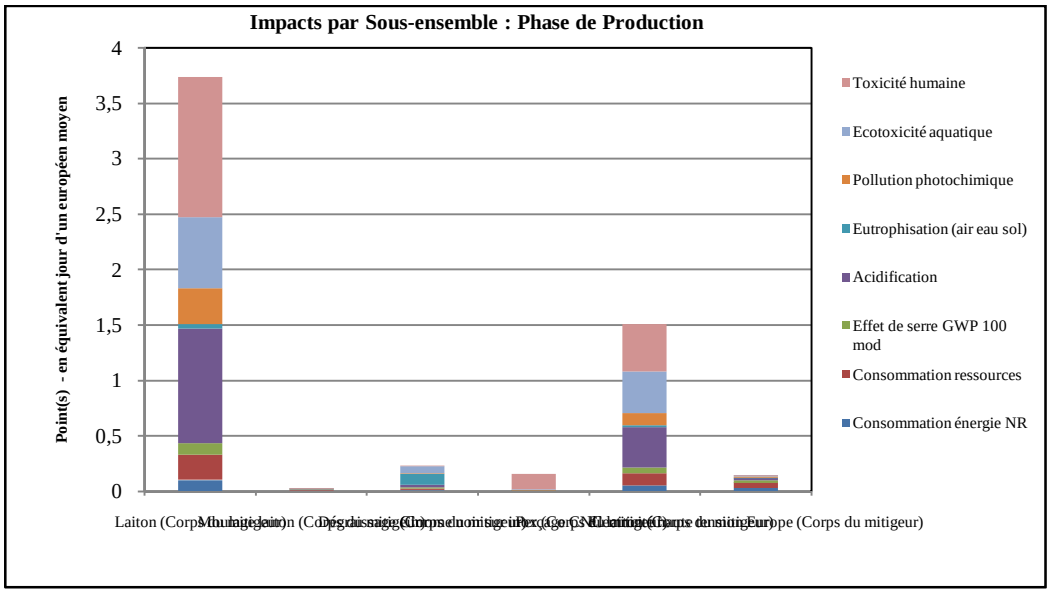


Figure 3. 11 Les IEx générés par les sous-ensembles du nouveau corps du mitigeur

3.3. Validation de la méthodologie sur un deuxième cas d'étude

La pièce présentée dans la figure 3.12 est le cas d'étude utilisé pour valider la méthodologie d'éco-conception proposée. Lors de la CAO, en se basant sur les *features*, l'identification des formes géométriques de la pièce permet de générer trois scenarios possibles pour sa réalisation.

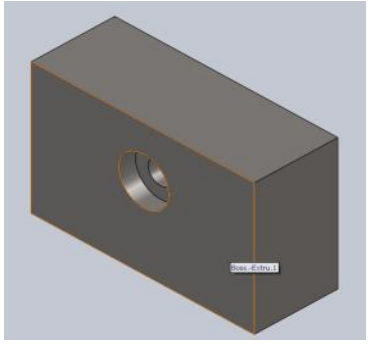


Figure 3. 12 Pièce cas d'étude

- Scénario 1 : La pièce peut être réalisée par un processus de moulage
- Scénario 2 : La pièce peut être réalisée par un processus d'usinage (usinage 3D par une machine à commande numérique)
- Scénario 3 : La pièce peut être réalisée par un processus mixte combinant le processus de moulage et le processus d'usinage. La forme du corps peut être obtenue par moulage et les perçages peuvent être réalisés par un processus de perçage.

La variation considérée ici concerne uniquement la phase de fabrication dans le cycle de vie produit. D'où on suppose que toutes les autres phases sont les mêmes pour les trois scénarios proposés. Le calcul d'impact environnemental est réalisé avec la méthode de calcul CML.

D'après le graphique de la Figure 3.13, le concepteur peut voir que le scénario 1 est le moins impactant. Ainsi, le processus de fabrication (DDL5) peut être un champ d'action pour le concepteur. Il peut également visualiser l'IE de chaque étape suivie pour le scénario choisi. Si le scénario 1 est considéré, deux sous-ensembles sont attribués qui sont la matière (acier courant) et le processus de fabrication (moulage de bronze).

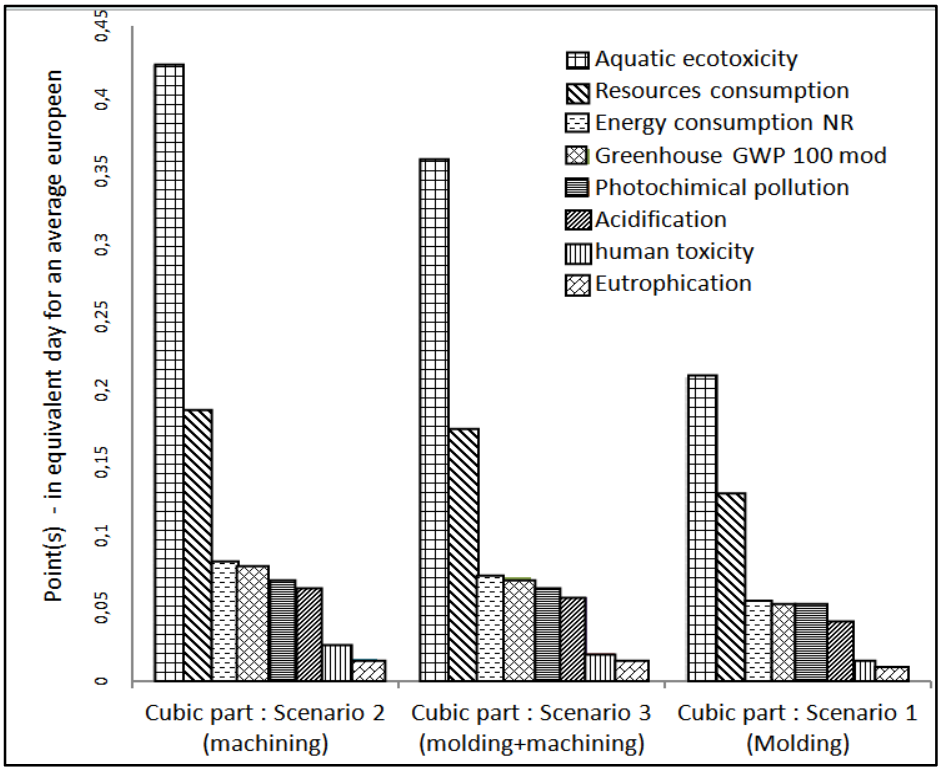


Figure 3. 13 Comparaison des IEx entre les trios scenarios de procédés de fabrication proposés pour la pièce considérée

Le graphique de la figure 3.14 montre les IEx de deux sous-ensembles, le concepteur peut voir que le choix des matériaux (DDL3) est le DDL le plus impactant dans le scénario 1.

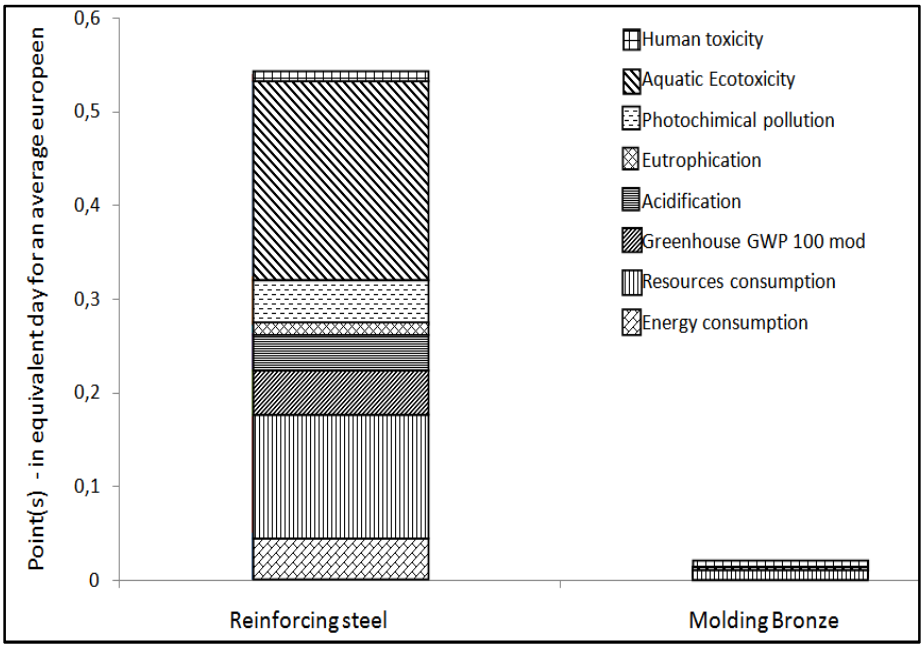


Figure 3. 14 Les IEx du premier scenario (moulage) par sous-ensembles

Le remplacement du matériau choisi par un autre similaire mais ayant de faibles impacts présente un champ d'action pour le concepteur. C'est pourquoi il peut agir sur le DDL3 et le DDL5, dans le but de réduire les IEx de son produit dès la phase de conception détaillée.

3.4. Apport de la méthodologie proposée par rapport à Solidworks Sustainability

Par rapport aux approches précédentes notre contribution consiste à évaluer environnementallement les produits en temps réel dès l'attribution des *features* lors de la phase CAO. Notre approche proposée représente un outil d'aide à l'éco-conception en temps réel pour assister le concepteur à réduire l'IE de ses produits dès la phase de conception de détails. A partir de la revue de la littérature réalisée dans le premier chapitre, nous choisissons « *SolidWorks Sustainability* » afin de comparer les résultats d'analyse environnementale qu'il fournit avec son module intégré « *Sustainabilty* » pour la pièce par rapport à ceux calculés en se basant sur notre méthodologie, car il est, jusqu'à présent, le seul outil intégré CAO-ACV Simplifiée présentant une évaluation environnementale en temps réel. Dans le tableau ci-dessous (Tableau 2.33.2) une comparaison est établie entre « ELA-GreenCAD » et « *SolidWorks Sustainability* » basée sur l'étude du cas présenté dans la figure 3.14. Nous considérons, ici, que la pièce est obtenue par un procédé mixte (moulage de la forme cubique et l'usinage pour le trou).

Nous avons évalué les IEx du corps du mitigeur par trois outils: « ELA-GreenCAD », SimaPro (GeodKoop et Oele, 2004) et « *SolidWorks Sustainability* ». Les résultats d'ACV sont présentés dans le tableau 3.3. De plus, ce tableau montre que les erreurs générées par « *SolidWorks »,* pour chaque catégorie d'impact, sont plus importante que celles générées par « ELA-GreenCAD ».

Tableau 3. 2 Comparaison entre « ELA-GreenCAD » et « *SolidWorks Sustainability* »

SW Sustainability	ELA-GreenCAD
*Le processus est généré automatiquement.	* Le processus est généré automatiquement.
*L'évaluation est en temps réel	* L'évaluation est en temps réel
*Un seul processus est considéré pour tous les détails de la pièce.	*Chaque *feature* de la pièce peut avoir son propre processus.
*Un seul scénario est évalué.	*Les scenarios possible sont générés et évalués.
*L'évaluation concerne la quantité de matière finale.	*L'évaluation concerne la quantité de matière finale et la quantité de matière perdue par les processus appliqués.
*L'UF et le NFR ne sont pas considérés d'où la comparaison des scénarios ne peut pas être réalisée.	* L'UF et le NFR sont considérés d'où la comparaison des scénarios est possible.
* Information Générale à propos des IES du cycle de vie total.	*Chaque étape est évaluée et comparée aux autres (la plus impactante peut être localisée).

Tableau 3. 3 Résultats de la comparaison d'ACV générés par « ELA-GreenCAD », SimaPro (GeodKoop et Oele, 2004) et « SolidWorks Sustainability » pour le corps du mitigeur

	SW	Erreur (%)	SimaPro	Erreur (%)	ELA-GreenCAD
Energie (Pt)	9 E-2	15,47	7,7 E-2	2,6	7,9 E-2
Emission dans l'air (Pt)	16 E-2	138	6,8 E-2	7,8	6,7 E-2
Emission dans l'eau (Pt)	1,2 E-2	22,24	1,57 E-2	6,06	1,47 E-2
Carbone (Pt)	0,105	49,24	7 E-2	10,05	7,8 E-2

Conclusion

Ce chapitre porte la réponse à la première question de la problématique du travail de recherche, à savoir, est-il possible d'éco-concevoir lors de la phase de modélisation géométrique et comment ?

En réponse à cette question on propose une approche d'aide à la décision pour le concepteur pour pouvoir visualiser l'influence des paramètres de conception sur l'environnement. Ainsi la démarche « ELA-Green CAD » proposée agit directement sur les features qui constituent les éléments principaux de développement des modèles CAO. Les éventuelles actions appliquées sur un feature pour réduire ses impacts environnementaux concernent la forme, les dimensions, les matériaux, les volumes, le processus de fabrication, le choix du « make or buy » et les traitements thermiques de surface. Les interventions sont réalisées en temps réel, en se basant sur des systèmes CAO/FAO/GFAO/PLM et sur des bases de données relatives au système d'ACV employé. Cela introduit la notion d'éco-feature qui sera la source d'information pour réaliser une évaluation environnementale. Cette dernière fournit les impacts environnementaux du produit sous forme graphique. L'application sur le mitigeur de lavabo est reprise de nouveau pour illustrer la procédure proposée. En fin de chapitre, on présente une comparaison entre la démarche « ELA-Green CAD » et la démarche « SolidWorks Sustainbility » ce qui lui permet de dégager les principales améliorations réalisées par rapport à l'existant.

Chapitre 4 : Proposition d'une démarche d'évaluation environnementale basée sur les éco-features

4.1. Le concept d'éco-feature

Dans la plupart de recherches réalisées, l'intégration de la contrainte environnementale se fait dans les premières phases de conception, essentiellement la phase de conception conceptuelle, qui décide 70% à 80% des propriétés du produit. Cette phase est caractérisée par une haute incertitude et un grand nombre d'inconnues (c'est-à-dire une zone d'action assez importante). En contrepartie, la phase de conception de détails est peu étudiée dans cet axe vue sa zone d'action assez réduite avec un faible nombre d'inconnues et une incertitude réduite. Cependant, certaines études ont montré que la majorité des impacts générés par un produit est dû aux choix faits lors de cette phase. Réaliser une évaluation environnementale assez complète, en temps réel, lors de la conception de détails, peut être la clé d'une géométrie éco-conçue. De ce fait, notre périmètre d'étude est la géométrie et son influence sur l'éco-conception d'un système donné. Pour cela, on part de l'hypothèse que le principe de fonctionnement du système est déjà défini.

L'objectif actuel de la méthode d'ACV selon les travaux suivants : (Stewart et al, 1999), (Suh and Huppes, 2005), (Jeswani et al, 2010) et (Xin et al, 2012), est principalement d'évaluer et comparer les modèles géométriques des produits existants et les produits après la conception détaillée (post-modélisation), puis de proposer quelques suggestions d'amélioration. Dans ce chapitre, l'accent est mis sur l'introduction et la discussion de l'approche d'utilisation de la technologie des features pour son potentiel à soutenir l'automatisation et l'extraction des données récupérées du produit pour l'inventaire du cycle de vie (ICV). Les données portées par les features sont considérées être des données globales si elles concernent le produit lui-même, les assemblages et les pièces qu'il contient. Il s'agit de données locales si elles sont liées à la géométrie des pièces concernant les features de fabrication et les propriétés de la pièce (Otto, 2001). Pour un inventaire des données telles que la masse des matières premières extraites, l'énergie nécessaire pour la réalisation, etc., on a besoin de récupérer toutes les données locales disponibles, telles que le processus de

fabrication, les tolérances admises, les matériaux utilisés, etc. pour la géométrie de la partie usinée de la pièce. Mais avant que cela puisse se réaliser, son emplacement exact ainsi que les composants, à savoir, la topologie, la forme actuelle et les dimensions, doivent être récupérés à partir du modèle géométrique. Pour extraire les informations complètes des propriétés d'usinage de la pièce (y compris les découpes complexes, les crêtes et les bavures de bord), toutes ces étapes de récupération de données doivent être répétées pour chaque feature. Les avantages de la TF permettent la récupération efficace des données nécessaires à un ICV en utilisant les modèles des features et les opérateurs basés sur les features. Dans ce cadre on propose le concept « d'éco-feature » pour modéliser l'intégration des données de conception dans la phase de conception de détails, afin de construire un modèle de cycle de vie d'un produit prêt pour la pratique d'une ACV. L'éco- feature est un feature enrichi par des données, telles que le volume, le matériau, le procédé de fabrication, l'énergie consommée, etc., permettant son évaluation environnementale afin de donner en temps réel des informations ou des indications en termes d'éco-conception. L'éco-feature englobe une pensée cycle de vie. Pour chaque phase de vie un ensemble de scénarios est envisageable. Chaque scénario est lié à un à un ensemble de données. Par exemple, pour la phase de fabrication, un feature peut être obtenu par différents procédés de fabrication. Chaque procédé à une énergie consommé.

La définition de l'éco-feature inclut les caractéristiques suivantes :

- L'intégrité. L'éco-feature est défini à travers trois éléments assemblés pour décrire un feature prêt à une EE qui combine un domaine physique et un domaine temporel et un domaine de calcul combinatoire pour la génération des scénarios. Ces scénarios sont en relation avec les DDLs en CAO et qui sont des données d'entrée pour une EE. Ceci assure l'intégrité de l'expression de l'éco-feature dans l'éco-conception.
- La flexibilité. Dans la définition de l'éco-feature, il n'y a pas une nécessité de définir les différentes phases de vie ou de modéliser tous les scénarios, sauf si le concepteur veut voir les impacts de toutes les phases de vie ou des tous les scénarios possibles. Il a

même la possibilité de combiner lui-même les scénarios sans avoir recours à la modélisation par scénarios.

Le processus de conception d'une pièce ou d'un produit en termes d'éco-conception est un assemblage d'éco-features modélisés en se basant sur l'ensemble des DDLs permis lors de la modélisation géométrique en CAO. De ce fait, en utilisant les éco-features on peut réaliser une EE à chaque ajout de feature, en temps réel.

4.2. La scénarisation à travers les éco-features

L'exploitation des paramètres liés à un modèle CAO, pour l'évaluer environnementallement en temps réel, est l'objectif de notre étude. Sa réalisation peut conduire à une évaluation environnementale plus précise en exploitant les scénarios de vie possibles qui peuvent être générés par les données présentes.

Les scénarios à générer peuvent être de différents types selon (Börjeson et al. 2006). En effet, ils peuvent être prédictifs, exploratoires ou normatifs. Les différents types de scénarios sont divisés en deux catégories; pour les scénarios prédictifs ils sont soient des prévisions ou des « si », pour les scénarios exploratoires ils sont soient externes ou stratégiques et enfin pour les scénarios normatifs ils sont issus soit d'une préservation ou d'une transformation. Dans notre étude, la génération des scénarios concerne l'analyse du cycle de vie (ACV). Selon Weidema et al. (2004) la génération des scénarios pour l'ACV peut être réalisée en cinq étapes différentes :

1. Identification des pièces du système
2. Identification de la précision nécessaire
3. Choix d'une méthode appropriée
4. Développement du scenario
5. Vérification de la cohérence des scénarios

Selon Bishop et al. (2007), il existe huit techniques de génération de scénarios :

1. Jugement
2. Base / attendu
3. Elaboration de scenarios fixes
4. Séquences d'événements
5. Analyse rétrospective

6. Dimensions d'incertitude
7. Analyse des impacts croisés
8. Modélisation

Nous avons choisi la huitième pour notre recherche : la modélisation. Pour la modélisation de scénarios pour l'ACV, nous sommes appelés à récolter les données qui peuvent être présentes et nécessaires lors de la conception de détails en CAO.

4.2.1 Recherche des données pour la génération des scénarios et inventaire du cycle de vie

La méthodologie proposée consiste à assister le concepteur CAO dans ses choix et lui fournir en temps réel des indications sur les impacts environnementaux résultants. En effet, pour un produit donné on part d'une géométrie initiale pour arriver à la géométrie finale. Pour cela plusieurs scénarios sont possibles lors de la transformation. La génération de ces scénarios nécessite une récupération des différentes données liées au modèle géométrique de la pièce en cours de modélisation. Lors du développement d'un modèle géométrique d'une pièce, trois entités de base sont présentes :

- La géométrie,
- le matériau
- le processus de fabrication.

La génération d'un scénario de vie est aussi basée sur ces trois entités comme le montre la figure 4.1.

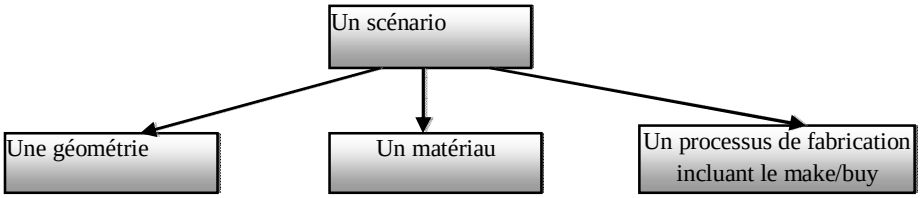


Figure 4. 1 Les composants d'un scénario lié à un feature

La collection des données et des paramètres d'un *feature attribué* permet déjà de générer plusieurs scénarios de vie envisageables. Ces scénarios sont accompagnés par des directives d'éco-conception telles que la réduction de la masse, le choix des

procédés de fabrication ayant le moins de déchets de matière non renouvelables, le choix du brut le plus efficace pour générer le moins de déchets matière.

Pour cela, il est d'abord nécessaire d'identifier les données à disposition lors de la géométrie en CAO de manière à pouvoir enrichir un *feature* « classique » afin d'améliorer la description des scénarios de vie possibles d'une pièce et en faire un vrai modèle pour l'éco-conception (les éco-features).

4.2.1.1. Données liées à la géométrie

Les données géométriques d'une pièce contribuent à la génération des scénarios du cycle de vie quand ils sont liés à un matériau donné. En effet à partir d'un modèle CAO on peut avoir deux géométries (figure 4.2) : la géométrie finale (V2) et la géométrie du brut (V1). La différence entre les deux géométries présente le volume de matière à enlever par un/des procédés d'usinage (déchets : V1-V2).

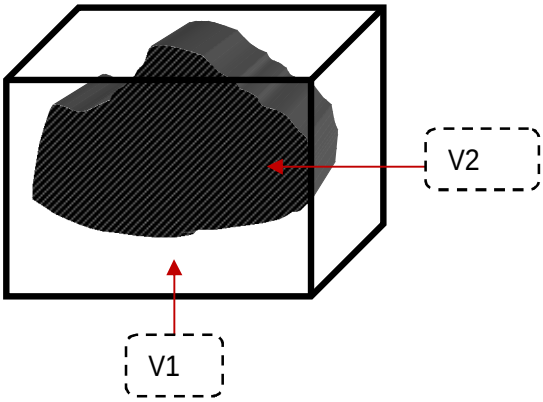


Figure 4. 2 Les volumes générés par un modèle CAO

Lorsqu'on définit un *feature* tel que le *feature* « poche » on ne s'intéresse pas à la forme mais au volume. Par exemple, lors d'un processus de moulage lorsqu'on effectue une poche, on a enlevé un certain volume de matière et par suite on met moins de matière dans le moule. D'où l'I.E est dépendant de la quantité de matière, qui est une information importante.

La forme géométrique présente quand même une donnée utile pour le calcul d'impacts. Par exemple, si on utilise un procédé d'estampage ou de moulage pour une forme assez compliquée mais avec des dimensions minces, ce n'est pas la complexité du moule qui va coûter cher mais la quantité de matière brute en plus, car plus la géométrie est compliquée, plus on a besoin d'un brut important.

4.2.1.2. Données liées au matériau

Au départ, quand on conçoit en CAO, on conçoit par des *features* pour obtenir un volume final et on attribue un matériau. A ce stade, on ne connait pas encore le procédé de fabrication. Par contre on peut quand même considérer l'information du volume de matière qui va nous permettre d'afficher l'ensemble des IEx dus uniquement à la prise en compte de la matière. A chaque ajout de *feature*, ou raffinement de ces derniers, on modifie le volume de matière et, par suite, on peut afficher un indicateur qui est éventuellement l'indicateur des impacts environnementaux qui est dû à la matière comme le modélise la figure 4.3.

On s'intéresse aux volumes parce qu'on peut considérer qu'un *feature* peut être un volume en plus ou un volume en moins. Un *feature* peut être un bossage, une poche, une rainure, une gorge, un chanfrein, etc.. Il existe des logiciels qui génèrent en automatique des processus de fabrication à partir des *features* attribués tels que SolidWorks, CATIA, etc.

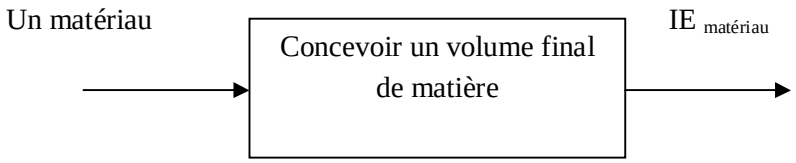


Figure 4. 3 Relation volume conçu / matériau dans la génération de l'impact environnemental lié au matériau

Lors de la réalisation d'une pièce, à partir du brut, on a un volume final et un volume perdu. Pour ce volume perdu, le taux de récupération, son recyclage en boucle courte/longue et sa qualité de recyclage sont des données qui peuvent enrichir les modèles de *features* afin d'obtenir les modèles d'éco-features. La modélisation d'un scénario de fabrication d'un volume de matière est présentée dans la figure 4.4. On peut associer au paramètre volume de matière les données suivantes :

- La quantité de matière à recycler,
- le recyclage en interne ou en externe (le facteur transport existe ou non),
- l'énergie nécessaire pour passer du brut au final,
- les traitements thermiques ou encore les traitements de surface.

En résumé, on déduit que la géométrie est fortement liée au matériau aussi bien qu'au processus de fabrication et donc à l'énergie dépensée et aux rejets durant cette phase.

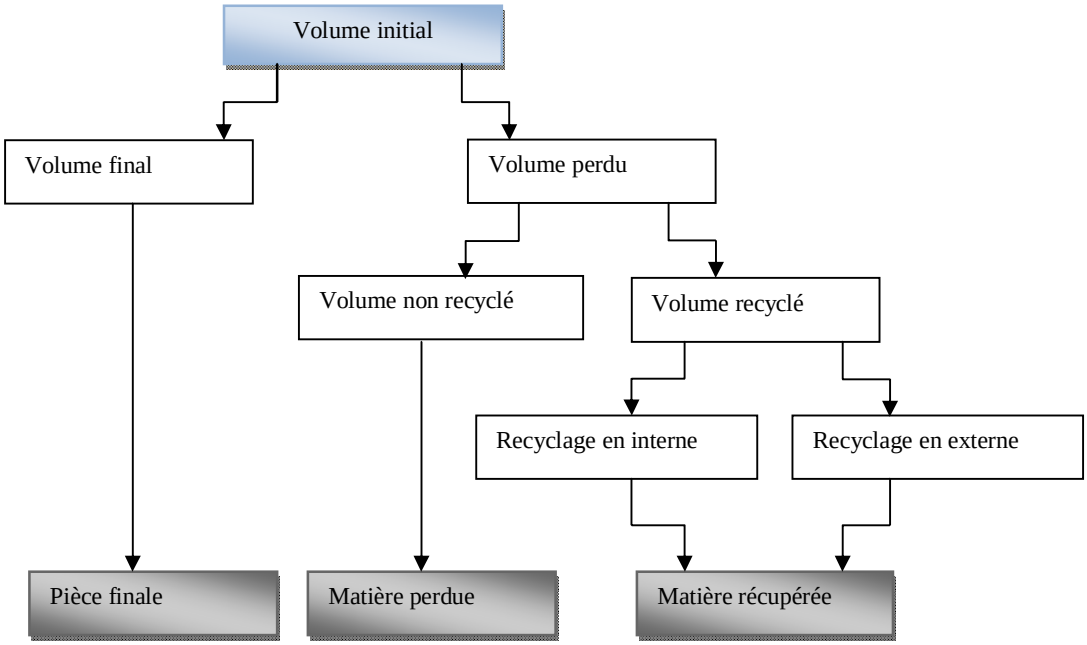


Figure 4. 4 Scénario de fabrication d'un volume de matière

4.2.1.3. Données liées au processus de fabrication

Chaque pièce élémentaire d'un système est composée de deux *features* ou plus. Selon la forme géométrique attribuée à un moment donné, des scénarios sont envisageables pour un système, puisque cette pièce va avoir un volume de matière, ce volume de matière peut être réalisé soit par un processus de fonderie, d'usinage, de soudage, etc.

Pour fabriquer une pièce en fonderie, on va utiliser un peu plus de matière car on a une partie qui est perdue dans les évents, les bavures, etc. et de cette quantité perdue il y a plus ou moins une partie qui peut être récupérée, et une autre non récupérée. Ainsi, l'impact environnemental de ce procédé de fabrication peut être modélisé en tenant compte de la quantité de matière non récupérable, l'effet de l'huile, l'énergie électrique, etc. On peut imaginer également l'impact environnemental du moule.

Si on adopte le processus d'usinage au lieu du moulage, les features seront convertis en features de fabrication. Ces features sont ensuite associés à un outil de fabrication et à un certain nombre de passes et de trajectoires lors de l'usinage, l'usure

de l'outil, l'huile, l'électricité, le transport et même l'amortissement de la machine. La figure 4.5 illustre un inventaire d'un processus de fabrication afin de calculer son impact environnemental

Le volume du brut présente la somme du volume final de la pièce et du volume perdu lors de l'usinage. Le volume de matière perdu sera plus ou moins recyclé ou non, en boucle courte ou en boucle longue.

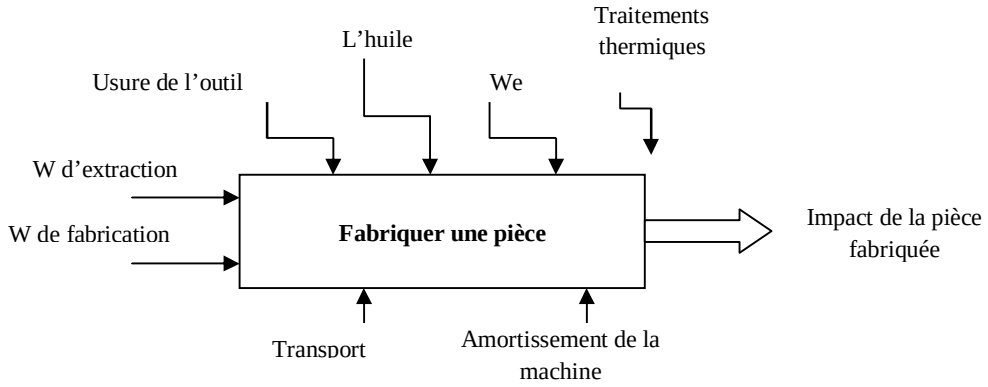


Figure 4. 5 Inventaire du processus de fabrication d'une pièce pour calculer son impact environnemental

Quand on conçoit en CFAO une pièce, dans le module fabrication on définit le brut et la trajectoire de l'outil. Ces informations permettent de calculer :

- La perte de matière
- Le temps d'usinage
- L'énergie nécessaire à l'usinage
- L'usure de l'outil

Il y a aussi les traitements thermiques/de surface qui peuvent être des facteurs importants d''impacts d'une pièce.

4.2.2 Expérimentation d'un scénario matériau / volume

Le concept d'un éco-feature englobe les différents scénarios possibles en se basant sur les données qu'il contient. Le choix d'un paramètre ne peut être isolé des autres et peut les influencer. Il peut être la base d'un scénario de vie d'une pièce ou d'un système.

Les relations entre les différents paramètres de conception aideront le concepteur dans sa démarche de scénarisation à partir des éco-features et le dirigeront vers un

scénario de plus en plus envisageable et raffiné. Ce scénario pourra être le sujet analysé afin de modifier tout mauvais choix avant même de passer à une étape plus avancée dans la conception.

Pour montrer l'aspect relationnel entre les différents paramètres de conception, on considère un volume conçu et on change le matériau pour visualiser l'influence du choix d'un matériau ou d'un autre. Pour cela on prend l'exemple du mitigeur étudié précédemment (chapitres 2 et 3) et plus particulièrement on va considérer le corps du mitigeur qui va être moulé à partir d'Aluminium (Al) ou de laiton, sachant qu'un Kg d'Aluminium coûte 3,500 TND et un Kg de laiton coûte 3,200 TND.

Pour un corps du mitigeur en Al on va utiliser 30% de matière en plus ; parce que l'Al est difficile à mouler. Si on prend un volume de 30% supérieur pour l'Al, donc comme le montre la figure 4.6, on aura ≃30% de plus (5.66 points) d'IE par rapport à une unité de volume d'Al (4 points).

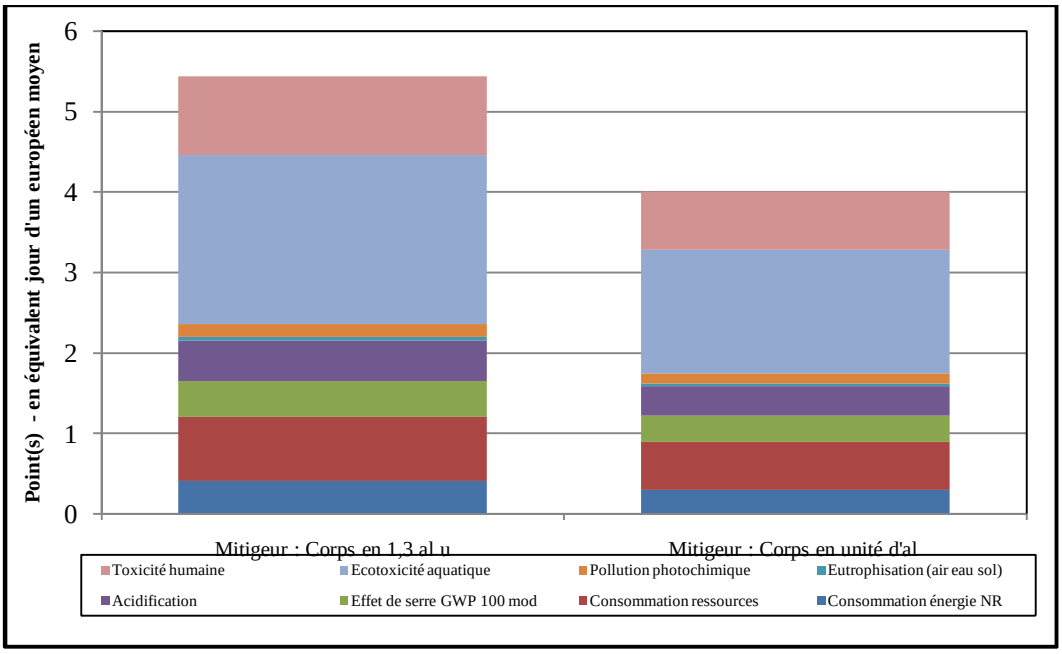


Figure 4. 6 Comparaison de l'impact environnemental entre une unité de volume d'Al et un volume avec plus 30%

Si maintenant on compare une unité de volume de laiton avec un même volume d'Aluminium augmenté de 30%, on obtient la figure 4.7, qui montre que le volume d'Aluminium à utiliser est plus impactant, de plus la quantité de matière utilisée va être plus importante, d'où le coût sera plus élevé de plus de 30% par rapport à l'unité d'Al qui est, à unité de poids donné, un peu plus coûteuse que le laiton.

De ce fait, en liant le paramètre volume au paramètre matériau (qui porte les informations IE et coût pour une unité de volume), on peut donner au concepteur à la fois une indication prix et une indication sur le profil environnemental avec les volumes à utiliser d'un matériau donné. Ces indications vont lui permettre de choisir parmi les alternatives à disposition. Si les profils environnementaux sont plus ou moins similaires, c'est le prix qui détermine la décision, mais à prix identique, c'est la solution la moins impactante qui l'emporte.

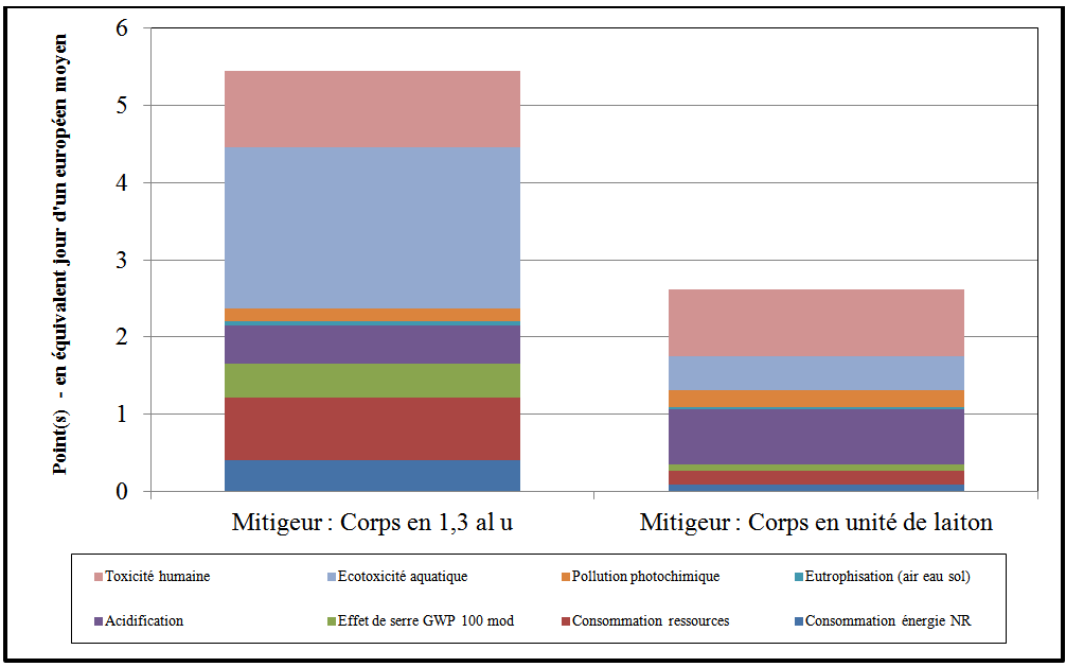


Figure 4. 7 Comparaison simplifiée d'aluminium et du laiton utilisés en fonderie pour le corps du mitigeur

4.2.3 Expérimentation d'un scénario procédé/énergie

Certes les différents paramètres ou DDLs relatifs à un éco-feature, mis à la disposition du concepteur pour modéliser ses produits lors de la CAO, sont en relation entre eux. Dans le paragraphe précédent pour un volume donné, on a montré que le choix d'un matériau ou d'un autre dépend de son impact environnemental et de son coût relativement à ce volume conçu.

Dans un éco-feature on trouve des données relatives au paramètre procédé de fabrication qui est lié à une géométrie d'une part et à un matériau d'autre part. Le choix d'un procédé ayant un minimum d'impact environnemental, d'énergie consommée et de coût optimisé est un objectif. Ce choix est basé sur une

scénarisation couplée procédé/énergie/coût/IE. Pour montrer cette scénarisation, on prend le produit robinet comme exemple de démonstration.

Il y a des robinets qui sont simplement soudés donc cela nécessite moins d'énergie qu'en fonderie. Ces robinets sont simplement des tuyaux d'acier qui sont soudés et ça nécessite moins d'énergie. En effet mettre en forme l'acier consomme moins d'énergie que de mettre le laiton en forme par moulage. En effet, à la société AMS, ils produisent des mélangeurs qui sont réalisés en tubes d'aciers. L'énergie utilisée, pour la mise en forme, est de l'ordre de 0,35KWh. Par contre, l'énergie utilisée en moulage pour le mitigeur est de l'ordre de 0,5KWh.

En soudure, les longueurs et les cordons de soudure sont deux paramètres majeurs qui vont permettre de calculer l'énergie nécessaire. Le temps de soudure permet de savoir s'il faut utiliser un ouvrier qualifié ou une machine. En effet, pour les industriels, le temps va être de l'argent donc on a des paramètres des features qui vont caractériser le temps et le coût et des paramètres qui vont caractériser plus l'énergie utilisée.

Dans le cas du soudage à l'arc électrique, l'énergie de soudage (H) est la quantité d'énergie transférée par unité de longueur de soudure tout au long du déplacement de la source de chaleur (l'arc électrique), exprimée en joules par millimètre. L'énergie de soudage est calculée en rapportant la puissance totale en watts de l'arc électrique par sa vitesse de déplacement en millimètres par seconde :

$$H = \frac{U.I.t}{L}$$

U= Tension de soudage en volts (V),

I= Intensité de soudage en ampères (I), et

L= Longueur de soudure déposée en mm,

t= Temps mis pour déposer une longueur de soudure L

4.3. Identification des problèmes d'évaluation environnementale par les éco-features

Dans notre recherche les features classiques qu'on enrichit avec des données nécessaires pour l'évaluation environnementale sont nommés les éco-features. D'où

ce qui est appliqué aux *features* classiques peut être appliqué aux éco-features (EF) proposés.

4.3.1. Problème de localisation des données

Dans le modèle géométrique d'une pièce, on peut trouver des features qui sont utilisés plus d'une seule fois. Ils peuvent être réalisés dans une seule opération d'usinage ou chacun à part ou peuvent être réalisés en association avec d'autres features. Les différents scénarios qui se déclinent, présentent un problème de localisation des informations dans chacun des *features* et, par suite, un problème dans l'identification des éco-features. Si par exemple à un moment donné on a deux *features* (2 poches ou 2 bossages), cela revient à moins cher de les réaliser les deux à la fois qu'en deux opérations distinctes. Par exemple, tant qu'à faire 2 usinages de bossages avec un outil fraise doigt, c'est plus économique de les faire en une seule opération. Il faut donc essayer de mutualiser les opérations pour à la fois diminuer les coûts et également l'énergie. On a un effet cumulatif ou de commonalisation entre *features* identiques. Pour s'attaquer à ce problème, il est nécessaire d'identifier tous les *features* attribués tout en analysant les informations de chacun d'eux séparément. De ce fait, on peut supposer que la pièce (P) est une somme des éco-features comme le montre l'équation (4.1).

$$P = EF_1 \cup EF_2 \cup EF_3 \cup \ldots \cup EF_n = \Sigma EF_i \qquad \textit{(Eq 4.1)}$$

Cet aspect cumulatif sur le gain de temps, de coûts et d'énergie qu'on peut trouver dans sur des features identiques peut-il être considéré de même pour des impacts environnementaux ? Cela nous conduit à détecter un nouveau problème dans la génération des éco-features, qui est le problème d'additivité des résultats des évaluations environnementales.

4.3.2 Problème d'additivité des résultats

Théoriquement une pièce est formée de *n features*. Certes ces *features* sont en interactions. Relativement au travail de Srinivasan et Sheng (1999b), ces interactions peuvent être classées en deux catégories : interactions géométriques et interaction de processus. D'où, l'apparition d'un problème de couplage entre les *features*, parce

qu'une somme de *features* n'est pas simplement sommer les conséquences des *features*. D'où on doit avoir une analyse globale des *features* avant que d'analyser les informations de chacun des *features* séparément. Pour éviter ce problème, on se pose la question de l'additivité là où on additionne les conséquences de chaque *feature* pour avoir la globalité des conséquences de la pièce. L'hypothèse d'additivité des impacts revient à dire que les impacts de chaque *feature* sont indépendants de ceux des autres et l'impact environnemental d'une pièce est la somme des IEx de chaque *feature* selon l'équation 4.2. En appliquant cette hypothèse sur les EF on obtient l'équation 4.3. La figure 4.8 montre un modèle pour le calcul de l'impact environnemental d'une pièce par la sommation des IEx de chaque éco-feature la constituant.

$$IE_{pièce} = IE_{Feature\ 1} + IE_{Feature\ 2} + \ldots + IE_{Feature\ N} = \Sigma\, IE_{Feature\ i} \quad (eq.\ 4.2)$$

$$IE_{pièce} = IE_{EF\ 1} + IE_{EF\ 2} + \ldots + IE_{EF\ N} = \Sigma\, IE_{EF\ i} \quad (eq.\ 4.3)$$

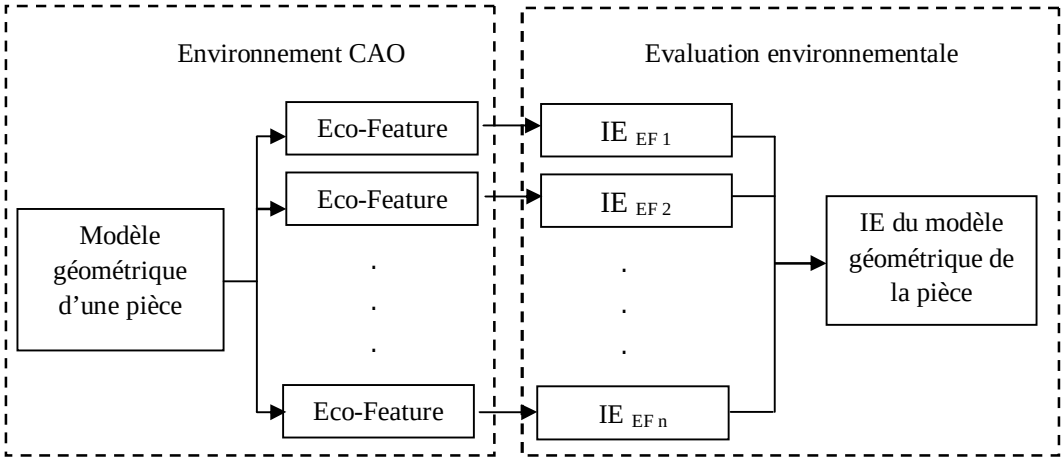


Figure 4. 8 Modèle de calcul de l'impact environnemental d'une pièce en CAO

Au niveau d'un *feature*, l'IE est calculé aussi en sommant les IEx de chaque sous-ensemble, tels que l'énergie, le matériau, etc., comme le montre l'équation 4.4.

$$IE_{Feature} = IE_{sous\text{-}ensemble\ 1} + IE_{sous\text{-}ensemble\ 2} + \ldots + IE_{sous\text{-}ensemble\ N} = \Sigma\, IE_{sous\text{-}ensembles} \quad (eq.\ 4.4)$$

4.4. Génération des éco-features

Afin d'étendre notre concept d'éco-feature, nous proposons une démarche de génération des éco-features (EF). Cette démarche, premièrement, collecte les données qui sont liées à chaque feature et qui sont en relation avec l'éco-conception des produits.

Pour ce faire, il faut synthétiser un corpus d'études en se référant à des travaux trouvés dans la bibliographie. Dans ce corpus, la collection de toutes les données a pour but l'identification de celles qui possèdent les critères nécessaires pour être retenus dans le modèle d'éco-feature. Ces critères sont définis selon la définition des cycles de vie possible de l'éco-feature afin de modéliser les différents scénarios de vie possibles, évaluer leurs IEx et, à la fin, choisir le scénario optimal en termes d'éco-conception.

Deuxièmement, cette démarche vise à favoriser la localisation de sources d'impacts au niveau des features et précise la zone d'action possible pour réduire l'IE du scénario optimisé mentionné par le modèle d'éco-feature.

Comme les features classiques sont réutilisés pour simplifier la modélisation géométrique des produits, les éco-features peuvent être réutilisés. En effet, les modèles des éco-features aident à une future mise en œuvre dans une banque d'éco-*features*. Cette banque de données peut ensuite être consultée par les concepteurs afin de permettre le choix des éco-features et favoriser la réalisation des éco-produits dès la phase de modélisation géométrique lors de la conception de détails.

L'utilisation des éco-features permet au concepteur de concevoir ses produits par une scénarisation basée sur ses choix en mentionnant l'IE de chaque scénario possible. Cela se fait sans lui imposer de considérer un scénario ou un autre à part.

L'introduction d'un nouveau éco-feature est possible tant qu'il existe une intégration entre les systèmes CAO, PPAO, FAO, PLM et ACV. Par suite, ce nouvel éco-feature, s'il est réutilisé, peut être ajouté à la banque des données et réutilisé sans avoir recours aux intégrations citées ci-dessus. D'où la banque des données sera apte à accepter les mises à jour réalisées.

Dans la proposition de la démarche de génération, il y a développement d'un processus d'évaluation environnementale basé sur la scénarisation. L'objectif à terme

de l'utilisation des éco-features est de localiser les sources d'impacts pour les différents scénarios de vie possible afin d'adopter par la suite un processus d'amélioration environnementale basée sur les résultats d'évaluation environnementale portés par les éco-features.

Afin de présenter la démarche de modélisation géométrique par éco-features, nous abordons les étapes de l'identification jusqu'à la modélisation des éco-features.

4.4.1. Identification des éco-features

C'est la première phase dans la génération, cette phase consiste à faire un inventaire sur les différents paramètres (énergie, usure de l'outil, déchets, etc.) qui peuvent être liés à un *feature* et nécessaires pour une évaluation environnementale.

Un éco-feature, par définition, est un feature classique qui est enrichi par des données liées au cycle de vie de ce feature en particulier et toute une pièce à laquelle il appartient en général. Ces données peuvent être liées à l'extraction des matières premières, à la phase de production, à l'usage, au transport et à la fin de vie. Chaque phase du cycle de vie peut se produire selon un seul scénario ou des scénarios différents.

L'enrichissement des features sert par la suite à évaluer environnementallement les scénarios de vie possibles afin d'aider le concepteur à choisir le scénario le plus écologique, qui servent à la fin pour localiser les sources d'impacts. Le travail d'identification se fait selon la détection des deux combinaisons suivantes : Géométrie/Matériau ou Géométrie/Matériau/Processus.

La collection des données d'un feature est relative aux trois paramètres de la conception en CAO :

- La géométrie
- Le matériau
- Le processus

La génération de certaines données dépend de la manière dont on conçoit un *feature* ou une pièce. Or, quand on est en CAO, on peut concevoir de deux manières :

- *On imagine rapidement quel est le procédé de fabrication qu'on va utiliser :* s'il s'agit d'un procédé de mécano-soudé ou d'usinage, on ne va pas concevoir de la même manière. Par exemple, on imagine que c'est une extrusion à partir d'un cercle pour donner un tube et, en fait, ça ne va pas être un tube en moulage mais en mécano-soudé d'où on ne peut pas interpréter au départ par le seul *feature* géométrique quel procédé de fabrication est associé. Il faut rajouter d'autres informations au *feature* pour améliorer le calcul d'impact avec l'énergie et la matière perdue du procédé.
- *On conçoit de la même manière en servant des fonctions en CAO puis on attribut le procédé à posteriori.* Au départ admettons qu'on définisse une base géométrique avec des cubes ou des cylindres, etc. puis on rajoute de la matière peu à peu. Quand on ajoute de la matière on voit croitre petit à petit l'impact du volume final. Malgré qu'on ne connaisse au départ le processus de fabrication, on a une idée sur le matériau et la quantité de matière utilisée et le matériau et la masse donnent déjà, à partir d'un outil d'ACV, une idée sur l'impact de la pièce. Si on ne connait pas le matériau on ne peut pas donner l'impact. Si on n'a pas une idée précise sur le processus de fabrication on peut imaginer des différents scénarios. D'où, le procédé de fabrication peut être du moulage, du mécano-soudé, de l'usinage, de l'estampage, du forgeage, etc.

Les données aussi peuvent être liées à la géométrie, au matériau ou au procédé. Partons, alors, des données d'un *feature* qu'on attribue lors de la modélisation d'une pièce donnée, on trouve trois paramètres principaux :

- Géométries (finale, brut)
  - Volume donné qui peut être un volume en plus ou en moins
  - Volume perdu
- Matériau
- Processus de fabrication incluant le make or buy

Les *features* peuvent être classés en deux catégories, un volume en plus ou un volume en moins comme le montre l'exemple présenté dans le tableau 4.1.

Tableau 4. 1 L'ensemble des features dans le modeleur géométrique « TOP Solid » (TopSolid, 2005)

Nom du feature	Un volume en plus	Un volume en moins
Extrusion	+	
Révolution	+	
Profilé	+	
Perçage		+
Limitation		+
Chanfrein		+
Congé		+
Dépouille		+
Evidement		+
Poche		+
Bossage	+	
Gorge		+
Filetage		+
Rainure		+
Nervure	+	
Enlèvement		+
Soustraction		+
Union	+	
Bloc	+	
Cylindre	+	
Sphère	+	
Cône	+	

Comme il a été notifié précédemment que le travail d'identification se fait selon la détection des deux combinaisons suivantes : Géométrie/Matériau ou Géométrie/Matériau/Processus, parce qu'en utilisant une de ces deux combinaisons, on peut avoir une estimation primaire sur l'IE.

En effet, à chaque ajout de *feature*, on modifie le volume de matière, qui peut être un volume en (+) ou en (-). Si c'est un volume perdu, on a des copeaux générés et les questions qui se posent immédiatement sont : est ce qu'ils vont être récupérés ? Quel est le pourcentage de récupération ? Est ce qu'avec la qualité du métal récupéré on obtient un métal noble ou perd t-on de la qualité ? Une partie des déchets n'est pas récupérée et valorisée mais enfouie ou encore parfois jetée dans un fleuve ou un lac ; bien entendue cette part doit absolument être minimisée pour des questions environnementales. A ce stade, on peut donc déjà afficher un indicateur qui est l'indicateur des impacts environnementaux dû à la matière. Autrement dit, celui-là est lié à la phase d'extraction de matières premières dans le cycle de vie d'un *feature*.

Si maintenant on a une combinaison Géométrie/Matériau/Processus, alors l'estimation de l'IE est plus facile et approchée de l'IE réel, vues les données en nombre plus important qui sont présentes. La donnée du processus de fabrication permet des raisonnements utiles. Par exemple, si un *feature* est ajouté, en considérant qu'on procède avec un processus d'usinage, on a un ajout d'énergie de fabrication en fonction de la taille du *feature*, une usure de l'outil, une huile d'arrosage en plus (d'où vaporisation dans l'air, dans le sol, etc.) et le temps d'usinage augmente avec ce nouveau feature. Ces données relatives peuvent être déduites de la définition du brut et de la trajectoire de l'outil en CFAO. Si on considère, par exemple, un processus de moulage lorsqu'on effectue une poche, on a enlevé un certain volume de matière et par suite on met moins de matière dans le moule. De plus s'il s'agit d'une pièce complexe donc ça nécessite un moule de forme complexe, mais ce n'est pas la complexité du moule qui va coûter cher mais la quantité de matière brute en plus parce que, plus la géométrie est compliquée plus on a besoin d'un brut important. Là, on peut avoir des IEx liés à la phase d'extraction des matières premières et à la phase de fabrication.

Après l'obtention du volume final souhaité par un processus de fabrication, on a un volume perdu au travers des coupeaux ou bien des bavures et des évents. Pour ce volume perdu, différents scénarios sont possibles en fonction de paramètres différents tels que le taux de récupération, son recyclage en boucle courte/longue et sa qualité de recyclage. Des fois la récupération se fait au sein de l'entreprise, des fois à l'extérieur. Au sein de l'entreprise, si par exemple, on a un cubilot qu'on doit ré-injecter, alors on doit le fondre pour la mise en forme de cette matière. En plus de la quantité récupérable, il y a aussi de la quantité de matière non récupérable. A cette étape on peut avoir un IE généré par la phase d'extraction des matières premières, la phase de fabrication, la phase du transport et la phase de fin de vie dans un cycle de vie d'un produit. Le tableau 4.2 récapitule quelques relations entre les données portées par un feature avec les phases de son cycle de vie sont présentées.

Tableau 4. 2 Relations entre les données portées par un feature avec les phases de son cycle de vie

Données		MP	Fabrication	Usage	Transport	FV
Géométrie	taille du *feature*	✔	✔	✔	✔	✔
	volumes de matière (brut, fini, perdu)					
	% récupération Vp		✔		✔	✔
	% irrécupérable					✔
Matériau	type du matériau	✔	✔		✔	✔
	Processus d'extraction	✔				
	pays d'extraction				✔	
	pays de fabrication				✔	
	pays d'usage				✔	
processus	énergie de fabrication		✔			
	usure de l'outil		✔			✔
	quantité d'huile d'arrosage		✔			
	temps d'usinage		✔			

4.4.1.2. Algorithme d'extraction des données d'un éco-feature

L'extraction et la filtration des données sont réalisées par différents modèles en CAO. Pour réaliser une ACV complète, il est nécessaire que les données d'inventaires soient collectées et structurées. En tenant compte du grand nombre des données et de leur variété, déjà à ce stade, une approche informatisée est nécessaire. Les approches traditionnelles de collecte des données pour une ACV ne sont plus réalisables, vu le temps réduit alloué pour la production aujourd'hui. Ces données sont portées par les éco-features et peuvent être extraites à l'aide d'un algorithme générique que nous présentons par la suite.

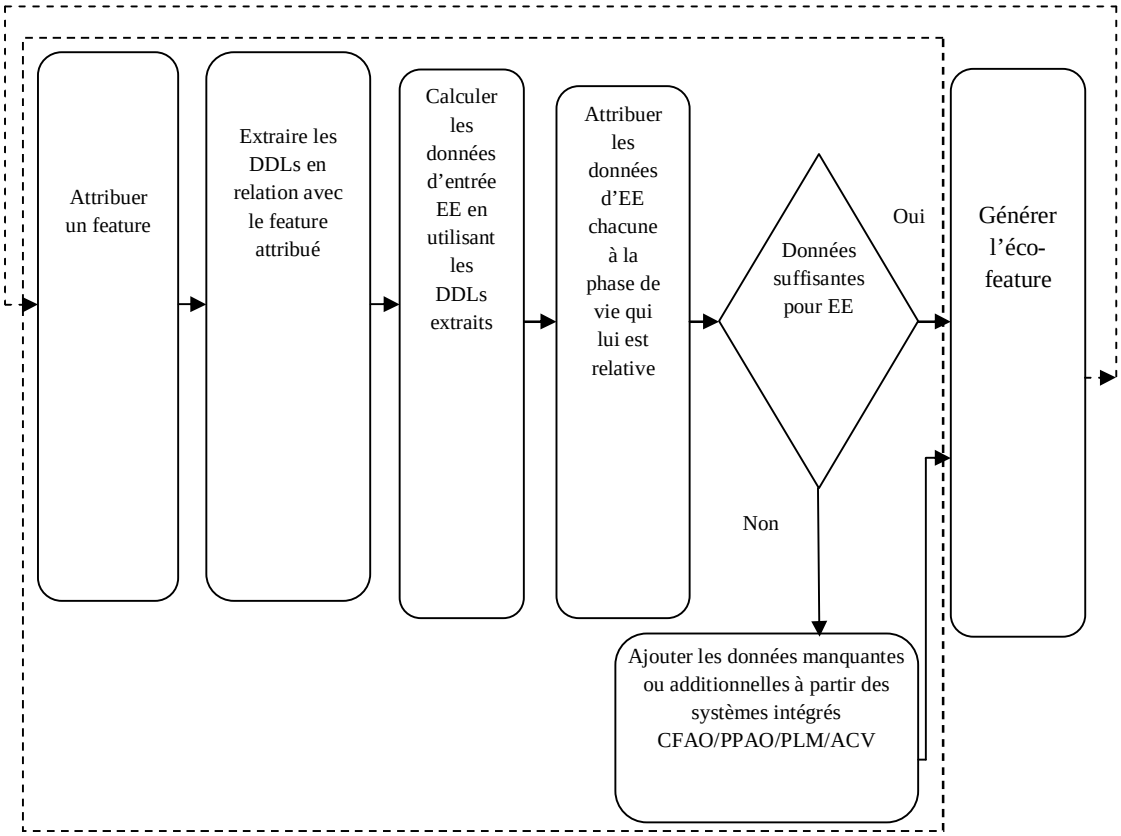


Figure 4. 9 Algorithme d'extraction des données d'un feature

Les données à extraire sont essentiellement les DDLs qu'on a introduits dans le chapitre 3. Ces DDLs sont utilisés pour calculer des données d'entrée pour des systèmes d'ACV. L'algorithme proposé dans la figure 4.9 présente un modèle de d'extraction des données au niveau d'un *feature* donné.

4.4.2. Modélisation des éco-features

En CFAO un produit peut être décrit par différents types de modèles de features. En effet, les *features* utilisés dans la phase de conception ne sont pas nécessairement les *features* de fabrication. Un exemple est donné dans la figure 4.10. La pièce en (a) peut être réalisée par addition d'un bossage au bloc de base comme illustré dans le modèle de *feature* de forme en (b). Cependant le modèle des *fetaures* de fabrication de la pièce peut être réalisé en soustrayant deux features (poches) à partir du brut qui englobe la pièce finie, comme montré en (c). Pour les applications de fabrication, on doit convertir le modèle de *features* de conception en un modèle de *features* de fabrication. Ce processus s'appelle conversion des modèles des *features*. Sachant qu'un *feature* de forme peut être positif/additif ou négatif/soustractif. D'où un *feature* d'usinage est un *feature* de forme négatif/soustractif associé à un processus d'usinage (Han, 1996).

Dans une orientation éco-conception on trouve des modèles développés, qui sont des modèles utilisés dans l'évaluation environnementale, tels que les modèles de produit et les modèles de processus. Les deux modèles décrivent le produit à partir de différent points de vue. Ils sont influencés par les propriétés du produit et par les processus du cycle de vie du produit (Marosky, 2007). Les différences entre les deux modèles sont listées dans le tableau 4.3.

En se basant sur notre approche d'intégration entre les systèmes CAO, FAO, PPAO, PLM et ACV, les données nécessaires à la réalisation d'une évaluation simplifiée quantitative du cycle de vie (ESQCV), telles que la masse de la matière enlevée, l'énergie nécessaire, le processus de fabrication à utiliser, les tolérances, sont extraites automatiquement. On établit un algorithme d'extraction des données nécessaires pour une évaluation environnementale et enrichir le modèle de feature classique qui devient par la suite un modèle d'éco-feature.

Tableau 4. 3 Différences entre les modèles de processus et de produit

Différences	Modèle de processus	Modèle de produit
Objectif principal	Description et orientation des processus du cycle de vie du produit	Description de la construction du produit et ses spécifications
Niveaux de structure	Processus du cycle de vie du produit	Assemblage du produit
Origine méthodologique/ domaine général d'application	Méthodologie ACV/ logiciels ACV	Développement du produit/ outils CAO

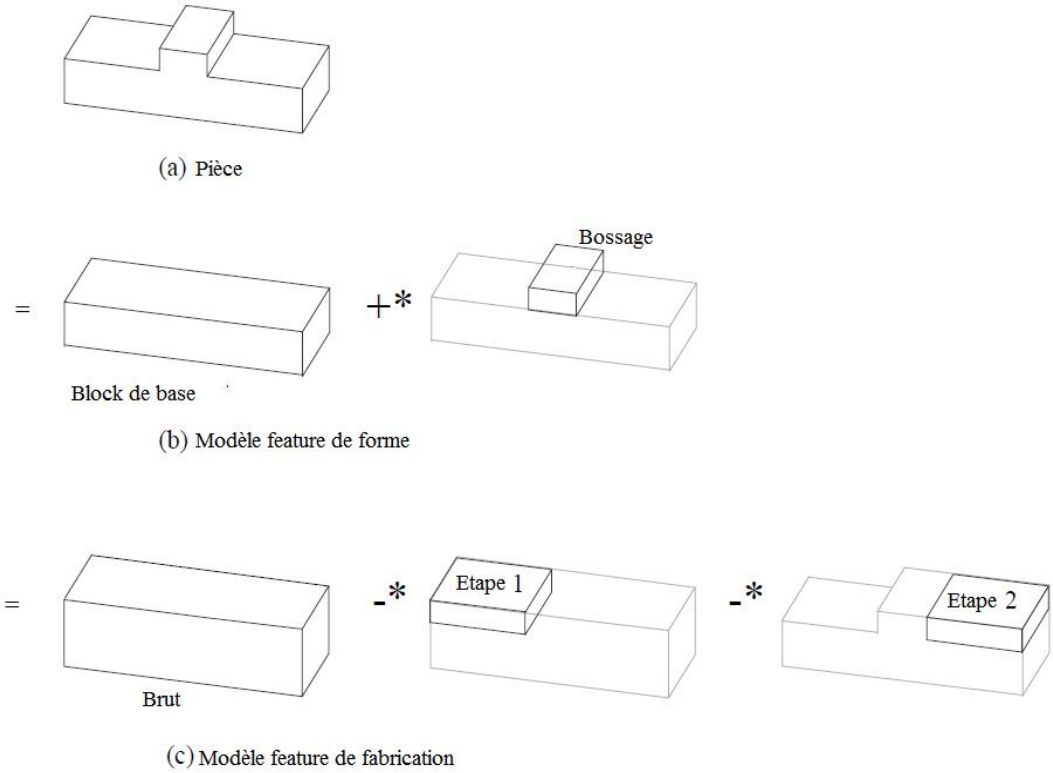


Figure 4. 10 Types des modèles de features (feature de forme/de fabrication)

Le modèle d'éco-fetaure de la pièce est vu par le concepteur, dans un premier scénario comme une somme d'IEx dus à la quantité de matière du brut dans un premier temps, et aux phases d'usinage dans un second temps (modèle (d) de la figure

4.11). Cependant, un modèle d'éco-feature peut porter différents scénarios comme le montrent les modèles (e) de la figure 4.11.

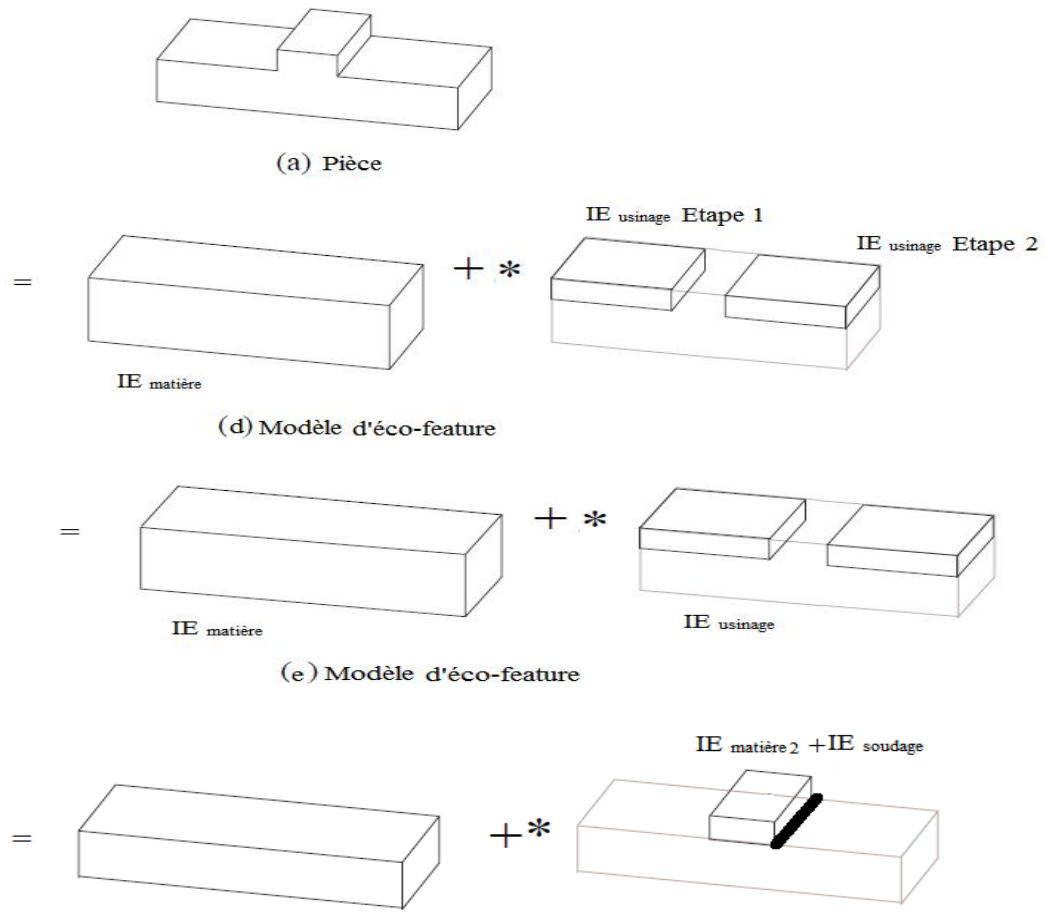


Figure 4. 11 La modélisation par scénarisation à travers les éco-features

La modélisation par *éco-features* va permettre de donner en temps réel des informations ou des indications en termes d'éco-conception. En effet, les trois types d'informations qu'inclue un éco-feature le permet. D'un point de vue physique, l'éco-feature inclue les DDLs du concepteur CAO qui présentent la base des données d'entrée d'une EE. Dans le domaine temporel, l'éco-feature couvre toutes les étapes du cycle de vie dès l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie. D'un point de vue scénarisation, l'éco-feature comprend un aspect combinatoire pour modéliser les différents scénarios de vie générés à partir des DDLs. La modélisation des éco-features passe par les trois étapes comme le montre la figure 4.12 :

- Liaison des données extraites avec les DDLs,

- classification des données dans un domaine temporel,
- génération des scénarios.

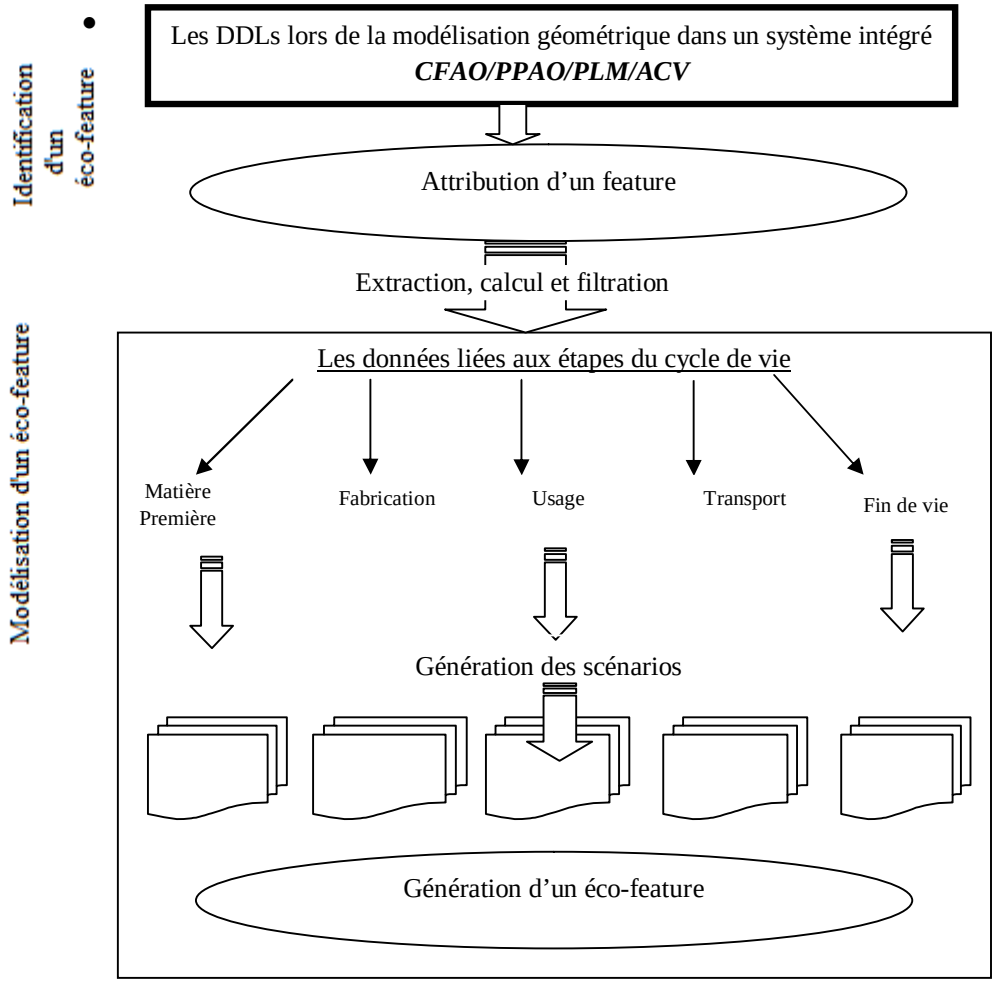


Figure 4. 12 Les étapes de génération d'un éco-feature

4.4.2.2. Classification des données dans un domaine temporel

Le domaine temporel concerne les différentes étapes du cycle de vie d'un *feature* classique. La classification des données se fait comme toute autre intégration réalisée jusqu'à présent de type CAO/ACV. Cette intégration consiste en une classification classique comme présentée dans le tableau 4.4:

Tableau 4. 4 Classification des données d'un feature selon chaque phase de vie

Phase	Données
Matière première	- Type du matériau - Quantité de matière (brut) - Etc.
Fabrication	- Processus utilisés - Énergies consommées - Traitements réalisés - Etc.
Usage	- Ressources à consommer - Produits additifs à utiliser - Etc.
Transport	- Quantité transportée - Distance - Etc.
Fin de vie	- % de recyclage - Processus du recyclage - Etc.

4.4.2.3 Génération des scénarios

Comme présenté au début de ce chapitre, l'éco-feature est un feature enrichi par des données liées aux étapes du cycle de vie dudit feature. Certaines de ces données sont exploitées directement et d'autres sont utilisées pour calculer d'autres données. Un modèle CFAO ne peut pas contenir des informations sur toutes les étapes du cycle de vie. D'où en se basant sur notre approche d'intégrer les systèmes PPAO, PLM et ACV avec un modeleur CFAO, on peut englober tout le cycle de vie du feature attribué. De ce fait, l'éco-feature est caractérisé par des attributs environnementaux

liés aux étapes de son cycle de vie. En outre, on trouve que les informations qui l'enrichissent peuvent constituer un scénario de vie unique comme elles peuvent permettre une modélisation des différents scénarios. Par exemple, si on considère le feature « trou lamé », sa réalisation, en se basant sur l'intégration avec le système PPAO, peut se faire selon deux scénarios si le processus est l'usinage ; soit on réalise le perçage puis le trou, soit on réalise le trou puis le lamage. Selon Sheng et al. (1995), les deux scénarios n'ont pas le même impact environnemental.

De ce fait, après avoir extrait les données à partir des différents systèmes intégrés (CFAO/CAPP ; CFAO/PLM ; CFAO/ACV), une filtration des données est réalisée. Cette filtration revient à attribuer les données extraites ou calculées à la phase de vie qui lui convient. On peut imaginer pouvoir attribuer un *feature*, imaginer plusieurs méthodes, plusieurs matériaux, plusieurs processus de fabrication et, selon ces méthodes de fabrication, imaginer plusieurs gammes de fabrication, plusieurs flux de matières de recyclage, plusieurs traitements thermiques différents dépendant du matériau. Cette étape représente la troisième étape dans la modélisation des éco-features.

Si on prend l'exemple du mitigeur et, plus précisément, le corps du mitigeur dans sa fin de vie, au sein d'un système intégré CAO/PLM on peut trouver une information qu'on récupère, par exemple, 80% de laiton en Algérie et 65% en Tunisie, car il y a des gens ou entreprises qui récupèrent assez systématiquement ces métaux qui ont de la valeur. Ce qu'il faut correctement modéliser ce sont les enchainements dans les scénarios, par exemple : si on récupère 65% des métaux en Tunisie et 80% en Algérie, et si on vend 60% des robinets en Tunisie avec une durée de vie moyenne estimée à 10 ans et 40% en Algérie avec une durée de vie moyenne estimée à 12 ans, on a des scénarios de vie et de recyclage différents et couplés dans une ACV s'exprimant par un nombre de flux de référence différent dans les deux scénarios.

Une entreprise possède ses propres données pour réaliser ses produits. Les scénarios des matières premières à utiliser, ou les accessoires à acheter à l'extérieur et d'autres paramètres présentent des données prédéfinies pour certains produits (stockées dans une base des données). Ainsi, les scénarios sont en nombre limité dans une base des données et, par suite, on peut définir les éco-features à utiliser. Pour

chaque scénario on a au final un impact calculable exprimé en Mid-points ou End-points.

Pour l'évaluation environnementale qu'on propose dans cette recherche, les entrées pour nous sont les scénarios : scénarios d'usage, scénarios de vie (combien de temps les gens utilisent les robinets) et les scénarios de fin de vie.

4.4.3. Modèle de génération des éco-features

D'après les sections précédentes, la génération d'un éco-feature passe par trois niveaux : niveau des données particulières, niveau des scénarios générés à partir du premier niveau et enfin un niveau global qui présente les phases de vie avec leurs différents scénarios. Cette modélisation par niveaux est illustrée dans la figure 4.13.

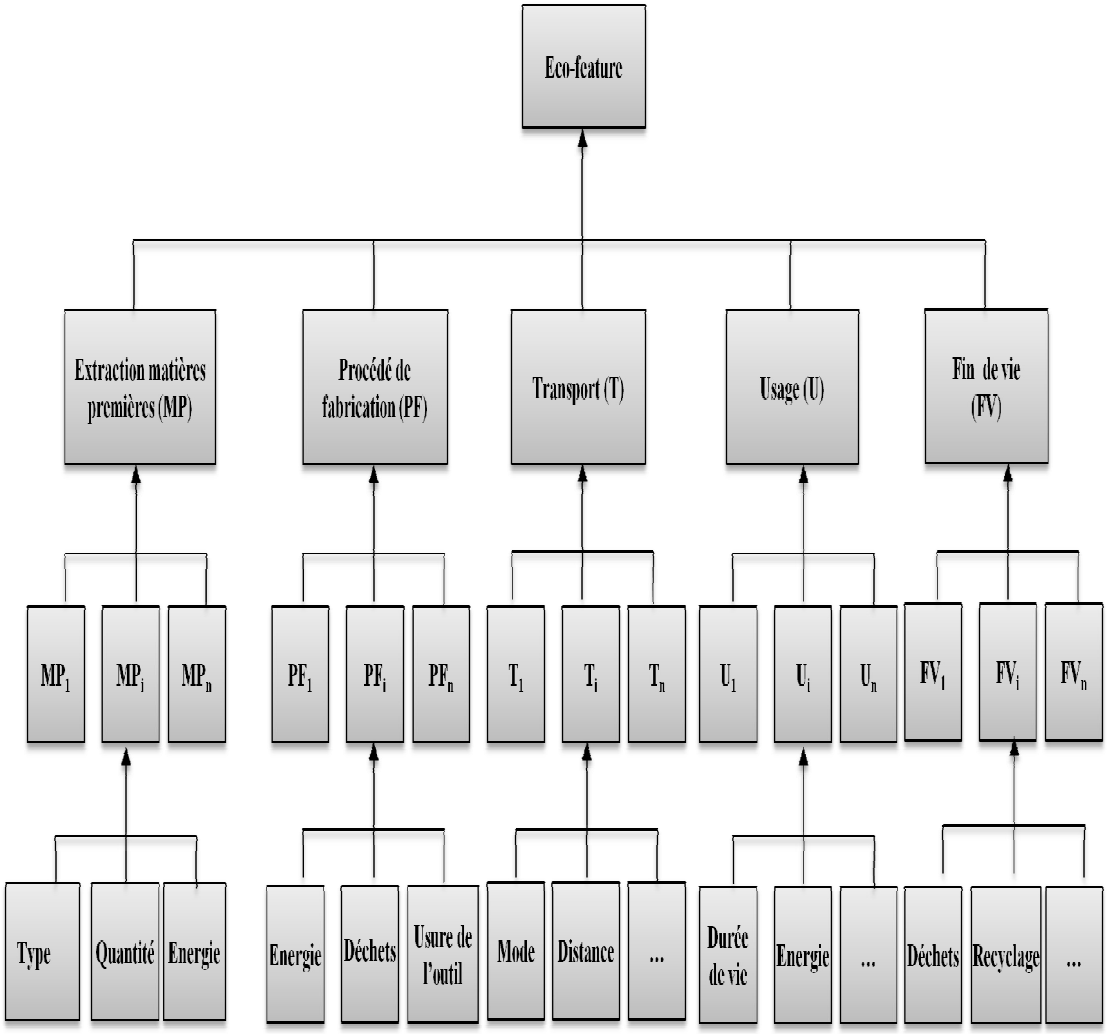


Figure 4. 13 Modèle de niveau pour la génération d'un éco-feature

4.5. Proposition d'un modèle de processus d'évaluation environnementale basé sur des éco-features

A l'aide des éco-features et en cours de modélisation géométrique, l'EE d'une pièce est devenue une pratique instantanée, pour différents scénarios de vie, qui permet de localiser les IEx les plus élevés ainsi que leurs sources. Cela nous permet d'introduire une nouvelle approche d'éco-conception lors de la conception de détails en temps réel basée sur la scénarisation grâce aux éco-features proposés. Le modèle proposé dans la figure 4.14 illustre les cinq étapes de cette nouvelle approche.

Le processus d'évaluation environnementale qu'on propose représente les deux premières phases du processus « ELA » qu'on a proposé dans le chapitre 3. Les deux sections suivantes présentent une description développée de chaque phase.

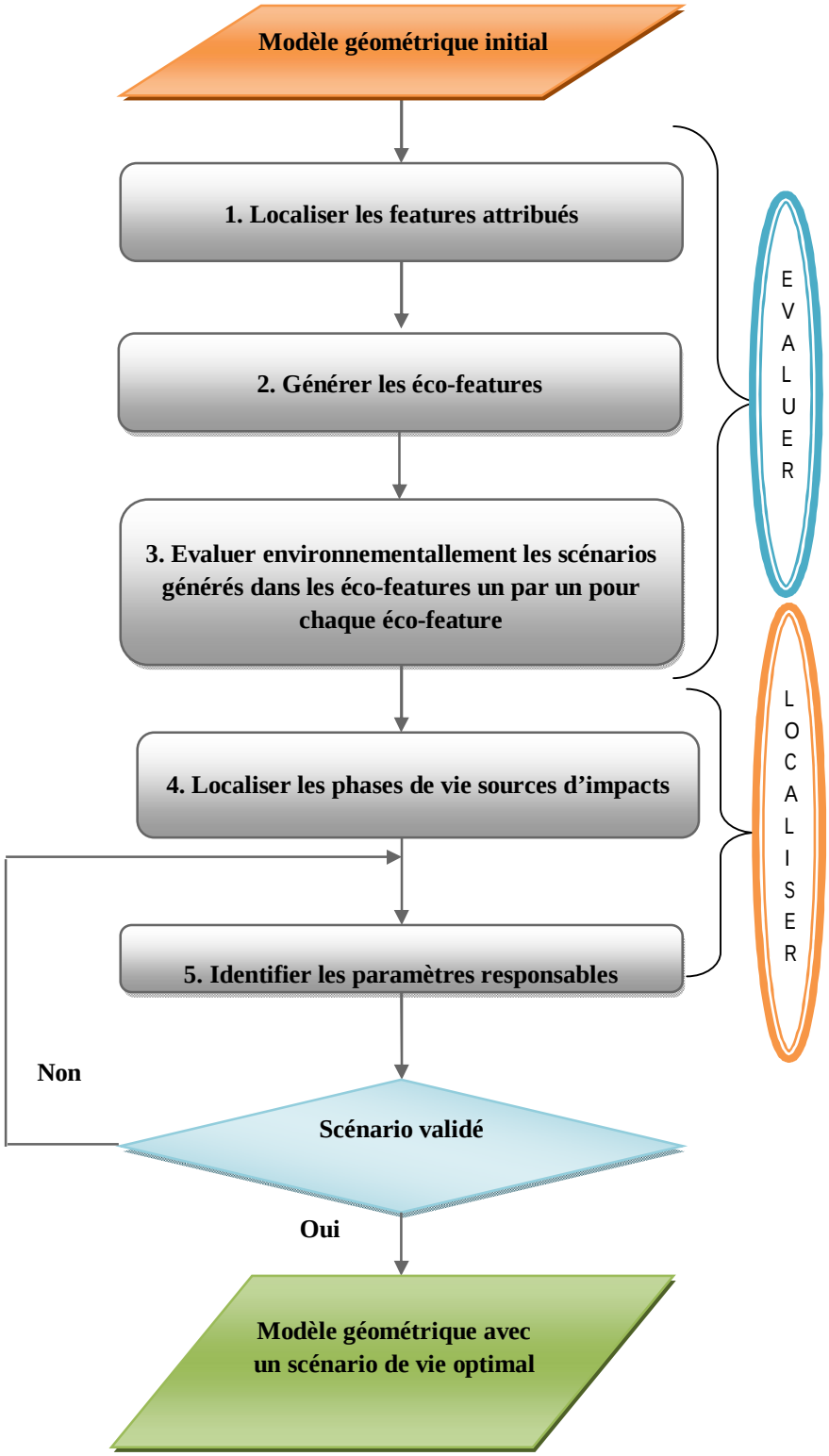


Figure 4. 14 Modèle de processus d'évaluation environnementale basé sur les éco-features

4.5.1. Application de la première étape du processus « ELA » : EVALUER

La réalisation de cette phase passe par trois étapes, comme le montre la figure 4.15 :

- Localiser les features attribués.
- Générer les éco-features.
- Evaluer environnementallement les scénarios générés dans les éco-features un par un pour chaque éco-feature.

Figure 4. 15 Les étapes de la première phase d'"ELA"

4.5.1.1. Localisation des features attribués

Cette étape consiste à analyser l'arbre de construction d'une pièce donnée pour extraire les différents features attribués. Cela a été réalisé par l'intermédiaire d'algorithmes. Pour notre recherche, on adopte l'algorithme décrit dans le travail de Jha et Gurumoorthy (2000), qui permet d'extraire automatiquement les features du modèle géométrique d'une pièce. Cet algorithme utilise la topologie caractéristique des faces d'une classe features particulière pour trouver les instances de cette classe, afin d'extraire un modèle de feature à partir d'un modèle géométrique.

4.5.1.2. Génération des éco-features

Cette phase consiste à réaliser un inventaire des données nécessaires pour une évaluation environnementale à partir du connecteur qu'on a proposé dans le chapitre 3. Ce connecteur exploite les intégrations réalisés entre les systèmes CAO et les systèmes PPAO, PLM, FAO et ACV pour collecter les données nécessaires dans une première étape, les filtrer et les classer dans le domaine temporel (les phases du cycle de vie) dans une seconde étape et, finalement, générer les différents scénarios de vie possibles de chaque feature attribué. Une description détaillée de cette phase est réalisée dans la section précédente de ce chapitre (cf.4.4).

4.5.1.3. Evaluation environnementale des scénarios portés par les éco-features

L'évaluation environnementale peut être réalisée par différents outils quantitatifs au sein du connecteur proposé (cf. 3.1.3). On peut se référer à une fiche élémentaire du procédé de fabrication, modélisée, tenant compte de la quantité de matière non récupérable, l'effet de l'huile, la correction de l'outil, le volume de matière, l'énergie électrique, etc. Les valeurs des indicateurs d'impacts à considérer peuvent être extraites d'une Base Des Données (BDD) d'un logiciel d'ACV. Le tableau 4.5 présente un exemplaire d'une telle fiche d'impacts.

L'évaluation environnementale peut être aussi réalisée par un outil numérique simplifié intégré au connecteur tel que « Bilan Produit » ou un outil d'ACV complète tel que « SimaPro ».

Tableau 4. 5 Fiche élémentaire du processus de fonderie

Paramètre à évaluer	Impact environnemental
Taux de matière non récupérable	$IE_{\text{déchets NR}}$
Effet de l'huile	IE_{huile}
Quantité de l'énergie électrique /kg	IE_{WE}
Usure de l'outil lors de la correction de la pièce	IE_{outil}

En tenant compte des hypothèses posées dans la section 4.3, le calcul de l'impact environnemental total d'un scénario de vie (i) d'un éco-feature correspond à la somme des impacts environnementaux de chaque phase de vie par la méthode CML comme le montre l'équation 4.5. De même, rappelons-le, l'IE d'un modèle géométrique d'une pièce présente la somme des impacts environnementaux de chaque éco-feature comme le montre l'équation 4 énoncée précédemment.

$$IE_{EFi} = IE_{MPi} + IE_{Fi} + + IE_{Ui} + IE_{Ti} + IE_{FVi} \qquad \textit{(eq. 4.5)}$$

4.5.2. Application de la deuxième étape du processus « ELA » : LOCALISER

La réalisation de cette phase passe par deux étapes, comme le montre la figure 4.16 :

- Localiser les phases de vie sources d'impacts
- Identifier les paramètres (éléments) responsables

Figure 4. 16 Les étapes de la deuxième phase d'ELA

Lors de la première étape, on réalise un tri des sommes des impacts dans le tableau des « Résultats par phase de vie » pour chaque phase de vie. Par la suite, on indique la phase la plus impactante pour commencer la recherche dans le tableau des impacts de la phase mentionnée et réaliser un autre tri des résultats. Ce deuxième tri permet de localiser l'élément le plus impactant et l'indiquer au concepteur.

L'élément indiqué au concepteur est en relation avec les DDLs qui restent au concepteur lors de la phase de modélisation géométrique. Cependant d'autres contraintes peuvent être imposées à un modèle géométrique donné et les DDLS doivent par la suite être réduits. De ce fait, le concepteur doit indiquer au début les DDLs qui lui restent réellement, c'est-à-dire sur lesquels il peut agir pour réduire les IEx de son modèle géométrique.

4.6. Application sur le corps du mitigeur de lavabo

4.6.1. Localisation des features

Le cas d'étude considéré pour valider notre modèle de processus d'évaluation environnementale basé sur les éco-features est la pièce corps du mitigeur illustrée dans la figure 4.17. Son arbre de construction sur le modeleur géométrique « CATIA » est représenté dans la figure 4.18. A partir de cette arbre de construction, on localise l'existence de 34 features de forme (1 surface épaisse, 4 extrusions, 3 solides multi-sections, 4 poches, 7 trous et 4 répétitions trous, 7 congés et 4 coupes) et un feature de processus (le matériau : Laiton).

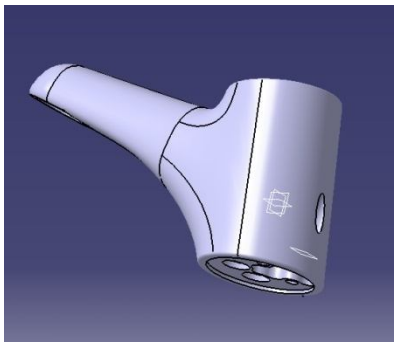


Figure 4. 17 Corps du mitigeur cas d'étude

Le choix du corps du mitigeur pour valider notre approche est basé sur les résultats d'analyse du cycle de vie réalisés auparavant dans le chapitre 2 (cf. 2.2.1.3) qui montrent que le composant le plus impactant du mitigeur complet est le corps.

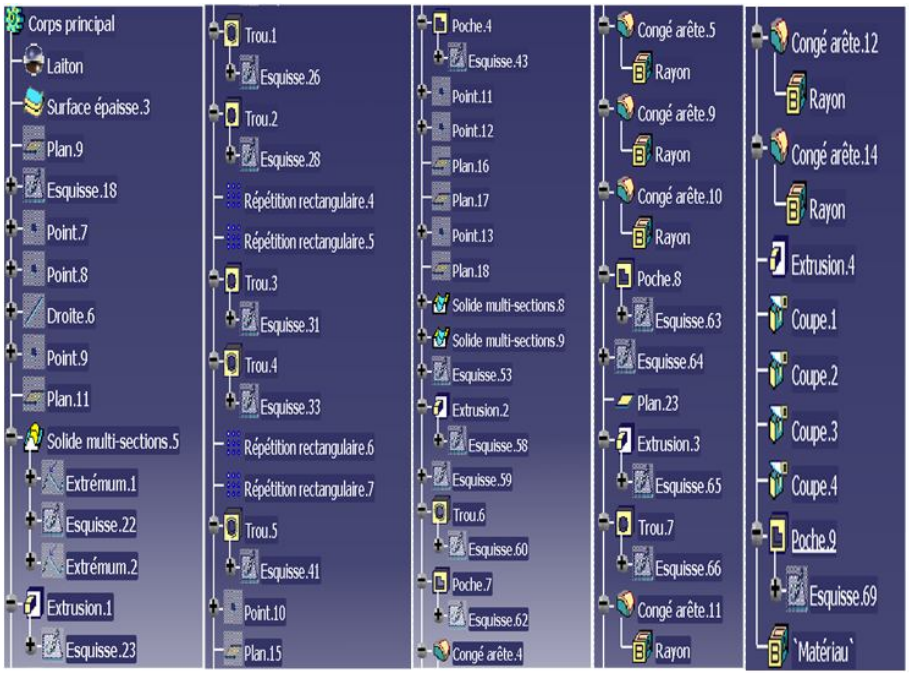


Figure 4. 18 Arbre de construction CAO sur CATIA du corps du mitigeur

4.6.2. Génération des éco-features

L'enrichissement des features localisés avec des données qui permettent leurs évaluations environnementales transforment ces features en éco-features. De ce fait on aura les éco-features représentés dans la figure 4.19.

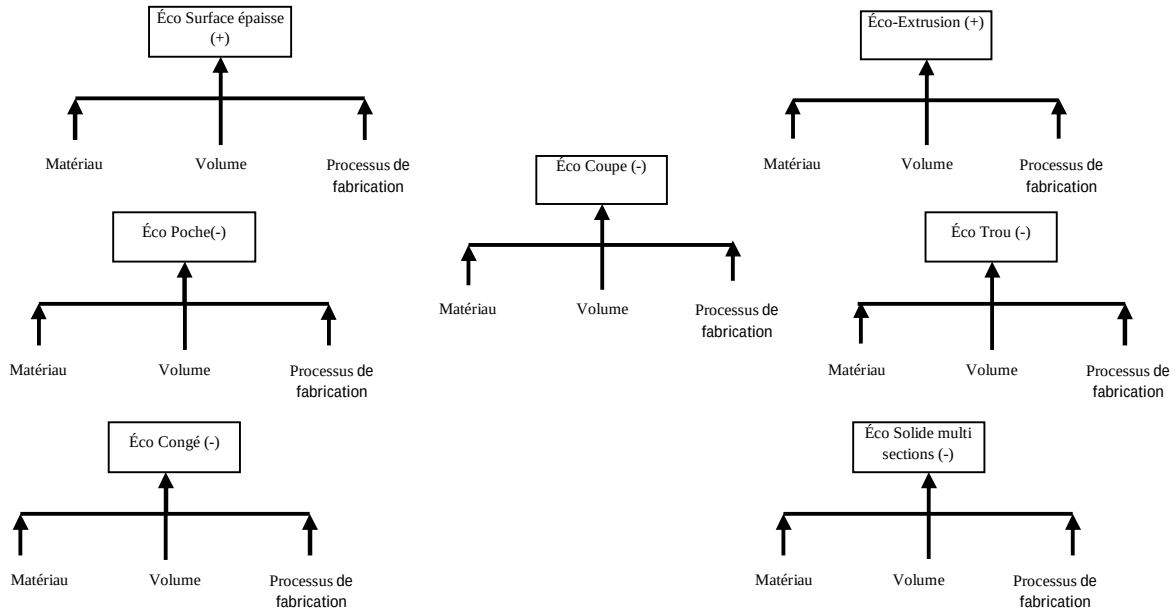


Figure 4. 19 Ensemble des éco-features à utiliser pour l'éco-conception du corps du mitigeur

4.6.2.1. Extraction des données relatives aux features localisés

L'extraction des données d'un feature doit se faire sous l'hypothèse qu'il a les mêmes phases d'usage et de transport que la pièce auquel il fait partie. D'où l'évaluation environnementale qu'on va pratiquer dans cet exemple concerne uniquement les phases de matière première, de la production et de la fin de vie. L'inventaire des données du cycle de vie est appliqué à chaque feature attribué. Le système CAO CATIA nous permet d'accéder aux données présentées dans le tableau 4.6 pour les features de forme. Ces données sont notamment les volumes de matière ajoutée ou enlevée et, de ce fait, elles permettent de connaitre la masse totale de la quantité de matière enlevée du brut. Un modeleur CAO nous donne aussi accès au matériau correspondant, qui est ici le laiton. Un système PLM nous informe que la matière première est importée de Monastir sous forme de lingot de laiton, ainsi que les déchets issus de la fabrication sont récupérés à 80% et recyclés au sein de la société. Le trou 6 peut être de Ø8 mm ou de Ø16 mm et il est lié à la consommation annuelle moyenne d'eau qui est peut être, respectivement, de 54000kg ou 36000 kg. En effet, à un même débit, si le trou est de Ø8 mm, le jet devient trop fort pour laver les mains et n'arrive pas à les arroser et si le trou est de Ø16 mm le jet assurerait un lavage des mains en 1.5 fois moins de temps.

Tableau 4. 6 Effet de l'ajout des différents features du corps du mitigeur sur la variation du volume, de la masse et de la surface

feature	Volume x10^{-5} (mm^3)	Masse (Kg)	Masse du feature attribué (Kg)	Processus utilisés
Surface épaisse	5,3	0,435	0,435	Moulage
Solide multi sections,5	8,505	0,699	0,264	Moulage
Extrusion 1	12,82	1,053	0,354	Moulage
Trou1	12,71	1,045	-0,008	Perçage
Trou 2	12,65	1,039	-0,006	Perçage
Répétition 4 Trou 2 (x 1)	12,59	1,033	-0,006	Perçage
Répétition trou1 (x 1)	12,48	1,025	-0,008	Perçage
Trou 3	12,47	1,025	-0,0001	Perçage
Trou 4	12,46	1,023	-0,002	Perçage
Répétition 6 (trou 3 x 1)	12,45	1,023	-0,0001	Perçage
Répétition 7	12,43	1,021	-0,002	Perçage
Trou 5	9,248	0,76	-0,261	Fraisage
Poche 4	9,009	0,74	-0,002	Fraisage
Solide multi sections 8	8,152	0,67	-0,007	Moulage
Solide multi-sections 9	7,507	0,617	-0,053	Moulage
Extrusion 2	7,813	0,642	+0,025	Moulage
Trou 6	7,507	0,617	-0,025	Fraisage
Poche 7	7,5	0,617	-0,0001	Fraisage
Congé 4	7,5	0,617	-0,0001	Moulage
Congé 5	7,503	0,616	-0,001	Moulage
Congé 9	7,5	0,616	-0,0001	Moulage
Congé 10	7,5	0,616	-0,0001	Moulage
Poche 8	7,39	0,607	-0,009	Fraisage
Extrusion 3	7,42	0,61	+0,003	Moulage
Trou 7	7,38	0,606	-0,004	Moulage
Congé 11	7,38	0,606	-0,0001	Moulage
Congé 12	7,38	0,606	-0,0001	Moulage
Congé 14	7,38	0,606	-0,0001	Moulage
Extrusion 4	7,406	0,608	+0,002	Moulage
Poche 9	7,39	0,607	-0,001	Fraisage

D'après les données industrielles qui nous ont été fournies, le processus d'usinage est imposé, celui-ci est composé de trois phases :

- Moulage du corps
- Usinage coté flexible
- Usinage coté cartouche (voir dessin d'ensemble cf.2.2)
- Perçage (pour la fixation)

Cela nous réduit le champ de scénarios du degré de liberté lié au processus de fabrication sur certains features attribués. Cependant l'usinage peut encore être réalisé de différentes manières, juste en modifiant l'ordre des séquences d'usinage.

Au sein d'une pièce il existe des interactions entre les features (interactions géométriques et interactions de processus (Sheng et al., 1996)). Dans notre étude, on ne va pas tenir compte de ces interactions. On suppose que le processus d'éco-conception proposé est pratiqué sur un feature indépendamment des autres. D'où, l'éco-conception d'une pièce consiste à agréger tous ses éco-features.

La génération des éco-features se concentre sur l'évaluation environnementale des différents types de features. Dans notre exemple, on trouve les types suivants :

- surface épaisse,
- extrusion,
- solide multi-sections,
- poche,
- trou,
- congé,

4.6.2.2. Classification des données dans le domaine temporel

Pour chaque feature, les données extraites d'un système intégré CFAO/PPAO/PLM/ACV sont classées dans le domaine temporel selon chaque phase de vie. On prend, par exemple, les données relatives à trou.6 et on les classe dans le domaine temporel comme l'illustre le tableau 4.7.

Tableau 4. 7 Classification des données du Trou.6

Feature	Données relatives aux phases du cycle de vie				
Trou.6	Matière Première	Fabrication	Usage	Transport	Fin de vie
	*Matière : Laiton *Masse (Kg) : 0.025	*Processus : Fraisage CNC *Energie : 0.005KWh *Chromage : 0.001mm^2 * Dégraissage : 0.001 mm^2	Eau (kg) : 36000	*Masse : 0.025 *Distance : 20km 0.0005t.km	*Masse 0.025kg *% recyclage 80%

4.6.2.3. Génération des scénarios possibles

Les scénarios doivent se faire au niveau système. Au fur et à mesure qu'on conçoit une pièce et qu'on fait des choix sur les processus de fabrication ou de make or buy ou sur les traitements thermiques, on fournit une indication supplémentaire (en gardant toujours l'hypothèse que ça ne va pas changer les durées de vie).

Tableau 4. 8 Exemple des scénarios de fabrication possibles pour les features attribués au corps du mitigeur

Feature	**Processus possibles**	**Feature**	**Processus Possibles**	**Feature**	**Processus Possibles**
Surface épaisse	Moulage/estampage	Répétition.7	Perçage /moulage	Congé.9	Moulage/ Meulage
Solide multi sections.5	Moulage/estampage	Trou.5	Perçage /moulage	Congé.10	Moulage/ Meulage
Extrusion.1	Moulage/ estampage/ usinage	Poche.4	Moulage/ Fraisage	Poche.8	Usinage
Trou1	Perçage /moulage	Solide multi sections.8	Fraisage / moulage	Extrusion.3	Moulage
Trou 2	Perçage /moulage	Solide multi-sections.9	Moulage / usinage	Trou.7	Perçage
Répétition.4 Trou2 (x1)	Perçage /moulage	Extrusion.2	Moulage/ usinage	Congé.11	Moulage/ Meulage
Répétition trou1.5 (x1)	Perçage /moulage	Trou.6	Usinage	Congé.12	Moulage/ Meulage
Trou 3	Perçage /moulage	Poche.7	Usinage	Congé.14	Moulage
Trou 4	Perçage /moulage	Congé.4	Moulage/ Meulage	Extrusion.4	Moulage
Répétition.6 (trou3 x1)	Perçage /moulage	Congé.5	Moulage/ Meulage	Poche.9	Usinage

Selon le feature attribué, différents scénarios de fabrication peuvent être générés. Le tableau 4.8 montre un exemple de scénarisation du processus de fabrication pour chaque feature attribué lors de la modélisation géométrique du corps du mitigeur.

Vue la complexité de la pièce cas d'étude (grand nombre de features utilisés), on s'est limité à la génération d'un seul éco-feature qui est relatif au trou.6. Ce trou a été considéré parce qu'il est en relation avec l'usage du système complet. La figure 4.20 présente l'éco-feature « Eco-trou.6 ».

Pour la génération de l'éco-trou.6 nous avons considéré 2 scénarios liant les phases de Matière première, Usage Transport et 3 scénarios liant les phases de fabrication et de Fin de vie. Ces scénarios sont présentés dans les tableaux 4.9 et 4.10.

Tableau 4. 9 Données du trou liées aux phases de Matière première, du transport et d'utilisation

Phase	**Scénario 1**		**Scénario 2**	
Matière Première	Matière : Laiton	Masse : 0.025 kg	Matière : Laiton	Masse : 0.0125 kg
Transport	Moyen : Camion < 16t	Masse : 0.025	Moyen : Camion < 16t	Masse : 0.0125
Utilisation	Eau : 36000kg		Eau : 54000kg	

Tableau 4. 10 Données du trou liées aux phases de fabrication et de fin de vie

Phase	**Scénario 1**		**Scénario 2**		**Scénario 3**	
Fabrication	Processus :	Perçage	Processus :	Tournage	Processus :	Perçage
	Temps :	4mn20	Temps :	4mn15	Temps :	3mn50
	Energie :	0,0045 Kw	Energie :	0,0055 Kw	Energie :	0,005 Kw
	% récupération déchets :	50%	% récupération déchets :	60%	% récupération déchets :	80%
Fin de vie	%recyclage déchets	50%	%recyclage déchets	60%	%recyclage déchets	80%

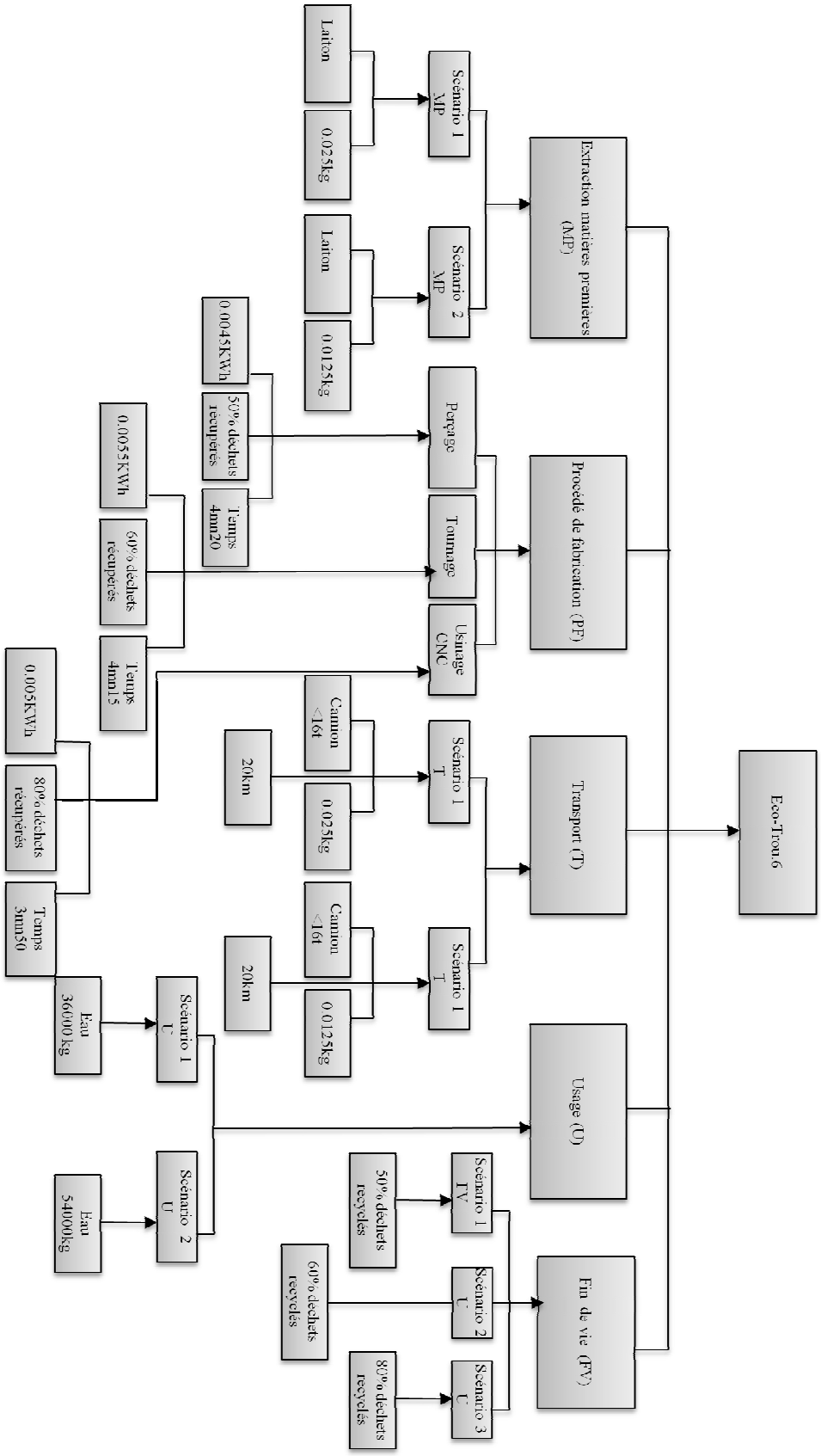


Figure 4. 20 Modèle de l'éco-trou.6

On obtient alors six scénarios de vie possibles pour le trou 6, qui sont présentés dans la figure 4.21.

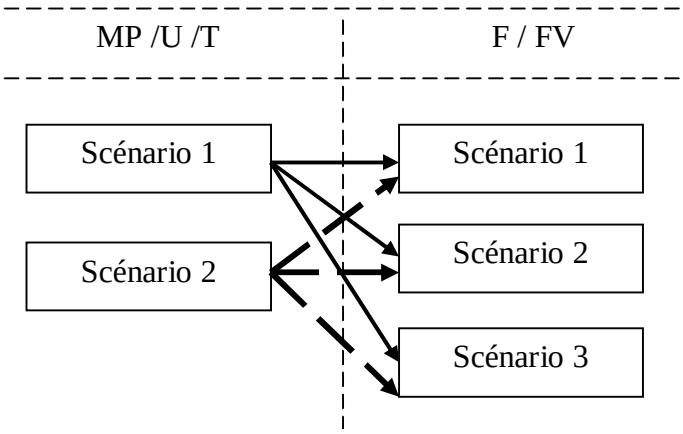


Figure 4. 21 Combinaison de différents scénarios de vie du trou.6

4.6.3. Evaluation environnementale des scénarios portés par l'éco-trou.6

Une fois les données classées selon chaque phase de vie et les scénarios possibles générés, l'étape d'évaluation environnementale de ces scénarios démarre pour calculer les impacts environnementaux de chacun d'eux, tout en introduisant au début le nombre de flux de référence « 2,5 » qui est celui de notre système d'étude global.

Une comparaison des résultats est faite pour voir quel est le moins impactant afin de pouvoir identifier les paramètres responsables pour améliorer la qualité environnementale du feature. Cette comparaison est illustrée dans la figure 4.22 obtenue en utilisant le logiciel « Bilan Produit » qui se base sur la méthode CML lors du calcul des impacts.

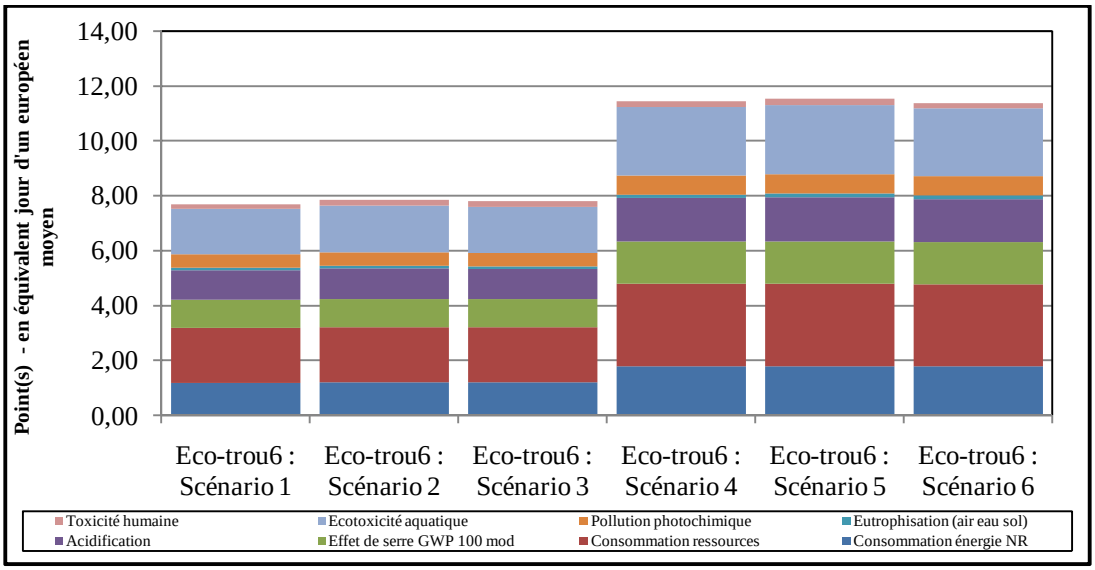


Figure 4. 22 Comparaison des Impacts environnementaux des scénarios par l'éco-trou.6

4.6.4. Localisation des phases de vie les plus impactantes de l'éco-trou.6 et identification des paramètres responsables des impacts environnementaux

L'index de recherche a permis de localiser le scénario 1 comme le scénario le moins impactant tandis que le scénario 5 est le plus impactant. Le concepteur peut visualiser aussi graphiquement la comparaison entre les différents scénarios, afin de choisir le scénario qu'il juge optimal pour sa modélisation géométrique.

Par notre modèle d'évaluation environnementale, le concepteur peut visualiser les sources d'impacts du scénario qu'il choisit. Pour ce faire, nous avons choisi le scénario 1, qui est le scénario optimal, pour identifier ses sources d'impacts. La figure 4.23 illustre l'impact de chaque phase de vie de l'éco-trou 6 dans le scénario 1. Ce graphique montre que la phase d'utilisation est la phase la plus impactante dans ce scénario d'où il est nécessaire de savoir quels sont les paramètres responsables. Cependant le seul paramètre utilisé pour cette phase est l'eau potable. D'où, la réduction de l'IE de cet éco-trou est liée à la réduction de la quantité d'eau à consommer. A ce stade, on arrive à localiser les sources d'impacts. Ces sources doivent être liées aux DDLs, pour pouvoir préciser la zone d'action du concepteur. Pour cela, la liaison entre les DDLs et les sources d'impacts fait l'objet du chapitre suivant (Chapitre 5).

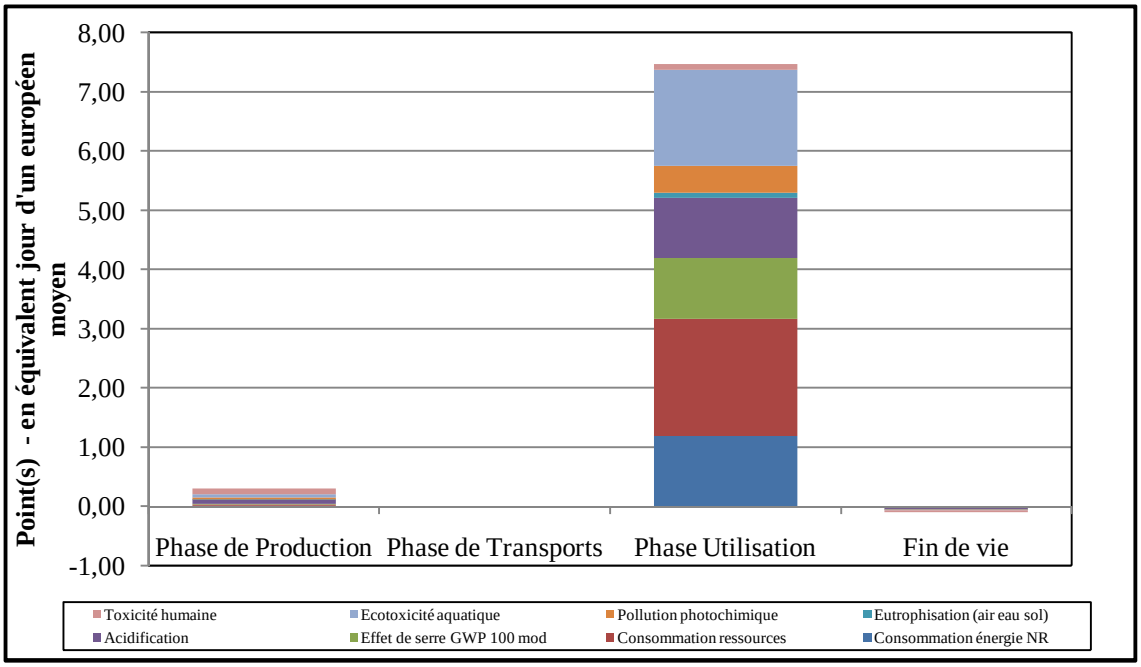


Figure 4. 23 Impacts par phase de vie pour le scénario 1 de l'éco-trou6

4.7. Conclusion

Ce chapitre présente les éco-features développées pour réaliser les deux premières phases de la démarche « ELA » d'éco-conception proposée, c'est-à-dire l'évaluation et la localisation. Ces éco-features sont obtenus à partir d'un enrichissement sémantique des features classiques des systèmes CAO par les trois informations concernant la géométrie, le matériau et le processus de fabrication. Puisque ces trois informations sont étroitement liées, une combinaison géométrie-matériau-procédé de fabrication constitue un scénario de vie pour un éco-feature. Plusieurs scénarios de vie pour le même éco-features sont alors générés en agissants sur les DDLs. Chaque scénario est accompagné par des directives d'éco-conception telles que la réduction de la masse, le choix des procédés de fabrication les plus écologique, le choix du brut offrant le moins de déchet matière. Les différents scénarios, d'usage de vie et de fin de vie constituent les éléments d'entrée pour le système d'évaluation environnementale. Une fois chaque scénario évalué, l'étape suivante de la méthodologie d'éco-conception « ELA » est la localisation des phases de vie source d'impacts environnementaux et l'identification des paramètres qui en sont responsables. Dans la dernière partie de ce chapitre on a présenté l'application de ces deux étapes à l'exemple de mitigeur de Lavabo.

Dans le chapitre suivant on présente comment la variation des paramètres peut influer sur la réduction ou l'augmentation des impacts environnementaux d'un feature, ou d'une pièce ou d'un assemblage. De plus la liaison des IEx aux DDLs du concepteur peut aider à améliorer la qualité environnementale des produits dès la phase de modélisation géométrique. Pour cela, un Modèle de DDLs est développé dans le chapitre 5.

Chapitre 5: Proposition d'un processus d'action pour une amélioration environnementale en CAO des éco-features

Introduction

Quand on arrive à la phase de conception de détails, 80% des choix de conception sont effectués (Song et Liu, 2003). A cette étape, les questions qui se posent sont les suivantes :

- Quels sont les outils qu'on peut utiliser à chaque fois qu'on va concevoir une pièce ?
- Que peut-on faire pour que chaque pièce soit éco-conçue en soit et que le système global soit éco-conçu ?

On part du principe que le système mécanique est modélisé de manière paramétrique et peut encore évoluer durant la conception selon des Degrés De Liberté (DDLs) sur les liaisons, sur les dimensions globales, la cotation et le choix des matériaux.

Pour éco-concevoir un feature, une pièce, puis un système global, il est nécessaire de déterminer les DDLs qui restent pour le concepteur sur lesquels il peut agir pour éco-concevoir son système en CAO. Cependant, le choix des DDLs les plus influençants en termes d'éco-conception est lié essentiellement aux sources d'impacts localisées à partir des résultats du calcul des impacts environnementaux.

5.1. Le concept des DDLs orientés éco-conception

La notion des degrés de liberté (DDLs) lors d'un processus de conception n'est pas nouvelle. En effet, dans le travail d'Andreasen et Hein (1987) on trouve la notion des (DDLs) de Conception qui, selon leur approche, correspond à une présentation du processus de conception sous forme d'une pyramide comme le montre la figure 5.1. Ces DDLs présentent les niveaux d'avancement du processus de conception, où chaque niveau a un lien de causalité rapport aux autres et la limitation d'un DDL va influencer les DDLs ci-dessous. Selon la pyramide, la conception est terminée lorsque les niveaux les plus bas de la pyramide sont fixés. D'où, le nombre d'informations à propos du système devient de plus en plus important.

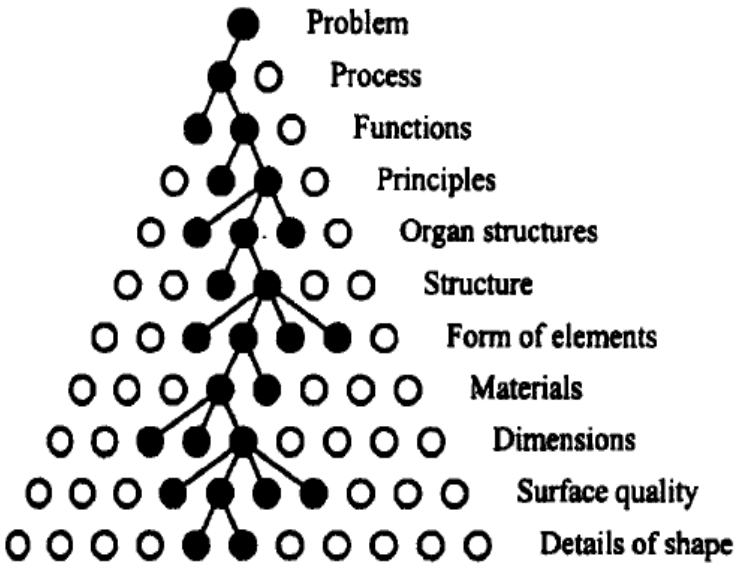


Figure 5. 1 Figure Les degrés de liberté du processus de conception selon Andreasen et Hein (1987)

En utilisant cette pyramide, Bhander et Hauschild (2003), dans un premier temps, proposent un processus de conception générique simplifiée soucieux de l'environnement et en relation avec les DDLS (Figure 5.2).

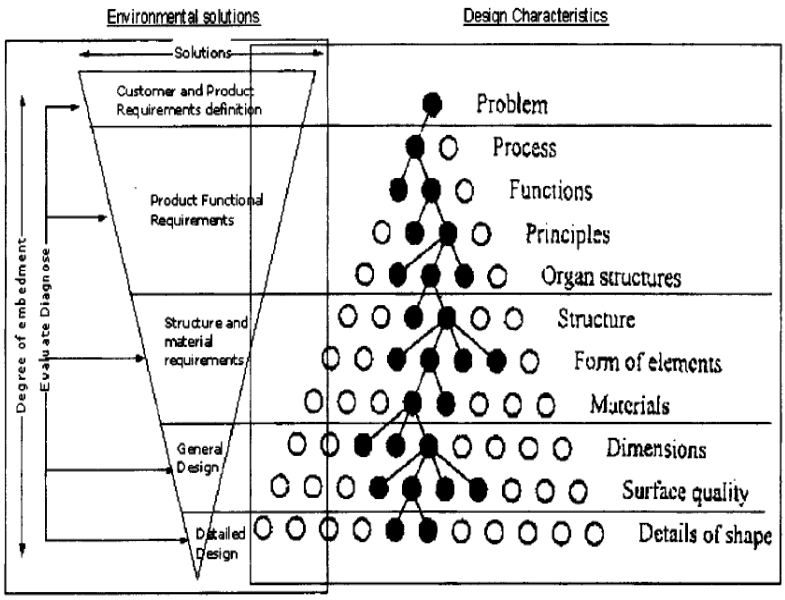


Figure 5. 2 Modèle Simplifié de la conception consciente de l'environnement selon Bhander et Hauschild (2003)

C'est un modèle générique de conception appelé Conception consciente de l'environnement (CCE), qui combine les « caractéristiques de conception » donné dans Andreasen et Hein (1987) et l'espace des « solutions environnementales ».

Dans un second temps, Bhander et Hauschild exploitent leur modèle de CCE pour présenter le paradoxe qui existe entre les DDLs pour la conception des solutions environnementales, d'une part, et la connaissance du produit d'une autre part. La figure 5.3 illustre ce paradoxe et montre qu'au cours du temps, la connaissance des produits augmente alors que le nombre de DDLs restants en conception et la capacité d'inclure des solutions environnementales diminuent. A la fin du processus, la connaissance du produit est plus grande, mais les possibilités de modification de la conception et de l'amélioration des performances environnementales sont restreintes. Des changements majeurs ne sont alors plus possibles, seules des modifications mineures peuvent être incorporées.

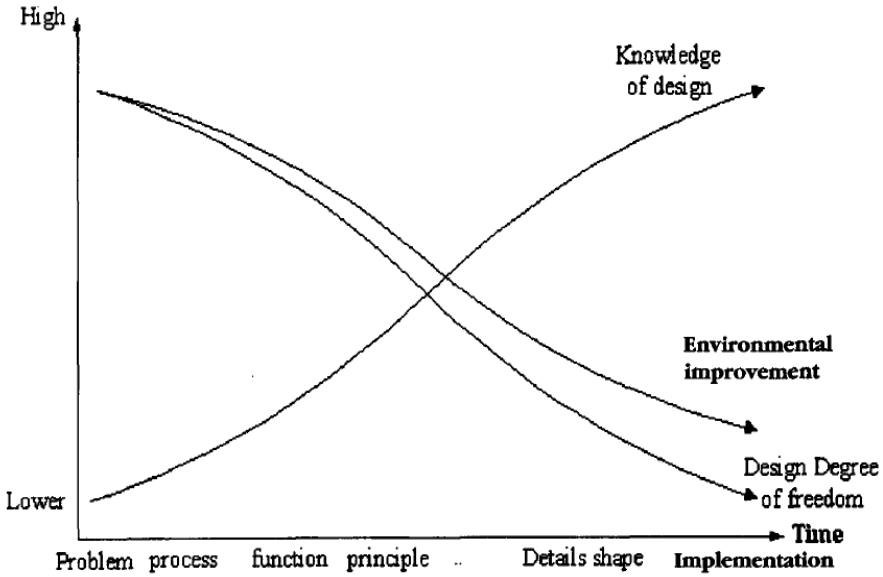


Figure 5. 3 Le paradoxe de l'éco-conception (Bhander et Hauschild, 2003)

Dans le chapitre précédent (cf. 4), nous avons montré que l'étape de la conception détaillée n'autorise que quelques DDLs au concepteur, cependant les choix effectués au niveau d'un feature peuvent influer sur la réduction des impacts environnementaux du système global. Lors de cette phase et essentiellement la phase de CAO, la zone

d'action du concepteur est assez réduite. L'identification de DDLs qui lui restent est réalisée dans la section suivante.

5.1.1. Identification des DDLs du concepteur CAO

Lors de la modélisation CAO la zone d'action du concepteur est assez réduite par rapport à la phase de conception conceptuelle. A cette étape avancée dans le processus de conception on a identifié 7 DDLs qu'on a introduits dans le chapitre 3.

- DDL1 : Formes
- DDL 2 : Dimensions
- DDL 3 : Matériaux
- DDL 4 : Volumes
- DDL 5 : Processus de fabrication
- DDL 6 : Choix du « *make or buy* » (transport : faire localement si nous avons la technologie)
- DDL 7 : Les traitements thermiques et de surface

Ces degrés de liberté peuvent être utilisés pour procéder à une éco-conception, car ils représentent les caractéristiques des *features*. Ils peuvent être corrélés aux systèmes d'information tels les systèmes CAO, FAO, PPAO et PLM.

Cette corrélation entre les DDLs et les systèmes d'informations qui peuvent être utilisés lors de la modélisation géométrique, peut nous servir lors de l'éco-conception d'un feature et spécialement pour l'amélioration environnementale. En effet, Les données qu'on peut extraire d'un système intégré CFAO/PPAO/PLM/ACV sont en relation directe avec les DDLs permis lors de la modélisation géométrique. Cela implique que les impacts environnementaux d'un feature donné sont dus aux DDLs.

5.1.2. Identification des DDLs liés aux sources d'impacts

La deuxième phase d'un processus d'éco-conception est l'amélioration environnementale. Dans notre cadre de recherche, cette phase consiste à améliorer la qualité environnementale d'un *feature* ou de l'ensemble des *features* évalués environnementallement en détectant les différents degrés de liberté en relation avec

les sources d'impacts, pour vérifier la possibilité d'action sur ces DDLs afin d'agir là-dessus et améliorer les performances environnementales du modèle géométrique en cours de développement. La localisation des DDLs sources d'impacts permet au concepteur d'agir sur le modèle géométrique initial afin de l'éco-concevoir. Ce modèle est basé sur les résultats trouvés à partir de l'évaluation environnementale basée sur les *éco-features*. La figure 5.4 montre l'emplacement du rôle des DDLs dans un processus d'éco-conception.

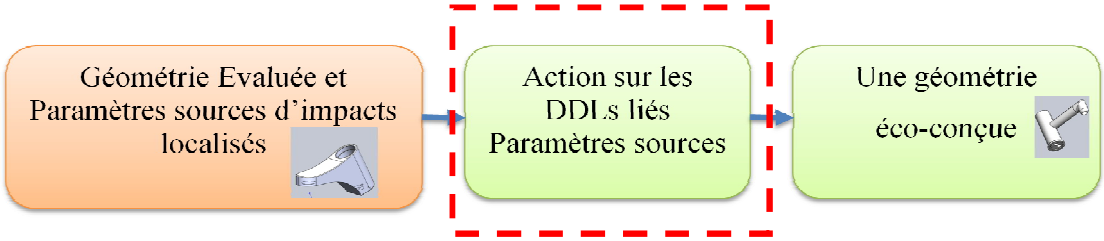


Figure 5. 4 Emplacement du rôle de DDLs dans un processus d'éco-conception

5.1.3. Identification des DDLs présentant une zone d'action possible

A cette étape, les DDLs CAO les plus influençants sur l'amélioration environnementale du modèle géométrique évalué sont déjà identifiés. Cependant, selon le cahier des charges fonctionnel du produit (CDCF), certains DDLs peuvent être éliminés et puisque selon Andreasen et Hein (1987), il existe une relation de causalité entre les DDLs, alors l'élimination de certains peut influencer d'autres. D'où, une représentation hiérarchique des interactions des impacts des DDLs est nécessaire pour voir l'influence de chaque DDL et la possibilité d'action sur le modèle géométrique pour atteindre l'objectif de son éco-conception.

Vue l'importance de la phase de conception de détails dans l'éco-conception des produits et plus précisément le choix des DDLs de CAO, il est nécessaire de développer un modèle basé sur les DDLs orientés éco-conception pour l'utiliser lors de la phase d'amélioration environnementale. Le développement de ce modèle fait l'objet de la section suivante.

5.2. Proposition d'un modèle des DDLs en vue de son application dans l'amélioration environnementale des produits

5.2.1. Proposition d'un modèle de DDLs orienté éco-conception

Un feature en CAO présente un ensemble des données telles que le matériau, les dimensions, le volume, etc. Il peut porter aussi d'autres types des données quand il s'agit d'un feature développé dans un système intégré XAO/PLM/ACV. La figure 5.5 montre l'aspect relationnel qui existe entre les paramètres d'un feature et les DDLs CAO. Le choix des DDLs implémente une attribution d'un *feature*. Les impacts environnementaux qui sont liés au feature sont alors aussi liés aux DDLs CAO. Pour cela, on va développer un modèle, basé sur les DDLs, qui permet de détecter ceux qui sont en relation avec les sources d'impacts et permettant au concepteur d'agir sur le modèle géométrique initial afin de l'éco-concevoir. Ce modèle est basé sur les résultats trouvés à partir de l'évaluation environnementale basée sur les *éco-features* qu'on a obtenus dans le chapitre 4.

Un feature porte un ensemble de paramètres (P_i) liés à une géométrie tels que le type de matériau, la densité, le volume, le diamètre, la profondeur, etc. D'une part, chacun de ces paramètres est en relation avec un ou plusieurs DDLs, comme le montre la figure 5.5.

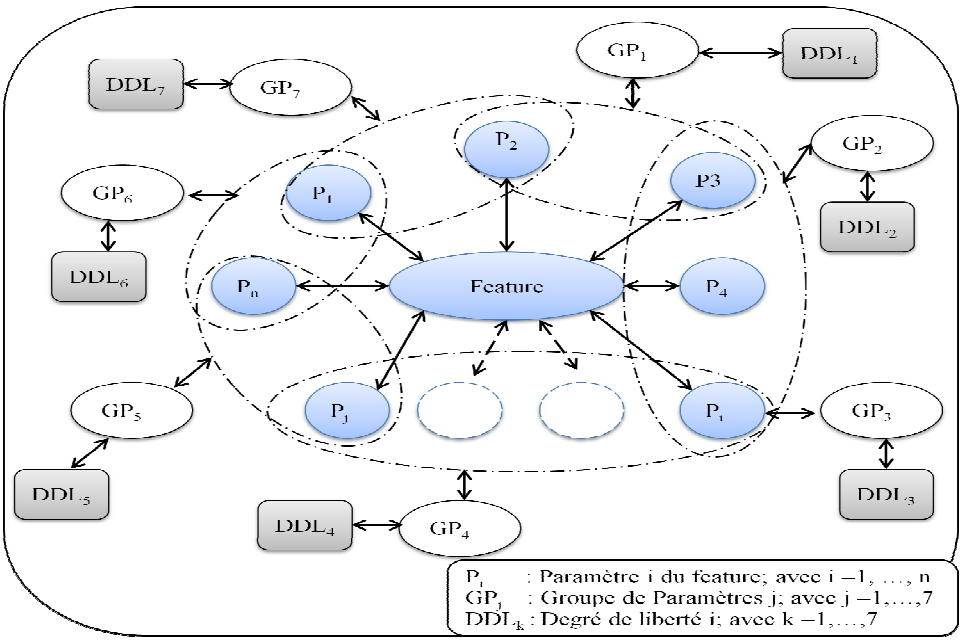


Figure 5. 5 Modèle relationnel entre les paramètres d'un feature et des DDLs

D'une autre part un DDL peut être en relation avec un ou plusieurs paramètres. D'où, suivant le nombre des DDLs (qui sont en nombre de 7), on va diviser les différents paramètres en 7 groupes (GP_i) c'est-à-dire l'ensemble des paramètres qui sont liés à un DDL on les assemble dans un groupe, sachant que les GP peuvent être en interférence puisque un paramètre peut être en relation avec des différents DDLs.

Les sous-ensembles relatifs aux différentes phases de vie d'un feature (tels que les sous-ensembles (SE) le processus de fabrication et l'énergie consommée pour la phase « production ») sont liés aux DDLs. Ces sous-ensembles peuvent être certains DDLs, par exemple, dans la phase « Matière première », le matériau est un sous-ensemble et il est aussi le DDL3.

D'où, on établit un contexte relationnel entre les sous-ensembles de chaque phase et les DDLs sous forme des listes des données. Par exemple, pour la phase d'extraction des matières premières on peut avoir la liste représentée dans le Tableau 5.1.

Tableau 5. 1 Exemple d'une liste à aspect relationnel entre les DDLs et les données environnementales d'un modèle géométrique

Données à introduire	DDLs concernés	Données introduites
Type du matériau	DDL3 Laiton (8500Kg/mm^3)	Laiton
Quantité de matière utilisée	DDL2, DDL3, DDL4 (100,100, 10) ; laiton ; 10^{5}mm^3	850g

En perçant un trou débouchant de diamètre 10 mm la masse devient 843,3g. D'où l'énergie à calculer est l'énergie nécessaire pour enlever 6,7 g par un processus de perçage. Cette énergie se calcule en fonction du matériau, de la quantité de matière à enlever. Elle dépend donc du DDL_3, DDL_2, DDL_4 et DDL_5.

De même pour les autres paramètres liés aux étapes du cycle de vie, on établit leurs relations avec les DDLs. Les paramètres relatifs à la matière première, la fabrication, à l'usage, au transport et à la fin de vie sont exprimés comme suit :

- $SE1_{MP}$= r(DDLs), $SE2_{MP}$=r(DDLs),…, SEk_{MP}=r(DDLs) ; Avec $SE1_{MP}$ est le premier sous-ensemble à introduire dans logiciel d'ACV lié à la première phase de vie d'un Modèle géométrique qui est la phase d'extraction des matières premières et « r » c'est l'aspect relationnel qui les lie.
- $SE1_F$= r(DDLs), $SE2_F$=r(DDLs),…, SEm_F=r(DDLs) ; Avec $SE1_F$ est le premier sous-ensemble à introduire dans le logiciel d'ACV lié à la phase de fabrication dans le cycle de vie d'un Modèle géométrique.
- $SE1_U$= f(DDLs), $SE2_U$ =f(DDLs),…, SEn_U =f(DDLs) ; Avec $SE1_U$ est le premier sous-ensemble à introduire dans le logiciel d'ACV lié à la phase d'usage dans le cycle de vie d'un Modèle géométrique.
- $SE1_T$= f(DDLs), $SE2_T$ =f(DDLs),…, SEp_T =f(DDLs) ; Avec $SE1_T$ est le premier sous-ensemble à introduire dans le logiciel d'ACV lié à la phase de transport dans le cycle de vie d'un Modèle géométrique.
- $SE1_{FV}$= f(DDLs), $SE2_{FV}$ =f(DDLs),…, SEq_{FV}=f(DDLs) ; Avec $SE1_{FV}$ est le premier sous-ensemble à introduire dans le logiciel d'ACV lié à la phase de fin de vie dans le cycle de vie d'un Modèle géométrique.

5.2.2. Processus de Liaison des impacts environnementaux aux DDLs CAO

On suppose que le concepteur définit (ou coche) l'ensemble des DDLs autorisés dans la conception, avant de commencer la modélisation géométrique). On veut avoir à la fin l'impact de chaque DDL pour pouvoir agir sur celui qui est le plus impactant, donc il faut lier l'IE de chaque phase avec les DDLs. Pour cela on considère que, pour une phase de vie, si un ou plusieurs DDLs ont une influence sur un sous-ensemble ou plusieurs de cette phase, alors on attribuera le même coefficient d'influence pour chaque DDL (par exemple si pour la phase de production on trouve que les DDLs 1, 2, 3, 4 et 5 ont une influence alors le coefficient d'influence sera 1/5). Pour les autres DDLs qui n'ont pas d'influence pour cette phase les coefficients d'influences seront considérés nuls. D'où, on établit l'équation 5.1 pour exprimer l'IE d'une phase

donnée en fonction de l'IE de chaque DDL avec des coefficients d'influence (a_1, …, a_n ; n est le nombre de paramètres qui sont liés au DDL_1).

$$IE\ (\text{phase de vie}) = a_1 \times IE\ (DDL_1) + \ldots + a_7 \times IE\ (DDL_7) \qquad \textit{(eq.5.1)}$$

La liaison de l'impact environnemental d'une phase donnée aux DDLs CAO peut être représentée dans une matrice (8x7) (8 catégories d'impacts à considérer et 7 DDLs). Par exemple, l'élément I_{MP11} de matrice d'impact de la matière première présente l'impact environnemental N° 1 du DDL_1 lors de la phase d'extraction de la matière première et l'élément I_{MP87} présente l'impact environnemental N° 8 du DDL_7. Cette matrice M_{IEMP} peut être représentée par l'équation 5.2 :

$$M_{IEMP} = \begin{bmatrix} I_{MP11} & \cdots & I_{MP17} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{MP81} & \cdots & I_{MP87} \end{bmatrix} \qquad \textit{(éq 5.2)}$$

De même pour chaque phase de vie on peut avoir une matrice d'impact qui peut lier l'impact environnemental d'une phase donnée aux DDLs CAO.

Pour la phase de fabrication on a la matrice M_{IEF} qui est représentée selon l'équation 5.3.

$$M_{IEF} = \begin{bmatrix} I_{F11} & \cdots & I_{F17} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{F81} & \cdots & I_{F87} \end{bmatrix} \qquad \textit{(éq 5.3)}$$

Pour la phase du transport on a la matrice M_{IET} qui est représentée selon l'équation 5.4.

$$M_{IET} = \begin{bmatrix} I_{T11} & \cdots & I_{T17} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{T81} & \cdots & I_{T87} \end{bmatrix} \qquad \textit{(éq 5.4)}$$

Pour la phase d'usage on a la matrice M_{IEU} qui est représentée selon l'équation 5.5.

$$M_{IEU} = \begin{bmatrix} I_{U11} & \cdots & I_{U17} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{U71} & \cdots & I_{U77} \end{bmatrix} \qquad \textit{(éq 5.5)}$$

Pour la phase de fin de vie on a la matrice M_{IEFV} qui est représentée selon l'équation 5.6.

$$M_{IEFV} = \begin{bmatrix} I_{FV11} & \cdots & I_{FV17} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{FV81} & \cdots & I_{FV87} \end{bmatrix} \qquad \textit{(éq 5.6)}$$

A partir des matrices élémentaires on arrive au développement de la matrice globale. Cette matrice représentée par l'équation 5.7 contient les valeurs de chaque impact calculé lié à chaque DDL.

$$M_{IE} = \begin{bmatrix} I_{MP11} + I_{F11} + I_{U11} + I_{T11} + I_{FV11} & \cdots & I_{MP17} + I_{F17} + I_{U17} + I_{T17} + I_{FV17} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{MP81} + I_{F81} + I_{U81} + I_{T81} + I_{FV81} & \cdots & I_{MP87} + I_{F87} + I_{U87} + I_{T87} + I_{FV87} \end{bmatrix}$$

(éq 5.7)

En utilisant la méthode du Plan Analytique Hiérarchique (PAH), développée par Saaty (Saaty, 1980), sur la matrice d'impact obtenue, on réalise une classification hiérarchique des impacts générés en fonction des DDLs. Pour les DDLs autorisés on trouvera une valeur de l'impact et pour les DDLs non autorisés on trouvera une valeur nulle. A partir de là, le DDL le plus impactant apparait et le concepteur à cette étape n'a plus qu'à agir sur ses choix pour améliorer les performances environnementales de son modèle géométrique. La figure 5.6 illustre le diagramme de relation entre les paramètres d'un feature et l'impact environnemental de ce feature.

La recherche du DDL le plus impactant pourrait être faite avec d′autres méthodes. Mais dans ce travail on se limite à une méthodologie simplifiée afin d'expliquer le concept du modèle de DDL et son utilisation pour l'amélioration environnementale. De ces méthodes on peut trouver par exemple :

- Les plans d′expériences qui utilise l′outil ACV mais à partir de valeur de DDL bien définies.
- L'optimisation multicritères pour laquelle les DDLs sont les variables avec les contraintes sur leur espace de valeurs respectif, min IE la fonction.

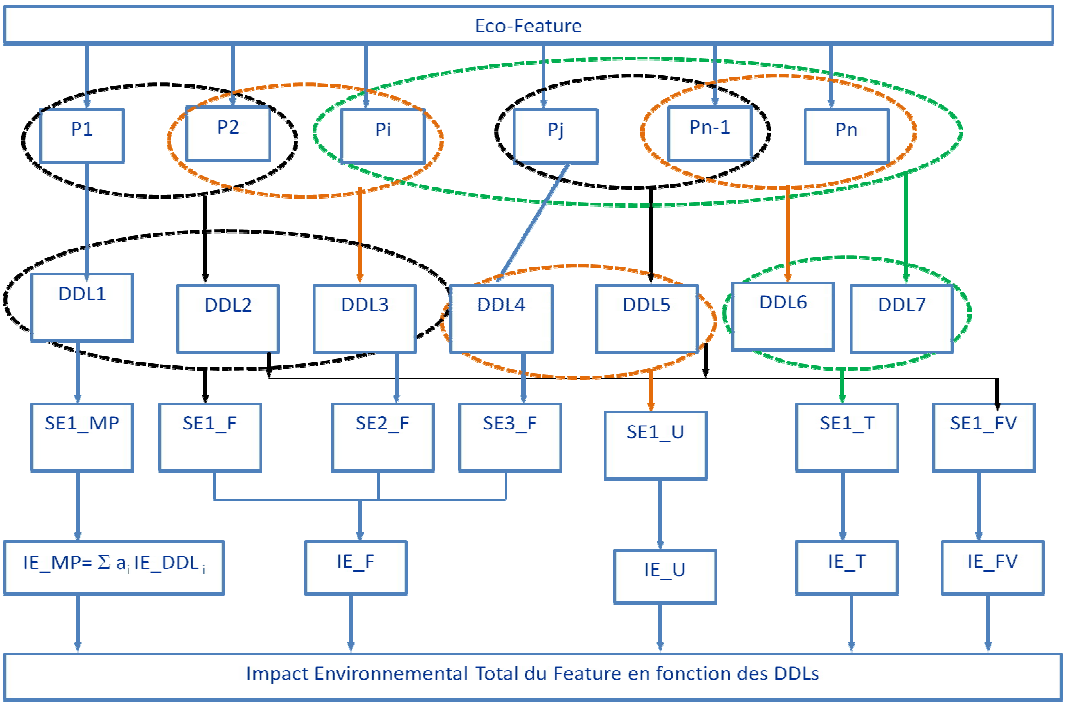


Figure 5. 6 Diagramme de relation entre les paramètres d'un feature et son IE total

On établit l'algorithme de calcul d'impact en fonction des DDLs représenté dans la figure 5.7

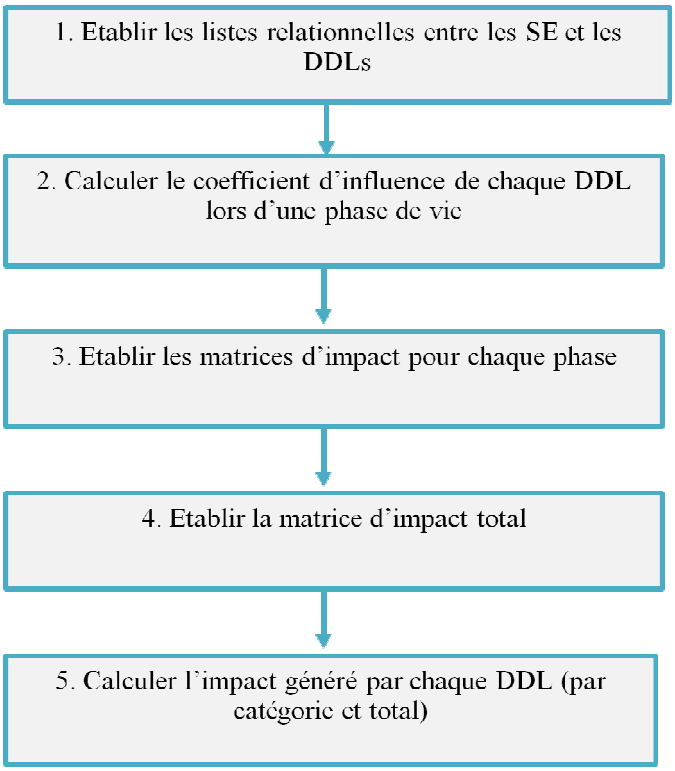


Figure 5. 7 Méthodologie de calcul des impacts de chaque DDL

5.2.3. Proposition d'un nouveau processus d'amélioration environnementale basé sur le modèle de DDLs

En se basant sur le modèle des DDLs développé dans les sections précédentes on propose un nouveau processus d'amélioration environnementale basé sur les DDLs autorisés au concepteur CAO. Ce dernier, ayant des résultats d'impacts environnementaux exprimés en fonction des données de son domaine de connaissance a la possibilité d'agir sur son modèle géométrique pour éco-concevoir ses produits. Pour cela, on propose l'algorithme de la figure 5.8.

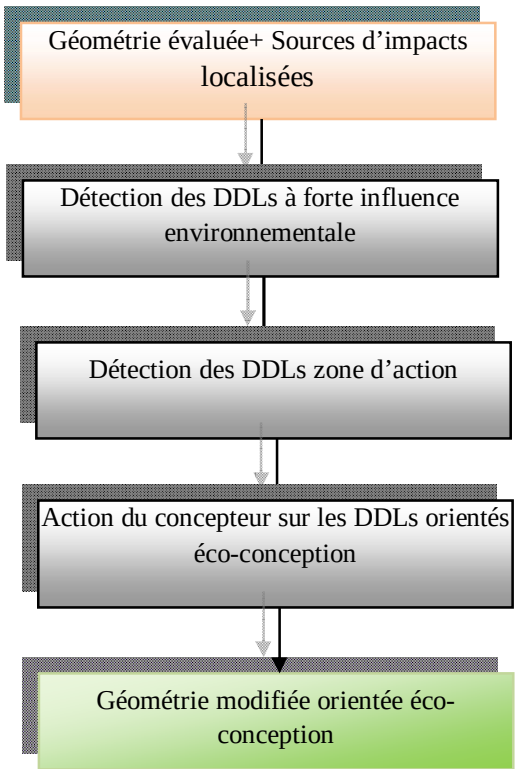


Figure 5. 8 Processus d'amélioration environnementale basé sur les DDLs CAO

Ce processus nécessite la présence d'un modèle géométrique évalué pour donner un modèle géométrique avec de performances environnementales améliorées. De plus, il se compose de trois phases :

- Détection des DDLs à forte influence environnementale.
- Détection des DDLs zone d'action.
- Action du concepteur sur les DDLs orientés éco-conception.

5.3. Application sur le corps du mitigeur de lavabo

Pour valider notre modèle d'amélioration environnementale basé sur les DDLs en CAO, nous utilisons l'évaluation environnementale du composant le plus impactant dans le système mitigeur de lavabo, qui est le corps du mitigeur. Les résultats de l'EE sont obtenus à partir du logiciel Bilan Produit qui est un logiciel d'ACV simplifié et il est utilisé pour montrer la faisabilité du processus proposé, d'où dans notre cas la crédibilité des résultats de l'EE n'est pas exigée dans cette étude. Le processus d'amélioration proposé nécessite la présence d'un modèle géométrique évalué environnementallement. En effet, on a dans le tableau 5.2 les résultats de l'évaluation environnementale du corps. Cette évaluation est réalisée sur « Bilan Produit » qui combine les phases d'extraction des matières premières et la production.

Tableau 5. 2 Résultats des impacts environnementaux de chaque phase en fonction des types d'impacts

Indicateurs	Phase de Production	Phase de Transports	Phase Utilisation	Fin de vie	Total indicateurs
Consommation énergie NR	4,54E-01	4,55E-01	1,19E+00	-1,78E-01	1,92E+00
Consommation ressources	9,36E-01	8,63E-01	1,99E+00	-3,88E-01	3,40E+00
Effet de serre GWP 100 mod	4,50E-01	4,06E-01	1,02E+00	-1,77E-01	1,70E+00
Acidification	3,57E+00	3,55E-01	1,02E+00	-1,83E+00	3,11E+00
Eutrophisation (air eau sol)	3,27E-01	8,07E-02	8,34E-02	-7,05E-02	4,21E-01
Pollution photochimique	1,10E+00	9,45E-02	4,56E-01	-5,62E-01	1,09E+00
Ecotoxicité aquatique	2,71E+00	1,64E-01	1,62E+00	-1,13E+00	3,37E+00
Toxicité humaine	4,49E+00	2,97E-02	9,77E-02	-2,22E+00	2,39E+00
Total phases	1,40E+01	2,45E+00	7,47E+00	-6,56E+00	1,74E+01

Pour établir les différentes matrices d'impact de la section précédente, il est d'abord, nécessaire de déterminer les différentes données d'entrée pour chaque phase

liées au corps du mitigeur. Les tableaux 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 et 5.7 présentent les données d'entrée de chaque phase de vie utilisées pour l'évaluation environnementale.

Tableau 5. 3 Données d'entrée de la phase de matière première

Nom	Quantité	Unité
Laiton	1,5	kg

Tableau 5. 4 Données d'entrée de la phase de production

Nom	Quantité	Unité
Moulage laiton	1,5	kg
Dégraissage	0,045	m2
Chrome noir sur inox	0,045	m2
Perçage CNC laiton	0,4	kg
Electricité haute tension Europe	0,5	kWh

Tableau 5. 5 Données d'entrée de la phase de transport

Sous-ensemble	Nom	Quantité	Unité	Commentaires utilisateur
Monastir	Camion moyen (16 à 32T) Euro4	30	t.km	Distance : 20km Masse transportée : 1500kg

Tableau 5. 6 Données d'entrée de la phase d'utilisation

Nom	Quantité	Unité
Eau potable au robinet	36000	kg

Tableau 5. 7 Données d'entrée de la phase de fin de vie

Matériaux	% Recyclage	% Incinération	% Enfouissement
Laiton	80,00%	10,00%	10,00%

5.3.1. Détermination de la matrice d'impact de la phase matières premières en fonction des impacts des DDLs

La détermination de la matrice d'impacts nécessite l'établissement de la liste relationnelle entre les paramètres de la phase de matière première et les DDLs qui leurs sont liés comme le montre le tableau 5.8, dans une première étape. Puis, on établit l'équation d'influence extraite de cette liste relationnelle pour écrire par la suite l'équation de l'impact de la phase de matière première en fonction de l'impact des DDLs responsables.

Tableau 5. 8 Liste relationnelle des paramètres de la phase de matière première et les DDLs qui leurs sont liés

Données à introduire	Données introduites	DDLs concernés
Type du matériau	Laiton	DDL3 Laiton (8500Kg/mm^3)
Quantité de matière utilisée	1.5kg	DDL2, DDL3, DDL4 (100,100, 10) ; laiton ; 10^{5}mm^3

$$IE_{MP} = 0 \times IE_{DDL1} + 1 \times IE_{DDL2} + 1 \times IE_{DDL3} + 1 \times IE_{DDL4} + 0 \times IE_{DDL5} + 0 \times IE_{DDL6} + 0 \times IE_{DDL7}$$

En se basant sur l'équation d'impact de la phase de matière première en fonction des DDLs et sur les résultats d'impacts, présentés dans le tableau 5.9, de cette phase générée par un outil d'ACV (tableau 5.9), on établit la matrice d'impacts de la phase

de matière première en fonction des DDLs pour chaque catégorie d'impact considérée.

Tableau 5. 9 Résultats des impacts de la phase de matière première, dus aux paramètres du corps introduits

Indicateurs	Laiton
Consommation énergie NR (MJ eq)	1,06E+02
Consommation ressources (kg Sb eq)	5,25E-02
Effet de serre GWP 100 mod (kg CO2 eq)	7,04E+00
Acidification (kg SO2 eq)	3,11E-01
Eutrophisation (air eau sol) (kg PO4--- eq)	1,04E-02
Pollution photochimique (kg C2H4)	1,17E-02
Ecotoxicité aquatique (kg 1,4-DB eq)	4,40E+00
Toxicité humaine (kg 1,4-DB eq)	1,74E+02

$$M_{IEMP}=\begin{pmatrix} 0 & 3{,}53E+01 & 3{,}53E+01 & 3{,}53E+01 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1{,}75E-02 & 1{,}75E-02 & 1{,}75E-02 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2{,}34E+00 & 2.34E+00 & 2.34E+00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7{,}78E-02 & 7{,}78E-02 & 7{,}78E-02 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2{,}60E-03 & 2{,}60E-03 & 2{,}60E-03 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2{,}93E-03 & 2{,}93E-03 & 2{,}93E-03 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1{,}10E+00 & 1{,}10E+00 & 1{,}10E+00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4{,}35E+01 & 4{,}35E+01 & 4{,}35E+01 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

5.3.2. Détermination de la matrice d'impact de la phase de production en fonction des impacts des DDLs

La détermination de la matrice d'impacts nécessite l'établissement de la liste relationnelle entre les paramètres de la phase de production et les DDLs qui leurs sont liés comme le montre le tableau 5.10, dans une première étape. Puis, on établit

l'équation d'influence extraite de cette liste relationnelle pour écrire par la suite l'équation de l'impact de la phase de production en fonction de l'impact des DDLs responsables.

Tableau 5. 10 Liste relationnelle des paramètres de la phase d'usage et les DDLs qui leurs sont liés

	Données à introduire	Données introduites	DDLs concernés
P1	Type du processus	Moulage laiton 1.5kg	DDL3 -DDL4-DDL5
P2	Type du processus	Perçage CNC laiton 0.4kg	DDL3 -DDL4-DDL5
P3	Type de traitement 1	Dégraissage 0,045 m2	DDL7 –DDL2
P4	Type de traitement 2	Chrome noir sur inox 0,045 m2	DDL7 –DDL2
P5	Type d'énergie	Electricité haute tension Europe 0,5 kWh	DDL3 -DDL4-DDL5

- IE (DDL_2) = IE (DDL_7) = b_3 x IE (P_3) +b_4 x IE (P_4); b_3 et b_4: Coefficients d'influence tel que b_3=b_4=0.5.
- IE (DDL_3) = IE (DDL_4) = IE (DDL_5) =c_1 x IE (P_1) + c_2 x IE (P_2) + c_5 x IE (P_5); c_1, c_2 et c_5: Coefficients d'influence tel que c_1= c_2= c_5=1/3.
- IE_F= 0 x IE_{DDL1} + 1 x IE_{DDL2}+ 1 x IE_{DDL3}+ 1 x IE_{DDL4}+ 1 x IE_{DDL5}+ 0 x IE_{DDL6}+ 1 x IE_{DDL7}.

En se basant sur l'équation d'impact de la phase de production en fonction des DDLs et sur les résultats d'impacts, présentés dans le tableau 5.11, de cette phase générée par un outil d'ACV, on établit la matrice d'impacts de la phase de production en fonction des DDLs pour chaque catégorie d'impact considérée.

Tableau 5. 11 Résultats d'impact de la phase du transport dus aux paramètres du corps introduits

Indicateurs	Moulage laiton	Dégraissage	Chrome noir sur inox	Perçage CNC laiton	Electricité haute tension Europe
Consommation énergie NR (MJ eq)	3,98E+00	7,61E+00	2,01E+00	5,86E+01	1,24E+01
Consommation ressources (kg Sb eq)	1,77E-03	2,57E-03	4,65E-04	2,76E-02	4,59E-03
Effet de serre GWP 100 mod (kg CO2 eq)	2,37E-01	5,88E-01	7,13E-02	4,08E+00	6,19E-01
Acidification (kg SO2 eq)	1,02E-03	4,50E-03	3,89E-04	1,18E-01	2,76E-03
Eutrophisation (air eau sol) (kg PO4--- eq)	5,06E-05	1,85E-02	3,48E-05	5,22E-03	1,55E-04
Pollution photochimique (kg C2H4)	4,61E-05	1,60E-04	1,65E-05	4,46E-03	1,10E-04
Ecotoxicité aquatique (kg 1,4-DB eq)	7,65E-03	3,25E-01	2,59E-02	2,80E+00	3,49E-02
Toxicité humaine (kg 1,4-DB eq)	1,69E-01	7,37E-01	1,43E+01	6,35E+01	6,03E-02

$$M_{IEF}=\begin{pmatrix} 0 & 4{,}81E+00 & 2{,}50E+01 & 2{,}50E+01 & 2{,}50E+01 & 0 & 4{,}81E+00 \\ 0 & 1{,}52E-03 & 1{,}13E-02 & 1{,}13E-02 & 1{,}13E-02 & 0 & 1{,}52E-03 \\ 0 & 3{,}30E-01 & 1{,}65E+00 & 1{,}65E+00 & 1{,}65E+00 & 0 & 3{,}30E-01 \\ 0 & 2{,}44E-03 & 4{,}06-02 & 4{,}06E-02 & 4{,}06E-02 & 0 & 2{,}44E-03 \\ 0 & 9{,}27E-03 & 1{,}81E-03 & 1{,}81E-03 & 1{,}81E-03 & 0 & 9{,}27E-03 \\ 0 & 8{,}83E-05 & 1{,}54E-03 & 1{,}54E-03 & 1{,}54E-03 & 0 & 1{,}54E-05 \\ 0 & 1{,}75E-01 & 9{,}48E-01 & 9{,}48E-01 & 9{,}48E-01 & 0 & 1{,}75E-01 \\ 0 & 7{,}52E+00 & 4{,}35E+01 & 4{,}35E+01 & 4{,}35E+01 & 0 & 7{,}52E+00 \end{pmatrix}$$

5.3.3. Détermination de la matrice d'impact de la phase du transport en fonction des impacts des DDLs

La détermination de la matrice d'impacts nécessite l'établissement de la liste relationnelle entre les paramètres de la phase du transport et les DDLs qui leurs sont liés comme le montre le tableau 5.12, dans une première étape. Puis, on établit l'équation d'influence extraite de cette liste relationnelle pour écrire par la suite l'équation de l'impact de la phase du transport en fonction de l'impact des DDLs responsables.

Tableau 5. 12 Liste relationnelle des paramètres de la phase d'usage et les DDLs qui leurs sont liés

Paramètres	Données à introduire	Données introduites	DDLs concernés
P1	Masse transportée, Distance Type de transport	1500kg	DDL3 -DDL4
		30km	DDL6
		Camion moyen (16 à 32T) Euro4	DDL6

- IE (DDL_3) = IE (DDL_4) = IE (DDL_6) =C_1 x IE (P_1) ; C1=1/3: Coefficients d'influence.
- IE_T= 0 x IE_{DDL1} + 0 x IE_{DDL2}+ 1 x IE_{DDL3}+ 1 x IE_{DDL4}+ 0 x IE_{DDL5}+ 1 x IE_{DDL6}+ 0 x IE_{DDL7}.

En se basant sur l'équation d'impact de la phase du transport en fonction des DDLs et sur les résultats d'impacts, présentés dans le tableau 5.13, de cette phase générée par un outil d'ACV, on établit la matrice d'impacts de la phase du transport en fonction des DDLs pour chaque catégorie d'impact considérée.

Tableau 5. 13 Résultats d'impact de la phase du transport dus aux paramètres du corps introduits

Indicateurs	**Camion moyen (16 à 32T) Euro4 (Monastir)**
Consommation énergie NR (MJ eq)	1,91E+02
Consommation ressources (kg Sb eq)	8,25E-02
Effet de serre GWP 100 mod (kg CO2 eq)	1,14E+01
Acidification (kg SO2 eq)	4,36E-02
Eutrophisation (air eau sol) (kg PO4--- eq)	8,48E-03
Pollution photochimique (kg C2H4)	1,42E-03
Ecotoxicité aquatique (kg 1,4-DB eq)	4,61E-01
Toxicité humaine (kg 1,4-DB eq)	1,67E+00

$$M_{IET}=\begin{pmatrix} 0 & 0 & 6{,}37E+01 & 6{,}37E+01 & 0 & 6{,}37E+01 & 0 \\ 0 & 0 & 2{,}75E-02 & 2{,}75E-02 & 0 & 2{,}75E-02 & 0 \\ 0 & 0 & 3{,}80E+00 & 3{,}80E+00 & 0 & 3{,}80E+00 & 0 \\ 0 & 0 & 1{,}45E-02 & 1{,}45E-02 & 0 & 1{,}45E-02 & 0 \\ 0 & 0 & 2{,}83E-03 & 2{,}83E-03 & 0 & 2{,}83E-03 & 0 \\ 0 & 0 & 4{,}73E-04 & 4{,}73E-04 & 0 & 4{,}73E-04 & 0 \\ 0 & 0 & 1{,}54E-01 & 1{,}54E-01 & 0 & 1{,}54E-01 & 0 \\ 0 & 0 & 5{,}57E-01 & 5{,}57E-01 & 0 & 5{,}57E-01 & 0 \end{pmatrix}$$

5.3.4. Détermination de la matrice d'impact de la phase d'usage en fonction des impacts des DDLs

La détermination de la matrice d'impacts nécessite l'établissement de la liste relationnelle entre les paramètres d'usage et les DDLs qui leurs sont liés comme le montre le tableau 5.14, dans une première étape. Puis, on établit l'équation d'influence extraite de cette liste relationnelle pour écrire par la suite l'équation de l'impact d'usage en fonction de l'impact des DDLs responsables.

Tableau 5. 14 Liste relationnelle des paramètres de la phase d'usage et les DDLs qui leurs sont liés

Paramètres	Données à introduire	Données introduites	DDLs concernés
P1	Eau potable	eau	DDL2
		36000	

- IE (DDL_2) = b_1 x IE (P_1) ; b1=1: Coefficients d'influence.
- IE_U= 0 x IE_{DDL1} + 1 x IE_{DDL2}+ 0 x IE_{DDL3}+ 0 x IE_{DDL4}+ 0 x IE_{DDL5}+ 0 x IE_{DDL6}+ 0 x IE_{DDL7}.

En se basant sur l'équation d'impact de la phase d'usage en fonction des DDLs et sur les résultats d'impacts, présentés dans le tableau 5.15, de cette phase générée par un outil d'ACV, on établit la matrice d'impacts de la phase d'usage en fonction des DDLs pour chaque catégorie d'impact considérée.

Tableau 5. 15 Résultats d'impacts de la phase d'usage dus aux paramètres du corps introduits

Indicateurs	Eau potable au robinet (Eau)
Consommation énergie NR (MJ eq)	5,00E+02
Consommation ressources (kg Sb eq)	1,90E-01
Effet de serre GWP 100 mod (kg CO2 eq)	2,86E+01
Acidification (kg SO2 eq)	1,25E-01
Eutrophisation (air eau sol) (kg PO4--- eq)	8,76E-03
Pollution photochimique (kg C2H4)	6,84E-03
Ecotoxicité aquatique (kg 1,4-DB eq)	4,54E+00
Toxicité humaine (kg 1,4-DB eq)	5,50E+00

$$M_{IEU}=\begin{pmatrix} 0 & 0 & 5{,}00E+02 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1{,}90E-01 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2{,}86E+01 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1{,}25E-01 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8{,}76E-03 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6{,}84E-03 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4{,}54E+00 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5{,}50E+00 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

5.3.5. Détermination de la matrice d'impact de la phase de fin de vie en fonction des impacts des DDLs

La détermination de la matrice d'impacts nécessite l'établissement de la liste relationnelle entre les paramètres de fin de vie et les DDLs qui leurs sont liés comme le montre le tableau 5.16, dans une première étape. Puis, on établit l'équation

d'influence extraite de cette liste relationnelle pour écrire par la suite l'équation de l'impact de fin de vie en fonction de l'impact des DDLs responsables.

Tableau 5. 16 Liste relationnelle des paramètres fin de vie et les DDLs qui leurs sont liés

Paramètres	Données à introduire	Données introduites	DDLs concernés
P1	Laiton	Type du matériau	DDL3-DDL5
		Taux de recyclage	

- IE (DDL_3) = IE (DDL_5)= c_1 x IE (P_1) ; c1=1/2: Coefficients d'influence.
- IE_{FV}= 0 x IE_{DDL1} + 0 x IE_{DDL2}+ 1 x IE_{DDL3}+ 0 x IE_{DDL4}+ 1 x IE_{DDL5}+ 0 x IE_{DDL6}+ 0 x IE_{DDL7}.

En se basant sur l'équation d'impact de la phase de fin de vie en fonction des DDLs et sur les résultats d'impacts, présentés dans le tableau 5.17, de cette phase générée par un outil d'ACV, on établit la matrice d'impacts de la phase fin de vie en fonction des DDLs pour chaque catégorie d'impact considérée.

Tableau 5. 1 Résultats d'impact de la phase de fin de vie due aux paramètres du corps introduits

Indicateurs	**Laiton (Phase de Production : Corps du mitigeur)**
Consommation énergie NR (MJ eq)	-7,46E+01
Consommation ressources (kg Sb eq)	-3,71E-02
Effet de serre GWP 100 mod (kg CO2 eq)	-4,96E+00
Acidification (kg SO2 eq)	-2,24E-01
Eutrophisation (air eau sol) (kg PO4--- eq)	-7,41E-03
Pollution photochimique (kg C2H4)	-8,42E-03
Ecotoxicité aquatique (kg 1,4-DB eq)	-3,17E+00
Toxicité humaine (kg 1,4-DB eq)	-1,25E+02

$$M_{IEFV}=\begin{pmatrix} 0 & 0 & -3{,}73E+01 & 0 & -3{,}73E+01 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1{,}86E-02 & 0 & -1{,}86E-02 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2{,}48E+00 & 0 & -2{,}48E+00 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1{,}12E-01 & 0 & -1{,}12E-01 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -3{,}71E-03 & 0 & -3{,}71E-03 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -4{,}21E-03 & 0 & -4{,}21E-03 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1{,}59E+00 & 0 & -1{,}59E+00 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -6{,}25E+01 & 0 & -6{,}25E+01 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

5.3.6. Détermination de la matrice globale d'impact et identification du DDL le plus impactant

La détermination de la matrice globale d'impacts nécessite la sommation des différentes matrices calculées précédemment.

$$M_{IE}= M_{IEMP+} M_{IEF+} M_{IEU+} M_{IET+} M_{IEFV} \qquad (\textit{éq 5.8})$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 3{,}13E+01 & 5{,}78E+02 & 1{,}15E+02 & 1{,}42E+01 & 6{,}85E+01 & 4{,}81E+00 \\ 0 & 1{,}46E-02 & 2{,}23E-01 & 5{,}19E-02 & 5{,}90E-03 & 2{,}90E-02 & 1{,}52E-03 \\ 0 & 2{,}09E+00 & 3{,}33E+01 & 7{,}21E+00 & 9{,}25E-01 & 4{,}13E+00 & 3{,}30E-01 \\ 0 & 8{,}02E-02 & 1{,}46E-01 & 1{,}33E-01 & 6{,}34E-03 & 1{,}70E-02 & 2{,}44E-03 \\ 0 & 1{,}19E-02 & 1{,}23E-02 & 7{,}24E-03 & 7{,}04E-04 & 1{,}21E-02 & 9{,}27E-03 \\ 0 & 3{,}01E-03 & 7{,}57E-03 & 4{,}94E-03 & 2{,}54E-04 & 5{,}62E-04 & 8{,}83E-05 \\ 0 & 1{,}28E+00 & 5{,}16E+00 & 2{,}20E+00 & 4{,}63E-01 & 3{,}29E-01 & 1{,}75E-01 \\ 0 & 5{,}10E+01 & 8{,}30E+00 & 6{,}53E+01 & 2{,}24E+00 & 8{,}08E+00 & 7{,}52E+00 \\ 0 & 3{,}47E+01 & 6{,}17E+02 & 1{,}24E+02 & 1{,}56E+01 & 7{,}30E+01 & 5{,}33E+00 \end{pmatrix}$$

Le calcul réalisé montre que le DDL le plus impactant est le DDL3 (Matériaux; $6{,}17^{E}$+02), suivi du DDL4 (Volume ; $1{,}24^{E}$+01), puis le DDL6 (Choix du « *make or buy* » ; 7.3^{E}+01) , suivi du DDL2 (Dimensions ; $3{,}47^{E}$+01), puis le DDL5 (Processus de fabrication ; 1,56+01) suivi du DDL7 (Traitements des matériaux ; 5,33) et enfin le DDL1 (Formes ; 0). Dans notre cas (corps du mitigeur), la forme ne génère pas

d'impacts environnementaux. Cependant, pour d'autres produits elle peut avoir une influence sur leurs performances environnementales.

Conclusion

Offrir au concepteur une assistance environnementale lors de la modélisation géométrique en lui permettant de calculer les impacts environnementaux, ne permet pas de l'aider à améliorer les performances environnementales de ses produits, vue son manque de connaissances en termes d'environnement. Dans ce chapitre, nous avons proposé une méthodologie qui permet de lier les DDLs qui lui restent lors de la conception de détails (ses choix de conception) aux résultats d'impacts calculés de manière globale et parlante. Le modèle de DDL proposé est orienté vers la deuxième phase du processus d'éco-conception, qui est la phase d'amélioration environnementale.

Chapitre 6: Plateforme de validation de la méthodologie d'éco-conception basée sur les features et les DDLs (ELA)

Introduction

Dans ce chapitre, on parachève la présentation de notre méthodologie d'éco-conception proposée avec la proposition d'un système intégré XAO/PLM/ACV pour générer des éco-features évaluables environnementallement pour assister le concepteur CAO à éco-concevoir au niveau des *features*. ELA-GeenCAD est le nom du *plugin* qui est destiné à être conçu pour un logiciel de CAO (CATIA dans notre cas). Ce *plugin* traduit le processus d'éco-conception « ELA » que nous avons proposé.

6.1. Développement de la méthodologie générale « E.L.A »

6.1.1. Etablissement de l'objectif

Les choix de conception réalisés lors de la phase de modélisation géométrique présentent une influence assez importante dans la génération des impacts environnementaux d'un produit sur toutes les étapes de son cycle de vie, malgré qu'elle présente une zone d'action assez restreinte pour le concepteur.

Notre méthodologie d'éco-conception proposée « ELA » se base sur l'enrichissement sémantique des *features* CAO pour assister en temps réel le concepteur dans ses choix (dès l'attribution des *features*). L'assistance environnementale suggérée concerne l'analyse de l'ensemble des scénarios de vie possibles des *feature*s choisis. Ces scénarios générés se basent sur la pensée cycle de vie.

« ELA » consiste à évaluer les impacts environnementaux dans une première étape puis localiser les paramètres sources d'impacts dans une seconde étape. Les IEx calculés par la méthode de calcul simplifié CML, sont liés dans une troisième étape aux différents degrés de liberté (DDLs) du concepteur dans la phase de conception de détail en CAO. Ainsi la visualisation est fonction de ces DDLs et traduit la zone d'action du concepteur pour réduire les IEx de son produit.

L'outil finalement développé permet au concepteur d'évaluer des alternatives de conception en temps réel facilement et rapidement dès l'attribution des *feature*s. De cette manière, il est possible de concevoir des produits verts, qui tiennent compte des IEx susceptibles d'être générés.

6.1.2. Définition du cycle de vie dans ELA-GreenCAD

La modélisation du cycle de vie (ou des cycles de vie) d'un feature, d'une pièce, ou d'un assemblage, est basée sur la collecte des données relatives à chaque phase de vie du modèle géométrique sélectionné pour l'évaluation. Ces données sont essentiellement extraites des différents systèmes intégrés à un système de CFAO. On peut trouver, pour une phase donnée, des informations qui peuvent être extraites d'un seul système ou parfois de tous les systèmes d'informations. Par exemple, pour les informations liées au paramètre « matériau », on peut les récupérer d'un système CFAO ou d'un système PLM ou on peut en trouver certaines dans le système de CFAO et d'autres dans le système PLM. Pour cela, l'interface d'ELA-GreenCAD doit pouvoir autoriser l'accès aux différents systèmes, d'où une connexion entre eux est nécessaire. Cette connexion se présente, en d'autres termes, comme une base des données (BDD). Cependant, l'extraction des données à partir d'un système PLM peut concerner toutes les phases de vie.

6.1.3. Exécution des étapes d'ELA

On Rappelle que les étapes d'ELA sont au nombre de trois ; Evaluer, Localiser et Agir. La génération d'un éco-feature (après l'extraction, la classification et la génération des scénarios), autorise la première étape « Evaluer ».

Une fois la première réalisée, la seconde étape qui est « Localiser » peut être déclenchée quand un scénario de vie est sélectionné. Après cette étape et en exploitant le modèle des DDLs, le concepteur peut visualiser, pour chaque DDLs, les différentes valeurs des catégories d'impacts considérées dans le calcul. De plus, une classification par ordre décroissant des DDLs impactants est mentionnée. Les DDLs autorisés sont marqués en vert et les DDLs bloqués en rouge.

En conclusion, le concepteur connait précisément sa zone d'action pour améliorer les performances environnementales de sa conception géométrique.

6.2. Implémentation de « ELA-GreenCAD

La simulation de prototypage d'ELA-GreenCAD est destinée à être réalisée dans un environnement du modeleur Géométrique CATIA pour l'analyse d'un modèle géométrique donné. ELA-GreenCAD est un *plugin* qui a été installé dans la barre d'outils de CATIA V5 R20 comme étant une application. Il est unique dans la façon dont il est entièrement calqué sur une approche étape-par-étape explicite et très facile à utiliser et à interpréter. Le prototypage d'ELA-GreenCAD a été auparavant réalisé en utilisant l'outil Microsoft Visual Basic©.

L'évaluation que peut effectuer ELA-GreenCAD s'applique sur un feature ainsi bien que sur une pièce ou un assemblage. Dans les sections suivantes, une description des fonctionnalités figurant dans son interface est réalisée.

6.2.1. Démarrage

Pour lancer notre interface de calcul environnemental, il suffit de cocher la fonctionnalité « Evaluer » dans l'onglet « *ELA-GreenCAD* » situé dans la barre d'outils du modeleur géométrique CATIA. Le démarrage déclenche la connexion du système CFAO utilisé avec les systèmes PLM, PPAO et ACV.

Ces connexions autorisent l'extraction des données nécessaires enrichissant un modèle géométrique pour une évaluation environnementale assez complète afin de se rapprocher au maximum de l'impact environnemental réel. La figure 6.1 illustre l'accès à « *ELA-GreenCAD* » ainsi que les connexions aux systèmes à intégrer dans le système CAO.

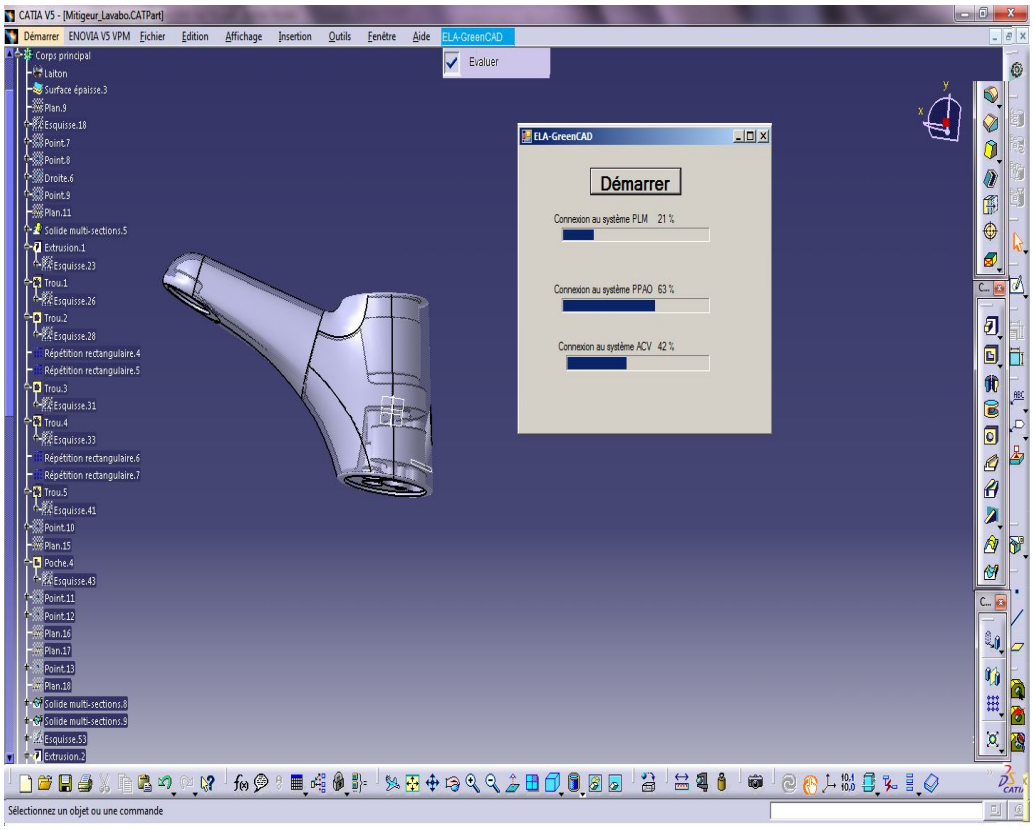


Figure 6. 1 Fenêtre de démarrage ELA-GreenCAD dans CATIA

6.2.2. Extraction des données CAO

Le premier Onglet du *plugin* consiste à extraire les informations qu'on peut trouver dans un système CAO. Mais avant de commencer, le concepteur doit d'abord sélectionner le modèle géométrique à évaluer, ainsi que les DDLs qui lui sont autorisés. Après, pour l'extraction des données, il a la possibilité de le faire automatiquement, en cochant l'option « Générer les données » pour déclencher la génération automatique à partir des modèles des données existants dans le modeleur géométrique. Cependant, s'il choisit de cocher l'option « Sélectionner les données », il doit introduire les données de son modèle géométrique à partir d'un système CAO manuellement. Ces données sont le(s) type(s) du matériau, la masse et le volume englobant. La figure 6.2 montre le contenu de l'interface de l'onglet « Données CAO ».

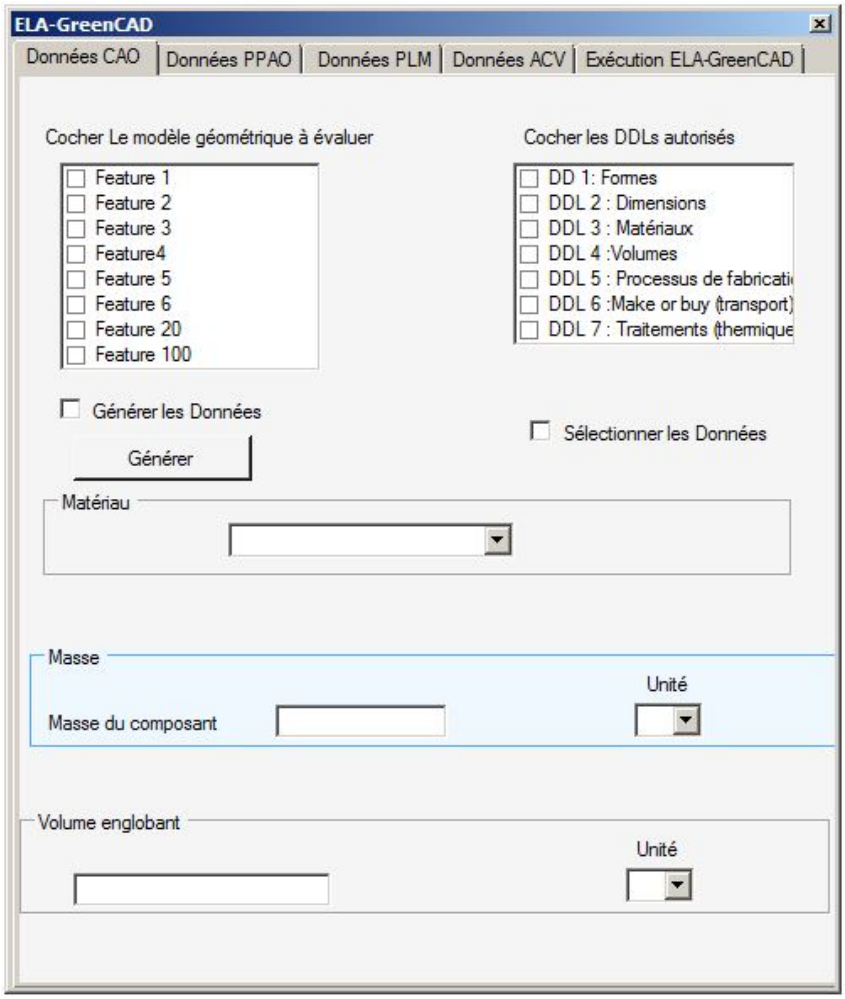


Figure 6. 2 Onglet des données CAO

6.2.3. Extraction des Données PPAO

Le deuxième onglet du *plugin* est basé sur l'intégration CAO/PPAO. Cette intégration permet de générer les scénarios possibles de fabrication et des gammes de fabrication. Un clic sur le bouton « Générer les plans de processus », figurant dans cet onglet, et le concepteur obtient les différents scénarios possibles de fabrication du modèle géométrique à évaluer. Les détails d'un scénario peuvent être visualisés si le concepteur les sélectionne à partir de la liste des scénarios générés. Ces détails consistent à choisir un modèle géométrique et voir les différents processus utilisés pour son obtention. Par exemple, un feature « trou » peut être percé puis taraudé.

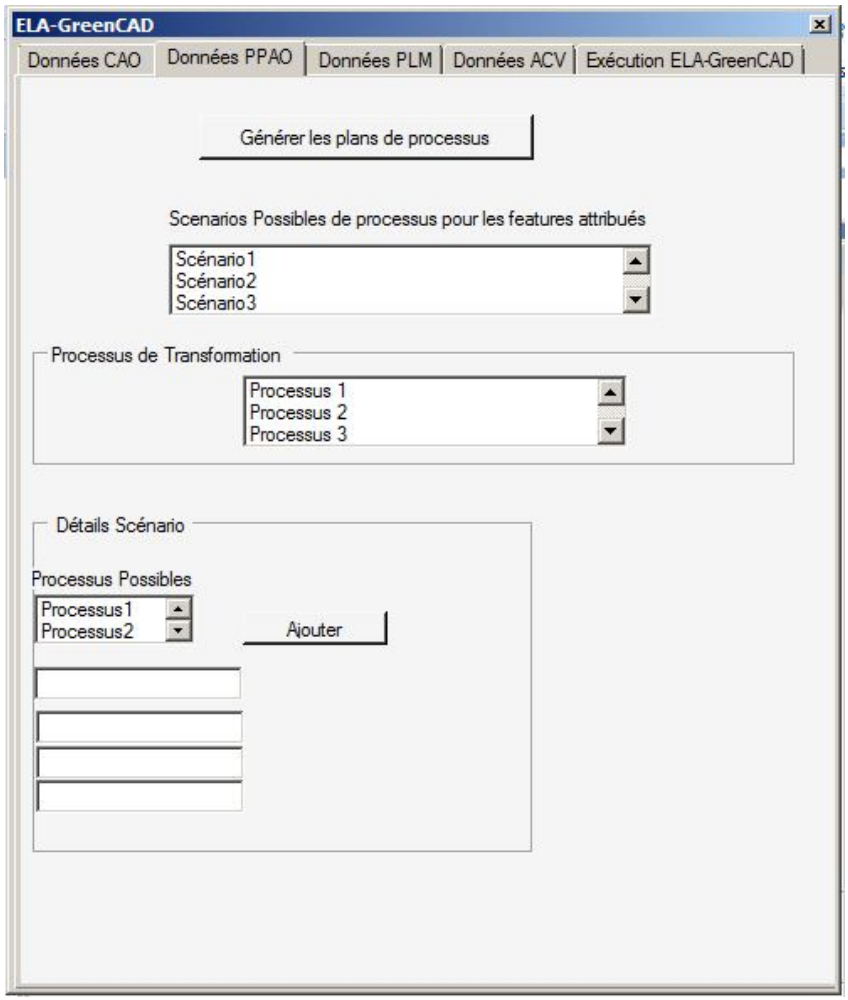


Figure 6. 3 Onglet « Extraction des données » à partir d'un système PPAO

6.2.4. Extraction des données d'un système PLM

Le troisième onglet « Données PLM » montre que des données des cinq étapes du cycle de vie d'un modèle géométrique peuvent être stockées dans un système PLM. De fait, on a choisi dans notre *plugin* d'avoir la possibilité d'extraire les données de chaque phase de vie à part (dans un sous-onglet).

6.2.4.1. Extraction des informations matières premières à partir d'un système PLM

Dans ce sous-onglet, le concepteur peut choisir entre l'option générer automatiquement les données relatives à la phase extraction des matières premières ou les introduire manuellement. Les données à extraire sont le matériau, le pays d'origine, le processus de transformation et on peut même avoir une idée sur le coût

de la quantité de matière à utiliser pour réaliser le modèle géométrique, objet d'évaluation. La figure 6.4 présente l'interface à manipuler pour extraire les données relatives à l'extraction des matières premières à partir d'un système PLM.

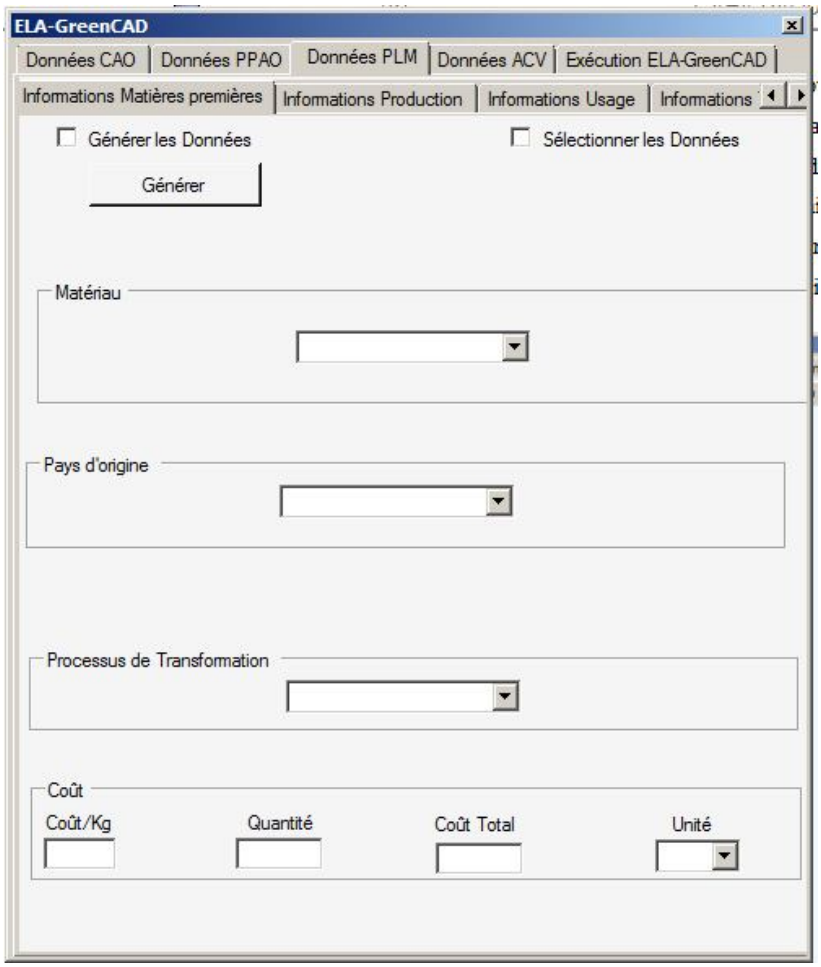


Figure 6. 4 Sous-onglet extraction des données relatives à l'extraction des matières premières à partir d'un système PLM

6.2.4.2. Extraction des informations sur la phase de fabrication à partir d'un système PLM

Dans ce sous-onglet, le concepteur de même a le choix entre l'option générer automatiquement les données relatives à la phase de fabrication ou les introduire manuellement. Les données à extraire sont les processus existants au sein d'une entreprise, ainsi que les processus externes qui peuvent être utilisés dans la réalisation d'un modèle donné. Le bouton « Ajouter » permet d'ajouter manuellement d'autres types de processus qui n'existent pas dans la base des données de l'entreprise et qui

sont récemment adoptés. De plus, le concepteur peut avoir le type et la quantité d'énergie utilisés pour l'obtention du modèle ainsi que la quantité de matière générée comme déchets pour chaque processus de production. Les processus de cette phase ne sont pas uniquement de transformation mais peuvent être aussi de traitements thermiques ou de surface. La figure 6.5 est une illustration de cette interface pour extraire les données relatives à la phase de fabrication à partir d'un système PLM.

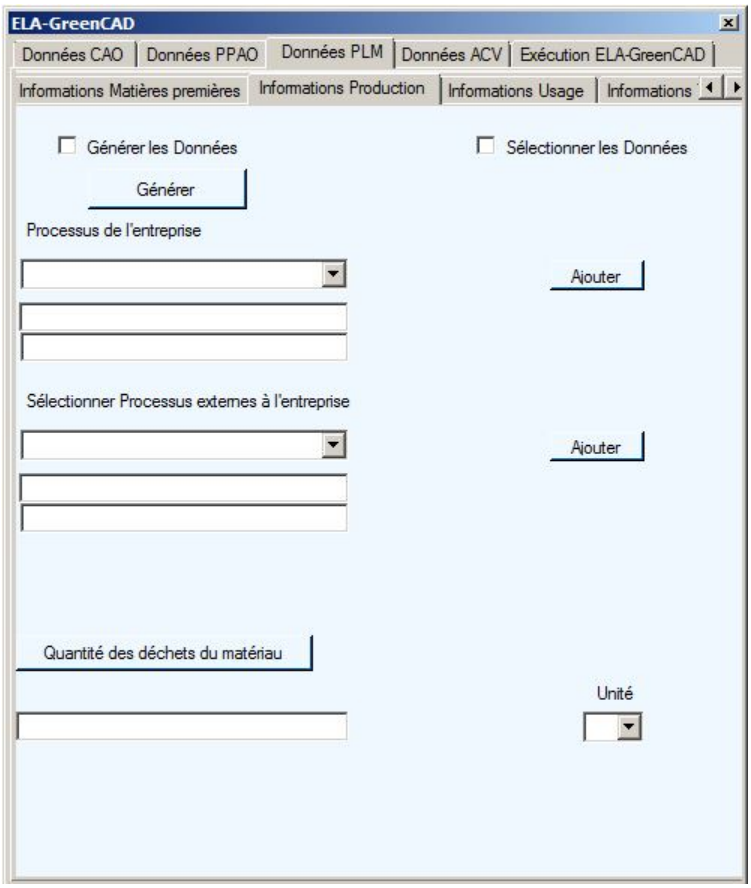


Figure 6. 5 Sous-onglet extraction des données relatives à la phase de fabrication à partir d'un système PLM

6.2.4.3. Extraction des informations sur la phase d'usage à partir d'un système PLM

Le sous-onglet « Informations usage » renseigne sur les processus adoptés lors de cette phase en utilisant le modèle géométrique à évaluer, ainsi bien que les ressources et leurs quantités. L'interface autorise le concepteur à ajouter d'autres données non existantes dans le système intégré si cela s'avère nécessaire. La figure 6.6 est une capture d'écran de ce sous-onglet.

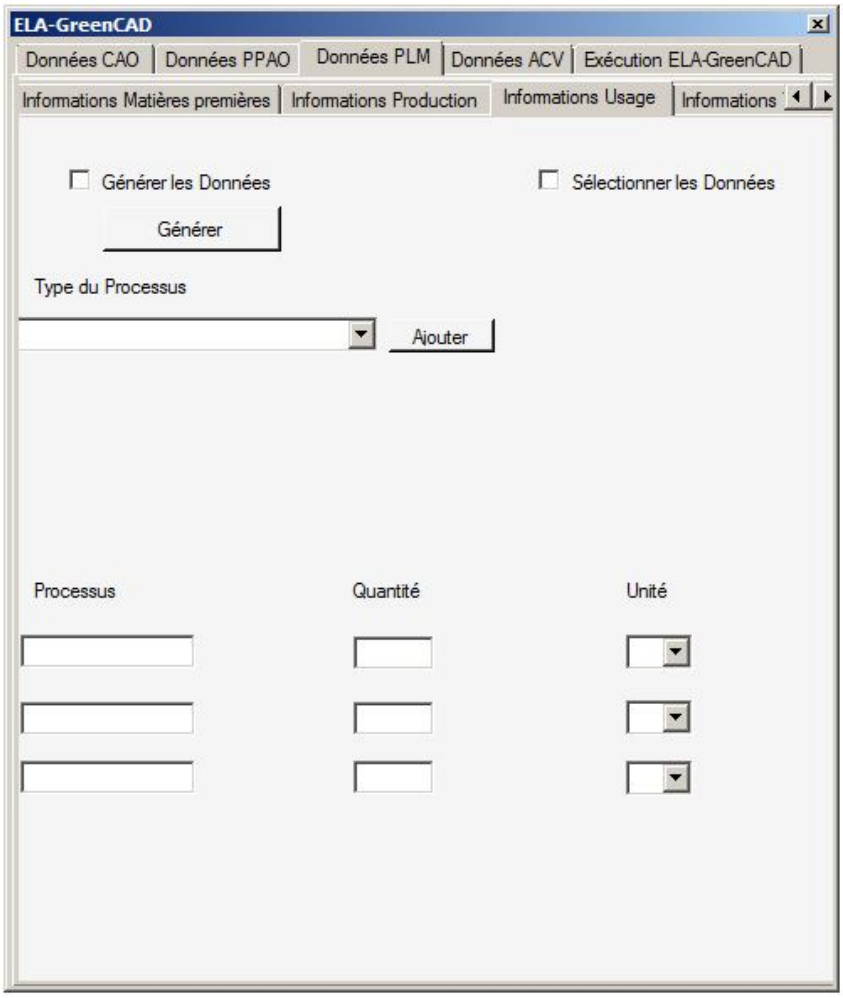


Figure 6. 6 Sous-onglet extraction des données relatives à la phase d'usage à partir d'un système PLM

6.2.4.4. Extraction des informations sur la phase du transport à partir d'un système PLM

Dans un système PLM, les données qu'on peut trouver sur la phase du transport sont les pays d'origine de la matière première, le pays de fabrication et le pays de distribution ainsi que les différents modes utilisés pour passer d'une phase de vie à une autre. La figure 6.7 montre un exemplaire de données à extraire d'un système PLM pour la phase du transport. Ces données peuvent être générés automatiquement ou introduites manuellement.

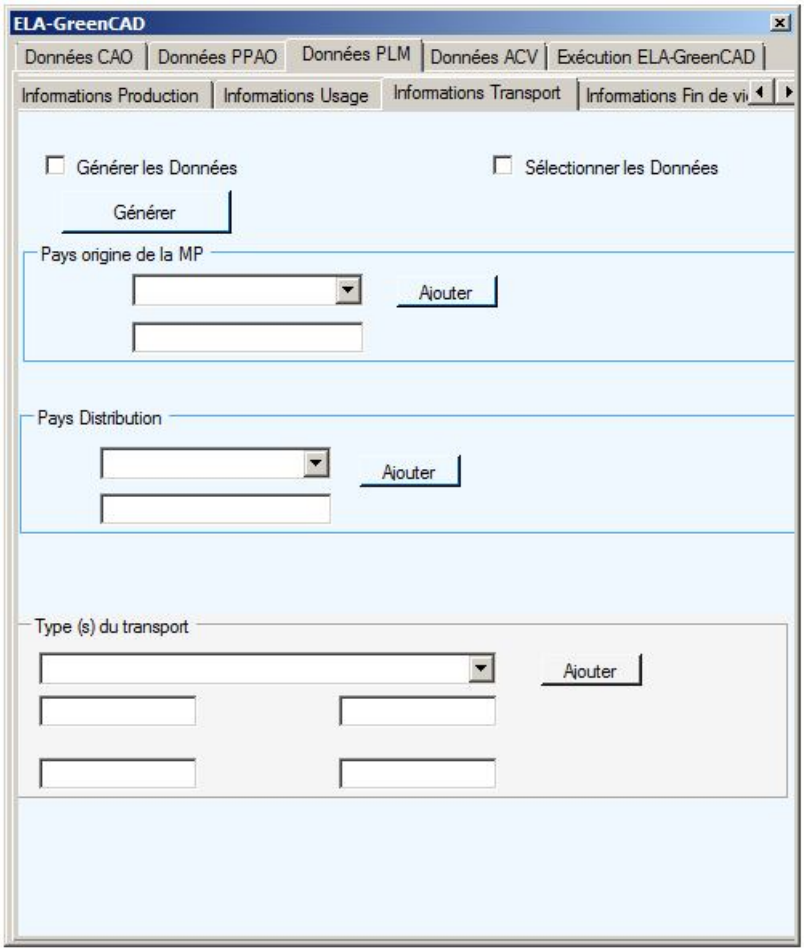


Figure 6. 7 Sous-onglet extraction des données relatives à la phase du transport à partir d'un système PLM

6.2.5.4. Extraction des informations sur la phase de fin de vie à partir d'un système PLM

Dans cette phase, les scénarios de fin de vie sont au nombre de deux ; Déchets ménagers, Déchets encombrants. Cependant, le concepteur peut ajouter d'autres scénarios manuellement s'il a des donnés plus précises sur la fin de vie d'un matériau donné dans un pays ou un autre. Cette phase de fin de vie est liée à la phase de fabrication par la récupération du type du matériau et les quantités utilisées ou rejetées. Avec cette interface, le concepteur sélectionne l'un des scénarios proposés ou choisit l'option « autre ». Pour chaque scénario, un matériau en fin de vie peut subir trois processus : recyclage, incinération et enfouissement. Pour chaque processus, on doit avoir le taux de ce processus. La figure 6.8 montre l'interface de manipulation de cette phase.

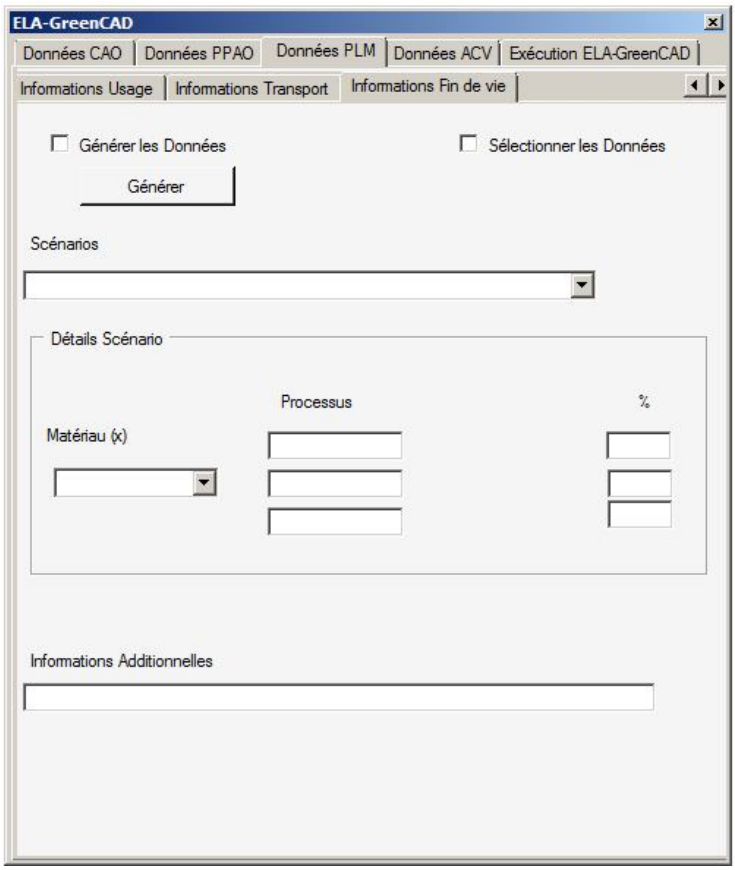


Figure 6. 8 Sous-onglet extraction des données relatives à la phase de fin de vie à partir d'un système PLM

6.2.5. Classification des données dans un système ACV

Pour réaliser une Analyse environnementale et comparer différentes solutions il est nécessaire d'établir une unité fonctionnelle ainsi que le nombre de flux de référence pour chaque solution.

Le Bouton « Classer » dans l'onglet « Données ACV » permet une classification des données extraites dans le domaine temporaire, c'est-à-dire que chaque donnée est attribuée à la phase qui lui correspond dans un tableau. Pour chaque phase, les colonnes représentent les types des données et les lignes représentent les scénarios possibles pour cette phase. La figure 6.9 présente l'interface de la classification des données environnementales.

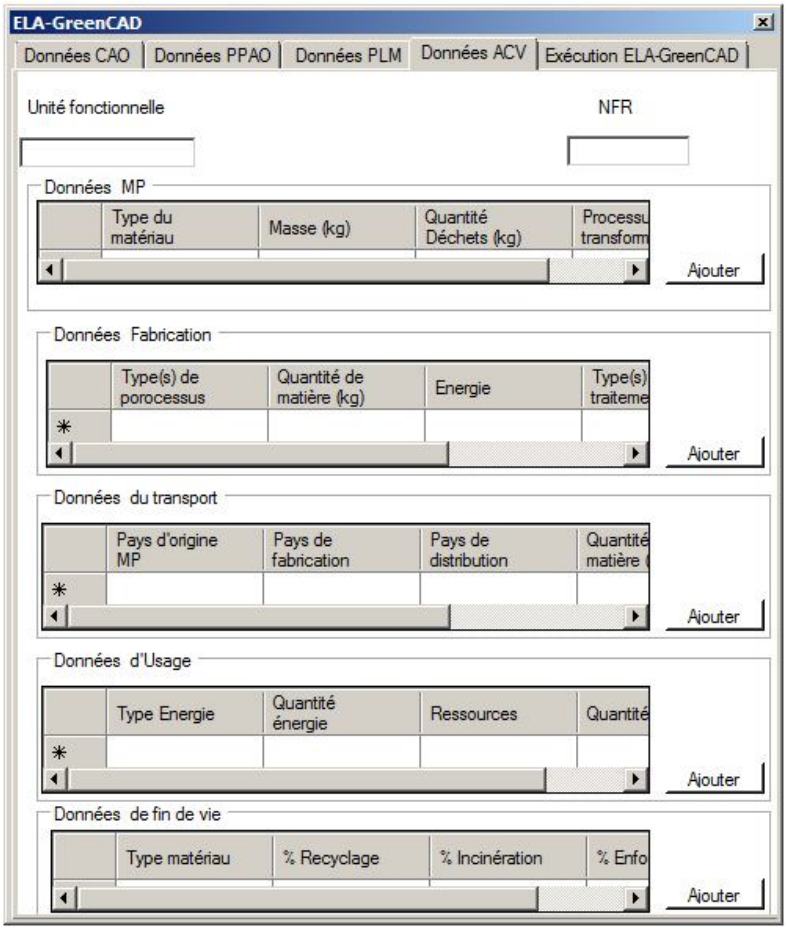


Figure 6. 9 Onglet Classification des données nécessaires à une ACV

Dans cette fenêtre, on trouve le tableau relatif aux données matières premières, qui contient les paramètres suivants : Type du matériau, Masse, Quantité de déchets, processus de transformation.

Dans le tableau correspondant aux données de la phase de fabrication, on trouve le type du processus, la quantité de matière, l'énergie consommée, types des traitements, etc.

Pour la phase du transport, on a le pays d'origine matières premières, le pays de fabrication des produits, le pays de distribution et la quantité de matière transportée.

Les données relatives à la phase d'usage sont le type d'énergie à utiliser par le produit final, la quantité d'énergie, les ressources et leurs quantités.

Pour la fin de vie, les paramètres qu'on trouve sont : le type du matériau et les taux des processus à considérer pour un matériau en fin de vie.

L'ajout d'un scénario pour une phase donnée peut se faire manuellement en cliquant sur le bouton « Ajouter » qui se trouve après la définition de chaque phase de vie.

6.2.6. Exécution de la méthodologie « ELA »

Enrichir un feature avec des données environnementales basées sur la scénarisation nous permet de générer un éco-feature. Cela permet de modéliser une pièce ou un assemblage à l'aide des éco-features puisqu'il représente l'élément unitaire dans la modélisation géométrique environnementale.

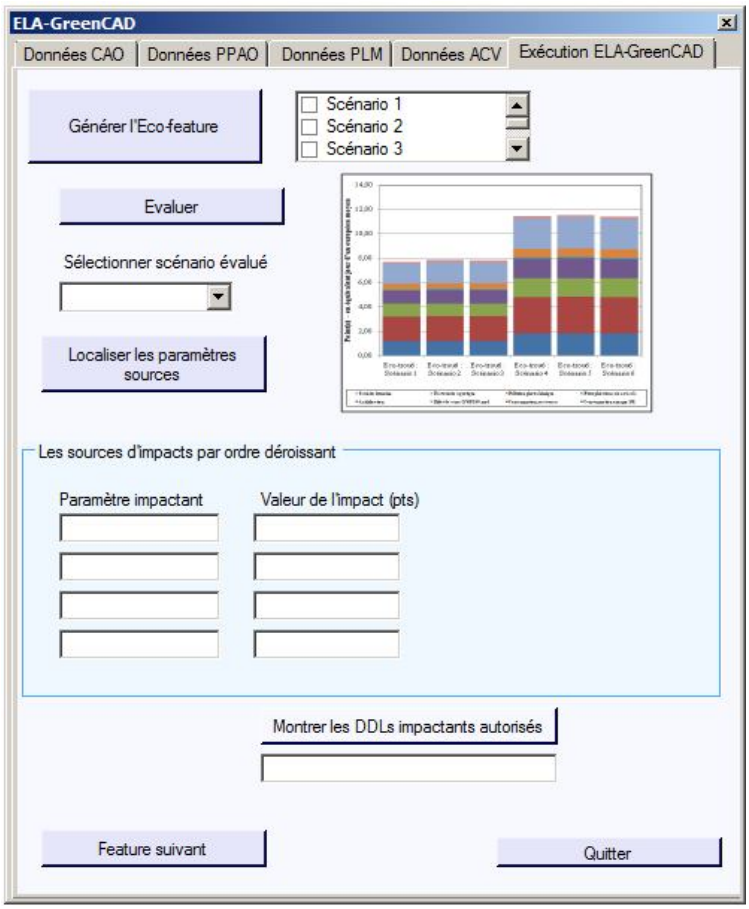


Figure 6. 10 Fenêtre d'exécution d'ELA

Dans la fenêtre représentée dans la figure 6.10, le bouton « Générer l'éco-feature » permet, de générer les différents scénarios de vie possibles d'un feature. Une fois les

scénarios générés, le concepteur sélectionne les scénarios qu'il veut évaluer puis active leur évaluation environnementale en cliquant sur le bouton « Evaluer ». Un graphique des impacts environnementaux des différents scénarios apparait. En se basant sur le graphique d'impacts, le concepteur choisit un scénario et localise ses sources d'impacts avec le bouton « Localiser les paramètres sources », les sources d'impacts ainsi que leurs valeurs apparaissent dans un ordre décroissant ci dessous. Puis, il clique sur le bouton « Montrer les DDLs impactants » pour visualiser en ordre décroissant les DDLs impactants avec leurs valeurs d'impacts.

En bas de la fenêtre, le concepteur doit choisir entre « Feature suivant » pour évaluer un autre feature ou « Quitter » pour sortir de l'application ELA-GreenCAD.

6.3. Validation sur le cas du mitigeur

La simulation du fonctionnement de l'application proposée « ELA-GreenCAD » est appliqué sur l'un des *features* de notre produit d'étude (le mitigeur de lavabo), qui est le trou.6 dans l'arbre de construction CAO du corps du mitigeur. Les différentes captures d'écrans de chaque étape sont présentées dans les figures 6.11 à 6.20.

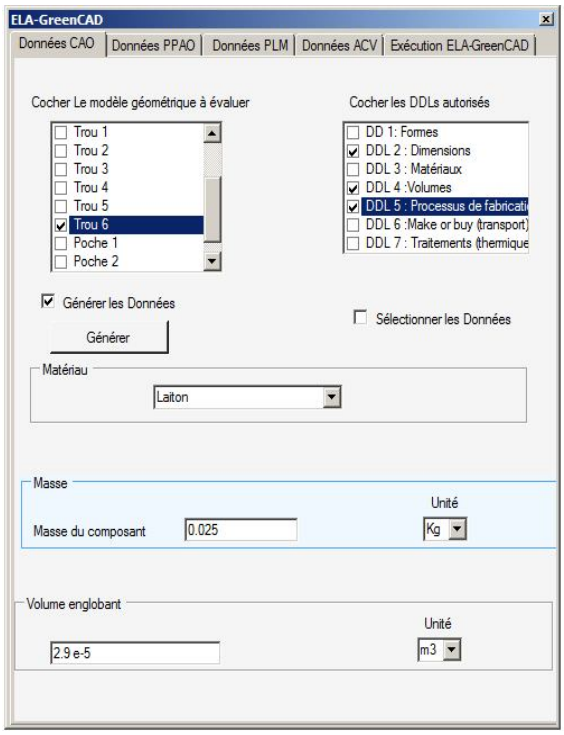


Figure 6. 11 Onglet données CAO du trou6

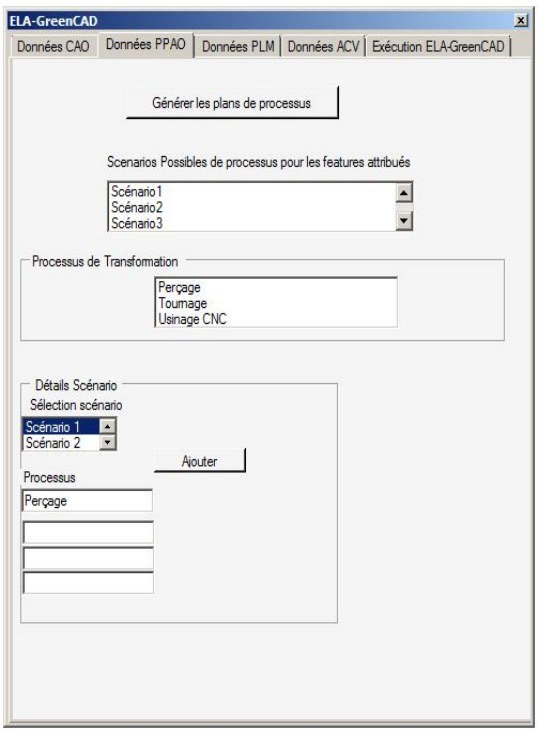


Figure 6. 12 Onglet données PPAO du trou 6

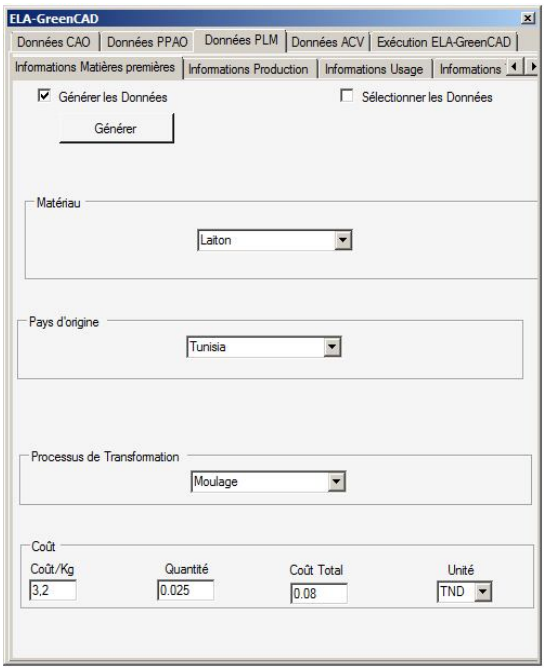


Figure 6. 13 Sous-Onglet données Matières premières dans un système PLM du trou 6

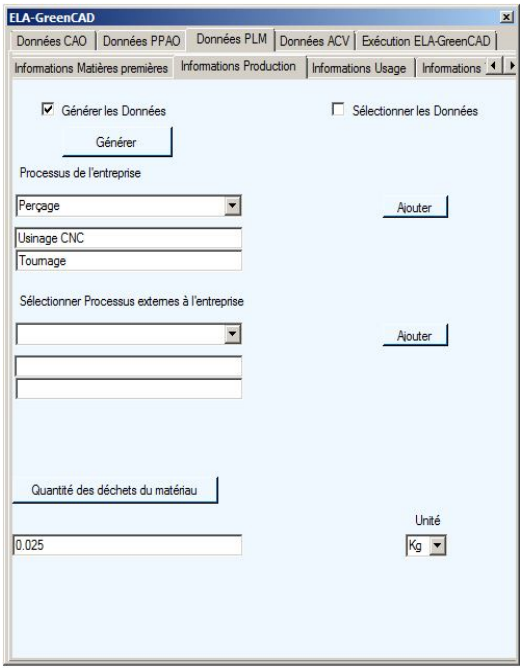


Figure 6. 14 Sous-Onglet données fabrication dans un système PLM du trou 6

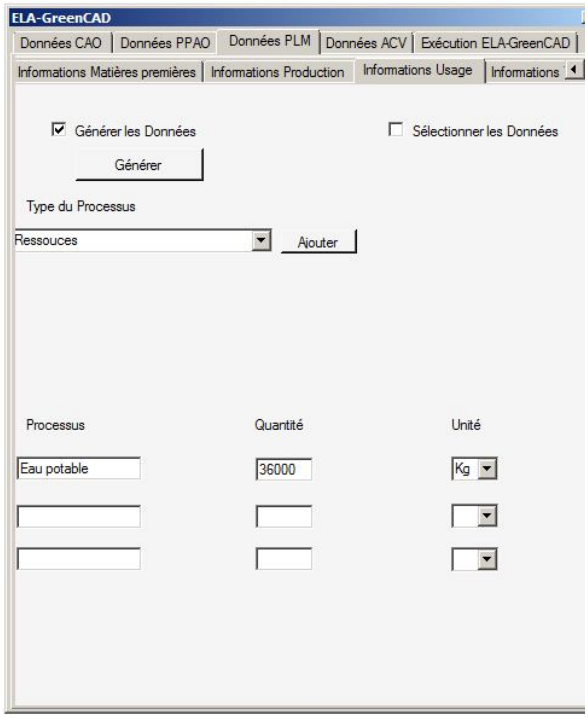


Figure 6. 15 Sous-Onglet données Usage dans un système PLM du trou 6

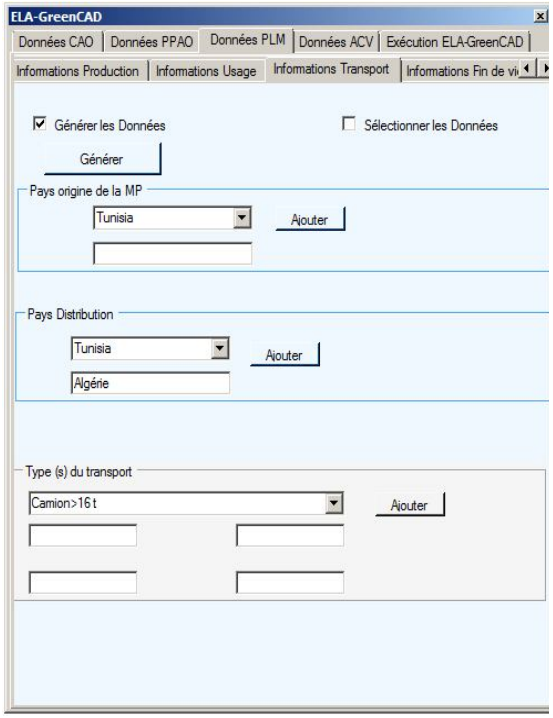


Figure 6. 16 Sous-Onglet données Transport dans un système PLM du trou 6

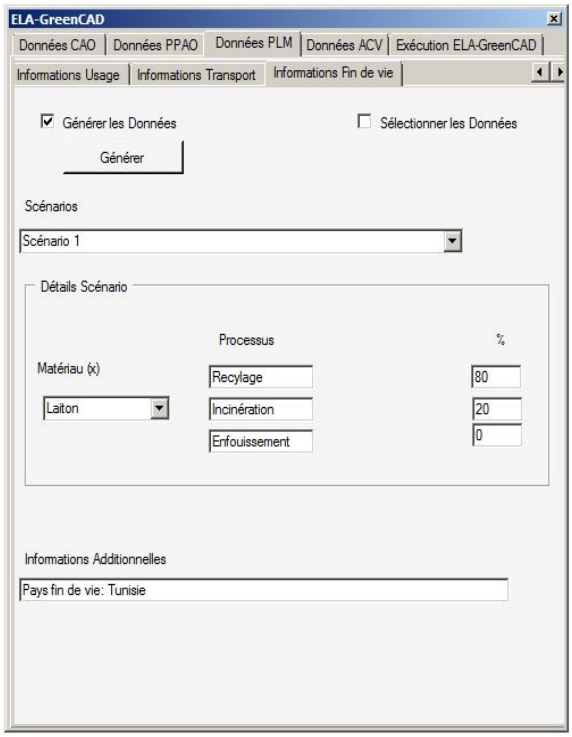


Figure 6. 17 Sous-Onglet données Fin de vie dans un système PLM du trou 6

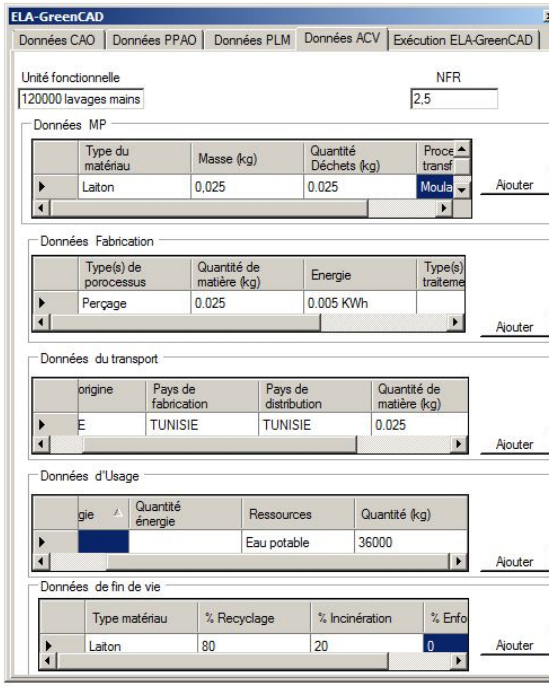


Figure 6. 18 Sous-Onglet données dans un système PLM du trou 6

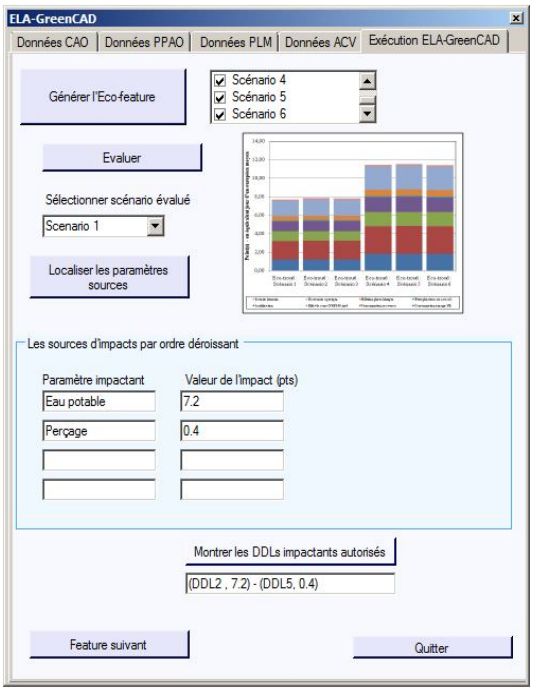


Figure 6. 19 Onglet Exécution ELA-GreenCAD sur le trou 6

6.4. Conclusions et limitations

A partir de ce cas test d'évaluation, nous constatons que l'approche proposée et l'outil développé offrent la possibilité de pratiquer une évaluation environnementale basée sur la scénarisation d'un *feature* en collectant ses données environnementales à partir des systèmes intégrables avec les modeleurs géométriques.

Le résultat obtenu montre que cette approche permet d'éco-concevoir un produit même à des phases très avancées dans le processus de conception malgré que la zone d'action soit assez réduite.

Il existe deux types de limitations globales. Le premier est lié aux limitations de la méthodologie CML, qui sont les suivants :

- Les incertitudes quant à la justesse de la méthodologie de dommages utilisée. Cela comprend les choix de valeurs comme le choix de l'horizon temporel dans le modèle de dommages, ou la question de savoir si nous devrions inclure un effet même si la preuve scientifique que l'effet existe est incomplète.
- Les incertitudes de données qui se réfèrent à des difficultés de mesure ou de prédiction des effets. Ce type d'incertitude est relativement facile à manipuler et peut être exprimée par une série des données ou un écart-type.

Le deuxième type de limitation est lié au *plugin* « ELA-GreenCAD » :

- Les gammes des matériaux ou processus, etc., ne sont pas exhaustives.
- Rendre le *plugin* compatible avec tous les logiciels de modélisation est une tâche difficile qui doit être mise en œuvre par une stru*cture* commerciale.
- Nous n'avons pas encore à ce jour la possibilité d'évaluer un produit complexe vu le grand nombre des scénarios qui doivent être générés en présence de plusieurs *features*. Il faut donc à nouveau compléter et professionnaliser notre plateforme pour la rendre utilisable dans tous les cas de figure de modélisation géométrique.

Conclusions et perspectives

Conclusions

Pour faire face aux problèmes environnementaux qui sont de plus en plus prégnants en conception, il apparaît indispensable de revoir fondamentalement les performances environnementales de nos produits sur le marché. Dans cette perspective, les entreprises doivent intégrer les préoccupations environnementales dans leurs processus de conception afin de mettre sur les marchés des produits plus durables.

L'éco-conception répond à ce défi à travers de multiples méthodes et outils. Toutefois la prise en compte des contraintes environnementales ont été considérées soit lors des phases de conception préliminaire, soit a posteriori de la conception de détails avec des Analyses de Cycle de Vie exhaustives mais qui arrivent à un stade où les modifications ne sont généralement plus tolérées. Les étapes intermédiaires de conception de détail des pièces et assemblages mécaniques sont assez peu couvertes, pourtant elles laissent un certain nombre de degrés de liberté au concepteur pour réduire les impacts environnementaux.

Dans ce cadre, ce mémoire de thèse propose une nouvelle approche d'éco-conception pour prendre en compte les aspects du cycle de vie dans le processus de développement de produits au niveau de la conception de détails et spécialement lors de l'attribution des entités élémentaires que sont les *features*.

Ces features, qui sont utilisés dans différents travaux visant la conception orientée environnement, ont été aussi utilisés dans d'autres intégrations avec les systèmes CAO tels que les systèmes XAO, PLM, ACV. Nous avons exploitaté ces intégrations pour éco-concevoir avec les features en les enrichissant par diverses données requises pour l'évaluation environnementale : il s'agit de notre proposition de modèle d'éco-feature.

De plus, la lecture et interprétation des résultats des évaluations environnementales restent toujours problématique pour un concepteur non expert en termes d'environnement.

En positionnant notre recherche dans ce cadre, nous avons défini trois axes de recherches. Le premier correspond à la présentation d'une démarche pour répondre à la première question de recherche « Est-il possible d'éco-concevoir lors de la phase de modélisation géométrique et comment ? » A cet effet, nous avons proposé un processus « ELA », pour Evaluer, Localiser et Agir, et montré qu'il répondait positivement à la question. Ce processus permet au concepteur CAO de chercher les sources d'impacts dans un modèle géométrique afin d'agir avec les degrés de liberté (DDLs) qui lui restent.

Le deuxième axe de recherche développe un modèle d'éco-*feature* qui est un feature classique enrichi par des données orientées éco-conception et qui permet de réaliser les deux premières phases d'ELA (Evaluer-Localiser). Ce modèle représenté en figure 4 permet de réaliser un inventaire du cycle de vie d'un *feature* ou d'un ensemble de *feature*s afin de pratiquer une analyse environnementale en premier lieu et localiser les sources d'impacts en second lieu dès qu'un feature est défini par le concepteur.

La possibilité d'avoir des résultats d'EE assez compréhensibles par des gens non experts en termes d'environnement a aussi été un objectif de recherche. Le modèle d'amélioration environnementale basé sur les DDLs en CAO permet de lier les résultats des analyses environnementales au domaine de connaissances du concepteur. Ce modèle autorise la détection des différents degrés de liberté en relation avec les sources d'impacts, cela rend le concepteur capable d'agir sur le modèle géométrique initial afin de l'éco-concevoir. Ce modèle présente la deuxième phase dans le processus d'éco-conception proposé «ELA».

Une comparaison réalisée entre les résultats d'analyse environnementale d'un modèle géométrique final d'un mitigeur de lavabo et celles d'un autre conçu en lui appliquant notre méthodologie montre l'influence importante des choix effectués lors de la conception de détails sur l'environnement.

La Plateforme de validation du processus d'éco-conception basée sur les features « ELA-GreenCAD » a été développée sur Visual Basic©. Elle peut être améliorée pour être développée comme un véritable outil fonctionnel et intégrable avec les différents modeleurs géométriques. Enfin, l'évaluation d'un assemblage avec ce *plugin* peut et doit maintenant faire l'objet des futurs travaux.

Perspectives

L'établissement d'un méta-modèle d'éco-features, qui prend en compte les interactions entre les features est nécessaire pour l'amélioration de l'approche proposée dans ce mémoire. En effet la faisabilité de l'éco-conception d'un feature en lui-même ne suffit pas pour obtenir une pièce éco-conçue puisque l'IE total de cette pièce n'est pas la somme des IEx de chaque feature.

De plus la détermination des DDLs par une approche multicritères est nécessaire pour pouvoir appliquer la méthodologie développée à tout type de produits. L'identification des espaces des variables ainsi que leurs intervalles nécessite aussi le développement d'une approche générique.

Enfin, la contrainte coût est une contrainte prioritaire pour les industriels. D'où l'établissement d'une méthodologie basée sur un bon compromis environnement/coût pourra intéresser énormément les industriels.

Liste des publications dans le cadre de la thèse

Articles

1. R. Gaha, A. Benamara, B. Yannou, "Eco-design of a basin mixer in a geometric modeling phase", Key Engineering Materials, V572, Pages 7-11, (2014).

2. R. Gaha, A. Benamara, B. Yannou, "Eco-designing with CAD features: Analysis and proposals", Advances in Mechanical Engineering, (2013).

3. R. Gaha, A. Benamara, B. Yannou, "A New Eco-design Approach on CAD systems", International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, (2014).

Communications

1. R. Gaha, A. Benamara, B. Yannou, "Proposition d'un processus d'éco-conception en CAO basé sur les features", Troisième congrès Tunisien de Mécanique, 24-26 Mars, Sousse, Tunisie, 2014.

2. R. Gaha, A. Benamara, B. Yannou, "Développement d'un modèle d'éco-feature pour l'inventaire du cycle de vie", Troisième congrès Tunisien de Mécanique, 24-26 Mars, Sousse, Tunisie, 2014.

3. R. Gaha, A. Benamara, B. Yannou, "A Feature-based methodology for eco-designing parts on detail phase",Cinquième congrès International Conception et Modélisation des systèmes Mécaniques, CMSM'2013, 25-27 Mars, Djerba, Tunisie, 2013.

4. R. Gaha, A. Benamara, B. Yannou, "ECO-conception d'un mitigeur de lavabo lors de la modélisation géométrique", Deuxième congrès Tunisien de Mécanique, 19-21 Mars, Sousse, Tunisie, 2012.

5. R. Gaha, A. Benamara, B. Yannou, "Méthodologie d'integration de l'eco-conception dans les premières phases du processus de conception", CMSM'2011, 30 Mai-01 juin, Sousse, Tunisie, 2011.

6. R. Gaha, A. Benamara, B. Yannou, "Influence of geometrical characteristics on eco-designed products", International conference on innovative methods in product design, IMPROVE 2011, 15-17 juin, Venice, Italy, 2011.

7. R. Gaha, A. Benamara, B. Yannou; "Eco-conception et CAO Parametrique"; CONFERE'10, 01-02 juillet, Sousse, Tunisie, 2010.

Références bibliographiques

(Abad, 2008) Abad K., An ontology based approach to integrating life cycle analysis and computer aided design, International Conference on Engineering and product design education., Université Polytechnique de Catalogne, Espagne. Septembre 2008.

(Abdalla et Ebeid, 2011). Abdalla, H. S., and Ebeid, M. A. (2011). A Holistic Approach for Sustainable Product Design. In Global Product Development (pp. 329-338). Springer Berlin Heidelberg.

(ADEME, 2008), ADEME, Bilan Produit 2008, http://www.ademe.fr/bilanproduit/

(Allada et Anand, 1995) Allada V. and Anand S. (1995) Feature-based modelling approaches for integrated manufacturing: state-of-theart survey and future research directions-International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Taylor and Francis, 1995. - Vol. 8. - pp. 411--440.

(AMS, 2001) Document Technique des AMS, 2001.

(Andreasen, M.M. and L. Hein, 1987) Andreasen, M.M. and L. Hein, “Integrated Product Development”, IPU Institute for Product Development, 1987.

(Ashby, 2005) Ashby M. F. Materials Selection in Mechanical Design, Third edition. 2005 (Elsevier).

(Bakar et Rahimifard, 2007) Bakar, M. S. A., and Rahimifard, S., (2007), “Computer-Aided Recycling Process Planning for End-of-Life Electrical and Electronic Equipment,” Proc. Inst. Mech. Eng., Part B, 221, pp. 1369–1374.

(Bhander et al., 2003) Bhander, G. S., Hauschild, M., & McAloone, T. (2003). Implementing life cycle assessment in product development. Environmental Progress, 22(4), 255-267.

(Bianconi, et al., 1993) Bianconi, F., Conti, P., & Di Angelo, L. (1993, August). Interoperability among CAD/CAM/CAE systems: a review of current research trends. In Geometric Modeling and Imaging--New Trends, 2006 (pp. 82-89). IEEE.

(Bidarra et Bronsvoort, 2000). Bidarra R. and Bronsvoort WF. (2000) Semantic feature modeling-Computer Aided Design. - 2000. -Vol. 32. - pp. 201--25.

(Bilan produit, 2008), Manuel bilan produit 2008/Eco-Invent, Swiss Centre For Life Cycle Inventories, 2009, http:// www.ademe.fr/bilanproduit.

(Bonvoisin, et Thiede, 2012) Bonvoisin, J., and Thiede, S. (2012, March). Vers une estimation de l'énergie de fabrication d'un produit dès sa conception. In 13ème Colloque National AIP-PRIMECA-Démarche et innovation dans la conception et la production des systèmes intégrés.

(Börjeson et al, 2006) (Börjeson et al, 2006)Börjeson L, Höjer M, Dreborg K-H, et al. « Scenario types and techniques: Towards a user's guide", 2006. Futures 38:723–739. doi: 10.1016/j.futures.2005.12.002.

(CAMLOGIC, 2012) CAMLOGIC, 2012 CamLogic, 2012. Solid Edge Ecodesigner (online). Available:http://www.camlogic.com/cad-siemens-solid-edge/solid-edgeecodesigner[Accessed April 26 2012].

(Cao et al., 2002) Cao, H. J., Liu, F., He, Y., and Zhang, H. (2002). Study on

model set based process planning strategy for green manufacturing. Jisuanji Jicheng Zhizao Xitong/Computer Integrated Manufacturing System(China), 8(12), 978-982.

(Capelli et al., 2007a) Cappelli, F., Citti, P., Delogu, M., and Pierini, M. (2007). Strumento informatico integrato in ambiente cad per l'analisi preventiva degli impatti ambientali dei processi/prodotti in fase di produzione. Atti del XXXVI Convegno Nazionale AIAS.

(Capelli et al., 2007b) Cappelli, F., Delogu, M., Pierini, M., and Schiavone, F. (2007b). Design for disassembly: a methodology for identifying the optimal disassembly sequence. Journal of Engineering Design, 18(6), 563-575.

(Capelli, 2006) Capelli F., Integration of LCA and Eco-Design guideline in a virtual cad framework, The 13th edition of the CIRP International conference on Life Cycle Engineering, Leuven, 2006.

(Chiu et Chu, 2012) Chiu, M. C., and Chu, C. H. (2012). Review of sustainable product design from life cycle perspectives. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 13(7), 1259-1272.

(Chu et al., 2009) Chu, C. H., Luh, Y. P., Li, T. C.(2009), and Chen, H., "Economical green product design based on simplified computer-aided product structure variation," Computers in Industry, Vol. 60, pp. 485-500..

(Collado-Ruiz et Ghorabi, 2009), Collado-Ruiz, D., & Ostad-Ahmad-Ghorabi, H. "Fuon theory: Standardizing functional units for product design". Resources, Conservation and Recycling, 54(10), 683-691.

doi:10.1016/j.resconrec.2009.11.009

(Deja et Siemiatkowski, 2012), Deja, M., and Siemiatkowski, M. S, “Feature-based generation of machining process plans for optimised parts manufacture”. Journal of Intelligent Manufacturing, 2012, 1-16.

(Desphande et al., 2011) Deshpande, A., Snyder, J., and Scherrer, D. (2011, June). Feature level energy assessments for discrete part manufacturing. In 39th Annual SME North American Manufacturing Research Conference (NAMRC).

(Ernzer et Birkhofer) M. Ernzer and H. Birkhofer, “From product ideas to sustainable products—life cycle design suitable for product designer,” in Proceedings of the Engineering Design Conference (EDC ’02),pp. 647–656, Kings College London, London, UK, July 2002

(European Union, 2003a) European Union, 2003, Directive 2002/96/EC of the 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE).

(European Union, 2003b) European Union, 2003, Directive 2002/95/EC of the 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment.(RoHS)

(European Union, 2005) European Union, 2005, Directive 2005/32/EC of 6 July 2005 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-using products. (EuP)

(European Union, 2006) European Union, 2006, Regulation (EC) n° 1907/2006 of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals (REACH).

(Gaha et al, 2014) Gaha, Raoudha, Benamara, Abdelmajid, et Yannou, Bernard. Eco-design of a basin mixer in geometric modeling phase. Key

Engineering Materials, 2014, vol. 572, p. 7-11

(Gaha et al., 2010) Gaha, R., Benamara, A., and Yannou, B. (2010), Eco-conception et CAO Paramétrique, Confere'2010, 1-2 Juillet 2010, Sousse, Tunisie.

(Gaha et al., 2011) Gaha, R., Benamara, A., and Yannou, B. (2011), Influence of geometrical characteristics on eco-designed products," Proc. Of the Int. Conf. on Innovation Methods in Product Design 2011, pp. 242-247, 2011.

(GeodKoop et Oele, 2004), GeodKoop, M., Oele, M., « Sima pro : introduction to LCA ». Product ecology consultants (pre consultants). Pays Bas. 2004

(Geodkoop et Sprienxma, 2000), Geodkoop, M., Sprienxma. R., « The eco indicator 99 : a damage oriented method for life cycle impact assessment ». Pre consultants, 2nd edition. 2000

(Geodkoop, et Sprienxma, 1999) Geodkoop, M., Sprienxma. R., « The eco indicator 99 : a damage oriented method for life cycle impact assessment ». Pre consultants, 2nd edition. 2000.

(Goedkoop et al., 2009) Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J. and Van Zelm, R. (2009). ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at midpoint and endpoint level. Report 1: Characterisation. 1ère édition. Pays-Bas, Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment. 132 p.

(Germani et al., 2004) Germani, M., Mandorli, F., Otto, H.E. (2004), CAD - LCA data migration supported by Feature technology and attributed structures , Proceedings of Gloal Conference on Sustainable Product Development and Life Cycle Engineering , pp. 379 - 384 , 2004 . ISBN 3937151214,

9783937151212.

(Ghodous,1996) Ghodous P. (1996) Modélisation Intégrée de Données de Produit et de Processus de Conception [Report] : Tech-report. - Lyon - FRANCE : Université Claude Bernard - Lyon1, 1996.

(Granta CES, 2012) Granta Design Ltd, (2012) GRANTA CES Edupack 2012 Overview (online). Available: http://www.grantadesign.com/download/pdf/edupack2012/2012Overview.pdf

(Granta Design ,2009) http://www.grantadesign.com/education/edupack2009.htm

(Granta Eco-materials Advisor, 2012) Granta Design Ltd, 2012. Eco Materials Adviser in Autodesk Inventor Datasheet (online). Available:http://inventor.grantadesign.com/en/ecomaterialsadviser.pdf

(Guinée et al., 2002) Guinée, J.B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., van Oers, L.,Sleeswijk, A. W., Suh, S., Udo de Haes, H. A., de Bruijn, H., van Duin, R., Huijbregts, M. A. J., Lindijer, E., Roorda, A. A. H., van der Ven, B. L. and Weidema, B. P. (2002). Handbook on Life Cycle Assessment. Operational Guide to the ISO Standards. Pays-Bas, Kluwer Academic Publishers, Centre of Environmental Sciences, Leiden University, 692 p.

(Guinée et Heijungs, 1992) Guinée J., Heijungs R. (1992): Environmental life cycle assessment of products: Guide, CML, Leiden, The Netherlands, NOH report 9266

(Güngör, 2006) Güngör, A. (2006). Evaluation of connection types in design for disassembly (DFD) using analytic network process. Computers and Industrial Engineering, 50(1), 35-

54.

(Haak, 2001), Haak, J., « Mesure par bilan matières et MIPS ». Économiste chercheur au centre d'économie et d'éthique pour l'environnement et le développement. TI G5910.

(Hagström et Ritzén, 2004) L.Hagström, S.Ritzén, "Integration of Environmental Assessment Functions in Design and Product Development Tools", Computer aided design and applications, conference volume, volume1, Thailand, Mai 2004

(Han. J, 1996) Han, J. (1996), Survey of feature research. Department of Computer Science and Institute for Robotics and Intelligent Systems, University of Southern California, Los Angeles, CA, USA.

(Hauschildt al., 2009) Hauschild, M. Z., Goedkoop, M., Guinée, J.B., Heijungs, R., Huijbregts, M., Jolliet, O., Margni, M. and De Schryver A. (2009). Framework and requirements for Life Cycle Impact Assessment (LCIA) models and indicators. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook. In Life Cycle Thinking and Assessment. Institute for the Environment and Sustainability.

(Helu et al., 2012) Helu, M., Behmann, B., Meier, H., Dornfeld, D., Lanza, G., and Schulze, V. (2012). Impact of green machining strategies on achieved surface quality. CIRP Annals-Manufacturing Technology.

(Humbert et al., 2005) Humbert S., Margni M., Jolliet, O. (2005) IMPACT 2002+: User Guide, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, October 2005

(ISO 14041) ISO 14041)

(ISO 14044) ISO 14044 2006a

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

(Jain, 2009) Jain, P. Design of an Interactive Eco-Assessment GUI tool for Computer Aided Product Design (Doctoral dissertation, Indian Institute of Technology) 2009.

(Janin, 2000) Janin, M. (2000). Démarche d'éco-conception en entreprise. Un enjeu: construire la cohérence entre outils et processus (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech).

(Jeswani et al, 2010) (Jeswani et al, 2010) H. K Jeswani et al., "Options for Broadening and Deepening the LCA Approaches, " Journal of Cleaner Production, vol. 18, pp. 120-127, 2010.

(Jha et Gurumoorthy, 2000) Jha et Gurumoorthy, (2000b), K. Jha, B. Gurumoorthy, Multiple feature interpretations across domains, Computers in Industry 2000;42(1):13–32.

(Jiang et Zhang, 2006) Jiang, Z., and Zhang, H. (2006, November). A vector projection method to evaluating machine tool alternatives for green manufacturing. In Technology and Innovation Conference, 2006. ITIC 2006. International (pp. 640-643). IET.

(Keoleian, 1993) Keoleian, G. A. The application of life cycle assessment to design. Journal of Cleaner Production, 1(3), 1993, 143-149.

(Le Pochat, 2005) Le Pochat, S. (2005). Intégration de l'éco-conception dans les PME: proposition d'une méthode d'appropriation de savoir-faire pour la conception environnementale des produits (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech).

(Leibrecht, 2005) Leibrecht, S. (2005). Fundamental Principles for CAD-based Ecological Assessments (9 pp). The International Journal of Life Cycle Assessment,10(6), 436-444.

(Mäntylä et al., 1996) Mäntylä, M., Nau, D., and Shah, J. (1996). Challenges in feature-based manufacturing research. Communications of the ACM, 39(2), 77-85.

(Marosky, 2007) Marosky N., Challenges of data transfer between CAD and LCA software tools, 3rd International Conference on Life Cycle Management, University of Zurich at Irchel, August 2007.

(Masoudi, et al., 2012) Masoudi, A., You, H., & Suh, S. H. (2012), A Guidance System for Selecting an Appropriate Eco-Design Checklist in the Early Stages of Product Development. 3rd International Conference on Green and Sustainable Innovation, May 2012

(Melk, 2007) Melk K., A Generic Framework for Life Cycle Applications, 3rd International Conference on Life Cycle Management, University of Zurich at Irchel, August 2007

(Morbidoni et al., 2011), Morbidoni, A., Favi, C., and Germani, M. “CAD-Integrated LCA Tool: Comparison with dedicated LCA Software and Guidelines for the improvement”. Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing, 2001, 569-574.

(Morbidoni et al., 2012) Morbidoni, A., Favi, C., and Germani, M. (2011). CAD-Integrated LCA Tool: Comparison with dedicated LCA Software and Guidelines for the improvement. Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing, 569-574.

(Munoz et Sheng, 1995) Munoz, A. A., and P. Sheng (1995). "An analytical approach for determining the environmental impact of machining processes." Journal of Materials Processing Technology 53.3 (1995): 736-758.

(Nawata et al., 2001) Nawata, Shoji, and Tojiro Aoyama (2001). "Life-cycle design system for machined parts-linkage of LCI data to CAD/CAM data." Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 2001. Proceedings EcoDesign 2001: Second International Symposium on. IEEE, 2001.

(Otto et al, 2001) OTTO, Harald E., MUELLER, Karl G., et KIMURA, Fumihiko. A framework for structured data retrieval in LCA using feature technology. In : Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 2001. Proceedings EcoDesign 2001: Second International Symposium on. IEEE, 2001. p. 250-255.

(Otto et al., 2003) Otto, H. E., Kimura, F., Mandorli, F., & Germani, M. (2003, December). Integration of CAD Models with LCA. In Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 2003. EcoDesign'03. 2003 3rd International Symposium on (pp. 155-162). IEEE.

(Pahng et al., 1998) Pahng, KF, Senin, N, and Wallace DR (1998), “Distributed Modeling and Evaluation of Product Design Problems,” Computer-Aided Design. 30 (6): 411-423.

(Poyner et Simon, 1995) Poyner, J. R., & Simon, M. (1995). Integration of DFE tools with product development.

(Pratt et Bedford, 1991) Pratt M.J. and Bedford M.K. (1991) Aspects of form feature modeling- Geometric modeling: methods and applications. Springer-Verlag, 1991. - p. 227.

(Puaut, 2004) Myriam Puaut (2004) Ademe l'éco-conception en action

(Rio, 2012) Maud Rio, (2012) A l'interface de l'ingénierie et de l'analyse environnementale :fédération pour une éco-conception proactive, thèse de doctorat à l'univesité technologique de Troyes, 2012.

(Roche, 1999) Roche, T. (1999). The Development of a DFE Workbench (Doctoral dissertation, Ph. D. Thesis).

(Ryu et al., 2003) Ryu, J.Y., Kim, I., Kwon, E., Hur, T., (2003). "Simplified life cycle assessment for Ecodesign". Proceedings of Eco-design: Third International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokyo, December 8–11 2003; 459– 463.

(Saaty, 1980), Saaty, T.L.,The Analvtic Hierarchv Proce ss, McGraw- Hill. 1980.

(Salomons, 2000) Salomons O.W. (2000) Computer Support in the Design of Mechanical Products: Constraint Specification and Satisfaction in Feature Based Design for Manufacturing - University of Twente: Enschede, 2000

(Shah et Mantyla, 1995) Shah J. J. and Mantyla M. (1995) Parametric and Feature Based CAD/Cam: Concepts, Techniques, and Applications

[Book]. - New York, NY, USA : John Wiley and Sons, Inc., 1995.

(Shah et Mathew, 1991) Shah J.J. and Mathew A. (1991) Experimental investigation of STEP form-feature information model - Computer-Aided Design. Butterworth-Heinemann Newton, MA, USA, 1991. - 4: Vol. 23. - pp.282--296.

(Sheng et al., 1995) Sheng, P., Srinivasan, M., and Kobayashi, S. (1995). Multi-objective process planning in environmentally conscious manufacturing: a feature-based approach. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 44(1), 433-437.

(Sheng et al., 1996) Sheng, P., Srinivasan, M., and Chryssolouris, G. (1996). Hierarchical part planning strategy for environmentally conscious machining. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 45(1), 455-460.

(Smith et Dagli 1995) Smith A. E. and Dagli C. H. (1995) Manufacturing feature identification for intelligent design - Intelligent Systems in Design and Manufacturing. - Boston, MA, USA, 1995. - 17-21. - pp. 213--230.

(SolidWorks, 2010) Solidworks, DS, Dassault Systems, “SolidWorks Sustainability, www.solidworks.com/sustainability/

(Song et Liu, 2003) Song H. J. et Liu Z. H. (2003), "Expression of scheme case and scheme generation in product's conceptual design, " Journal of Machine Design, vol. 20, no. 4, pp. 9-11, Apr 2003.

(Sridhar, 2007) Sridhar, I. (2007). Materials Selection for Green Design. Environmentally Conscious Mechanical Design,

319-350.

(Srinivasan et Sheng, 1999a) Srinivasan, M., and Sheng, P. (1999). Feature-based process planning for environmentally conscious machining–Part 1: microplanning. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 15(3), 257-270.

(Srinivasan et Sheng, 1999b) (Srinivasan et Sheng, 1999b), SRINIVASAN, M. et SHENG, P. Feature based process planning in environmentally conscious machining–Part 2: macroplanning. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 1999, vol. 15, no 3, p. 271-281.

(Steen, 2000) Steen B. “A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). Version 2000 – General system characteristics” CPM report 1999:4, Chalmers University of Technology Sweden, 1999.

(Stewart et al, 1999) (Stewart et al, 1999) R. Stewart et al., "Life cycle assessment as a tool for environmental management”, Clean Products and Processes, vol. 1, pp. 73-81, 1999.

(Suh and Huppes, 2005) (Suh and Huppes, 2005) S. Suh and G. Huppes, "Methods for Life Cycle Inventory of a Product, " Journal of Cleaner Production, vol. 13, pp. 687-697, 2005.

(Sustainable minds, 2012) Sustainable minds LLC. (2012). Connecting ecodesign with LCA for a new generation of greener products. Retrieved from www.sustainableminds.com/ecodesign-and-lca

(Takao et Niall, 1999) Takao B., Niall M. (1999), An Ecological Design Support Tool for Recyclability, Technical Reports, Industrial Electronics and Systems, Mitsubishi Laboratory,

September 1999

(Takata et Shozo, 1993), TAKATA, Shozo “Generation of a machining scenario and its applications to intelligent machining operations”. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1993, vol. 42, no 1, p. 531-534.

(Tan et al., 2002) Tan, X. C., Liu, F., Cao, H. J., and Zhang, H. (2002). A decision-making framework model of cutting fluid selection for green manufacturing and a case study. Journal of materials processing technology, 129(1), 467-470.

(Tan et al., 2006) Tan, X., Liu, F., Dacheng, L., Li, Z., Wang, H., and Zhang, Y. (2006). Improved methods for process routing in enterprise production processes in terms of sustainable development II. Tsinghua Science and Technology, 11(6), 693-700

(TopSolid, 2005) (TopSolid, 2005), TopSolid, 2005, http://topsolid-2005-by-missler-software.software.informer.com/

(Trayak LLC., 2012) Trayak LLC., (2012) Solid Edge EcoDesigner (online). Available: http://www.trayak.com/solutions/ecodesigner/

(Wang et Ozsoy, 1991) Wang N. and Ozsoy T.M. (1991) A scheme to represent features, dimensions, and tolerances in geometric modeling - Journal of Manufacturing Systems. - 1991. Vol. 10. - pp.233--240.

(Weidema et al, 2004) (Weidema et al, 2004) Weidema BP, Ekvall T, Pesonen H-L, et al. “Scenarios In Life-Cycle Assessment”. SETAC, Pensacola, USA, 2004.

(Wenzel et al., 997), Wenzel H., Hauschild M., Alting L.: “Environmental assessment of products Vol. 1 Methodology, tools and case studies in product development” London Chapman & Hall, 1997.

(Wilson et Pratt 1988) Wilson P. R. and Pratt MJ. (1988) A taxonomy of form features for solid modeling-Geometric Modeling for CAD Applications.. - North Holland: Elsevier Science, 1988. - 125-135.

(Xin et al., 2012) XIN, Lan-Lan, JIA, Xiu-Jie, LI, Fang-Yi, (2012). Green feature modeling for mechanical and electrical product conceptual design. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, vol. 18, no 4, p. 713-718.

(Yang et al., 2012) Yang, X., Li, F., Wang, X., and Wang, L. A Green-Feature Based LCA Backtracking Mechanism., proceedings of Electronics Goes Green 2012+ (EGG), 2012, P1-6.

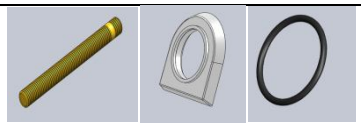
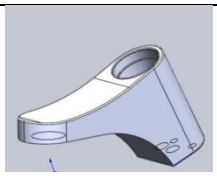
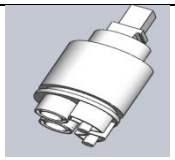
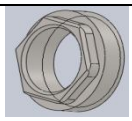
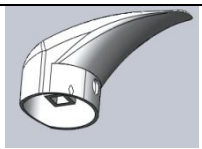
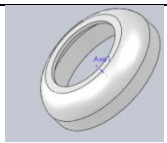
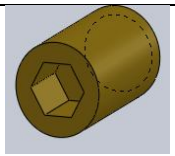
(Zhang et al., 1996) Zhang, H.C. and Kuo, T.C. (1996) ‘Graph-based approach to disassembly model for end-of-life product recycling’, Paper presented at IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology (IEMT) Symposium, 14–16 October, Austin, TX, USA.

(Zhang et al., 2010) Zhang, H., Zhang, X. G., and Wang, Y. H. (2010). The Evaluation of Resources and Environment Attributes of Manufacturing Process Based on Scatter Degree Combination Evaluation Method. Applied Mechanics and Materials, 37, 1466-1472.

(Zhao et al., 2012) Zhao, F., Murray, V. R., Ramani, K., and Sutherland, J. W. (2012). Toward the development of process plans with reduced environmental impacts. Frontiers of Mechanical Engineering, 1-16.

Annexe 1

Tableau 2 Composants du mitigeur

Fonction à assurer	*Nom de la pièce*	*Pièce en 3D*
Fixer le robinet avec étanchéité	Goujons, rosace, joins	
Assurer l'ouverture et la fermeture du lavabo	Ensemble tirette	
Conduire l'eau vers l'extérieur	Corps avec design d'esthétique	
Permettre de choisir entre l'eau chaude et l'eau froide Filtrer l'eau	Cartouche	
Assembler le capuchon et le corps	Ecrou M37x1.5	
Varier le débit d'eau avec précision	Manette de commande	
Assurer le mouvement de la manette	Capuchon fileté	
Assembler la manette et la cartouche	Vis Hc M5x6 a bout plat	

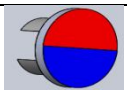
Indiquer le choix de la température d'eau	Plaquette pour manette	

Tableau 3 Données de la phase de fabrication des composants du mitigeur

Sous-ensemble	Nom	Quantité	Unité
aérateurM24x1	Laiton	0,0093	kg
aérateurM24x1	Perçage CNC laiton	0,01	kg
aérateurM24x1	Dégraissage	0,002	m2
aérateurM24x1	Electricité moyenne tension Europe	0,55	kWh
bouton tirette	PVC	0,0013	kg
bouton tirette	Injection	0,0015	kg
bouton tirette	Electricité moyenne tension Europe	0,33	kWh
capuchon fileté	ABS	0,0045	kg
capuchon fileté	Injection	0,006	kg
capuchon fileté	Dégraissage	0,005	m2
capuchon fileté	Electricité haute tension Europe	0,3	kWh
cartouche	PET amorphe	0,006	kg
cartouche	Electricité moyenne tension Europe	0,3	kWh
cartouche	Injection	0,0065	kg

corps mitigeur	Laiton	1,101	kg
corps mitigeur	Moulage laiton	1,5	kg
corps mitigeur	Dégraissage	0,045	m2
corps mitigeur	Electricité haute tension Europe	0,5	kWh
corps mitigeur	Fabrication moyenne en cuivre	0,66	kg
Ecrou M37x1.5	Laiton	0,047	kg
Ecrou M37x1.5	Perçage CNC laiton	0,05	kg
Ecrou M37x1.5	Electricité moyenne tension Europe	0,33	kWh
Ecrou M6	Laiton	0,0021	kg
Ecrou M6	Perçage CNC laiton	0,003	kg
Ecrou M6	Electricité moyenne tension Europe	0,66	kWh
emballage	Boite en carton ondulé	0,002	kg
manette de commande	Zinc (neuf)	0,314	kg
manette de commande	Dégraissage	0,015	m2
manette de commande	Electricité moyenne tension Europe	2	kWh

manette de commande	Extrusion de profils aluminium	0,4	kg
plaquette pour manette	BR	0,00025	kg
rosace	ABS	0,009	kg
rosace	Electricité moyenne tension France	0,3	kWh
tirette	Laiton	0,028	kg
tirette	Electricité moyenne tension Europe	0,3	kWh
tirette	Tournage laiton CNC	0,3	kg
vis Hc M5x6	Acier courant	0,007	kg
vis Hc M5x6	Electricité moyenne tension Europe	0,4	kWh
vis Hc M5x6	Tournage CNC acier	0,008	kg

Tableau 4 Moyens de transport utilisé durant le cycle de vie du mitigeur

Sous-ensemble	Nom	Quantité	Unité	Commentaires utilisateur
Sousse-Algérie	Gros camion (>32 T) Euro4	0,9045	t.km	Distance : 1500km Masse transportée : 0,603kg
Distribution en Tunisie	Petit camion 3,5 à 16 T (moyenne européenne)	0,21105	t.km	Distance : 350km Masse transportée : 0,603kg

Monastir-Sousse	Camion moyen (16 à 32T) Euro4	0,01206	t.km	Distance : 20km Masse transportée : 0,603kg

Tableau 5 Données de fin de vie du mitigeur générées par « Bilan Produit »

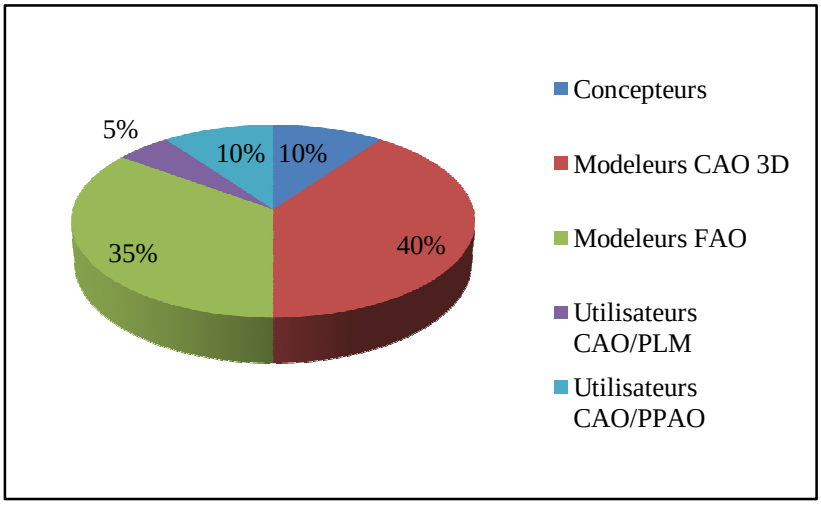
Phase de vie	Sous-ensemble	Matériaux	% Recyclage	% Incinération	% Enfouissement
Phase de Production	aérateurM24x1	Laiton	80,00%	10,00%	10,00%
	bouton tirette	PVC	20,00%	40,00%	40,00%
	capuchon fileté	ABS	20,00%	40,00%	40,00%
	cartouche	PET amorphe	20,00%	40,00%	40,00%
	corps mitigeur	Laiton	80,00%	10,00%	10,00%
	Ecrou M37x1.5	Laiton	80,00%	10,00%	10,00%
	Ecrou M6	Laiton	80,00%	10,00%	10,00%
	emballage	Boite en carton ondulé	65,00%	12,50%	12,50%
	manette de commande	Zinc (neuf)	80,00%	10,00%	10,00%
	plaquette pour manette	BR	0,00%	50,00%	50,00%
	rosace	ABS	20,00%	40,00%	40,00%
	tirette	Laiton	80,00%	10,00%	10,00%

	vis Hc M5x6	Acier courant	80,00%	10,00%	10,00%

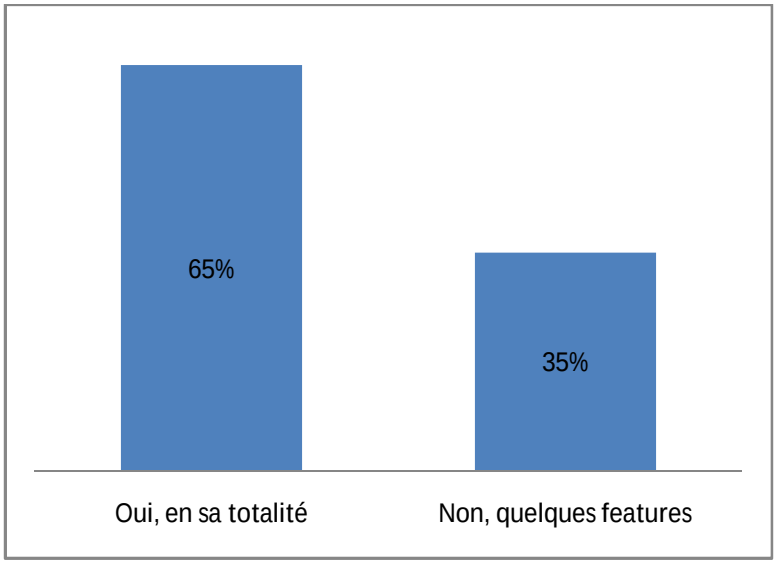
Annexe 2

Dans cette partie nous mettons la lumière sur la détermination des DDL restants en CAO pour le concepteur acquises par une série d'entretiens et des questionnaires en ligne. La foule, des utilisateurs questionnés, comprenait des personnes ayant les connaissances et les compétences en conception de produit, des modeleurs CAO 3D, des modeleurs FAO, des utilisateurs des systèmes intégrés CAO/PLM, des utilisateurs des systèmes CAO/PPAO. Les questions portaient principalement sur leurs pratiques en matière de développement de produits et les degrés de liberté qui restent lors de la conception de détails. Le nombre total d'utilisateurs impliqués dans l'étude est de 100 Voici les résultats détaillés:

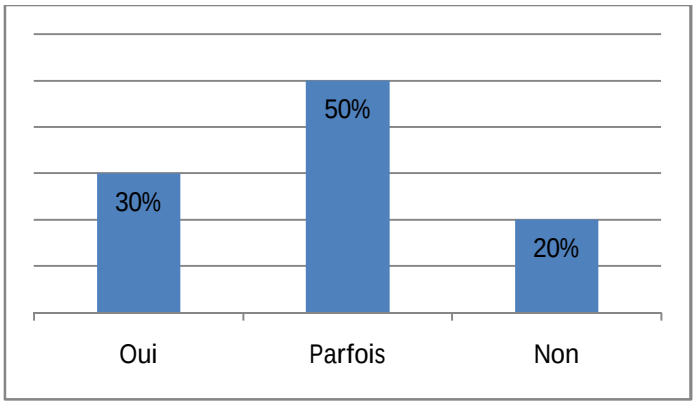
1. Répartition des utilisateurs à travers leurs profils:



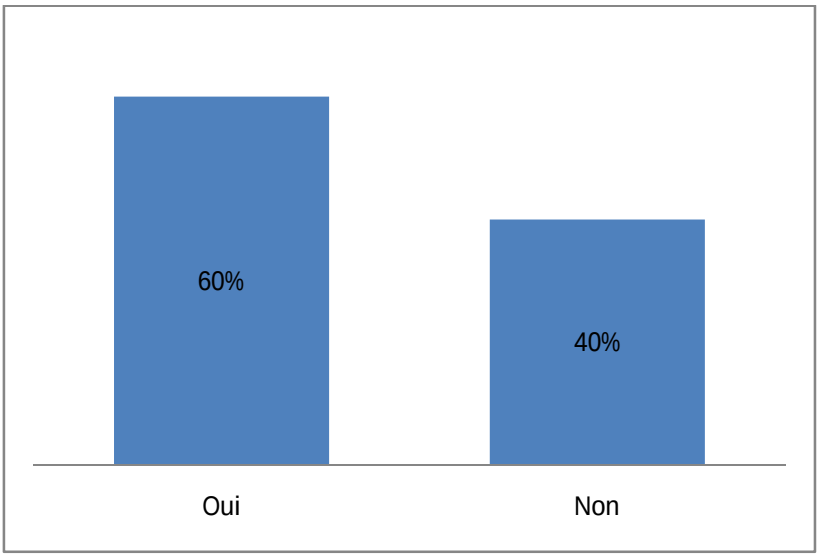
2. Pensez-vous que lors de la phase de conception de détails du produit, vous avez droit à changer sa forme en sa totalité ou quelques features uniquement?



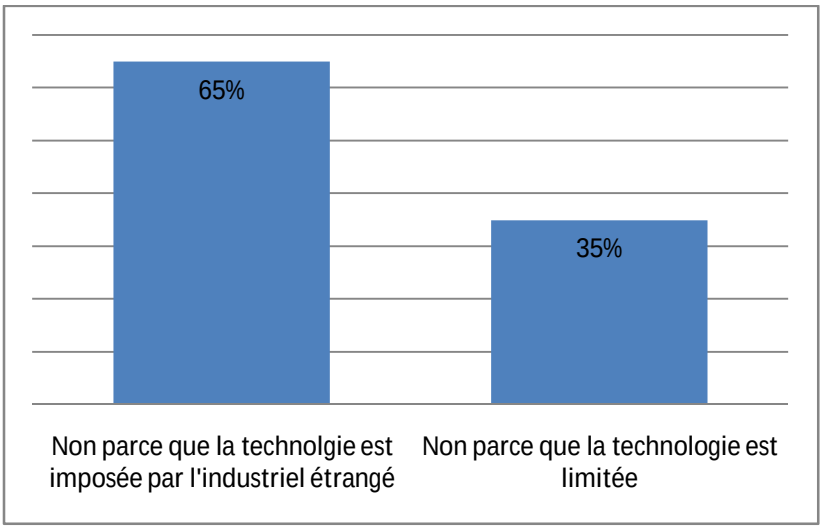
3. Pourriez-vous changer le matériau désigné dans le CDCF



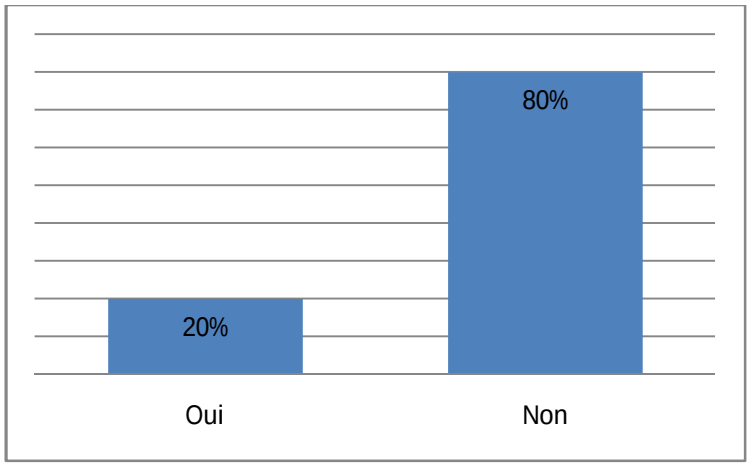
4. Penses vous que le concepteur CAO peut choisir le processus de fabrication, si non SVP citer Pourquoi



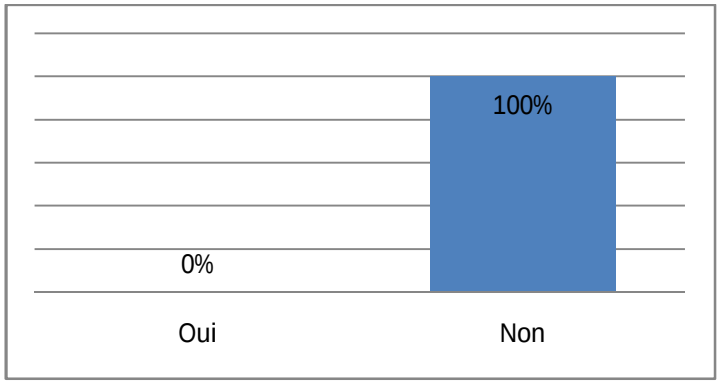
Les 40% qui ont répondu « Non » ont essentiellement justifié par deux causes



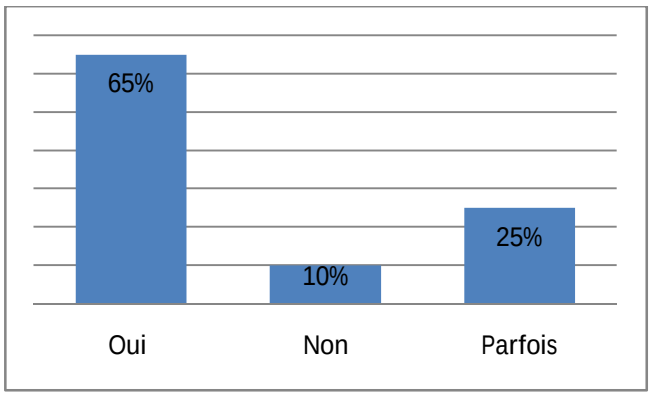
5. Pensez vous qu'une entreprise fabrique tous ses composants



6. Pensez vous qu'en CAO le concepteur a le droit de changer le fonctionnement du système



7. Pensez vous qu'en CAO le concepteur a le droit de changer les dimensions et le volume du système



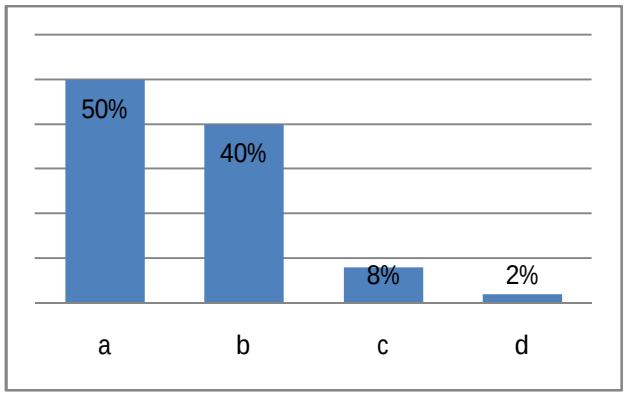
8. Que pensez-vous du rôle d'un Concepteur CAO dans la fabrication d'un produit respectueux de l'environnement?

a) Très important : il doit en tenir compte dès qu'il commence à concevoir

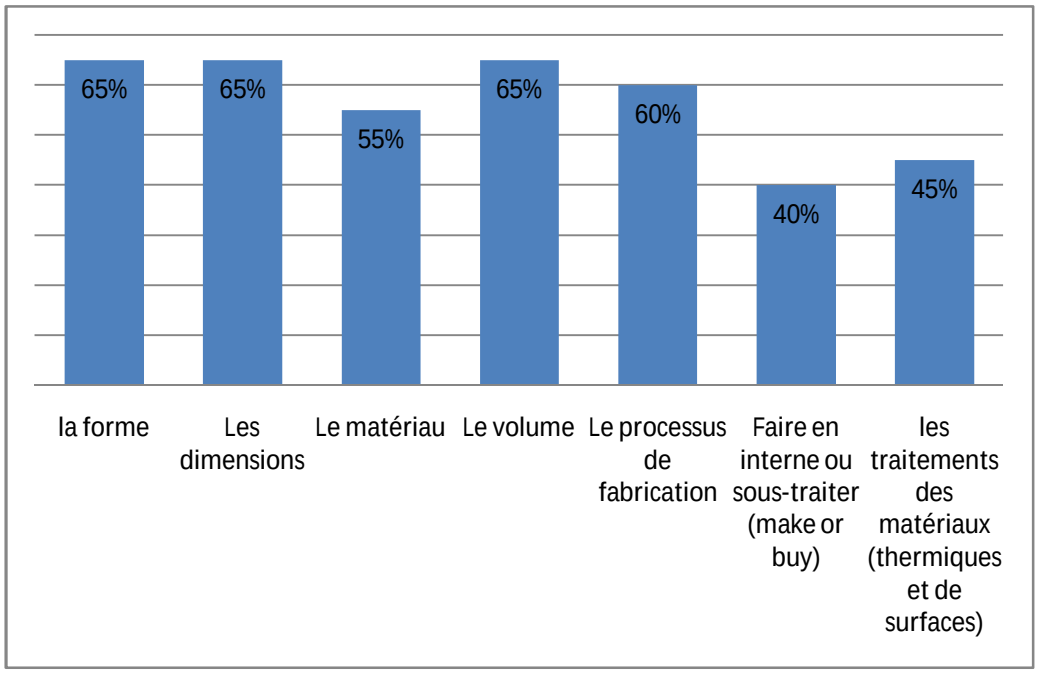
b) Moins important : Il n'a pas grande chose à faire

c) Ce n'est pas très important

d) Je ne sais pas



9. Quels sont les DDLs que peut avoir un concepteur CAO



Résumé étendu

Contexte de la recherche

Aujourd'hui, les activités humaines dégradent l'environnement par le prélèvement des ressources sans souci de leur renouvellement, l'éradication des espèces animales et végétales, la pollution de l'eau, des sols et de l'air.

L'évolution constante des réglementations environnementales ainsi que les directives et pénalités environnementales, ont poussé les industriels à réduire les impacts environnementaux, qui s'additionnent d'une étape à une autre du cycle de vie d'un produit ou d'un service, pour garder leurs places sur le marché.

L'augmentation et la différenciation des impacts environnementaux causés par l'industrie d'aujourd'hui exigent une nouvelle démarche de conception intégrant des contraintes environnementales.

Des études ont montré que jusqu'à 80 % des impacts environnementaux d'un produit tout au long de son cycle de vie sont détectés à la phase de conception (De Winter & Kals, 1994), c'est pourquoi une grande attention est accordée à l'intégration des dimensions environnementales dès cette phase.

L'objectif des analyses environnementales est d'identifier la nature des impacts majeurs engendrés tout au long du cycle de vie, d'identifier leurs causes, de viser la réduction de ces impacts en évitant le transfert de pollution d'une étape à une autre.

Il serait utile qu'un concepteur puisse réaliser une analyse et améliorer des performances environnementales en l'absence même d'un expert environnemental. Aujourd'hui, une demande importante existe pour l'intégration d'un module environnemental au sein des modeleurs géométriques afin d'assister le concepteur de pièces et d'assemblages mécaniques à éco-concevoir en environnement de Conception Assistée par Ordinateur (CAO).

A l'heure actuelle l'objectif des logiciels de CAO a dépassé la modélisation géométrique. Plusieurs d'entre eux permettent la modélisation sous contraintes, la simulation de fabrication, la simulation cinématique et dynamique, le calcul de

structures, l'imagerie de synthèse, etc. qui sont des modules intégrés au sein d'une même plateforme et activables par le ou les concepteurs sans avoir recours à d'autres logiciels spécialisés.

L'évolution des systèmes CAO a permis d'intégrer au modèle géométrique d'autres informations non géométriques (par exemple les contraintes d'ingénierie, les tolérances, matériaux, etc.) grâce à des entités technologiques de haut niveau, dites *features* présentes dans la plupart des systèmes actuels de CAO. Les *features* sont au cœur de la modélisation géométrique en CAO (Benamara, A. 1998).

Nous avons mis comme objectif permettre au modélisateur CAO une analyse environnementale simplifiée pour une conception plus écologique avec une compréhension aisée des résultats en utilisant les *features.* L'objectif de notre travail est l'enrichissement sémantique de ces features CAO pour aider le modélisateur CAO à déterminer les impacts environnementaux afin de les éviter ou au moins de les réduire.

Positionnement de la recherche

L'évaluation environnementale du modèle CAO d'un produit donné a été largement étudiée. Les objectifs principaux de ces travaux sont les suivants :

- Le couplage des systèmes CAO avec des logiciels d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) basé sur un échange des données extraites des *features* pour calculer les impacts environnementaux d'un produit avant son lancement sur le marché.
- Le choix d'un processus de fabrication écologique avec ses différents paramètres tels que la machine outil, le lubrifiant, la gamme d'usinage etc. en se basant sur les *features* définis au préalable.
- Le choix de scénarios de fin de vie orientés éco-conception en favorisant le désassemblage basé sur une lecture des *features* attribués dans les liaisons entre les différents module d'un système donné et, par suite, favoriser le recyclage et la réutilisation.

Selon Andreasen et Hein (1987) la zone d'action du concepteur est large durant les premières phases de conception ; elle devient assez restreinte lors de la phase CAO

et essentiellement la phase de conception de détails pour laquelle le nombre de degrés de liberté est réduit. En éco-conception cela est validé par Bhander et al (2003) qui ont montré qu'au sein d'une phase très avancée du processus de conception, le taux des données nécessaires pour réaliser une analyse du cycle de vie (ACV) est assez important, cependant les degrés de liberté restant au concepteur pour agir et réduire les impacts environnementaux de son produit sont limités.

En se basant sur les analyses de la littérature qu'on a réalisées on propose d'étudier la possibilité d'éco-concevoir les produits dans la phase de conception des formes et de démontrer l'importance qu'il y a quand même à réduire les impacts environnementaux à ce stade. Pour atteindre cet objectif on devra répondre aux questions de recherche suivantes :

- Question 1 : Est-il possible d'éco-concevoir lors de la phase de modélisation géométrique et comment ?
- Question 2 : Est-il possible d'avoir un modèle de *features* enrichi, permettant au concepteur CAO de prendre conscience des Impacts Environnementaux (IEx) induits par ses choix ?
- Question 3 : Est-il possible d'avoir des résultats parlants permettant au concepteur de réduire les IEx induits par ses choix ? Nous entendons par résultats parlants des graphiques de résultats et des Interfaces Hommes-Machines (IHMs) signifiantes pour prendre des décisions en éco-conception ?

Les questions de recherches posées nous ont conduits à explorer l'état de l'art des domaines suivants :

- Les intégrations CAO/ACV
- Les fonctionnalités des *features*
- L'exploitation des *features* pour l'éco-conception du produit (pièces, assemblage) tout au long de ses phases du cycle de vie.

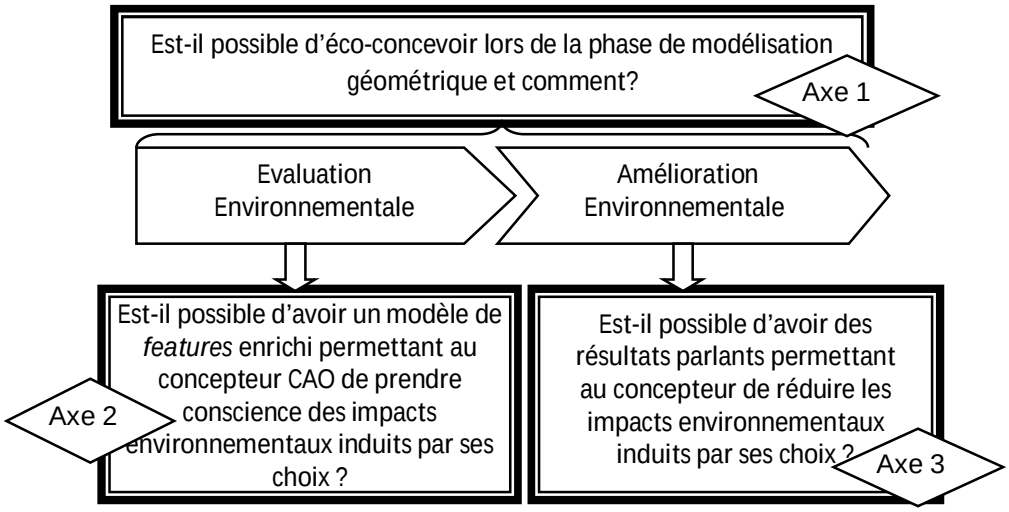


Figure 2. Les questions de recherche de la thèse

De cette littérature élaborée, nous dégageons trois axes de recherche qui visent à conduire une éco-conception des produits à partir de la phase de modélisation géométrique.

Trois axes de recherche

Les axes de recherche que nous avons identifiés sont représentés en figure 2.

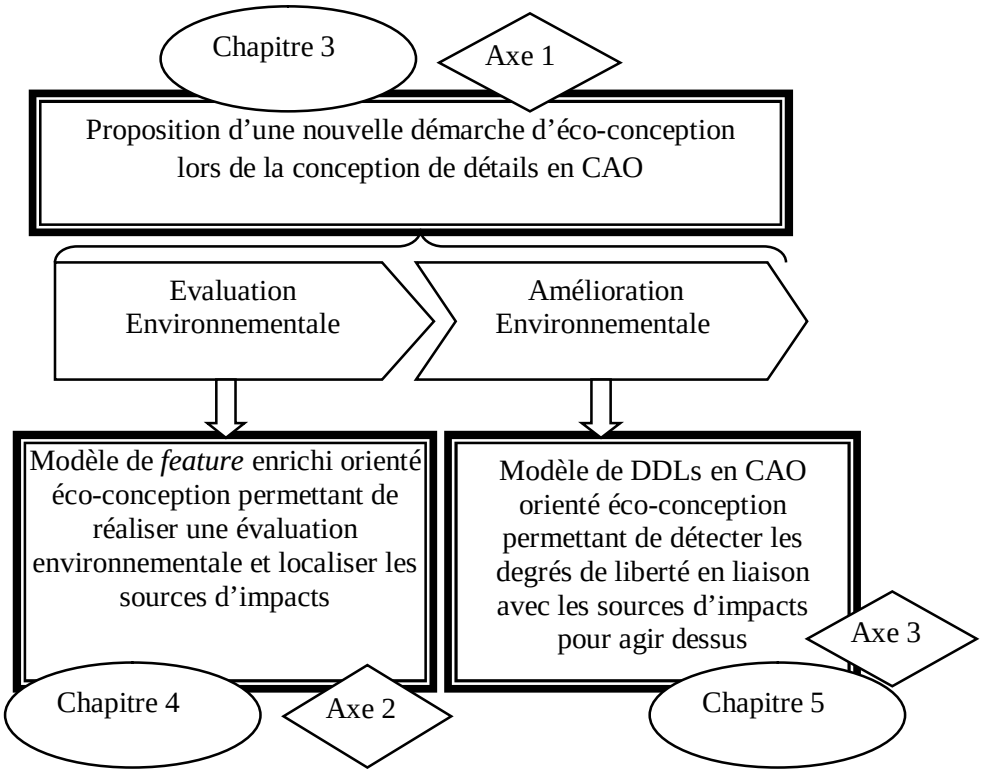


Figure 3. Les axes de recherche de la thèse

- Axe 1 : Processus d'éco-conception lors de la conception de détails en CAO

Le premier axe de recherche présente une démarche pour répondre à la première hypothèse. Cette démarche, qui est représentée dans la figure 3, est constituée essentiellement de 3 étapes : Evaluer, Localiser et Agir. Elle permet au concepteur CAO de chercher les sources d'impacts dans un modèle géométrique afin d'agir avec les degrés de liberté (DDLs) qui lui restent.

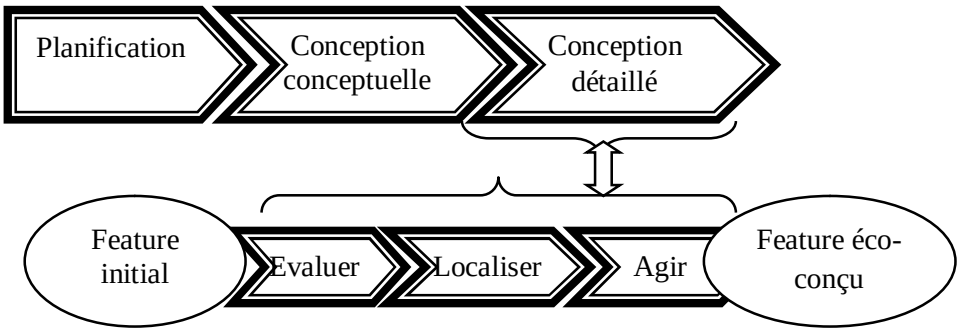


Figure 4. Méthodologie d'éco-conception en CAO

- Axe 2 : Modèle de *feature* enrichi orienté éco-conception (Evaluer-Localiser)

Ce modèle représenté par la figure 4 permet de réaliser un inventaire du cycle de vie d'un *feature* ou d'un ensemble de *feature*s afin de pratiquer une analyse environnementale en premier lieu et localiser les sources d'impacts en second lieu.

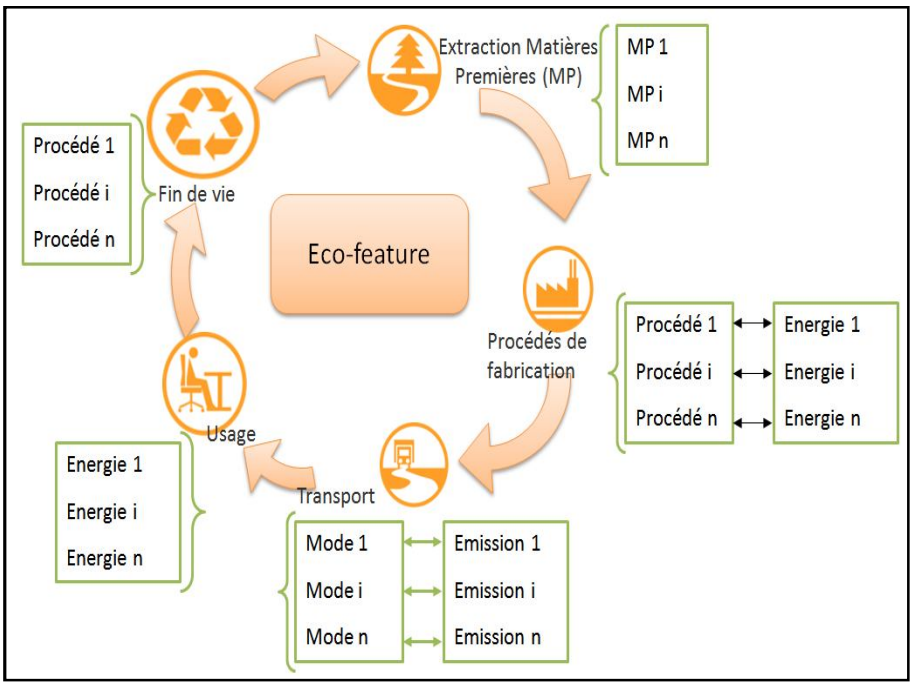


Figure 5. Modèle d'Eco-feature

Cet axe représente la première phase de la méthodologie générale proposée. Cette phase elle-même se décompose en deux sous-phases ; la première consiste à

évaluer les impacts environnementaux d'un *feature* initial avec les différents scénarios possibles de vie et la deuxième consiste à localiser les sources d'impacts. Ces étapes sont illustrées en figure 5.

Figure 6. Axe 2 de la recherche

- Axe 3 : Modèle de DDLs en CAO orienté éco-conception

Ce modèle permet de détecter les différents degrés de liberté en relation avec les sources d'impacts, cela permettant au concepteur d'agir sur le modèle géométrique initial afin de l'éco-concevoir. La figure 6 montre que ce modèle présente la deuxième phase dans le processus d'éco-conception proposé «ELA».

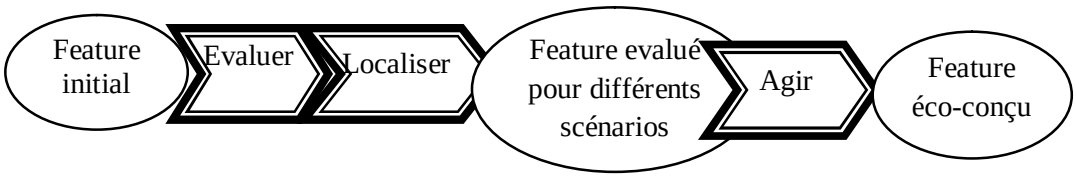


Figure 7. Axe 3 de la recherche

Application sur un mitigeur de lavabo

Les trois axes de recherche ont été appliqués sur un produit industriel, qui est un mitigeur de lavabo. Le choix de ce produit est lié à la disponibilité des informations nécessaires pour réaliser une Analyse du Cycle de Vie Simplifiée (ACVS). Cette ACVS a permis de localiser les sources d'impacts liées au corps du mitigeur. D'où il était nécessaire d'étudier le cycle de vie de chaque *feature*, afin de pouvoir localiser les leviers d'impacts, puis chercher les différents scénarios de vie possibles pour chaque *feature* et, par suite, au niveau de la pièce mécanique trouver le scénario optimal à atteindre. Ce scénario permet de voir avec les degrés de liberté qui restent, la zone des actions possibles sur la géométrie initiale. Un exemple de scénario de vie d'un feature « trou » relatif au corps du mitigeur est présenté dans la figure 7

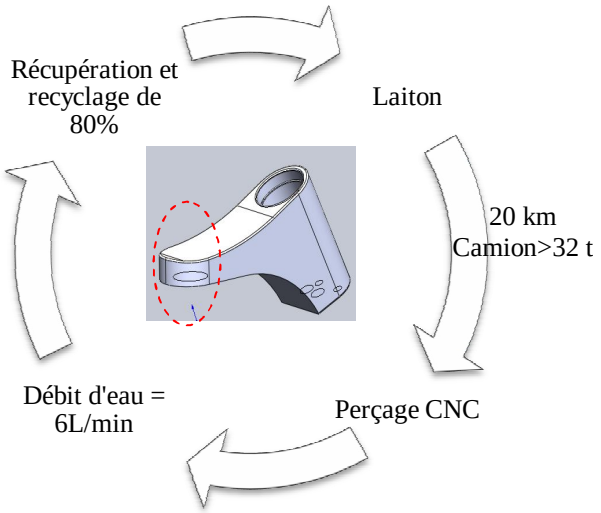


Figure 7. Scénario de vie d'un feature trou du corps du mitigeur

Apports et perspectives

Les principales contributions de nos travaux sont les suivantes :

- Une méthodologie générique d'éco-conception des produits lors de la conception de détails en CAO
- Le modèle d'éco-*Feature* générique basé sur la modélisation de scénarios de vie possibles d'une géométrie pour réaliser une évaluation environnementale et localiser les sources des impacts environnementaux de chaque scénario.
- Un modèle de DDLs qui permet de déterminer la zone d'action du concepteur pour réduire les impacts environnementaux du scénario choisi.
- Le développement de la plateforme « ELA Green-CAD » pour l'application et la validation de ces contributions théoriques sur un cas d'étude industriel. Cette application a permis de souligner le potentiel de notre approche.

Ce travail de recherche apparaît finalement comme une étape satisfaisante pour développer l'éco-conception lors de la modélisation géométrique. Cependant, nous considérons qu'il s'agit d'une première contribution dans ce contexte particulier, et qu'une grande quantité de travail est cependant encore nécessaire afin de déployer cette approche dans un cadre général de plateforme CAO.