



HAL
open science

Intégration de règles "DfE" (Design for Environment) pour la conception de produits, process et cycles de vie propres

Hayder Alhomsy

► To cite this version:

Hayder Alhomsy. Intégration de règles "DfE" (Design for Environment) pour la conception de produits, process et cycles de vie propres. Autre. Université de Grenoble, 2012. Français. NNT : 2012GRENI049 . tel-00872123

HAL Id: tel-00872123

<https://theses.hal.science/tel-00872123>

Submitted on 11 Oct 2013

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.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Génie Industriel** □ **Conception et Production**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

« Hayder ALHOMSI »

Préparée au sein du **Laboratoire G-SCOP**
dans l'**École Doctorale I-MEP2**

Intégration de "Règles DfE" (Design for Environment) pour la conception de produits, process et cycles de vie propres

Thèse soutenue publiquement le **22 Octobre 2012** devant le jury
composé de :

**Monsieur Daniel FROELICH, professeur à l'Institut
ENSAM de Chambéry)**

Rapporteur

**Monsieur Nicolas PERRY, professeur à l'Université de
Bordeaux 1**

Rapporteur

**Madame Nadège TROUSSIER, professeure à l'Université
de Technologie de Troyes**

Présidente

Madame Peggy ZWOLINSKI, professeure à Grenoble INP

Directrice de thèse



Rapporteurs et membres du jury

Madame Peggy ZWOLINSKI, Directrice de thèse

Enseignant chercheur - Grenoble INP

46 Avenue Félix Viallet

38031 GRENOBLE Cedex 1

France

Madame Nadège TROUSSIER, Présidente

Enseignant-chercheur - Université de Technologie de Troyes

12 Rue Marie Curie, BP 2060,

10010 Troyes

France

Monsieur Daniel FROELICH, Rapporteur

Professeur éco-conception /recyclage (ENSAM de Chambéry)

4, rue du lac majeur - BP 295

73375 Le Bourget du Lac Cedex

France

Monsieur Nicolas PERRY, Rapporteur

Professeur - Université de Bordeaux 1

351 cours de la libération

33405 Talence Cedex

France

Remerciements

Tout d'abord, je remercie toutes celles et tous ceux qui ont contribué à la préparation et la rédaction de ma thèse. Bien évidemment, il m'est difficile de remercier tout le monde, chacun par son nom car c'est grâce à l'aide de nombreuses personnes que j'ai pu mener cette thèse à son terme.

Je voudrais ensuite, remercier grandement la directrice de thèse Madame Peggy ZWOLINSKI de m'avoir accepté et encadré tout au long de la préparation de ma thèse. Je suis ravi d'avoir pu travailler en sa compagnie car en plus de son appui scientifique, elle a toujours été là pour me soutenir (avec sympathie et patience) et me conseiller au cours de l'élaboration de mes travaux en Master et en Thèse. Elle a été un support scientifique avec un côté humain dont je garderai un long souvenir.

Je remercie enfin, Madame Nadège TROUSSIER, la présidente de jury, Monsieur Daniel FROELICH et Monsieur Nicolas PERRY qui m'ont fait l'honneur d'être rapporteurs de ma thèse et de faire partie des membres du jury. Je les remercie pour le temps qu'ils ont accordé à la lecture de ma thèse et à l'élaboration du rapport d'évaluation. Je les remercie également pour leurs remarques fructueuses, leurs multiples conseils ainsi que pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux. Les questions et les remarques faites lors de la soutenance ont d'une part, enrichies la présentation et (révélées) suscitées la compréhension approfondie des éléments abordés. Elles (ils) m'ont permis d'exprimer pendant la thèse en détails quelques points de mes travaux réalisés qui représentent des éléments complémentaires difficilement présentables lors d'une soutenance eu égard au temps qui m'a été accordé. D'autre part, elles (ils) m'ont motivé à exprimer les perspectives attendues de la recherche et à en donner suite en tentant de valider les résultats (approche et évaluation proposées) dans les domaines liés, sur un terrain d'application (industriel, professionnel, etc.) afin d'obtenir des résultats concrets, évaluables et mesurables du point de vue technique et environnemental.

Le travail de recherche présenté dans ce manuscrit a été achevé au Laboratoire des Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production de Grenoble (G-SCOP). A ce titre, je tiens à exprimer ma sympathie aux personnes du laboratoire (chercheurs, enseignants chercheurs, doctorants, personnel administratif et Technique). Je remercie particulièrement les membres de l'équipe Conception Produit Process (CPP) et surtout le pôle Eco-conception. Je remercie également mes collègues du laboratoire et spécialement Monsieur Alan LELAH ainsi que mon collègue de bureau Monsieur Jorge Luis AMAYA pour nos échanges très intéressants et pour les bons moments que nous avons pu partager ensemble.

Je remercie l'état Syrien qui a financé cette thèse et qui a donc contribué à ma réussite et à l'achèvement de ma thèse. De même, je remercie la France de m'avoir accueilli pour qui j'exprime aujourd'hui ma profonde reconnaissance.

Quant à vous mes amis, vous êtes nombreux. Je vous remercie du fond du cœur. Un merci particulier à ceux qui sont en Syrie mais aussi en France : Khaled, Mohy-Eldyn, Bassem, Fouad, Farouk, Yousef, Chérif, Wassim et la famille de mon beau père et les autres comme toi ☺ .

Pour finir, j'adresse un grand merci à toute ma famille, mes parents pour leur amour sincère et leur soutien sans faille au cours de ces années, mes frères et sœurs qui ont été pour moi des étoiles lumineuses tout au long du chemin et qui ont été présents lorsque j'en ai eu besoin. Un grand merci à mon frère Docteur Imad qui est pour moi, non seulement un ami, mais aussi un exemple.

Je tiens, particulièrement, à exprime ma gratitude à mon épouse (ma source d'inspiration) que je remercie infiniment pour avoir accepté de me suivre, de me soutenir et de partager mes responsabilités pendant cette aventure. Bien évidemment, je n'oublie pas mes deux enfants (Hanan et Ali) pour le bonheur qu'ils m'ont apporté et qu'ils m'apportent chaque jour.

Table des matières

Introduction.....	9
Chapitre 1 : Points de vue de concepteurs sur l'environnement.....	13
1.1. Normes et législations.....	13
1.2. Marchés « verts ».....	16
1.3. Production propre.....	18
1.4. Cycle de vie du produit.....	19
1.5. Les concepts « x R ».....	23
1.6. Premiers constats.....	25
Chapitre 2 : Approches en éco-conception.....	27
2.1. Focus sur l'ACV.....	28
2.2. Focus sur l'Eco-design Strategy Wheel.....	30
2.3. Focus sur l'outil Ecodesign Pilot.....	32
2.4. Bilan sur les approches actuelles en éco-conception.....	33
Chapitre 3 : Problématique liée à l'utilisation de règles DfE en conception.....	35
3.1. Problématique générale.....	35
3.2. Approche proposée.....	36
3.3. Problématique autour de la définition des règles DfE.....	38
3.4. Problématique liée à la méthode d'évaluation.....	39
Chapitre 4 : Choix des règles DfE à impliquer dans la démarche de conception.....	41
4.1. Construction d'une BDD de règles DfE.....	41
4.1.1. Exemples de Règles DfE.....	42
4.1.2. Domaines d'implémentation des règles DfE.....	47
4.1.3. Bilan sur les règles DfE.....	53
4.2. Le choix des règles DfE impliquées.....	54
4.2.1. Choix des objectifs environnementaux.....	54
4.2.2. Choix des domaines d'implémentation des Règles DfE.....	57
4.2.3. Choix des règles DfE.....	60
4.2.4. En résumé.....	62
Chapitre 5 : Implémentation des règles DfE en conception.....	65
5.1. Calcul d'indicateurs associés à des règles DfE.....	65
5.1.1. Modèle produit retenu pour identifier les éléments du produit évaluables.....	67
5.1.2. Traduction de règles DfE selon les caractéristiques produit □Indicateur [I _i]..	71
5.1.3. La pondération des règles DfE.....	74
5.1.4. Evaluation de la solution □indicateur [I _{Glo}].....	77
5.2. Implémentation des règles DfE en conception.....	78
5.2.1. Cas 1: «Evaluation d'une règle DfE dans une phase de conception.....	79
5.2.2. Cas 2 : Poursuivre l'implémentation d'une seule règle DfE dans plusieurs phases de conception ».....	81
5.2.3. Cas 3 : « Liste des règles DfE dans la phase de conception ».....	84
Chapitre 6 : Implémentation de la méthode lors de la conception d'une agrafeuse.....	87
6.1. Présentation du projet de conception d'une agrafeuse.....	87
6.1.1. Présentation du produit retenu.....	87
6.1.2. Processus de conception proposé.....	88
6.2. Démarche d'implémentation des règles DfE dans le processus d'éco-conception..	89
6.2.1. Cahier des Charges et Définition des besoins.....	89
6.2.2. Choix des objectifs environnementaux.....	90

6.2.3.	Domaines d'implémentation des règles DfE.....	91
6.2.4.	Règles DfE implémentées et évaluables	94
6.3.	Processus de conception de l'agrafeuse	96
6.3.1.	Conception	99
6.3.2.	Conception de réalisation (<i>Embodiment Design</i>).....	107
6.3.3.	Conception détaillée (Detailed Design)	112
6.3.4.	Modifications de conception liées à l'examen du niveau d'implémentation des Règles DfE	120
6.4.	Bilan de l'étude de cas « agrafeuse »	130
	Conclusion.....	131
	Table des références	135
	Table des tableaux.....	145
	Table des figures	147
	Table des équations:	149

Introduction

Le développement économique s'impose dans le fonctionnement de notre société comme un élément moteur du développement. Toutefois, il s'accompagne de besoins forts en énergie et matériaux et conduit à une forte production de déchets issus des activités de production et des rejets de consommation. La problématique est donc ici : « Pendant que les économies du monde continuent à se développer, comment protéger, restaurer et gérer l'environnement ? » {Richards et Fullerton, 1993} [1].

Après plusieurs années de recherches et d'expériences, nous reconnaissons nos limites pour traiter les pollutions des rivières, le smog urbain, les sites de déchets dangereux, alors qu'il est essentiel de résoudre ces problèmes. Le problème majeur auquel nous sommes confrontés est lié aux effets de la croissance économique mondiale et à l'accroissement démographique. Le taux et l'abondance des deux effets conjugués, amènent de nouvelles préoccupations : préoccupation concernant le taux d'utilisation des ressources naturelles et la capacité à soutenir sur le plan biologiques, physiques, chimiques les systèmes pour qu'ils assimilent les émissions dues à nos activités économiques.

En Juin le 1992, la conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (CNUED) à Rio de Janeiro, au Brésil {Barthod, 1992} [2], {Nations_Unies, 2002} [3] a cherché à mettre en place des éléments de réponse dans un programme d'actions nationales et mondiales de grande ampleur reposant sur une approche socio-économique. C'est dans cette conférence que le concept de "Développement Durable" a été exprimé {Barthod, 1992}* et {Barthod, 1992}** [4, 5]. Les orientations données sont à ce jour toujours valables et sont axées sur la prévention de la pollution {EU, 2008} [6], l'amélioration de la qualité de vie, et la recherche de moyens pour protéger les besoins des générations futures par des décisions prises aujourd'hui sans entraver la croissance économique. Suite à ces orientations, de nombreux aspects ont évolué dans la société, en particuliers la demande des marchés et des consommateurs. Ainsi, une plus large palette de produits permet aujourd'hui de répondre à des exigences techniques et environnementales, avec l'apparition d'écolabels comme moyen de certification. Ces évolutions ont conduit les entreprises et les concepteurs à faire évoluer leurs points de vue et à adopter des éco-stratégies pour répondre à différents enjeux :

- Marché de l'économie verte
- Marché des services et biens durables
- Techniques de Production Propres
- Consommation de matières adaptée et technologie respectueuse de l'environnement
- Gestion de la consommation de l'énergie / efficacité énergétique
- Usage des énergies renouvelables,
- Scénarios de fin de vie plus adaptés, moins impactant
- Développement durable,
- □

On a ainsi vu des démarches se mettre en place au sein des entreprises : des démarches liées à la production, puis des démarches plus proactives, liées à la conception des produits. Ces dernières démarches appelées démarches d'éco conception visent à intégrer les éco-stratégies dans la conception du produit. Elles reposent sur l'intégration des caractéristiques et des exigences des éco-stratégies dans la conception du produit en considérant l'ensemble du cycle de vie.

Actuellement, de nombreux travaux de recherche sont menés concernant l'intégration des contraintes environnementales pendant le processus de conception des produits et la conception des process relatifs à ces produits. Ainsi, de nouvelles méthodes de conception sont développées, basées sur la prise en compte de l'ensemble du cycle de vie des produits, afin de réduire leur impact environnemental.

Dans les phases préliminaires, les concepteurs peuvent utiliser des guides de conception afin d'être guidés dans leurs choix. Les règles mises en place sont bien adaptées aux phases de conception conceptuelles mais ne sont que rarement utilisées parce qu'elles ne retournent pas d'indicateurs quantitatifs utilisables pouvant être analysés et comparés à d'autres indicateurs de conception lors de ces premières étapes du projet de conception.

Ainsi, l'impact environnemental du produit est principalement pris en compte durant la phase de conception détaillée. Lors de cette étape, les données nécessaires sont connues (composants, poids, matériaux, fixations, process de fabrication, ...), les outils de conception pour l'environnement peuvent être utilisés et des analyses de cycle de vie (ACV) peuvent être réalisées. Ces analyses permettent de faire une évaluation quantitative des impacts environnementaux du produit en cours de conception. Une fois ces analyses réalisées, les concepteurs valident ou non le fait que le produit satisfait ou non les exigences environnementales. Ainsi, si les exigences sont satisfaites, le processus de conception continue. Sinon, la solution doit être reconsidérée, en y apportant des modifications mineures pour l'optimiser ou des modifications majeures en phase de conception préliminaire, ce qui conduit à une grande perte de temps au niveau du projet.

Afin d'aider les concepteurs à considérer l'environnement dans leur projet de conception de produit, tout en minimisant le temps consacré au projet, nous proposons de mettre en place une évaluation environnementale simplifiée utilisable en phase de conception préliminaire. Cette évaluation peut débuter en phase de conception préliminaire mais peut être poursuivie jusqu'à la phase de conception détaillée. Notre objectif est de proposer un outil d'évaluation utilisant les premiers éléments de la représentation fonctionnelle du produit (composants principaux, liens fonctionnels, ...) pour renvoyer des indicateurs environnementaux simples aux concepteurs (figure 1). Ainsi, pour chaque étape du processus de conception, une évaluation des exigences environnementales peut être réalisée pour éviter de trop longues boucles essais/erreurs pendant la conception. Les indicateurs développés ne sont pas relatifs à une évaluation d'impacts environnementaux (du type ACV) du fait d'un manque de données sur le produit à cette étape de la conception. L'objectif ici n'est pas de remplacer les ACV qui peuvent et doivent être réalisées à la fin des études détaillées: l'objectif est de guider le concepteur au plus tôt vers un bon compromis pour le produit par des estimations simples. Cette approche est nécessaire afin d'éviter des modifications significatives à la fin des études détaillées.

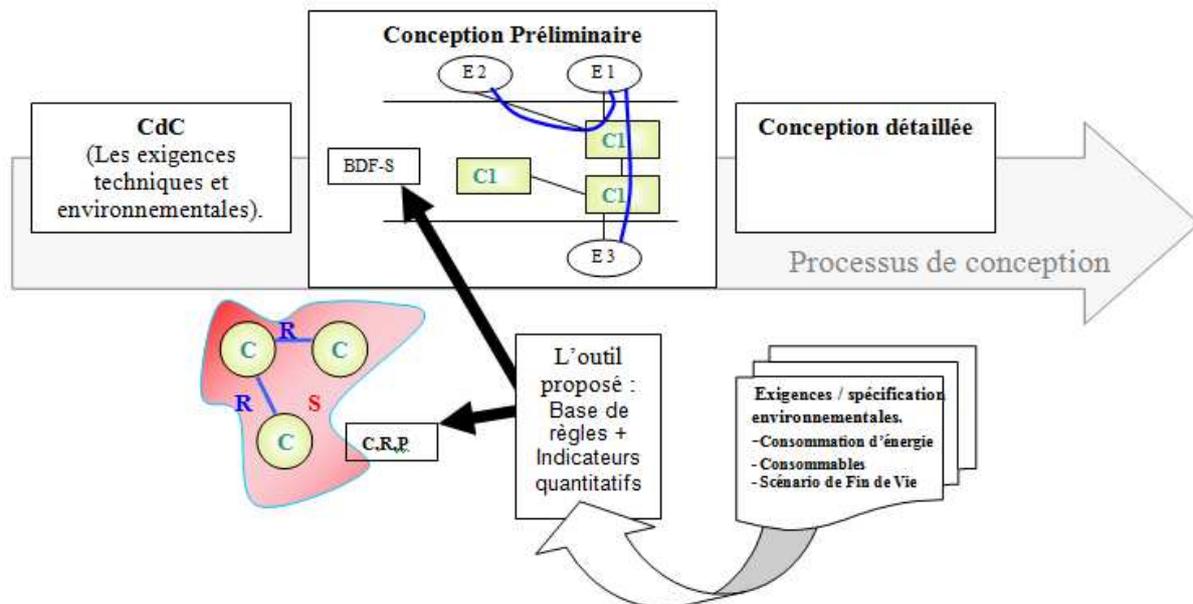


Figure 1: Démarche d'implémentation de règles DfE dans la conception

Dans la première partie de ce document, nous allons définir la problématique liée à l'intégration des exigences environnementales (Règle DfE) lors du processus de conception. Le chapitre 1 donne un point de vue de concepteurs sur l'environnement, le chapitre 2 fait état des approches actuelles en éco-conception et le chapitre 3 pose la problématique liée à l'utilisation de règles DfE en conception.

Nous proposons ensuite, chapitre 4, une méthode et des outils pour intégrer les règles environnementales (DfE) au début du processus de conception. Cette méthode s'appuie sur la mise en place d'une base des données des Règles DfE, sur l'établissement d'une méthode de choix des règles en fonctions du contexte du projet de conception, sur des calculs d'indicateurs relatifs aux règles DfE et sur des représentations adaptées pour l'interprétation des résultats lors de projets de conception

Le chapitre 5 montre comment s'implémente la méthode au cours du processus de conception et le chapitre 6 illustre l'ensemble de la démarche sur une étude de cas.

Cette thèse s'est déroulée au laboratoire G-SCOP dans le pôle « conception intégrée », sous la supervision de ma Directrice de thèse, le professeur Peggy ZWOLINSKI.

Je remercie l'État Syrien qui a financé mes études et l'État Français qui m'a accueilli dans ses établissements universitaires avec la coopération de l'accord culturel franco syrien (CNOUS et CROUS).

En espérant contribuer, grâce à ma thèse, à enrichir la recherche et l'analyse de la conception de produit et de la production durable.

Chapitre 1 : Points de vue de concepteurs sur l'environnement

La prise en compte de l'environnement dans la vie de tous les jours est un fait établi mais chacun adopte un point de vue différent sur la préservation de l'environnement {Brundtland, 1989} [5] et {UE, 2009} [47], selon sa formation, sa mission, son métier {Gil Friend Nicholas, 2009} [48], {ISO,2006} [15, 49]. C'est le cas des acteurs des équipes de conception {Johns, 1992} [50] et {Richards et al, 1993} [1] confrontés à la prise en compte de l'environnement. Ils doivent prendre en compte différentes facettes de l'environnement présentées sous différentes formes selon leurs métiers {Morris, 2004}[51] [51]. Ce sont certains de ces points de vue que nous allons présenter dans ce chapitre, afin de mettre en avant les besoins multiples en éco-conception {Gehin et al, 2008} [52].

1.1. Normes et législations

A cause de dommages liés aux activités industrielles, les gouvernements et organisations engagées sur les problématiques de préservation de l'environnement introduisent des mesures de différentes formes : Contraintes, Standards, Limites, Législations, Recommandations, Règles, □ . Ces mesures visent à contrôler les effets négatifs des industries, en particulier au niveau de la fabrication et de la production {Nations Unies, 2002} [3], {Luttrupp, 2006} <http://www.afnor.org/> [26], {UNEP, 2006} [53], {EU, 2008} [6], {Ministère du Développement Durable Française, 2009} [54] et {Mathieux, 2010} [55]. Plusieurs Normes sont proposées pour intégrer les exigences environnementales dans les activités industrielles. Parallèlement à ces normes et contraintes législatives, les entreprises ont le choix d'adopter une démarche volontaire de diminution des impacts sur l'environnement {Hertwich, 1997} [56], {Lehni, 2000} [57], et {Van der Werf et Petit, 2002} [58]. Ainsi, les entreprises adoptent des objectifs et des stratégies différentes selon les priorités du management ou de l'organisation {Janin, 2000} [8]. Les domaines liés à ces normes varient entre des « normes de management, de qualité, de produits, de systèmes, de processus, de mesure ou d'essai, de nombreuses applications volontaires permettent maintenant aux acteurs socio-économiques de ne plus fermer les yeux devant la réalité environnementale sans, pour autant, mettre en danger leur potentiel économique » {AFNOR- www.afnor.org} [59].

Parallèlement, les centres de recherche proposent des moyens et solutions techniques pour améliorer l'intégration environnementale aux activités industrielles et commerciales {Lopez-Ontiveros et al, 2006} [35], {Haoues et al, 2006} [36], et {Froleich, 2007} [60] et {Maussang, 2008} [61]. Ils commencent à développer des approches et méthodes capables d'adapter les normes et contraintes législatives liées à l'environnement dans le processus de développement de produit via l'Eco-Conception {Jeganova, 2004} [62], {Fargnoli et al, 2008} [63], {Alhomsy et Zwolinski, 2009} [11] et {BOVEA et al, 2010} [64]

Ainsi, différentes normes sont aujourd'hui considérées dans le processus de conception et sont regroupées dans la série des ISO 14000 (www.iso.org) {ISO, 2010} [65], la figure 2. Cette série de normes propose un système de «Management Environnemental» qui a été lancé en 1996 en réponse à la sensibilisation croissante des dommages à l'environnement et à la

nécessité d'un ensemble de normes qui pourraient être adoptées par une organisation {JANIN, 2002} [8]. Les normes fournissent des directives sur les éléments qu'un système de gestion de l'environnement devrait avoir. Elles prescrivent ce qui devrait être fait par l'organisation pour améliorer les performances environnementales de ses activités et des produits et processus liés, mais n'indiquent pas comment cela doit être fait.

Référence ISO 14000	Objective	Group	Notes
ISO 14001	Système de Management environnemental	Gestion de la qualité	Exigences et Guidelines d'utilisation. 2ème édition/2004.
ISO 14004	Système environnemental	Gestion de la qualité	Guidelines généraux- principes Systèmes de support technique
ISO 14010	Audit du système environnemental	Gestion de la qualité	Lignes directrices pour l'audit environnemental Principes généraux. Informations générales
ISO 14011	Audit du système environnemental	Gestion de la qualité	Lignes directrices pour l'audit environnemental Procédures d'audit Audit des systèmes de management environnementaux
ISO 14012	Audit du système environnemental	Gestion de la qualité	Lignes directrices pour l'audit environnemental Critères de qualification pour les auditeurs environnementaux
ISO 14015	Audit du système environnemental	Gestion de la qualité	Management environnemental Évaluation environnementale de sites et des organismes (EESO)
ISO 14020	Étiquettes et Déclarations environnementales	Marquage et Déclarations	Principes généraux.
ISO 14021	Étiquettes et Déclarations environnementales	Marquage et Déclarations	Auto-déclarations environnementales Étiquetage de type II.
ISO 14024	Étiquettes et Déclarations environnementales	Marquage et Déclarations	Principes et méthodes Étiquetage de type I
ISO 14025 (Version PR, projet)	Étiquettes et Déclarations environnementales	Marquage et Déclarations	Étiquetage de type III
ISO 14030	Indicateurs environnementaux	Identification	Identification d'un ensemble d'indicateurs de performance
ISO 14031	Indicateurs environnementaux	Identification	Évaluation de la performance environnementale Lignes directrices
ISO/TR 14032	Indicateurs environnementaux	Identification	
ISO 14040	Management environnemental	Analyse du cycle de vie	Principes Cadre
ISO 14041 (Obsolète)	Management environnemental	Analyse du cycle de vie	Définition des Objectifs, Champ d'étude et analyse.
ISO 14042 (Obsolète)	Management environnemental	Analyse du cycle de vie	Évaluation de l'impact du cycle de vie
ISO 14043 (Obsolète)	Management environnemental	Analyse du cycle de vie	Interprétation du cycle de vie.
ISO 14044	Management environnemental	Analyse du cycle de vie	Exigences, Guidelines d'utilisation
ISO 14047	Management environnemental	Analyse du cycle de vie	Evaluation de l'impact du cycle de vie
ISO 14049	Management environnemental	Analyse du cycle de vie	Analyse du cycle de vie
ISO 14050	Vocabulaire environnemental	Gestion de la qualité	Définitions de notions fondamentales
ISO 14061	Management environnemental	Gestion de la qualité	Information to assist forestry organizations in the use of environmental management
ISO 14062 (TR)	Management environnemental	Gestion de la qualité	Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit

Tableau 1. Exemples de normes de la série ISO 14000 [selon le www.iso.org]

La première version de ces normes remonte à 1996 et la publication de la version actuelle des normes de la série ISO 14000 date de décembre 2004 {ISO-www.iso.org, 2010} [65], {Ammenberg et Sundin, 2003} [66] et {Morris, 2004} [51]. Un récapitulatif des principales normes est présenté dans le tableau 1 ci-dessus.



Figure 2: ISO-14001 logos

ISO 14000 et conception

De nos jours, l'économie exige un produit fonctionnel délivré par une entreprise « verte » avec une bonne image de qualité {Nicholas et al, 2001} [67] et {DeSimone et al, 2005} [68]. Ce sont ces éléments qui vont permettre à l'entreprise d'avoir un avantage concurrentiel. Les organisations qui souhaitent s'engager dans ces démarches sont déjà confrontées à de nombreux règlements relatifs à la responsabilité des produits {Adu, I.K. et al, 2008} [69], à la santé et à la sécurité des employés {DeMendonca, 2001} [70], aux problèmes de qualité, au traitement des plaintes des clients. Elles ont donc besoin de s'appuyer sur de nouveaux référentiels pour améliorer leur prise en compte de l'environnement {Charter, 2011} [71].

La conception pour l'environnement (Eco-conception ou Design for Environment) devient donc une stratégie importante parmi les stratégies environnementales adoptées par les entreprises. L'éco-conception est présentée dans la norme ISO TR 14062 sous le titre « *Integrating Environmental Aspects into Product Design and Development* ». Il s'agit dans cette norme de considérer les attributs environnementaux d'un produit durant son CdV {Quella, 2007} [72].

La figure 3, ci-dessous, montre comment la série des ISO 14000 va pouvoir contribuer au processus de développement de nouveaux produits, en agissant à la fois sur les actions à mener, mais également sur la planification des tâches à réaliser et sur leur suivi {ISO, 2002} [73].

Ce point de vue des « normes » est aujourd'hui toujours en évolution, mais connu voire adopté par la plupart des entreprises en France et en Europe.

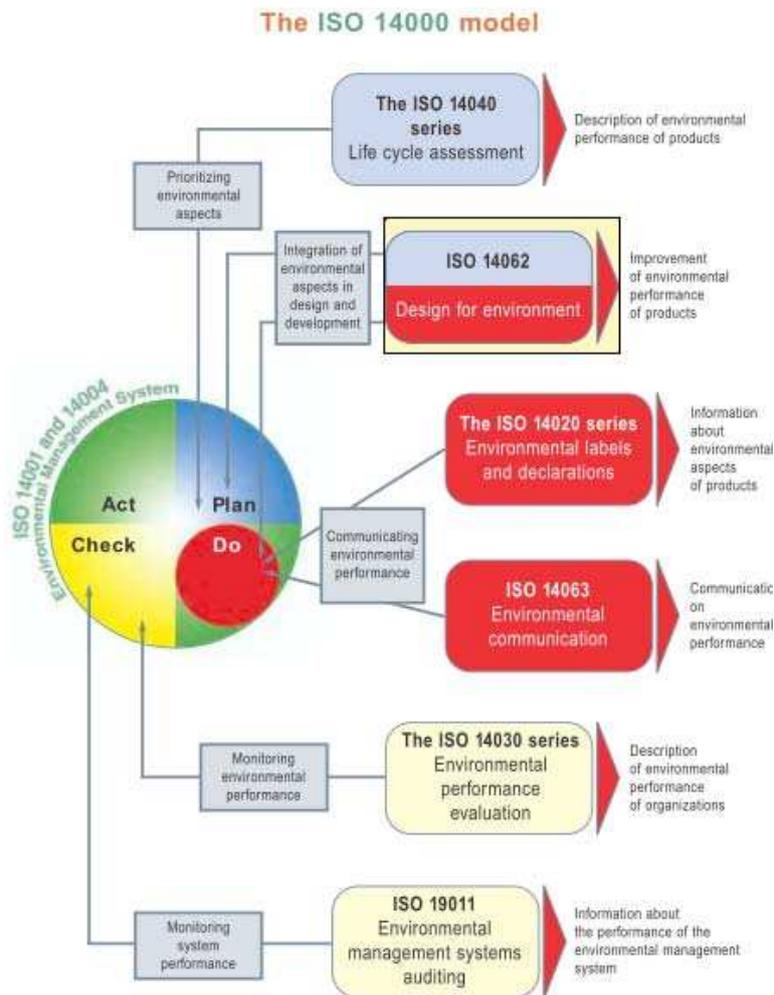


Figure 3. Relation entre l'ISO 14000 et le développement de produit [ISO, 2002].

1.2. Marchés « verts »

Gil Friend dans son livre « The truth about green business » {Gil Friend Nicholas, 2009} [48] représente plusieurs approches environnementales qui ont eu pour objectif de gagner des marchés. Face à la multitude des solutions proposées, il a fallu mettre en place des écolabels ou formats de déclaration qui permettent aux consommateurs de s'y retrouver et de positionner entre eux les produits présentés comme « verts » {Daniel C. Esty et al, 2009}[74], {Frank et al, 2010}[75], {Gil Friend Nicholas, 2009}[48] et {Swallow, 2009}[76] et les indicateurs nécessaires comme les « KIPIs » {Singhal et al, 2004}[18].

Eco déclaration et écolabel

Pour permettre aux clients de sélectionner de façon plus active les produits écologiques, les entreprises ont mis en place un système d'informations environnementales sur les produits {Gil Friend Nicholas, 2009} [48]. Les entreprises offrent ainsi souvent des informations dans un document déclaratif (éco déclaration) qui indique les stratégies écologiques adoptées {Ventère,1995}[77]. Elles ont aussi adopté des systèmes d'auto-déclaration sous la forme d'écolabels « privé ». Les exemples présentés dans la figure 4 montrent le nombre croissant des entreprises qui développent ces écolabels, au détriment de la compréhension des consommateurs.



Figure 4: La diversité des écolabels « privés » sur le marché et les labels français et européens

L'éco-labelling est ainsi devenu un outil important pour le marketing, car il reflète la prise de conscience environnementale des entreprises. Un écolabel permet au consommateur de distinguer des produits ou services plus respectueux de l'environnement, et pour le fabricant il peut permettre une différenciation des produits sur le marché (Produit moins impact et consommation durable {Vezzoli et Manzini, 2008} [78]. En France le marque « NF Environnement » a été créée en 1991 et est délivrée par un organisme certificateur indépendant (AFNOR Certification). Pour l'Europe, l'Ecolabel (figure 4) a été créé en 1992, et est construit sur le principe d'une « approche globale » qui prend en considération le cycle de vie du produit à partir de l'extraction des matières jusqu'à leur recyclage ou leur élimination après usage {AFNOR, Website} [79]. L'Ecolabel est le seul label écologique officiel européen utilisable dans tous les pays membres de l'Union Européenne.

Commerce durable

Le commerce durable s'appuie sur la définition du développement durable {Vezzoli et Manzini, 2008} [5], concept qui a été décrit en 1987 comme:

« un développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. Deux concepts sont inhérents à cette notion : le concept de « besoins », et plus particulièrement des besoins essentiels des plus démunis à qui il convient d'accorder la plus grande priorité, et l'idée des limitations que l'état de nos techniques et de notre organisation sociale impose sur la capacité de l'environnement à répondre aux besoins actuels et à venir. ». Ainsi, le commerce durable se concentre sur les

secteurs des biens et de services qui génèrent des bénéfices sociaux {Islam et al, 2003} [80], économiques et environnementaux en conformité avec les principes fondamentaux du développement durable John Elkington présent en 1994 la triple « Equity, Environment, Economics » comme les trois cycles engagés {Elkington, 1994}[81] et Wouter Van Dieren présent le même concept dans son report {Dieren, 1995}[82]. La figure 5 suivante figure dans le rapport de l'UNEP « A bridge to sustainable products » {Jensen et Remmen, 2006}[83].

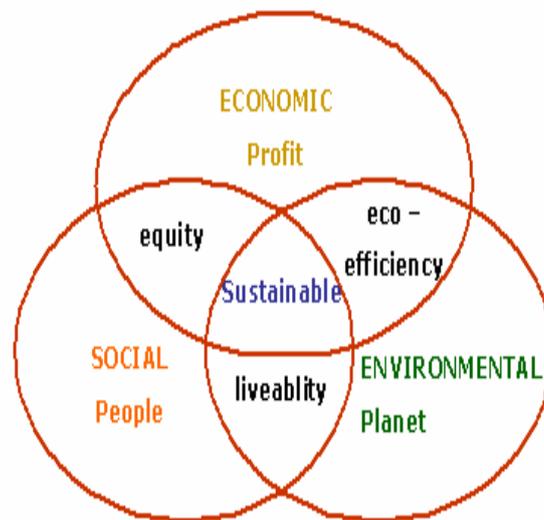


Figure 5. Le développement Durable et le triptyque: social, économique et environnemental [UNEP 2006]

Ainsi, le concept Commerce Durable « implique un système commercial qui ne nuit pas à l'environnement ni ne détériore les conditions sociales tout en favorisant la croissance économique » {Jensen, 2006}[84]. Plusieurs industries et produits vont adapter à ce concept {Coatanéa et al, 2006}[85] et {Laszlo, 2005}[86], {Gueret, 2004}[87] et {Finkbeiner, 2011}[29] comme les produits de l'agriculture {Nelson,2003}[88] et {Minnesota website, 2010}[89], des produits cosmétiques {Vanhellement, 2009}[90], des médicaments {Bristol-Myers Squibb, 2010}[91]. Ces visons « Ecolabel » « Commerce Durable » {AFNOR-Certification, 2001}[92] viennent aujourd'hui grandement influencer les choix de conceptions et en particuliers les exigences initiales sur le produits/service {DeSimone et Popoff, 2005}[68] et {Sakao et Lindahl, 2009}[93].

1.3. Production propre

Le concept de production propre a été lancé en 1989 en réponse à une décision de l'UNEP (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) avec l'obligation de réduire la pollution industrielle mondiale et les déchets {UNEP, 2006}[94]. Les secteurs liés à la production sont souvent les plus avancés en termes de diminution des impacts environnementaux, notamment car les normes les concernant ont été rapidement mises en place {Cheremisinoff, Et al, 2001}[67]. La production propre signifie l'utilisation de procédés industriels, matières premières et produits conçus pour prévenir la pollution de l'air, de l'eau et des sols, en réduisant les déchets, les risques sur l'environnement et la santé humaine, et en rendant efficace l'utilisation des matières premières, de l'eau et de l'énergie {Sonnemann et al, 2004}[23].

Aujourd'hui, c'est le concept d'éco-efficacité (Eco-efficiency) qui ressort de l'ensemble des pratiques {Dyllick et Beyond, 2002} [95], et {Lehni, 2000} [57]. Il a été inventé par le Conseil Mondial des Entreprises pour le Développement Durable «World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) en 1992 {WBCSD, website} [96]. Il est basé sur

l'idée de créer davantage de produits ou services en utilisant moins de ressources et en générant moins de déchets et de pollution. Selon le WBCSD, les aspects essentiels de l'éco-efficacité sont les suivants :

- La réduction de l'intensité des matériaux des biens ou des services;
- La réduction de l'intensité énergétique des biens ou des services;
- La réduction de la dispersion des matières toxiques;
- L'amélioration de la recyclabilité;
- L'utilisation maximale de ressources renouvelables;
- Une plus grande durabilité des produits
- L'augmentation de l'intensité des services pour les biens et services.

Encore une fois, ces éléments vont influencer les choix de conception, en particulier les choix réalisés dans la mise en relation Produit/Process.

1.4. Cycle de vie du produit

Le concept de cycle de vie n'est pas totalement nouveau pour l'industrie, même si jusqu'alors il ne concernait pas ou peu les aspects environnementaux. Du point de vue des ventes, le cycle de vie va être représenté selon cinq étapes (figure 6): le Développement d'un nouveau produit, l'introduction du produit sur le marché, la phase de croissance, la phase de maturité et la phase de déclin. La figure suivant représente cette évolution selon l'UNISIT- © Unesco 1988 {Savard, 1988} [97].

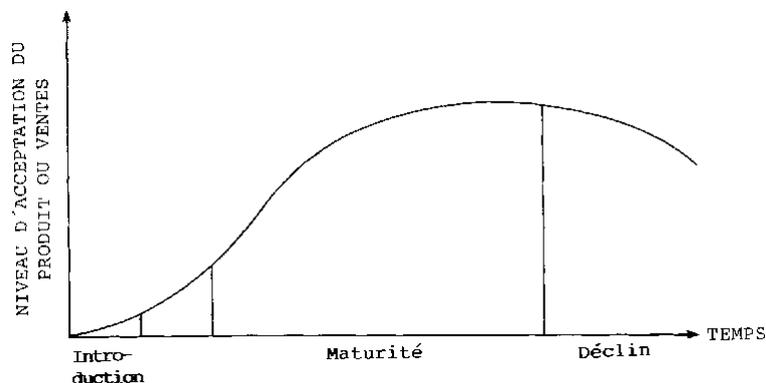


Figure 6: Les étapes du cycle de vie de produit, du point de vue des ventes (© Unesco 1988)

Pahl & Beitz ont représenté un CdV dont l'étape initiale est déclenchée par un besoin du marché ou par l'apparition d'une idée nouvelle. Ce cycle commence avec la planification et se termine quand la phase de vie utile du produit est finie, soit par du recyclage, de la récupération d'énergie ou de la mise en décharge (figure 7). Ce cycle représente un processus de transformation de matières premières en produits économiques à forte valeur ajoutée » {Pahl & Beitz, 1972} [98].

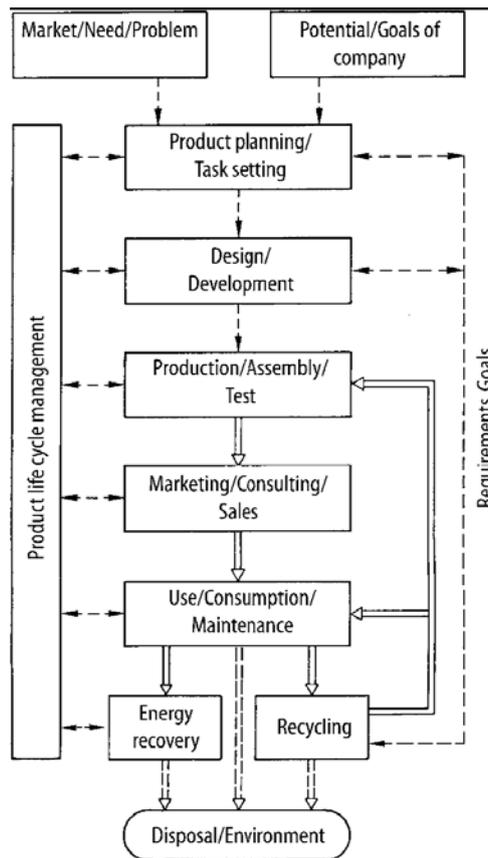


Figure 7: Figure 8. CdV de produit selon Pahl & Beitz

Depuis l'extraction des matières premières jusqu'au traitement en fin de vie (élimination, incinération, recyclage ou autres scénarios disponibles), le produit traverse de nombreuses étapes appelées phases de cycle de vie {Brissaud et al, 2004} [24]. Le terme de cycle de vie de produit (CdV) utilisé dans un contexte de prise en compte de l'environnement, va se référer à cinq phases principales {Nielsen et al, 2002} [99]: matières premières, production, transport (distribution), utilisation du produit et fin de vie (figure 8), ce cycle est adapté du livre "Green Products by Design: Choices for a Cleaner Environment" {Johns, 1992}[50].

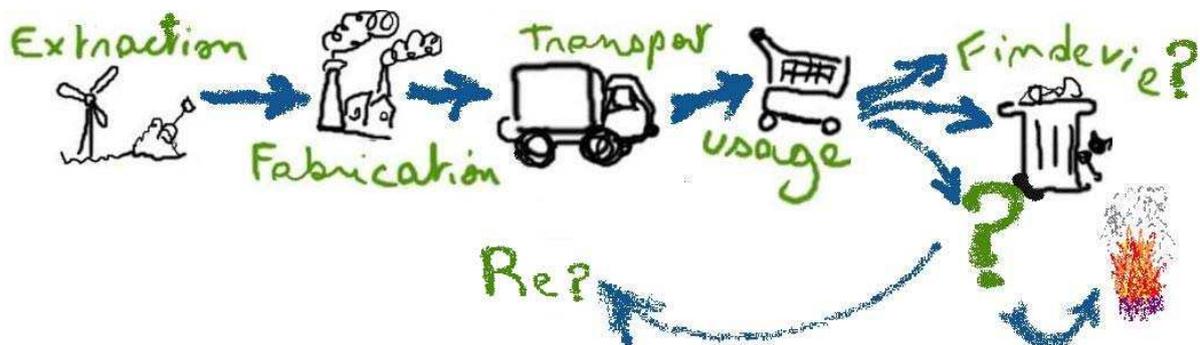


Figure 8. Le cycle de vie du produit pour la prise en compte de l'environnement

- **Matière première** : Cette phase comprend l'extraction des matériaux et leur fabrication jusqu'au produit semi-fini (par exemple, des profilés en acier à partir de minerai de fer).

- **Production** : Cette phase comprend l'achat de composants, ainsi que le processus de fabrication et d'assemblage, tant chez les fournisseurs qu'en production.
- **Transport (Distribution)**: Cette phase couvre toute la chaîne logistique, des fournisseurs aux utilisateurs finaux et prend en compte les moyens de transport (navires, trains, avions, camions, camionnettes, voitures, etc.). La phase de transport inclut généralement les activités d'emballage.
- **Utilisation** : Cette phase prend en compte l'ensemble des éléments liés à l'utilisation du produit afin d'assurer sa fonction (filtres + eau + énergie pour une machine à café). La phase d'utilisation inclut également l'installation et les activités d'entretien et de maintenance.
- **Fin de Vie (FdV)** : Cette phase permet de décrire les processus liés à la fin de vie (FdV) du produit. Quelques scénarios de FdV intégrant les concepts liés à la récupération permettent de prendre en compte les bénéfices économiques, sociaux, commerciaux, etc.,

L'option finalement retenue dépend donc de nombreux facteurs : exigences réglementaires, famille de produits, stratégie d'entreprise, besoins commerciaux {Johns, 1992} [50], {Lindahl, 2006} [22].

Des recherches proposent d'autres découpages du cycle de vie. C'est le cas de Gehin {Thèse-Gehin, 2008} [34] qui présente dans sa thèse une méthode pour aider les concepteurs dans la définition du scénario de cycle de vie du produit (Figure 9) en particulier pour concevoir les flux bouclés.

Ces cycles de vie bouclés ont pour objectif de diminuer les pertes environnementales et économiques liées aux stratégies de fin de vie et sont conditionnés par le choix d'options telles que la réutilisation, le remanufacturing ou le recyclage.

- *Recyclage* : La récupération massive des matériaux entre dans le scénario de recyclage de matières des produits {Froelich et al, 2007}[100]. Cette récupération est un scénario pratique pour la plupart des produits récupérés {Mathieux et al, 2008}[101].
- *Remanufacturing* : Le remanufacturing consiste en une récupération et revalorisation des produits en fin de vie, tout en préservant la valeur ajoutée {LOPEZ-ONTIVEROS et al, 2004} [102]. La forme des pièces est gardée, contrairement au recyclage et l'extraction de matières premières est diminuée. Le processus de remanufacturing peut comporter les étapes suivantes : le désassemblage complet du produit, le nettoyage, le contrôle, le tri de tous les composants, la remise à neuf ou remplacement de certaines pièces, le réassemblage du produit {Lopez-Ontiveros et al, 2006} [35].
- *Réutilisation* : Dans ce scénario de FdV on va récupérer la fonctionnalité totale du produit et garder la valeur ajoutée du produit [103]. Pour bien récupérer la fonctionnalité, des processus d'entretien et de maintenance sont mis en place afin de garantir l'efficacité de la fonctionnalité du produit récupéré {Gehin et al, 2009}[104].

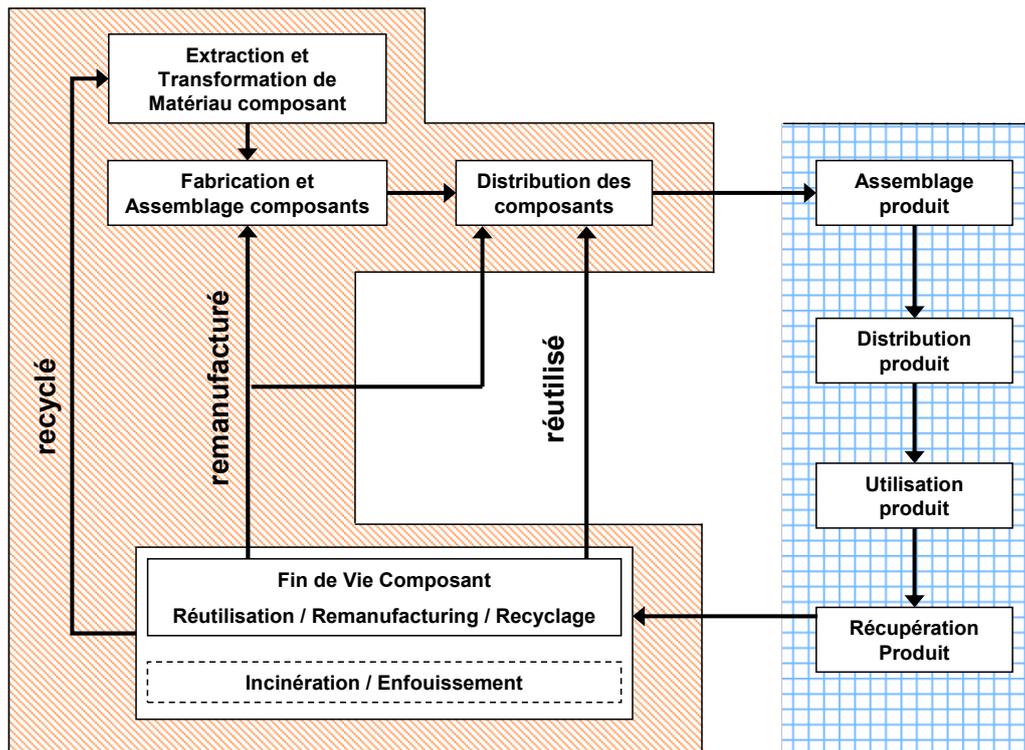


Figure 9. Le cycle de vie proposé par Gehin [Gehin, 2008]

Dans le cas des scénarios liés à l'incinération et à l'enfouissement, il s'agit d'adopter une stratégie pour prévenir la production de déchets et l'usage de substances dangereuses et/ou non-recyclées. La figure 10 ci-dessous met en relation les phases du cycle de vie et les objectifs qui peuvent être poursuivis selon que l'on est en phase de prévention ou de gestion {Ministère de l'écologie et du développement durable-France, 2004} [105].

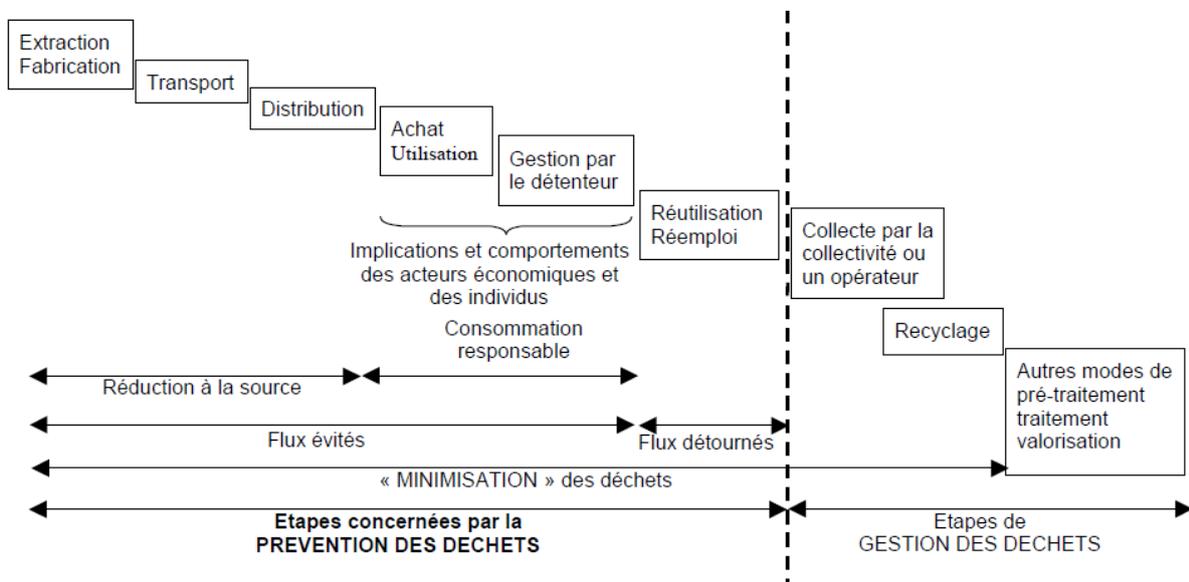


Figure 10. Prévention des déchets et gestion des déchets [adopté par Ministère de l'écologie et du développement durable]

Les choix des scénarios de cycle de vie des produits vont fortement influencer les solutions techniques adoptées (techniques de désassemblage différentes selon le scénario de fin de vie, composants plus robustes si durée de vie étendue, □) et donc influencer l'impact sur

l'environnement. La conception du cycle de vie en parallèle de la conception du produit lui-même s'impose maintenant aux concepteurs {Thèse-Gehin, 2008} [34].

1.5. Les concepts « x R »

Un zoom particulier est souvent fait sur la phase de fin de vie des produits, qui va comporter plusieurs scénarios envisageables, voire des scénarios mixtes. Les stratégies de traitement sont ainsi hiérarchisées (figure 11) {EU, 2008} [106].



Figure 11. La hiérarchie des stratégies de traitement des déchets [Directive 2008/98/EC]

Des concepts ont ainsi été développés comme le concept 3R, qui fait référence à trois stratégies adoptées pour la gestion des déchets en fin de vie. Ces trois stratégies sont Réduire, Réutiliser, Recycler {Matsumoto, 2010} [103] et {W-BCSD, 2010} [107]. A titre d'exemple, le projet (UR-3R) {Global-Renewables, 2010} [108] a permis d'implémenter le concept 3R dans la stratégie de gestion des déchets des agglomérations (figure 12) {Poole et simon, 1997} [109].



Figure 12. Le concept 3R dans gestion durable des déchets urbains [GRL/UR-3R Process]

Un autre concept 3R relatif cette fois-ci aux produits a été mis en avant par Gehin dans sa thèse {Gehin, 2008} [34]. Les stratégies impliquées sont : Réutiliser, Remanufacturer, Recycler. On donne la priorité à la récupération fonctionnelle du produit (Réutiliser), de ses composants (Remanufacturing) puis de ses matériaux (Recycler). L'idée ici est de conserver la matière dans la boucle, mais également la valeur ajoutée du produit (figure 13) {Fishbein, 2000} [110].

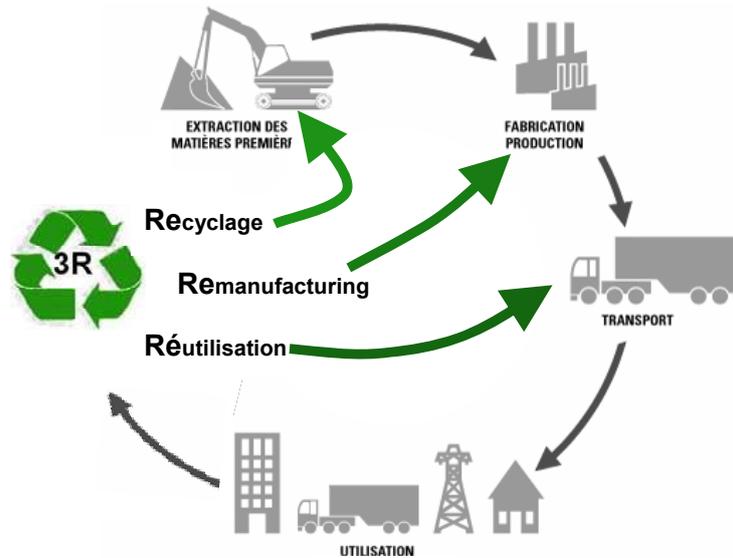


Figure 13. Le concept 3R au niveau du produit [Gehin-Thèse 2008]

Le concept 6R est proposé pour améliorer la démarche de conception de produit plus écologique et pour intégrer d'autres demandes que celles du 3R lors de la conception de produit. Selon Joshi, Venkatachalam et Jawahir {Joshi et al, 2006} [111] et {www.epa.gov, websit} [10], le transfert du concept des 3R (Réduire, Réutiliser, Recycler) au concept 6R (Réduire, Remanufacturer [remise à neuf], Réutiliser, Récupérer, Recycler, Repenser) peut générer des bénéfices économiques à la fois pour le fabricant mais également pour le consommateur. On peut faire également l'hypothèse que dans la plupart des cas ces bénéfices sont également environnementaux. La figure 14, montre comment ce concept mis en œuvre dans le domaine de l'industrie des véhicules permet de prolonger la vie des produits et d'ainsi augmenter les gains par des cycles de vie multiples {Zameri et saman, 2010} [112] et {Kuik et al, 2004} [113].

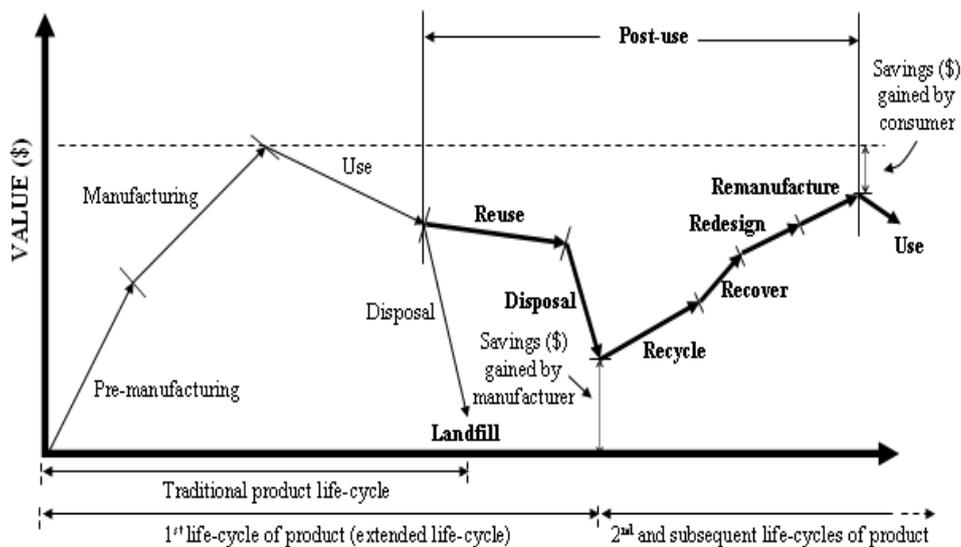


Figure 14. Bénéfices économiques en lien avec le concept 6R

Ce point de vue «mix» de stratégies en fin d'usage va également fortement influencer les solutions élaborées par les concepteurs {Poole et Simon, 1997} [109].

1.6. Premiers constats

La prise de conscience environnementale a progressivement amené les entreprises à modifier leurs pratiques quant à la prise en compte de l'environnement. Les approches initialement très ciblées (lutte contre la pollution, les déchets) intègrent aujourd'hui de nombreux domaines d'expertise (conception durable) et demandent un haut niveau d'intégration des différentes expertises en jeu {Fhrenfeld, 2000} [114] (figure 15).

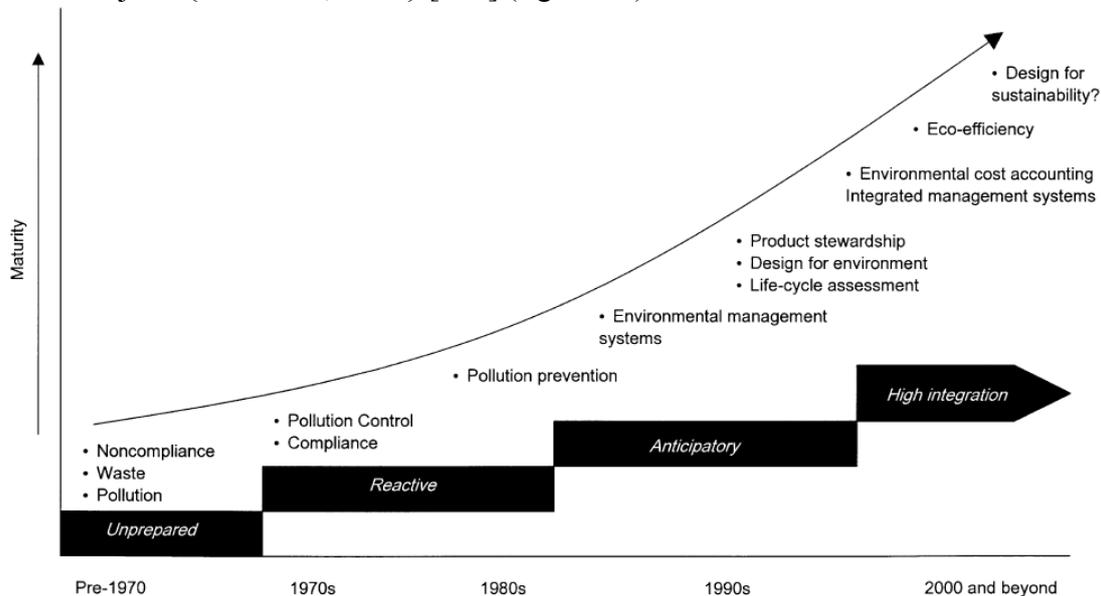


Figure 15. Evolution des pratiques pour l'intégration de l'environnement en conception

En se concentrant sur l'intégration des aspects environnementaux dans les phases de développement de produit {Nielsen et al, 2002} [99] et en prenant en compte le concept (POEMS) (Product-Oriented Environmental Management Systems) {Ammenberg et Sundin, 2005} [115], le concepteur mène une stratégie globale qui est conçue pour améliorer la performance environnementale de l'entreprise à travers une nouvelle approche de conception des produits et procédés {Gehin et al, 2008} [52].

L'éco-conception est ainsi appliquée comme une stratégie pratique liée à la stratégie globale de l'entreprise. Par exemple, l'analyse du marché et les besoins des clients, le marketing, la vente et le processus de conception et de développement de produit, □ etc., sont des éléments engagés dans la stratégie de l'entreprise {Nielsen et Wenzel, 2002} [99] et {Matsumoto, 2009} [116]. D'autre part les éco-objectifs comme l'éco-efficacité, la réduction des impacts environnementaux et l'éco-image « xR » pour les scénarios de fin de vie [Brissaud et Zwolinski, 2004] [24], □ etc. sont des cibles à atteindre et donnent des indications différentes permettant de vérifier le niveau d'implémentation de l'approche d'éco-conception {Ammenberg et Sundin, 2005} [66] et {Gray, 2009} [117].

Le monde industriel porte aujourd'hui un regard très intéressé sur les approches d'écoconception (ou Design for Environment). La Norme ISO 14062 définit l'éco-conception comme l'intégration de contraintes environnementales dans la conception et le développement de produits {ISO, 2002} [118]. La norme ISO 14062 précise aussi qu'il faut entendre par « produit » aussi bien des produits que des services. L'objectif de cette intégration est de réduire l'effet sur l'environnement du produit conçu et de son CdV. Il s'agit donc de prendre en compte l'ensemble des phases du cycle de vie du produit et ceci du « berceau à la tombe ». Selon l'UNEP {Jensen et Remmen, 2006} [83] le déploiement de l'éco-conception est motivé par deux types de pilotes :

- Les pilotes internes concernent l'innovation, l'amélioration de l'image, la qualité des produits, le sens des responsabilités, la motivation des employés, la réduction des coûts,
- les pilotes externes concernent les contraintes et la politique gouvernementale (DEEE, directive ROHS,), le marché (demande, compétitivité,), les exigences environnementales de la conception, les déchets, etc... Le chapitre 2 explore ces approches d'éco-conception.

Chapitre 2 : Approches en éco-conception

L'implémentation de l'éco-conception s'appuie sur une approche multicritères des problèmes environnementaux (matières premières, énergie, déchets, eau, etc.). C'est une démarche préventive qui se caractérise par une approche globale :

- **multi-étape** (prise en compte de tout le cycle de vie du produit, depuis l'extraction de matières premières jusqu'à son élimination en fin de vie) et
- **multicritère** (consommations de matières et d'énergie, rejets dans l'eau et dans l'air, production de déchets, bruit, etc.). {AFNOR, Website} [119].

On trouve dans la littérature plusieurs outils et méthodes liés à la prise en compte de l'environnement, qui aident les concepteurs à prendre des décisions {EPA, 2008} [39]. Larry W. Canter {Canter,1995}[120] a fait la liste dans le tableau 2 suivant des méthodes utilisées dans les activités d'évaluation d'impacts environnementaux (EIA: Environmental Impact Assessment).

<i>Types of Methods in EIA</i>	<i>Define Issues (Scoping)</i>	<i>Impact Identification</i>	<i>Describe Affected Environment</i>	<i>Impact Prediction</i>	<i>Impact Assessment</i>	<i>Decision Making</i>	<i>Communication of Results</i>
Analogs (look-alikes) (case studies)	X	X		X	X		
Checklists (simple, descriptive, questionnaire)		X	X				X
Decision-focused checklists (MCDM; MAUM; DA; scaling, rating, or ranking; weighting)					X	X	X
Expert opinion (professional judgment, Delphi, adaptive environmental assessment, simulation modeling)		X		X	X		
Expert systems (impact identification, prediction, assessment, decision making)	X	X	X	X	X	X	
Laboratory testing and scale models		X		X			
Literature reviews		X		X	X		
Matrices (simple, stepped, scoring)	X	X		X	X	X	X
Monitoring (baseline)			X		X		
Monitoring (field studies of analogs)				X	X		
Networks (impact trees and chains)		X	X	X			
Overlay mapping (GIS)			X	X	X		X
Photographs and photomontages			X	X			X
Qualitative modeling (conceptual)			X	X			
Quantitative modeling (media, ecosystem, visual, archaeological, systems analysis)			X	X			
Risk assessment	X	X	X	X	X		
Scenarios				X		X	
Trend extrapolation			X	X			

X: Potential for direct usage of method for listed activity

MCDM = multicriteria decision making; MAUM = multiattribute utility measurement; DA = decision analysis; GIS = geographical information system.

Tableau 2. Liens entre les méthodes EIA utilisées et les objectifs recherchés

M. Janin présente dans sa thèse plusieurs exemples liés à l'éco-conception dans les entreprises {Janin, 2000}[8]. Il montre que les entreprises ont consacré beaucoup d'efforts pour développer des outils pour aider les concepteurs à créer des produits moins impactant sur l'environnement. Les concepteurs sont ainsi amenés à mettre en place des indicateurs et à appliquer des règles de conception pour l'environnement :

- **Indicateurs d'impacts**: Des indicateurs spécifiques sont généralement mis en place par les concepteurs pour les aider durant le processus de conception. Les analyses de cycle de vie fournissent la plupart des indicateurs liés aux impacts environnementaux et qui sont aujourd'hui bien reconnus de par le monde.

- **Indicateurs environnementaux** : des indicateurs de type « taux de recyclabilité » ou « niveau d'énergie consommée » vont également contribuer à orienter les concepteurs vers une conception plus responsable. Ils sont généralement calculés en lien avec une règle de conception.

- **Guides/règle d'éco-conception**: Le concepteur peut être amené à appliquer des règles d'éco-conception dans son projet. Ces règles doivent intervenir au plus tôt dans la conception, au moment où le concepteur peut encore facilement modifier les solutions. Le tableau 3 ci-dessous présente quelques règles de base en éco-conception.

Phase de CdV	Exemples de règles d'éco-conception (règles DfE)
Utilisation de la matière	- Choisir le bon matériau (renouvelable, moins consommateur d'énergie, recyclable, recycle, □) - Réduire l'utilisation de matière
Fabrication	- Réduire l'utilisation de matière par composant (déchets, consommables) - Economiser l'énergie pendant la fabrication et choisir des énergies propres - Améliorer l'assemblage du produit
Distribution	- Diminuer l'usage des emballages - Optimiser la logistique (distances, type de transport)
Usage	- Optimiser la consommation d'énergie (quantités et type) - Optimiser les fonctionnalités du produit (maintenance, durée de vie □) - Optimiser l'utilisation de consommables (quantité, type)
Fin de Vie	- Améliorer la réutilisation - Améliorer le remanufacturing - Améliorer le recyclage

Tableau 3. Exemples de règles d'éco-conception (règles DfE) [Alhomsy, 2009] [121]

2.1. Focus sur l'ACV

Les méthodes quantitatives d'évaluation du cycle de vie et d'autres méthodes d'analyse détaillées donnent une image de l'impact environnemental d'un produit ou d'une de ses fonctions pour le cycle de vie complet ou pour une partie de celui-ci.

Ces dernières années, l'ACV a gagné l'acceptation générale et a pour principales utilisations celles liées à l'étiquetage environnemental (*Environmental Labeling*) {ISO,2009} [122], {Ventère, 1995}[77], {Kayberger, 2003}[123] et {Mrtensson et al, 2000}[124], l'amélioration environnementale des produits (*Product Environmental Improvement*) {Hindle et al, 1993}[125], {Nielsen et Wenzel, 2002}[99] et {Bovea et Vidal, 2004}[126], l'éco-conception (Eco-Design) {Frischknecht et Rebitzer, 2011}[29] et {Neumann, 2007}[127].

Grace à la reconnaissance de cette approche, des méthodes et des bases de données ont été développées pour supporter et améliorer la performance des outils ACV. Beaucoup d'outils logiciels et de bases de données sont aujourd'hui disponibles et les utilisateurs sont souvent des experts en ACV et parfois des concepteurs.

La démarche ACV est divisée en trois étapes principales ; définir l'objectif, déterminer l'inventaire et évaluer l'impact environnemental {Lindahl, 2006} [22] . La méthode de calcul dépend du choix de l'analyste, qui va choisir une méthode comme BEES, CML 1992, CML 2001, Eco-Indicator 99, □ {Frischknecht et Rebitzer, 2005} [128] et {Pré, 2010} [129].

Le choix des méthodes se fait selon l'objectif ciblé de l'analyse (Energie, impact, économie, □) et la façon de calculer la performance environnementale des produits. La figure 16 illustre, pour la méthode Eco-Indicator 99 {Pré, 2010} [129] et {Pré, 2001} [130], comment se déroulent les 3 étapes et les types de résultats agrégés que l'on peut obtenir.

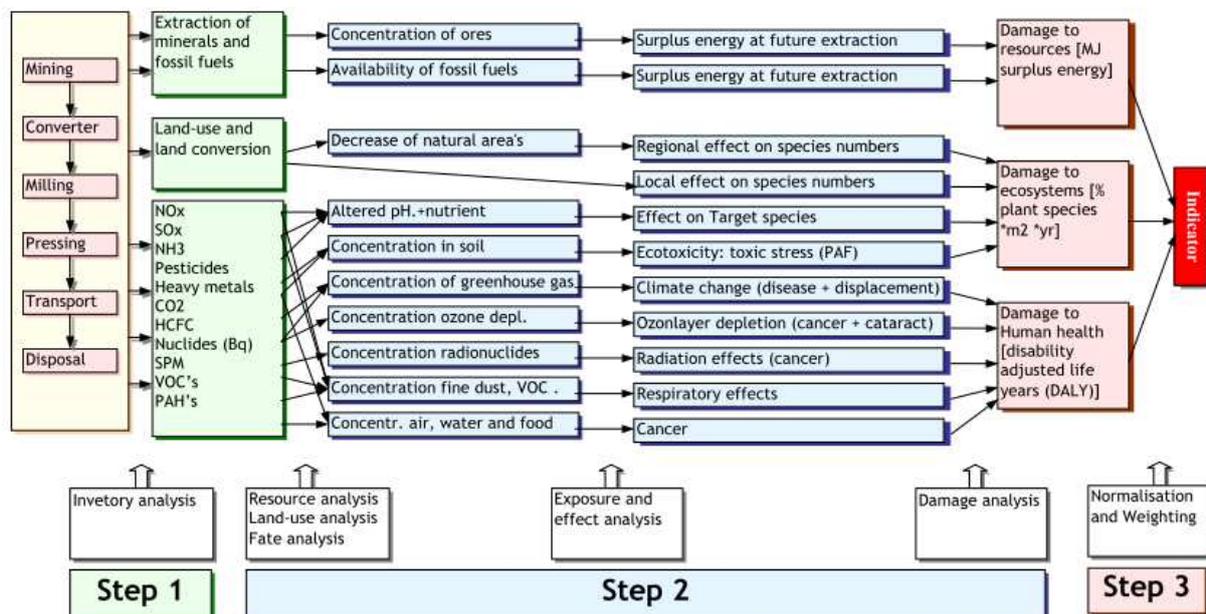


Figure 16. Déroulement de la démarche de calcul en ACV (eco-indicateur 99)

Les logiciels utilisés pour mettre en œuvre l'ACV comme le SimaPro, Eco-scan, Eco-It, GaBi utilisent des bases de données pour modéliser les produits et les activités liées. Le résultat final d'une ACV est une valeur (Quantitative, et/ou %) lié à la performance environnementale de produit. Cette valeur est représentée par un score unique ou par une série de scores partiels, selon les impacts environnementaux. La figure 17 suivante permet d'illustrer comment se répartissent en pourcentage% les impacts environnementaux par catégorie pour du diesel. Cette analyse prend en compte toutes les étapes du cycle de vie, de l'extraction à la consommation en tant que carburant. La caractérisation a été faite avec l'indicateur Eco-Indicator 99 Hierarchist selon les dix catégories proposées par Eco-Indicator {Pré-Consultants, 2010} [131].

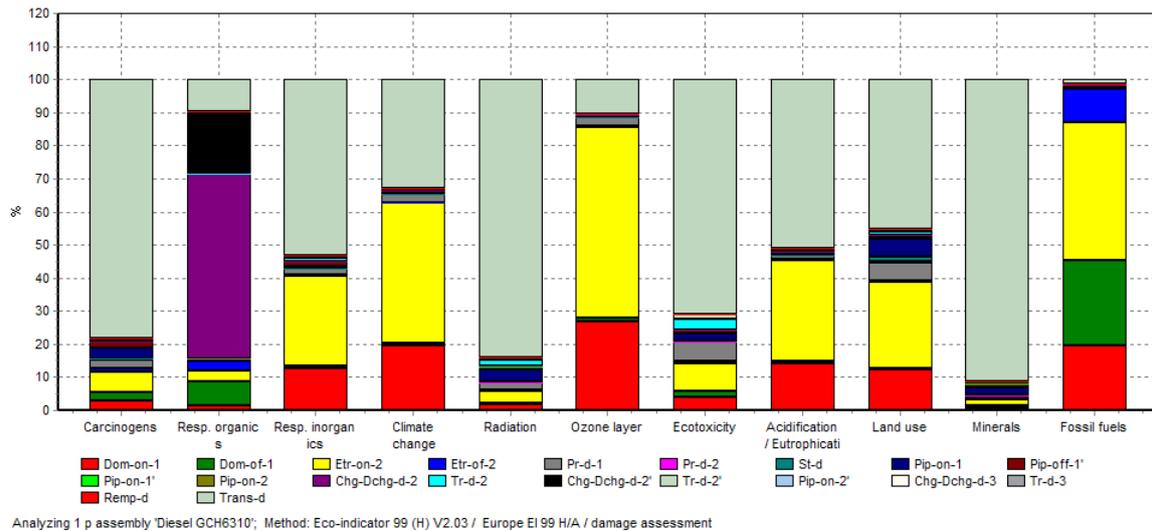


Figure 17. Résultat d'une ACV sur le diesel (SimaPro - Eco-Indicator 99)

La réalisation d'une ACV est souvent longue, complexe et coûteuse pour une entreprise. Elle peut difficilement être utilisée directement dans le processus de développement produit, mais elle donne des valeurs qualitatives essentielles pour pouvoir mener des comparaisons d'impacts environnementaux entre des solutions.

2.2. Focus sur l'Eco-design Strategy Wheel

Il existe de nombreux outils d'éco-conception en parallèle des méthodes d'ACV {Knight et Jenkins, 2009} [132]. Les données qui doivent être considérées peuvent être qualitatives ou semi-quantitatives {Hur et al, 2005} [43] et {Dewulf et Duflou, 2003}. Au début d'un projet dans le processus de développement de produits, différentes méthodes et listes de contrôle (Checklist) {Luttrupp, 2006} [26] [26] et {EPA, 2008} [39] sont souvent préférées ainsi que des indicateurs. Ces outils ont leur force car ils fournissent un aperçu rapide et un mécanisme d'évaluation facile à mettre en œuvre. Par contre, les analyses manquent de détails et de précision [Pochat et al, 2007] [7].

Quand les méthodes et les outils de DfE sont implantés et mis en œuvre dans les entreprises, ils deviennent une partie du processus de développement produit. Par contre, souvent ces outils de DfE sont isolés par rapport aux autres activités qui composent le processus de développement de produit {Yarwood, 2003} [133]. Pour éviter ce problème, les outils doivent être situés dans un processus global de développement de l'éco-conception qui décrit comment les outils doivent être utilisés, et il faut lier des activités de DfE avec le reste du processus de développement produit. De plus, d'après M. Betz, H. Florin et H. Schöch {Betz et al, 2001} [134] les caractéristiques principales des outils de DfE sont:

- L'outil de DfE doit offrir une interface utilisateur qui est liée à la planification du travail quotidien.
- L'architecture du produit doit être visualisée correctement.
- Les conséquences environnementales des changements dans la conception sont calculées «juste à temps» par l'outil grâce à des données et des méthodologies qui sont déjà stockées dans la base de données de conception écologique.

L'Eco-design Strategy Wheel est un outil d'éco-conception qui permet de dresser une liste de contrôle (Check-list) visant dès les premières phases du processus de développement de produits, de visualiser les caractéristiques environnementales d'un produit qui correspondent aux domaines engagés dans la conception. L'objectif de l'EcoDesign Strategy Wheel {Jeganova, 2004}[62] est de fournir un guide à l'équipe de conception pour identifier les aspects environnementaux à considérer durant la conception. L'outil peut également être utilisé plus tard dans le processus d'examen des premières décisions {Chulvi et Vidal, 2011}[135] et {Remery, 2011} [136]. La roue (figure 18) représente le cycle de vie des produits et illustre le processus continu pour la conception durable. Les stratégies sont proposées sous la forme de lignes directrices (guidelines) laissant le concepteur à un niveau décisionnel. Ici, 8 stratégies sont engagées dans le cycle de vie du produit.

L'implémentation de règles DfE intègre aussi l'utilisation de moyens pour proposer des solutions et choisir entre les alternatives de conception possibles. En effet, il s'agit de trouver des compromis entre des aspects environnementaux et les autres aspects du produit (techniques, économiques,) et ceci selon la méthode et l'outil utilisé {Mattias, 2006} [21] et selon le niveau et la phase dans la conception {Gehin et al, 2009} [137] et {Hur et al, 2005} [43]. Par exemple, la consommation d'énergie et le poids des matériaux doivent être équilibrés avec les coûts du produit et de la production {Crul et Diehl, 2006} [138].

Des outils de prise de décision comme des matrices d'analyse coûts/bénéfices (Cost Benefit Analysis) {Hur et al, 2005} [43], {UNEP, 2007} [139] peuvent être utilisées en parallèle pour choisir la meilleure solution {Choi et al, 2008} [140].

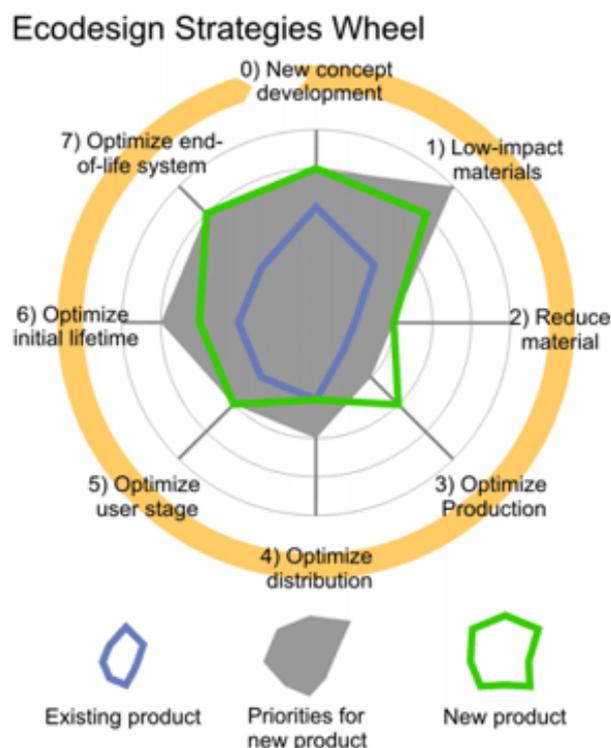


Figure 18. Exemple d'une Eco-design Strategy Wheel

2.3. Focus sur l'outil Ecodesign Pilot

L'outil Ecodesign Pilot est un outil qui permet au concepteur de trouver la meilleure stratégie environnementale pour améliorer rapidement son produit. Une liste de données est à saisir : nom du produit, durée de vie, unité fonctionnelle; poids et type de matériaux pour les 5 composants retenus et pour 5 pièces du packaging. La consommation d'énergie, pour la fabrication, et les déchets par unité, les volumes de production, les données sur les polluants et les process relatifs aux matériaux par unité produite, les pourcentages de pièce externes, les distances de transport pour ces pièces achetées, la distance moyenne de transport pour la distribution du produit, la fréquence d'utilisation, les consommables par utilisation, et les déchets par utilisation. Une fois ces données saisies, L'ECODESIGN assistant renvoi un résultat concernant la catégorisation du produit (prépondérant au niveau : matière première, fabrication, transport, utilisation ou recyclage) et des axes d'amélioration appropriés (i.e. réduction du transport ou optimisation des fonctionnalités du produit ou amélioration de la maintenance) {Wimmer et Zust, 2003}[38] et {Ecodesign-Pilot, Website} [141] (figure19).

The screenshot shows the Ecodesign Pilot Assistant interface. At the top, there is a navigation bar with 'ECODESIGN online PILOT' and 'INTRODUCTION'. Below this is a yellow header with 'Assistant' and a navigation menu with tabs: 'Description', 'Raw Material', 'Manufacture', 'Distribution', 'Product Use', 'End of Life', and 'Result'. The main content area is yellow and contains the following sections:

- Product**
 - Name: Disposal shaver
 - Life Time: 0.143 years
 - Use: 37 times per year
 - Functional Unit: a disposal shaver for 37 shaves per year
- Classification**

The analysed product seems to be a hybrid type AE, the phases 'raw material' and 'end of life' are significant here.
- Recommendations**

We recommend the following improvement strategies. The listed strategies forward you to the checklists of the ECODESIGN PILOT.

 - (Main) Strategies with high priority:**
 - S2. Reducing material inputs
 - S11. Increasing product durability
 - S19. Recycling of materials
 - (More) Strategies to be realized later:**
 - S1. Selecting the right materials
 - S9. Optimizing product use
 - S10. Optimizing product functionality
 - S15. Improving maintenance
 - S16. Improving reparability
 - S17. Improving disassembly
 - S18. Reuse of product parts
 - (Other) Additional, recommended strategies:**
 - S4. Optimizing type and amount of process materials

Figure 19. Résultats concernant les axes d'amélioration dans Ecodesign pilot (cas du rasoir)

Pour chaque stratégie, une check-list ECODESIGN PILOT peut être utilisée par l'équipe de conception pour les aider à trouver de nouvelles idées pour développer des produits soucieux de l'environnement (figure 20). L'algorithme utilisé n'est malheureusement pas décrit.

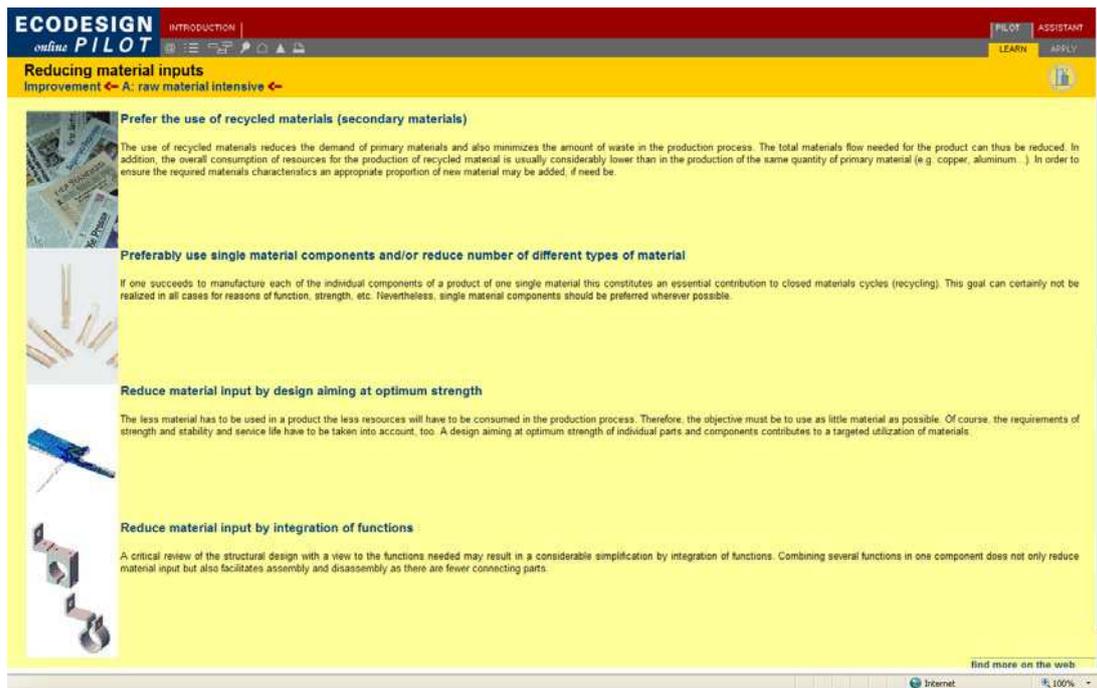


Figure 20. Exemple de règles pour guider la conception (Ecodesign Pilot)

2.4. Bilan sur les approches actuelles en éco-conception

De nombreux travaux de recherche sont menés concernant l'intégration de contraintes environnementales pendant le processus de conception des produits et la conception des processus relatifs à ces produits. Ainsi, de nouvelles méthodes de conception sont développées, basées sur la prise en compte de l'ensemble du cycle de vie des produits et l'intégration des phases du CdV dans la conception de produit pour réduire leur impact environnemental. La figure 21 donne une représentation de la démarche actuelle de l'implémentation de ces règles dans les processus de conception : en phase de conception préliminaire ce sont des outils qualitatifs (guide, liste de règles génériques, recommandations) qui sont utilisés, faute du manque de données liées aux caractéristiques physiques du produit {Lahonde et al, 2010} [142], {Zuo et Director, 2000} [143] et {Charter, 2011} [71].

Plus tard, en phase de conception détaillée, le produit et ses caractéristiques détaillés ainsi que les processus liés sont déterminés (toutes les données nécessaire pour faire l'ACV sont facilement accessibles pour le concepteur). Mais, s'il faut faire des modifications en profondeur selon le résultat de l'ACV alors toute l'étude peut être à reprendre, dès la phase de conception conceptuelle {Linkov et al, 2009} [13]. De plus, le concepteur reçoit des critiques du type : « il n'existe pas une méthode unique de calculs d'impacts environnementaux acceptée de manière universelle », ce qui donne une raison de plus de ne pas reconsidérer un design finalisé. Les résultats restent encore aujourd'hui des scores environnementaux, difficiles à traduire en critères de conception pour quelqu'un qui n'est pas expert en ACV. Pour rendre les ACV plus accessibles par tous et rendre les résultats exploitables, des

méthodes d'ACV simplifiées ont été imaginées et peuvent servir de guide pour des concepteurs avertis de leurs limitations dues au manque de données disponibles sur le produit.

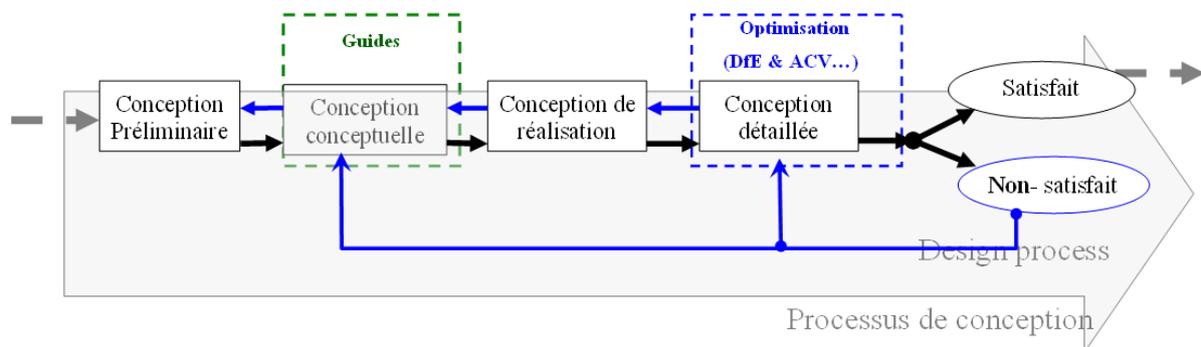


Figure 21. Approche actuelle pour la conception de produits respectueux de l'environnement

On voit bien ici que pour aider le concepteur à comprendre et traduire les contraintes environnementales pendant le processus de conception et pour intégrer les exigences environnementales liées au cycle de vie du produit, la conception de produit a besoin d'être supportée par des outils d'analyse environnementale avec des valeurs quantitatives déterminées et par d'autres outils qualitatifs particuliers qui ont une approche environnementale pendant toutes les phases de conception. On constate également que ces outils doivent facilement être mis en relation avec la connaissance et l'expérience obtenues et les principaux outils de conception que le concepteur utilise pour traiter les problèmes techniques {Perry, 2005}[144], afin de pouvoir être « au plus juste » des évaluation en fonction du niveau de définition du produit. Dans la suite de ce travail, nous nous intéresserons plus particulièrement aux « règles d'éco-conception » (règle DfE) en faisant l'hypothèse qu'elles peuvent favoriser l'évaluation quantitative nécessaire au concepteur tout au long du processus de conception.

Chapitre 3 : Problématique liée à l'utilisation de règles DfE en conception

3.1. Problématique générale

Afin d'aider les concepteurs à considérer l'environnement dans leur projet de conception de produit {Coatanéa et al, 2006} [85], tout en y minimisant le temps consacré, une aide à l'évaluation environnementale doit être mise en place. En effet, la réussite du développement de produit intégrant les exigences environnementales nécessite la capacité de prédire l'impact environnemental du produit sur l'ensemble de son cycle de vie au plus tôt dans le processus de conception {Ehrebfeld, 2000} [114], {Kaebemick et al, 2003} [17] et {Wim Dewulf, 2005} [145]. Ignorer cette intégration au cours du processus de conception peut conduire à de mauvaises décisions qui ne répondront pas aux réglementations et aux mesures environnementales exigées. {Hung et al, 2006} [146], {Bras, 1997} [147] et {Fagnoli, 2008} [148].

Dans ce travail de thèse, nous souhaitons donc répondre à la problématique suivante :

« Trouver une méthode quantitative pour l'évaluation environnementale des produits dès les phases amonts du processus de conception ».

Lors du processus de conception, le concepteur est l'acteur principal qui peut améliorer l'impact environnemental du produit en considérant des règles de conception pour l'environnement (règles DfE) {Alhomsy et Zwolinski, 2009} [11]. Le « Design for Environnement » (ou éco-conception) {Fiksel, 2009} [41] [41] est une approche qui s'inspire des approches génériques DfX, dans lesquelles le « X » représente le point de vue à adopter (DfA : Assembly, DfD : Disassembly, DfM : Manufacturing, DfR : Recycling, □) {Bras, 1997} [147], et {Haoues, 2006} [36]. Lors de ces approches, on utilise des règles DfX afin de guider les concepteurs dans leurs choix de conception orientés « X » {Meerkmm, 2007} [150]. Dans le cas des règles DfE, c'est la prise en compte de l'environnement qui est l'orientation principale du projet de conception.

Pour être effectives, ces règles doivent être spécifiquement intégrées tout au long du processus de conception et particulièrement pendant les phases préliminaires {Fagnoli et Sakao, 2008} [63]. En effet, ces premières étapes sont souvent décisives sur les orientations et les choix de conception, rarement remis en question du fait des délais et des coûts imposés par la concurrence et/ou les consommateurs {DeMendonca et Baxter, 2001} [151]. En conception préliminaire, le concepteur a toujours la possibilité de pouvoir facilement apporter des modifications sur le produit en lien avec les exigences environnementales, les domaines de la connaissance et de la compétence {Lahonde et al, 2010} [142], sur la base de la représentation fonctionnelle du produit. Mais, du fait de la nature de la représentation fonctionnelle {Crow, 2002} [152] qui ne fournit pas de données finalisées et détaillées sur le

produit final, l'implémentation des règles DfE n'est pas simple et rarement effectuée en début de projet {Hauschild et al, 2004} [153] et {Leory, 2009} [154].

Cela nous conduit à la question suivante :

« Comment traduire les exigences et les spécifications environnementales relatives au produit sous la forme de règles quantifiables tout au long des processus de conception. »

3.2. Approche proposée

Dans la bibliographie, il existe plusieurs cas de démarches industrielles intégrant des méthodes de recommandations et d'utilisation de règles liées aux approches d'éco-conception: Apple-Inc. {Apple-Computer-Inc, 2000} [9], EPA {EPA, 2002} [10] et d'autres entreprises comme (Xerox, BMW, Volkswagen, HP, IBM, □ {Yarwood et Eagan, 2003} [133]. De nombreuses expériences industrielles ont fait l'objet de rapports et d'articles : {Hertwich et al, 1997} [48], {Siddhaye et al, 2000} [155], {Hauschild et al, 2004} [153], {Kotelnikov,2004} [156], {Joshi et al, 2006} [111], {Fitzgerald et al, 2007} [157], {Vezzoli et Manzini, 2008} [78], {Fiksel, 2009} [41], {Matsumoto, 2009} [116], {Matsumoto, 2009} [103], {Zameri et saman, 2010} [112] et {Global-Renewables, 2010} [108].

En parallèle, plusieurs chercheurs se sont concentrés sur l'analyse et l'amélioration de ce domaine et de son implémentation : Lindahl {Lindahl, 2006} [22], Ammenberg {Ammenberg, 2005} [115], {Ammenberg, 2005} [66], Froelich [Froelich, 2007} [60] et {Froelich, 2008} [158], Zwolinski {Brissaud et Zwolinski, 2004} [24], {Gehin et al, 2008} [52] et {Alhomsy et Zwolinski, 2009} [11], et {Nielsen et Wenzel, 2002} [99].

A partir de ces expériences les auteurs ont déterminé une liste de caractéristiques nécessaires pour que ces approches d'éco-conception puissent s'adapter au processus de conception actuel. Elles doivent:

- Apporter un réel avantage au processus de conception
- Etre compréhensibles et faciles à utiliser
- Etre adaptables à différents contextes
- Etre rapide à mettre en œuvre
- Ne pas nécessiter beaucoup de coopération
- Ne pas nécessiter trop de données
- Fournir des résultats visuels
- Etre basées sur des techniques informatiques
- Donner des directions à suivre plus que des résultats significatifs

Mais ils n'ont pas identifié à ce jour une approche générique couvrant l'ensemble des règles utilisables en éco-conception.

Nous proposons donc une démarche nouvelle pour l'intégration des règles DfE en conception, reposant sur une évaluation quantitative, avec la mise en place d'indicateurs environnementaux, le plus tôt possible. Ces indicateurs pourront également être utilisés tout au long du processus de conception, jusqu'à la validation finale de la solution retenue. L'objectif de ce travail est de permettre aux concepteurs de faire une évaluation de leur

produit en lien avec les évolutions de la conception. Ainsi, pour chaque étape (phase) du processus de conception, une évaluation des exigences environnementales peut être réalisée pour éviter de trop longues boucles essais/erreurs pendant la conception (figure 22). L'avantage des règles est qu'elles permettent de guider les concepteurs tout en leur laissant de la flexibilité et de la facilité pour proposer des alternatives de solutions.

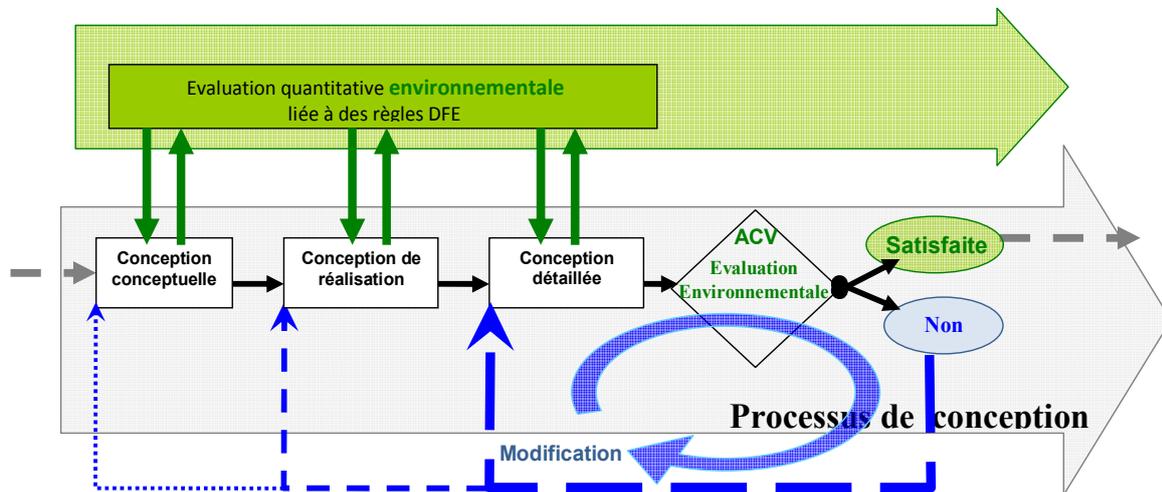


Figure 22. Approche pour intégrer des règles DfE dans le processus de conception

Les indicateurs développés ne seront pas relatifs à une évaluation d'impacts environnementaux (du type ACV) à cause d'un manque de données sur le produit aux étapes de conception préliminaire. Mais une première estimation du profil environnemental du produit sera possible en utilisant les règles DfE. L'objectif ici est de guider les concepteurs au plus tôt vers un bon compromis pour le produit par des estimations simples. Cette approche est nécessaire afin d'éviter des modifications significatives à la fin des études détaillées.

Selon la valeur de l'évaluation environnementale, le concepteur décidera du niveau de modification dont il a besoin pour répondre aux exigences du cahier des charges. L'évaluation proposée supportera quantitativement la décision des concepteurs et ceci avant même de pouvoir réaliser une ACV.

Ainsi :

- Cette démarche va aider le concepteur à faire des diagnostics sur ses alternatives de conception et ceci dès les phases de conception initiales et jusqu'aux phases finales, afin de réduire les boucles essais/erreurs
- La démarche sera supportée par une évaluation quantitative en parallèle de toutes les phases de conception et non plus uniquement lors des phases détaillées, afin de favoriser la mise en usage dès le début de la conception.
- L'évaluation sous la forme d'indicateurs donnera la possibilité d'intégrer les caractéristiques techniques et fonctionnelles qui vont influencer la performance environnementale des produits. L'évaluation ne se limitera pas aux mesures d'impacts relatifs aux ressources et aux émissions comme pour les ACV : des aspects tels que la désassemblabilité du produit par exemple seront eux aussi intégrés lors des évaluations.
- L'évaluation proposée ne remplacera pas d'autres types d'analyses telles que l'ACV mais elle supportera le déroulement des projets d'éco-conception avec d'autres types d'indicateurs

liés aux règles DfE. Ces indicateurs seront quantifiés en lien avec les caractéristiques des produits en cours de développement.

La mise en place de cette méthode va nécessiter (Figure 23) :

- L'adaptation de règles environnementales, pour les rendre utilisables en phases amont de la conception
- La définition d'une méthode pour l'évaluation quantitative des règles qui accompagnera :
- l'évolution du produit au long de sa conception.
- La proposition d'un outil pour l'intégration des règles en conception

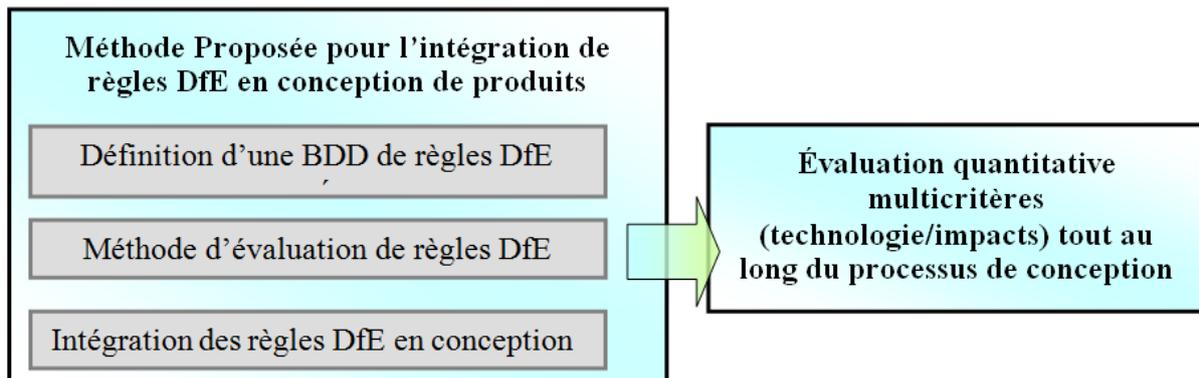


Figure 23. Eléments à mettre en place pour notre méthode d'intégration de règles DfE en conception

3.3. Problématique autour de la définition des règles DfE

Ainsi, il faut réaliser une liste de règles DfE agréée pour notre méthode pour guider les concepteurs et les responsables de l'environnement dans les entreprises lors de la prise de décisions et lors du choix d'alternatives de conception {Resestar, 1998} [159].

La constitution d'une base de données (BDD) de règles DfE utilisable dès les phases amont de la conception dépend en premier lieu de la collecte des règles qui existent aujourd'hui. Ces règles sont issues à la fois des expériences :

- académiques (Centre de recherche, Article, Livre, Conférence internationale, Etudes particulières)
- industrielles et professionnelles (Entreprise, Projet collaboratif, Guidelines pratiques, Normes, Législations)

Les règles issues de ces recherches sont très variées, parfois très générales (améliorer la recyclabilité), ciblées sur une phase du cycle de vie (limiter les déchets en production), techniques (améliorer la modularité), contextuelles (pour les produits X avoir une consommation d'énergie limitée à Y), □

Cette diversité d'objectifs et de niveaux d'implémentation des règles, nécessite de **mettre en place une classification selon des domaines qui vont être compatibles avec les problématiques des concepteurs**. Ainsi, les règles seront plus facilement identifiables et donc utilisable dans les processus de conception. Il est bien entendu que dans le cas d'une implémentation d'outil supportant la méthode finale, il s'agira de laisser la possibilité d'ajouter des règles en fonctions des évolutions en termes de législation mais également en fonction des règles internes à l'entreprise qui ne cessent d'évoluer.

Pour un usage en conception, il va s'agir de traduire ces règles sous une forme exploitable, c'est-à-dire, être capable d'identifier en quoi les variables de conception viennent influencer ces règles. Cette question est d'autant plus importante que l'on sait que ces variables évoluent au cours du processus de conception au fur et à mesure que l'on précise la solution. Il va donc falloir anticiper sur **comment évolue la règle au cours de la conception**, au fur et à mesure que l'on va vers une solution détaillée.

3.4. Problématique liée à la méthode d'évaluation

L'implémentation des règles en conception peut être réalisée à l'aide d'une évaluation quantitative au sens environnemental. Ainsi, **chaque règle DfE peut être traduite sous la forme d'un indicateur** (Indicateur [I_i]) dont la valeur renvoie une indication concernant le niveau d'implémentation de la règle DfE mise en jeu lors de la conception du produit (figure 24).

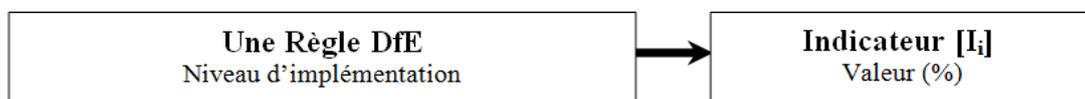


Figure 24. Représentation la Règle DfE par un Indicateur [I_i]

L'objectif ici est d'être capable de faire une **relation entre les éléments évaluable du produit en cours de conception et la règles DfE** (figure 25). Des éléments évaluables sont des caractéristiques issues du modèle produit (Cf. nombre de composants) ou des caractéristiques spécifiques aux évaluations environnementales (Cf. polluants). A noter que les éléments évaluables ne sont pas les mêmes d'une phase de conception à une autre, pouvant être plus ou moins détaillés.

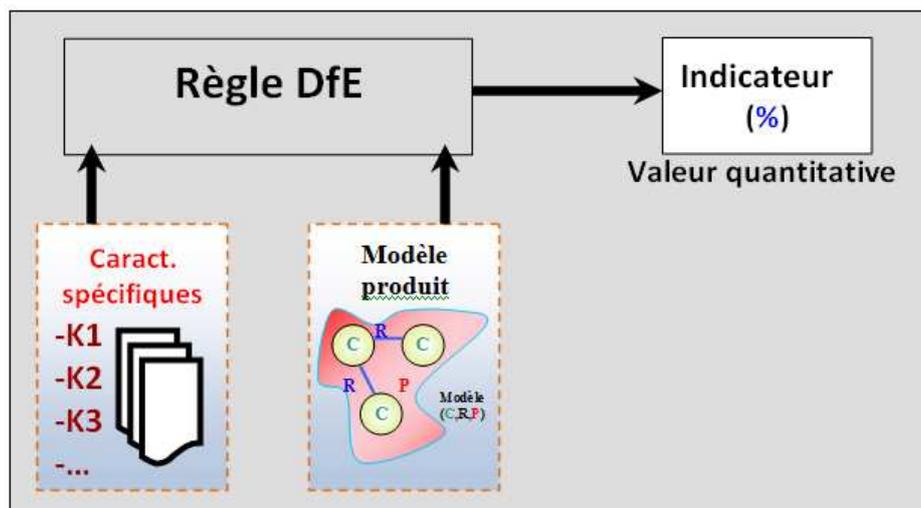


Figure 25. . Traduction des règles DfE selon les éléments évaluables

Les concepteurs peuvent retenir une ou plusieurs règles dans le cadre d'un projet de conception. Dans ce cas, ils se réfèrent à un autre indicateur (Indicateur global [I_{Glo}]) qui représente le **niveau global d'implémentation des règles DfE** choisies lors de la conception

du produit. Ici, la méthode utilise le principe de pondération dans le calcul de l'indicateur global. Le **système de pondération est nécessaire** car les règles ne sont pas toutes du même niveau. Ce système doit dépendre fortement du point de vue du concepteur qui saura prioriser ses objectifs de manière globale.

$$I_{\text{glo}} = \text{intervalle } [0-1] = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} Fi * Ii}{\sum_{i=1}^{i=n} Fi}$$

I_{Glo} : Indicateur global
 Fi : Facteur de pondération
 Ii : Indicateur de niveau d'implémentation la règle

Équation 1. Calcul de la valeur de l'Indicateur global

Un suivi de l'évolution des indicateurs I_i et I_{Glo} doit être mis en place tout au long de la conception afin de tenir compte de l'évolution des connaissances relatives au produit {Alhoms, 2007} [42], {Alhoms et Zwolinski, 2009} [11].

Chapitre 4 : Choix des règles DfE à impliquer dans la démarche de conception

La règle DfE est une règle qu'il faut mobiliser en cours de conception afin de tenir compte des propriétés du produit permettant de limiter ses impacts sur l'environnement. On est alors dans une véritable approche d'éco-conception, visant une amélioration du produit du point de vue de ses impacts sur l'environnement. Le concept de règle DfE est un concept assez récent et les activités de recherche liées à ce domaine ne sont pas très nombreuses. Dans ce chapitre, nous allons présenter comment construire la BDD de règles DfE. Nous allons montrer comment elles peuvent être caractérisées, classées, puis validées comme utilisables par notre méthode. Dans une deuxième partie, nous présenterons une démarche et des outils d'aide au choix des règles par les concepteurs en début du projet de conception.

4.1. Construction d'une BDD de règles DfE

La règle DfE est une règle de conception avec un sens environnementale, c'est-à-dire une règle qui intègre un principe visant à diminuer l'impact du produit sur l'environnement. Ces règles DfE sont issues de la bibliographie académiques (Sites web des centres de recherche, articles, livres, conférences, études □) et des pratiques industrielles (Sites web des entreprises, projets collaboratifs, Guidelines pratiques, Normes et standards, Législations □). Afin de pouvoir caractériser ces règles DfE et les rendre utilisables dès les premières étapes de la conception, nous avons dressé la liste de ces règles à travers l'examen de ces nombreuses ressources (Tableau 4).

Type de Ressources	
1	Centres de recherche
2	Articles
3	Livres
4	Conférences
5	Etudes particulières
6	Entreprises
7	Projets collaboratifs
8	Guidelines pratiques
9	Normes et standards
10	Législations

Tableau 4: Ressources utilisées pour identifier une liste de règles DfE

Chaque règle DfE est associée à un objectif unique, mais pratiquement il y a des règles DfE qui auront la même cible de conception et utiliseront la même stratégie d'amélioration de la performance environnementale. Quelques recherches et des entreprises listent ces règles générales et les classifient selon des critères différents. Certaines références dépendent de la phase de CdV de produit (MP, Production, Transport, Utilisation et FdV) pour guider le concepteur, d'autres sont liées à des impacts environnementaux (épuisement des ressources

naturelles, consommation d'énergie, consommation d'eau, contribution à l'effet de serre), ou encore dépendent de concepts environnementaux (intensité d'utilisation des matières ou de l'énergie, quantité de matériaux recyclés et recyclables, durabilité du produit, éco-conception, conception du cycle de vie). D'autres règles plus génériques offrent au concepteur plus de flexibilité dans la conception (*Ten golden rules*) {Luttrupp et Lagerstedt, 2006} certaines (surtouts données par les entreprises) permettent de donner une bonne image environnementale. Généralement, ces règles sont liées au point de vue commercial ou à certains labels (*energy star, ecolabel, point vert*).

4.1.1.Exemples de Règles DfE

A titre d'exemple, le tableau 5 ci-dessous présente une liste de règles identifiée par Telenko et al. (2008) [160]. Cette liste de règles générales couvre de nombreuses industries. Il a classifié ces règles selon des phases du cycle de vie, afin que cette liste de règles fournisse aux équipes de développement de produit des suggestions pour réduire les impacts environnementaux.

Life Cycle Stage: Materials	
Ensure sustainability of resources	1 Specify renewable and abundant resources. 2 Specify recyclable or recycled materials, especially those within the company or for which a market exists or needs to be stimulated. 3 Layer recycled and virgin material where virgin material is necessary. 4 Exploit unique properties of recycled materials. 5 Employ common and remanufactured components across models. 6 Specify mutually compatible materials and fasteners for recycling. 7 Specify one type of material for the product and its subassemblies. 8 Specify non composites, nonblended materials and no alloys. 9 Specify renewable forms of energy.
Ensure healthy inputs and outputs	10 Install protections against release of pollutants and hazardous substances. 11 Specify nonhazardous and otherwise environmentally "clean" substances, especially in regards to user health. 12 Ensure that wastes are water-based or biodegradable. 13 Specify the cleanest source of energy. 14 Include labels and instructions for safe handling of toxic materials. 15 Specify clean production processes for the product and in selection of components. 16 Concentrate toxic elements for easy removal and treatment.
Life Cycle Stage: Production	
Ensure minimal use of resources in production	17 Apply structural techniques and materials to minimize the total volume of material. 18 Specify materials that do not require additional surface treatment, coatings, or inks. 19 Structure the product to avoid rejects and minimize material waste in production. 20 Minimize the number of components. 21 Specify materials with low-intensity production and agriculture. 22 Specify clean, high-efficiency production processes. 23 Employ as few manufacturing steps as possible. 27Life Cycle Phase: Distribution.
Ensure minimal use of resources in distribution	24 Replace the functions and appeals of packaging through the product's design. 25 Employ folding, nesting, or disassembly to distribute products in a compact state. 26 Specify lightweight materials and components.
Life Cycle Stage: Use	
	27 Implement reusable supplies for ensuring the maximum usefulness of consumables.

<p>Ensure efficiency of resources during product use</p>	<p>28 Implement fail-safes against heat and material loss. 29 Minimize the volume and weight of parts and materials to which energy is transferred. 30 Specify best-in-class, energy-efficient components. 31 Implement default power-down for subsystems that are not in use. 32 Ensure rapid warm-up and power-down. 33 Maximize system efficiency for an entire range of usage conditions. 34 Interconnect available flows of energy and materials within the product and between the product and its environment. 35 Incorporate partial operation and permit users to turn off systems partially or completely. 36 Use feedback mechanisms to indicate how much energy or water is being consumed. 37 Incorporate intuitive controls for resource-saving features. 38 Incorporate features that prevent waste of materials by the user. 39 Use default mechanisms to automatically reset the product to its most efficient setting.</p>
<p>Ensure appropriate durability of the product and components</p>	<p>40 Reutilize high-embedded energy components. 41 Plan for ongoing efficiency improvements. 42 Improve aesthetics and functionality to ensure the aesthetic life is equal to the technical life. 43 Ensure minimal maintenance and minimize failure modes in the product and its components. 44 Specify better materials, surface treatments, or structural arrangements to protect products from dirt, corrosion, and wear. 45 Indicate on the product which parts are to be cleaned/maintained in a specific way. 46 Make wear detectable. 47 Allow easy repair and upgrading, especially for components that experience rapid change. 48 Require few service and inspection tools. 49 Facilitate testing of components. 50 Allow for repetitive disassembly and reassembly.</p>
<p>Life Cycle Stage: Recovery</p>	
<p>Enable disassembly, separation, and purification of materials and components</p>	<p>51 Indicate on the product how it should be opened and make access points obvious. 52 Ensure that joints and fasteners are easily accessible. 53 Maintain stability and part placement during disassembly. 54 Minimize the number and variety of joining elements. 55 Ensure that destructive disassembly techniques do not harm people or reusable components. 56 Ensure that reusable parts can be cleaned easily and without damage. 57 Ensure that incompatible materials are easily separated. 58 Make component interfaces simple and reversibly separable. 59 Organize a product or system into hierarchical modules by aesthetic, repair, and end-of-life protocol. 60 Implement reusable/swappable platforms, modules, and components. 61 Condense into a minimal number of parts. 62 Specify compatible adhesives, labels, surface coatings, pigments, and the like that do not interfere with cleaning. 63 Employ one disassembly direction without reorientation. 64 Specify all joints so that they are separable by hand or only a few, simple tools. 65 Minimize the number and length of operations for detachment. 66 Mark materials in molds with types and reutilization protocols. 67 Use a shallow or open structure for easy access to subassemblies.</p>

Tableau 5: Règles d'éco-conception d'après Telenko et al.[2008]

D'autres règles peuvent être aussi très spécifiques à un domaine ou à une industrie. Giannotta présente ainsi des règles d'éco-conception très générales concernant les matériaux plastiques [Jean-Claude GIANNOTTA, Eco-Conception : possibilités et limites des matériaux, conférence « Les aspects de l'Eco-Conception appliquée aux produits plastiques IPFM, le 21 avril 2005, Club Matériaux, CARMA] [161]:

1. Choix des matériaux et réduction des masses des produits plastiques
2. Amélioration des techniques de production
3. Optimisation de la logistique et des systèmes d'emballage
4. Minimisation des impacts sur l'environnement lors de l'utilisation
5. Stratégie de la durabilité
6. Valorisation finale

Puis il détaille certaines d'entre elles en lien avec le domaine des matières plastiques :

- 100 % plastiques en mono matériau
- Plastiques : 100 % recyclables dans les filières existantes
- Réutilisation systématique des surplus plastiques (carotte, bavures, rebus...) dans d'autres produits
- Réduction des masses des produits plastiques

Le tableau 6 ci-dessous présente les règles d'éco-conception de chez Schneider. Dans leur guide d'éco-conception [Règles déco-conception chez Schneider electric (internet 2001-2005), un chapitre est consacré aux règles d'éco-conception qui peuvent être générales ou spécifiques à leurs métiers. Il est souligné que ces quelques critères de conception définis à chaque phase du cycle de vie d'un produit, ainsi que les quelques exemples d'applications qui en découlent, n'ont pas la prétention de résoudre l'ensemble des cas d'éco-conception. Leur but principal est simplement d'alimenter la réflexion du concepteur. Néanmoins, il faut souligner que par leur simple formalisation, ces règles peuvent fortement influencer la conception de produit [162].

Règles générales
<ul style="list-style-type: none"> * Préservation et usage efficace des ressources naturelles. * Minimisation des émissions (effet de serre, bruit, etc.). * Minimisation des déchets (fabrication, fin de vie). * Suppression ou minimisation de l'utilisation des substances dangereuses. * Réduction de la consommation d'énergie.
Le choix des matériaux
<ul style="list-style-type: none"> * Réduction de la masse et du volume de matière utilisée : <ul style="list-style-type: none"> - <i>optimisation du volume et de la masse des pièces et des produits</i> - <i>réduction du nombre de pièces</i> * Choix de matériaux pas ou peu toxiques : <ul style="list-style-type: none"> - <i>en phase d'extraction, de production, d'utilisation, d'élimination (fin de vie)</i> * Choix de matériaux produits à partir de ressources renouvelables : <ul style="list-style-type: none"> - <i>afin de ne pas épuiser les ressources naturelles non renouvelables</i> * Choix de matériaux peu consommateurs d'énergie : <ul style="list-style-type: none"> - <i>en phase d'extraction de la matière première, d'élaboration du matériau, voire d'utilisation</i> * Utilisation de matériaux recyclés : <ul style="list-style-type: none"> - <i>l'impact environnemental est alors celui du recyclage et non plus celui de</i>

<p>L'élaboration</p> <ul style="list-style-type: none"> * Utilisation de matériaux recyclables : <ul style="list-style-type: none"> - dans l'optique de la valorisation fin de vie du produit
La production
<ul style="list-style-type: none"> * Réduction des rejets vers l'environnement (eau, sol, air) : <ul style="list-style-type: none"> - <i>choix de techniques de production minimisant les rejets vers l'environnement.</i> <i>Exemple : éviter si possible les traitements de surface</i> * Minimisation de la consommation d'énergie à toutes les étapes de la production : <ul style="list-style-type: none"> - <i>choix de techniques de fabrication, de montage, d'assemblage peu consommatrices d'énergie.</i> * Réduction du volume de déchets (usinage, découpe, moulage, etc.). <ul style="list-style-type: none"> <i>Exemple :</i> <ul style="list-style-type: none"> - <i>conception de pièces minimisant les chutes de matières</i> - <i>réutilisation des carottes de moulage</i> - <i>réduction des rebuts</i> * Réduction du nombre d'étapes de production. <ul style="list-style-type: none"> <i>Exemple : minimisation du nombre de pièces différentes</i> * Minimisation des transports entre les différentes étapes : <ul style="list-style-type: none"> - <i>minimisation du volume des transports inter usines (pièces, sous-ensembles)</i> - <i>minimisation de la consommation d'énergie liée aux transports</i> * Utilisation de nouvelles techniques de production : <ul style="list-style-type: none"> - <i>nouvelles techniques dont l'impact environnemental est réduit par rapport aux techniques classiques</i> - <i>techniques de type BAT (Best Available Technique)</i>
La distribution
<ul style="list-style-type: none"> * Diminution de la masse et du volume des emballages : <ul style="list-style-type: none"> - <i>réduction du volume et de la masse des produits</i> - <i>optimisation de la fonction emballage</i> * Réduction du nombre d'emballages : <ul style="list-style-type: none"> - <i>emballages communs à plusieurs produits</i> * Choix d'emballages plus propres : <ul style="list-style-type: none"> - <i>teneur minimale en métaux lourds (plomb cadmium, mercure, etc.)</i> * Conception d'emballages réutilisables/valorisables : <ul style="list-style-type: none"> - <i>valorisation de 50 à 65 % en poids</i> - <i>éviter les emballages hétérogènes (carton, mousse, etc.)</i> * Optimisation/minimisation des transports : <ul style="list-style-type: none"> - <i>minimisation des masses et volumes à transporter</i> * Choix de transports moins consommateurs d'énergie
L'utilisation
<ul style="list-style-type: none"> * Minimisation de la consommation d'énergie en phase d'utilisation du produit : <ul style="list-style-type: none"> - <i>consommation dans les contacts électriques (résistance de contact, soudures, etc.), dans les bilames</i> - <i>consommation des organes de commande (électroaimants, etc.)</i> - <i>puissance dissipée dans les composants électroniques, etc.)</i> * Minimisation des fuites et rejets vers l'environnement : <ul style="list-style-type: none"> - <i>réduction du bruit</i> - <i>minimisation des fuites (SF6 par exemple)</i> * Accroissement de la durabilité des produits. * Maintenance et réparations facilitées : <ul style="list-style-type: none"> - <i>amélioration de la fiabilité des produits</i> - <i>liaison client (pré-alarme, etc.)</i> - <i>modularité des produits.</i>
La fin de vie
<ul style="list-style-type: none"> * Désassemblage facile du produit :

- éviter l'emploi de systèmes d'assemblage non démontables
- modularité du produit
- * Réutilisation de sous-ensembles/composants :
- favoriser la modularité du produit
- * Réparation/remise à neuf du produit (2ème main).
- * Recyclage des matériaux :
- marquage des pièces plastiques (voir directive technique FT 20 050)
- minimisation du nombre de matériaux différents
- * Choix de matériaux non toxiques incinération.
- * Démontage aisé des composants toxiques et/ou à traitement spécifique :
- permettre une accessibilité et un démontage rapide des piles, relais mercure, cartes électroniques, écran LCD, etc.
- * Mise en sécurité aisée du produit (ressorts sous tension, etc.).
- * Notice de fin de vie accompagnant le produit.

Tableau 6: Règles d'éco-conception chez Schneider Electric

On constate que pour chaque groupe de règles DfE il existe des sous groupes relatifs à des points techniques spécifiques pour guider le concepteur plus précisément pendant la définition du produit. En effet, ces règles guident les concepteurs lors de la prise en compte de l'environnement mais également dans d'autres domaines relatifs à la conception de produit (remanufacturing, désassemblage, maintenance, etc.). Elles sont définies selon des guides pratiques de conception et traduites pour être adaptées aux données disponibles en phase de conception conceptuelle. Ainsi, nous avons identifié deux types de règles : les règles techniques et les règles environnementales en réponse à la fois aux exigences fonctionnelles et environnementales définies dans le cahier des charges du produit. La liste suivante propose des exemples de ces règles :

- **Choisir les bons matériaux :** L'objectif dans ce groupe de règles est de guider le concepteur dans son choix de matériaux et de déterminer l'effet de ces choix sur l'ensemble du produit.
 - **Règles techniques :** □ Minimiser le nombre de types de matériaux dans le produit □
 - **Règles environnementales :** □ Adapter le choix des matériaux au cycle de vie des produits □
- **Améliorer les processus de fabrication :** L'objectif dans ce groupe de règles est d'optimiser l'utilisation de la matière et de l'énergie utilisées dans les processus de fabrication en préconisant des stratégies de production propres.
 - **Règles techniques :** □ Utiliser des pièces et composants standardisés pour faciliter l'assemblage □
 - **Règles environnementales :** □ Éviter l'utilisation de matériaux toxiques dans les processus □
- **Améliorer le transport :** L'objectif de ce groupe est d'améliorer les impacts liés aux emballages et au transport.
 - **Règles techniques :** □ Adopter des formes modulaires standards pour des emballages réutilisables », □ Utiliser des matières premières recyclables pour les emballages □
 - **Règles environnementales :** □ Réduire les distances de transport □
- **Améliorer l'usage du produit :** L'objectif est de minimiser l'impact du produit et de ses consommables en usage.
 - **Règles techniques :** □ Minimiser la consommation d'énergie lors de l'usage □
 - **Règles environnementales :** □ Augmenter la durée de vie du produit en concevant des produits pour plusieurs cycles d'usage », □ Étendre l'usage du produit à plusieurs utilisateurs dans la même phase d'usage »

- **Augmenter la durée de vie du produit** : L'objectif de ce groupe de règles est de minimiser les déchets en adoptant des stratégies de gestion des produits et matériaux en flux bouclés.

- **Règles techniques** : « Améliorer le désassemblage du produit ».

- **Règles environnementales** : « Préférer des cycle de vie bouclés »

Ainsi, les règles techniques et environnementales peuvent être définies de la façon suivante :

Règles techniques

Les règles techniques sont utilisées pour répondre aux exigences techniques qui doivent être respectées par le produit durant son cycle de vie, afin qu'il soit moins impactant pour l'environnement. Quand le concepteur définit le type de produit à concevoir (mécanique, électrique, électronique, ...) et propose un scénario de fin de vie, il a besoin de règles pour le guider dans la conception et pour prendre en compte des aspects techniques spécifiques. Ces règles indiquent des préconisations générales relatives aux matériaux des composants, à la structure du produit, aux directions d'assemblage / désassemblage, aux techniques de fixation, aux polluants, ... Ces règles sont issues des approches DfX telle que la conception pour le désassemblage (DfD), la conception pour le remanufacturing (DfRem). Elles doivent guider le concepteur lors de la prise en compte des exigences techniques pour chaque phase du cycle de vie du produit : pour la proposition de matières premières, afin de choisir des process propres, jusqu'à la définition des stratégies de fin de vie.

Règles environnementales

Nous avons vu que les règles techniques permettent de proposer des idées techniques, de résoudre des problèmes techniques, pour trouver des solutions fonctionnelles, pour adapter des approche de type « conception pour le remanufacturing ». Les règles environnementales sont plus liées aux exigences et recommandations liées à l'environnement. Elles font référence aux exigences du cycle de vie pour l'ensemble du produit : consommation d'énergie, impact environnemental, scénario de fin de vie, durée de vie du produit [6] . Elles doivent aider les concepteurs à considérer les exigences environnementales dans chaque phase de vie du produit. La mise en place de ces règles a pour objectif d'améliorer la prise en compte de l'environnement en phase de conception conceptuelle en donnant des objectifs à atteindre aux concepteurs, qui ne sont pas uniquement liés à des performances techniques.

4.1.2. Domaines d'implémentation des règles DfE

Les exemples précédents montrent que les règles DfE peuvent être classées selon les phases du cycle de vie des produits, selon les types de produits (électronique, plastique, automobile, ...), selon leur orientation environnementale ou technique. D'autres essais ont été réalisés pour classifier les différentes règles DfE. Un premier exemple concerne les règles visant à minimiser la toxicité et la pollution. Trois grandes catégories de règles sont utilisées selon :

- Le principe de prévention / réduction
- Le principe d'amélioration / Augmentation
- Les principes de rupture : nouvelles technologies et R&D

Prévention / Réduction	Amélioration (augmentation)	Techno / R&D
Minimiser le nombre de matériaux polluants du produit	Regrouper les composants polluants ensemble dans le produit	Utiliser les technologies moins polluantes pendant la production

Tableau 7: Classification des règles selon le niveau de décision en conception

A noter que ces principes peuvent finalement s'appliquer à toutes les règles DfE.

Un autre exemple de classification concerne les principes de:

- Réduction de la consommation de matière,
- Réduction de la consommation d'énergie,
- Valorisation des scénarios fin de vie du produit.

L'idée ici est bien de couvrir l'ensemble des processus au travers de l'examen des entrants et des sortants du système (Figure 24).

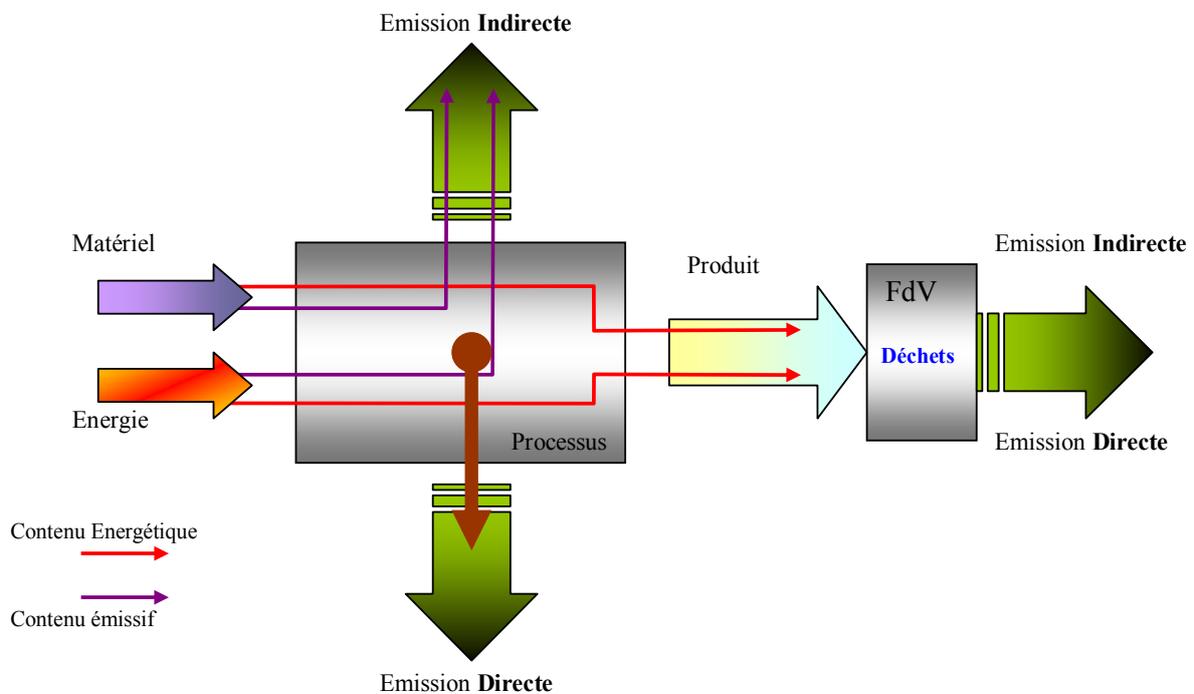


Figure 26: Eléments à considérer pour définir les impacts environnementaux du produit

A partir de ces trois principes, on peut obtenir la classification suivante de règles DfE (tableau 8). Les exemples identifiés de règles sont utilisés pour améliorer la performance environnementale du produit selon des contraintes externes à l'entreprise : réglementation RoHs, REACH, □, réglementation EuP, réglementation DEEE, VHU, □, Eco-labels, marketing, □ ou pour répondre à des objectifs internes à l'entreprise en lien avec les stratégies écologiques et les standards adoptés par l'entreprise: Amélioration du produit (désassemblage, marquage, □), diminution des impacts environnementaux, optimisation du cycle de vie, □

Réduire la consommation de matière	Réduire la consommation d'énergie	Scénario fin de vie du produit
Minimiser la variété (diversité) de matériaux dans le produit. (Utilisation de mono-matériaux pour les composants dans le produit)	Réduire la forme (Dimension) des pièces pendant la distribution (Énergie_Transport)	Les composants polluants doivent être les premiers éléments à désassembler (FdV_G.déchets)
Choisir des matières recyclables comme matières premières (Matières_Choix de matière)	Utiliser la technologie la moins consommatrice d'énergie pendant la production. (Énergie_Production)	Minimiser la variété de scénarios FdV des composants dans le même produit (FdV_Scénario)
Choisir des matières recyclées comme matières premières (Matière_Choix de matière)	Choisir des matières moins denses pour les composants mobiles (pendant l'usage). (Énergie_Utilisation)	Diminuer le nombre des outils nécessaires pour désassembler les composants polluants (FdV_Pollution)
Choisir des matières biodégradables (ou renouvelables) comme matières pour l'emballage (Matière_Transport)	Choisir des matières moins énergivores (Énergie_Choix de matière)	Le type de relation entre les composants doit être facilement déconnecté. (FdV_Désassemblabilité)
Utiliser des matières premières compatibles pour le recyclage (Matière_Choix de matière)	Réduire la consommation d'énergie pour traiter les déchets (Énergie_G.déchets)	Diminuer le nombre de directions de désassemblage des composants polluants. (FdV_Désassemblabilité)
Minimiser le taux des matières polluantes dans le produit. (Matière_Choix de matière/pollution)	Améliorer la consommation en mode "veille" pour les produits électriques (Énergie_Utilisation)	Éviter les associations irréversibles entre des matériaux différents. (FdV_Désassemblabilité)
Choisir des matières écologiques, récupérables, « propres ». (Matière_FdV / R&D/ N. technologie)	Utiliser des technologies moins consommatrices d'énergie pendant la production (Énergie_Utilisation)	Diminuer le nombre d'outils nécessaires pour désassembler le composant. (FdV_Désassemblabilité)
Remplacer le produit physique par un produit non-physique / par un service (Matière_Utilisatio/service)	Utiliser des sources d'énergie plus propre (Énergie_source d'énergie)	Maximiser le taux de valorisation fonctionnel (remanufacturing) (FdV_Remufacturing)

Tableau 8: Classification de règles selon énergie/matériaux/fin de vie

Selon que les concepteurs maîtrisent une phase de cycle de vie (fin de vie) une technologie (injection plastique), une dimension environnementale (énergie), □, ils auront tendance à mieux connaître et donc mieux utiliser les règles DfE relatives à ce domaine de compétences.

Ainsi, il nous semble important de considérer cette dimension « domaine » de compétence en parallèle des objectifs environnementaux « affichés » par le groupe projet, afin d'aider à la classification puis au choix des règles DfE.

En nous appuyant sur la recherche bibliographique, nous avons pu identifier les domaines suivants qui interrogent la classification des règles DfE (tableau 9). Cette liste de thèmes n'est bien entendue pas exhaustive et peut être complétée.

Domaines Principaux
Cycle de Vie du produit
Toxicité et Pollution
Consommation des ressources
Type de produit
DfX
Maintenance et Upgrading
Dev.Dur & Eco-Innovation

Tableau 9: Domaines identifiés pour la classification des règles DfE

On a deux catégories de domaines, qui se distinguent du fait de leur incidence directe ou non sur l'impact environnemental des produits. Il y a les domaines relatifs à l'environnement :

- Phases de CdV
- Consommations de ressources (matériaux, énergie)
- Emissions atmosphériques (la pollution l'air)
- Production de déchets
- Valorisation du produit en fin de vie (récupération)
- Processus de production (fabrication, emballage, □) etc.

Il y a les domaines relatifs à la conception pour l'environnement :

- Types de produits et les législations liées (automobile, produit électrique/électronique, produit jetable□),
- Demandes du marché (Eco-Commerce, Eco-Client, Eco-image,□),
- Approches de conception : Design for X

En examinant les objectifs environnementaux et les domaines de compétence, on va pouvoir mieux identifier les expertises des concepteurs et ainsi identifier les règles DfE à mettre en place au sein du groupe de travail et qui vont influencer d'une façon directe ou indirecte la performance environnementale du produit.

Ces règles n'ont bien évidemment pas les mêmes niveaux d'importance, selon qu'elles soient issues de la législation, prioritaires pour l'entreprise, directement relative à l'environnement ou au domaine de la conception.

La figure 25 décline les domaines suivant différentes sous-catégories de domaines (figure 25) que l'on va retrouver au cours de projets de conception.

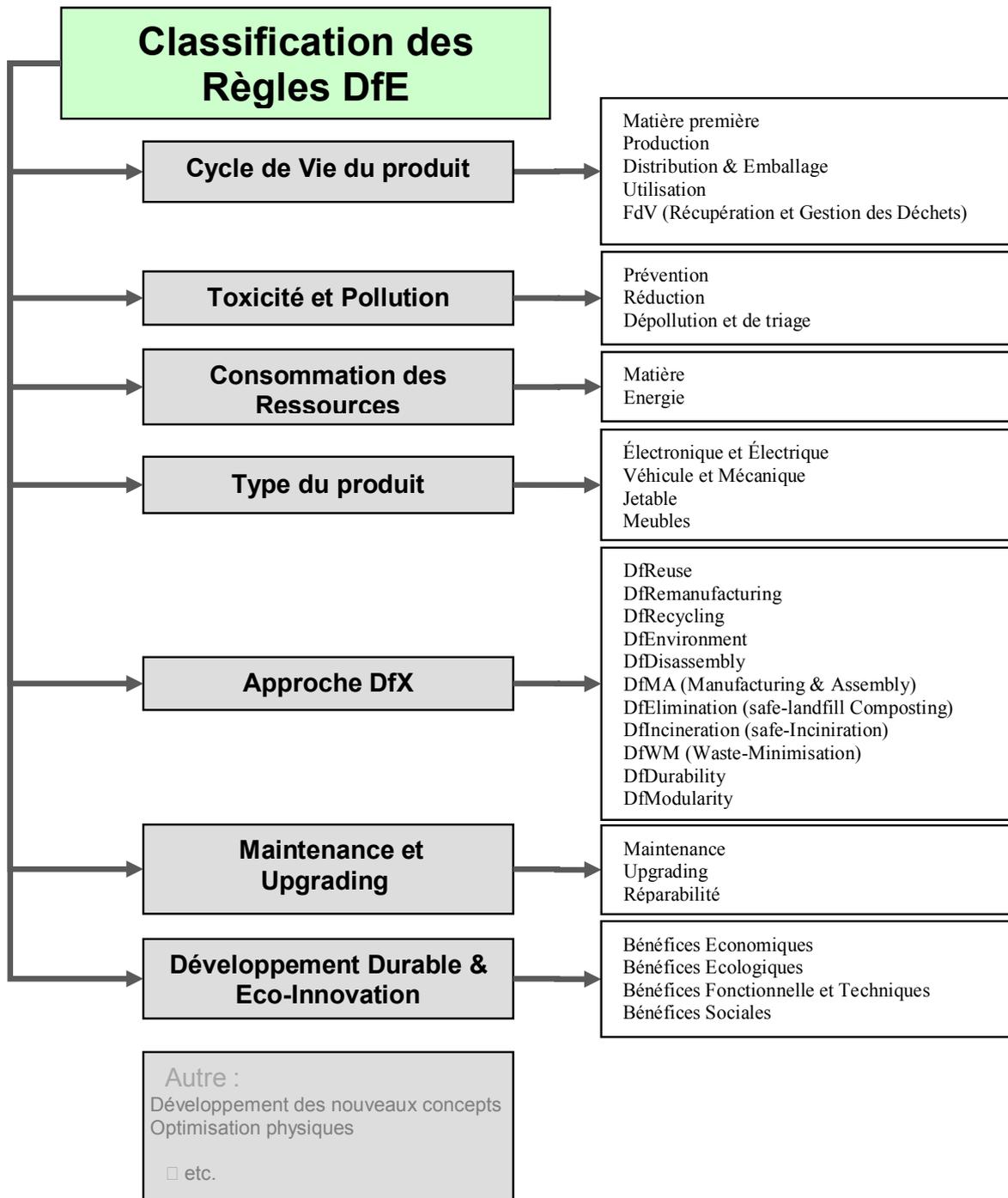


Figure 27: Les domaines d'implémentation des règles DfE

Le tableau 10 ci-dessous donne un exemple de classification, mêlant les aspects cycle de vie, les niveaux de prise de décision, les objectifs environnementaux et les domaines d'intervention requis.

Domaine	Objectif	Principe		
		Prévention et Réduction	Précaution (Amélioration / Augmentation)	Autre Conception / R&D
Matériel (Consommation des Ressources)	Choix des matériaux	Minimiser le nombre de matériaux constitutifs du produit	Utiliser de la matière première compatible au recyclage	Choisir des matières compatibles avec les processus appliqués en fin de vie du produit
Energie	Réduire la consommation d'énergie	Réduire la consommation d'énergie pendant la production	Optimiser la consommation pendant l'utilisation	Utiliser les sources d'énergie les plus propres
Pollutions	Eviter les dommages	Minimiser le taux des matières polluantes dans le produit,	Garder des composants polluants ensemble dans le produit	Utiliser des matières polluantes recyclables
Gestion des déchets (Fin de vie)	Recyclabilité	Minimiser la diversité des matériaux dans le produit	Choisir des matériaux compatibles à recycler ensemble	Utiliser des matières compatibles au recyclage
Gestion des déchets (Fin de vie)	Dégradation	Minimiser le nombre des matières non-recupérées dans le produit	Choisir de matières (Dégradables) pour les matières non recyclables et consommées pendant la production de produit	Adapter la stratégie "Cleaner Production" mais pas « end of pipe »
Bénéfices Fonctionnelles et Techniques	L'optimisation de la fonctionnalité du produit	Réduire l'espace nécessaire au rangement du produit	Réaliser des produits adaptés à une utilisation intensive	Prévoir l'évolutivité technologique du produit
Réparabilité	L'amélioration de l'entretien, la maintenance et la réparabilité	Réduire le processus de nettoyage	Améliorer la forme des composants pour faciliter le nettoyage	Concentrer l'usure sur des pièces interchangeable
Maintenance	L'amélioration de L'accessibilité à la pièce	Minimiser le temps global d'accessibilité pour atteindre les composants cibles	Améliorer la désassemblabilité de s produits	Assurer un accès facile aux composants pour permettre les réparations et les remplacements
Df Disassembly	L'amélioration de la désassemblabilité	Minimiser le temps global de séparation pour atteindre les composants cibles,	Améliorer le type de relations entre les composantes pour être faciles à déconnecter.	Réduire le temps des étapes de démontage

4.1.3. Bilan sur les règles DfE

Au regard de l'ensemble de règles examinées, nous avons pu établir une liste des caractéristiques générales pour les règles DfE :

- La règle DfE est adaptée aux principes des approches d'éco-conception qui visent une meilleure prise en compte de l'environnement lors de la conception et constitue un support permettant l'orientation des activités de conception
- Elle cible un objectif parmi un ensemble d'objectifs environnementaux
- Elle peut être environnementale ou technique
- Elle décrit les objectifs de manière littérale en termes compréhensibles par les concepteurs, afin d'être intégrées au processus de conception
- Cette règle DfE a pour objectif la prévention, la réduction et/ou l'amélioration des impacts environnementaux
- La règle DfE est issue de ressources académiques ou de pratiques industrielles
- La règle DfE appartient à un domaine d'implémentation
- La Règle DfE a une importance relative à son contexte d'utilisation et doit pouvoir être valorisée dans le processus de conception en fonction de ce contexte.

Ces éléments doivent ainsi être pris en compte dans la méthode de conception (Figure 26).

Méthode d'Eco-Conception supportée par les règles DfE

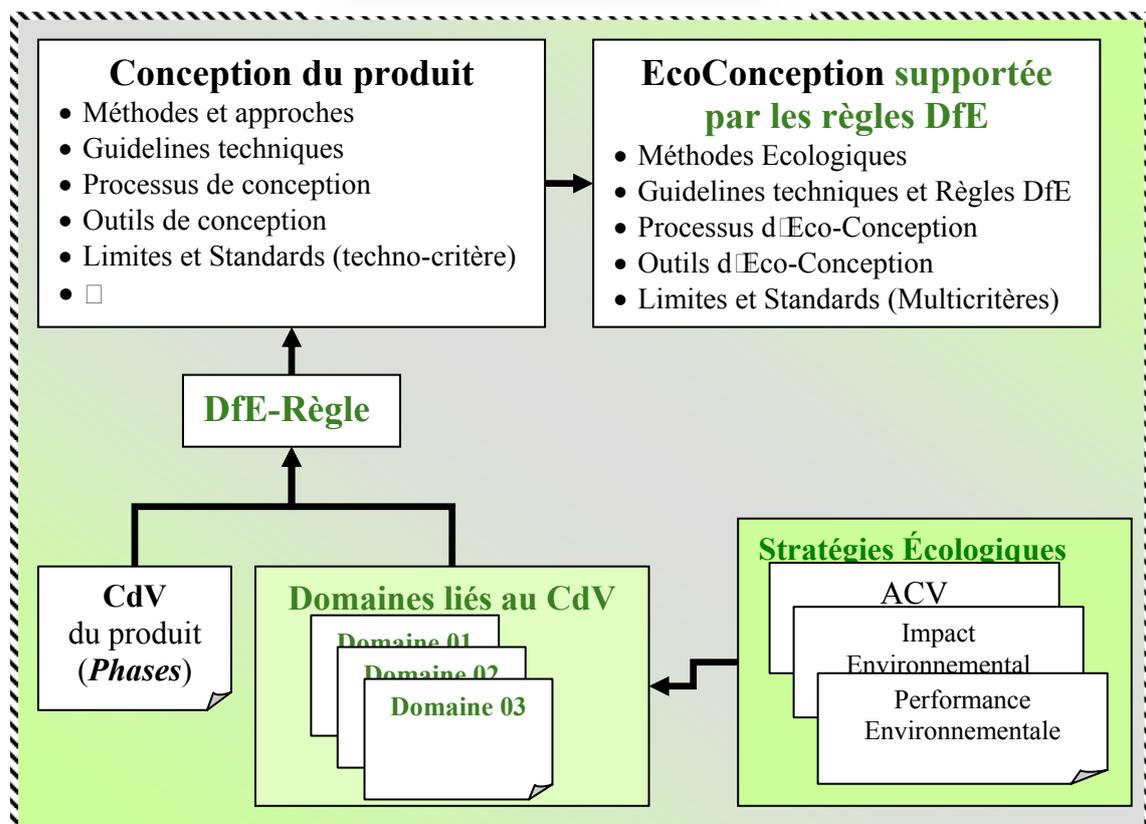


Figure 28: Concept général de la méthode proposée intégrant les règles DfE

En effet, la mise en évidence des stratégies/objectifs de l'entreprise, des domaines que les concepteurs maîtrisent et des phases de cycle de vie qui doivent être mise en avant, conduisent à une sélection de règles pouvant être considérée avec attention dans le processus

de conception. Néanmoins, afin de favoriser cette prise en compte et compte tenu des pratiques observées, il nous faut mettre en place les caractéristiques/propriétés suivantes :

- La règle DfE doit pouvoir être traduite sous la forme d'un indicateur mesurable tout au long du processus de conception. L'indicateur utilisé devant renvoyer une valeur ayant un sens par rapport à l'environnement (Cf. désassemblage pour le recyclage).
- Il faut pouvoir tenir compte du niveau d'exigence relatif à l'application de la règle (législation vs. recommandation générale),

Dans le paragraphe suivant, nous verrons comment cette sélection de règles peut être assistée dans un processus de conception. Le chapitre 5 détaillera comment les règles peuvent être traduites sous forme d'un indicateur, puis évaluées en cours de conception.

4.2. Le choix des règles DfE impliquées

Le choix des règles DfE est propre aux concepteurs. Néanmoins, nous proposons de l'aider dans ses choix au travers d'une démarche en trois temps (figure 27) qui va le conduire à définir ses objectifs environnementaux et à choisir ses domaines d'intervention pour aboutir à un choix de règles optimisé.

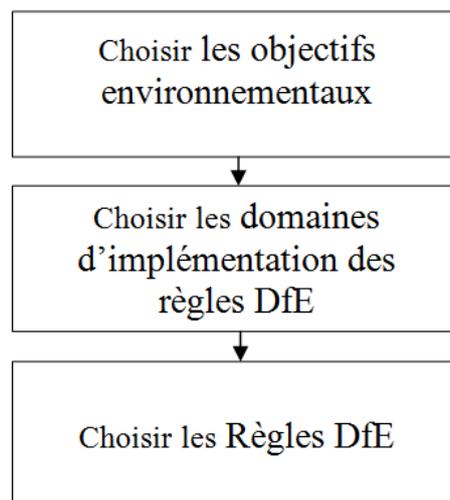


Figure 29: Les principales étapes conduisant au choix des règles DfE

4.2.1. Choix des objectifs environnementaux

Les objectifs environnementaux sont des concepts environnementaux adaptés aux caractéristiques environnementales qui sont à intégrer dans la conception du produit. Ils sont décrits comme des règles DfE générales, c'est-à-dire qu'ils se présentent comme des règles DfE pouvant englober de nombreux sous-objectifs. Choisir des objectifs environnementaux constitue un premier pas vers le choix de la liste des règles DfE utilisables pendant la conception du produit. En effet, ces objectifs dépendent des concepts environnementaux que le concepteur veut intégrer dans la conception de produit. On va donc retrouver ces objectifs au niveau du cahier des charges initial du projet.

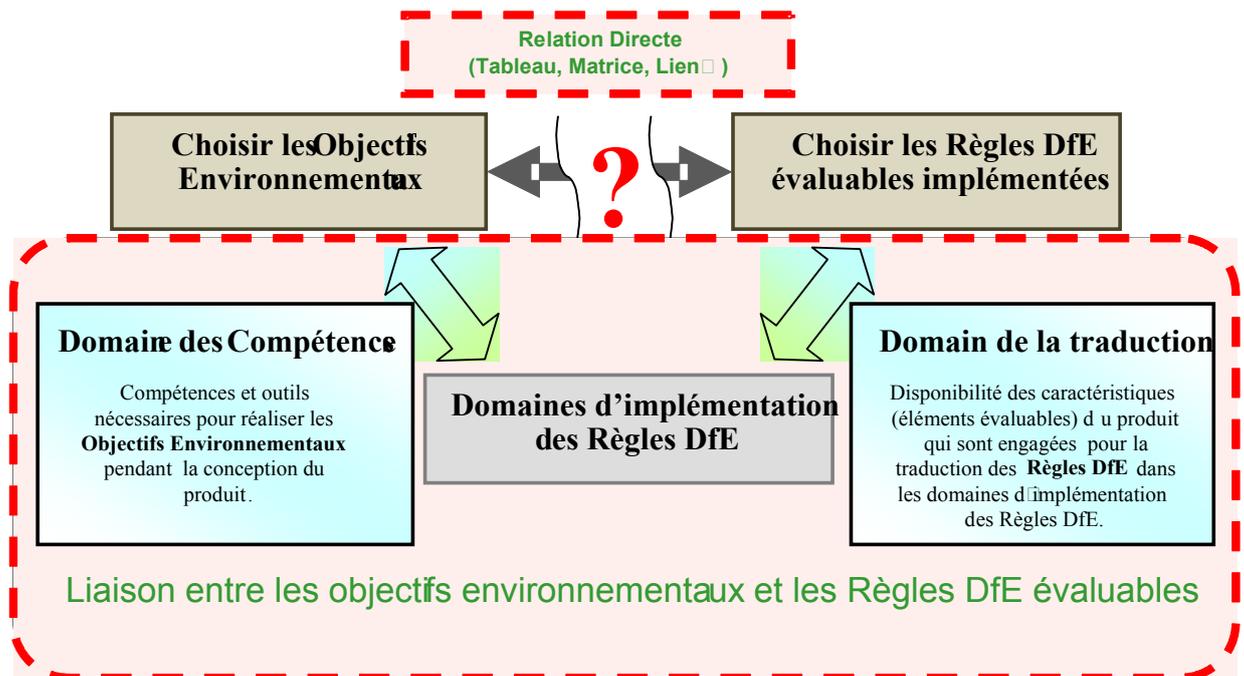
Ces objectifs peuvent apparaître suite au choix d'une stratégie d'adaptation de l'entreprise. En effet, le niveau managérial de l'entreprise peut mettre en place des orientations spécifiques, selon une orientation «environnementale» qui s'intègre avec le secteur d'activité et le message de l'entreprise (Stratégies Ecologiques, politique de récupération, diminution des émissions de gaz, innovation, etc.). Sous ces stratégies d'adaptation on peut décliner un ou plusieurs objectifs environnementaux (tableau 11). Le concepteur va décider d'un ou plusieurs objectifs environnementaux selon le nombre des concepts environnementaux ciblés à intégrer dans la conception du produit.

Stratégies d'adaptation	Liste des Objectifs Environnementaux
Récupération	<ul style="list-style-type: none"> Améliorer la compatibilité des matériaux (Recyclage - Incinération) Améliorer le broyage / <i>Shredding</i> Améliorer la ré-assemblabilité Améliorer la récupération énergétique Améliorer la récupération fonctionnelle Améliorer la récupération massique Améliorer la recyclabilité Améliorer la remanufacturabilité Améliorer la réutilisation Améliorer l'assemblabilité Améliorer l'entretien
technique (Désassemblabilité,...)	<ul style="list-style-type: none"> Améliorer la démontabilité des relations entre les composantes Améliorer la désassemblabilité du produit Améliorer l'accessibilité à la pièce (composant) cible
Produit	<ul style="list-style-type: none"> Améliorer la fiabilité de produit Améliorer le choix de matière durable (Renouvelable) Améliorer la durabilité du produit Améliorer la maintenance Améliorer la modularité produit / pièce Améliorer la réparabilité Améliorer le system de codage Optimiser la fonctionnalité du produit Optimiser le volume produit Réduire la diversité des matières utilisées
Pollution	<ul style="list-style-type: none"> Améliorer la séparation des polluants (composant avec matière polluante et/ou dangereuse) Optimiser la concentration de dommage de pollution Réduire l'utilisation de matières polluantes Réduire le niveau de toxicité (pollution) des matières utilisées
Stratégie Ecologique	<ul style="list-style-type: none"> Améliorer les conditions de transport du produit Améliorer les conditions d'emballage du produit Améliorer le processus de production Améliorer l'utilisation des matériaux recyclés Améliorer le scenario de FdV de produit (Choisi - Proposé) Optimiser la consommation de matières Améliorer le choix de matières écologiques, récupérées, récupérables (<i>Cleaner Materials</i>) Valorisation de la stratégie de Conception pour l'environnement -DfE (<i>Design For Environment</i>) Valorisation de la stratégie de production propre (<i>Cleaner Production</i>)
Moins Impactés	<ul style="list-style-type: none"> Améliorer le choix des matériaux plus écologiques (<i>Moins Impactés</i>) Améliorer la dégradabilité du produit Eviter les dommages sur l'environnement et l'homme
Energie	<ul style="list-style-type: none"> Améliorer l'utilisation des sources d'énergie plus propres Optimiser le mode de consommation d'énergie Réduire la consommation d'énergie Réduire l'énergie potentielle dans le produit
Emission de gaz	<ul style="list-style-type: none"> Réduire les émissions de gaz CO2 Réduire l'émission de fluides et gaz à effet de serre ou nuisant à la couche d'ozone

Le
les
S
d'a
Ré
T
E
I
Straté

4.2.2. Choix des domaines d'implémentation des Règles DfE

Actuellement, il n'y a pas de méthode pour établir une relation entre objectifs environnementaux et règles DfE. L'objectif ici est de proposer une interface pour établir ces liens et limiter le champ des possibilités. On va ainsi utiliser le concept de domaine lors de l'examen des relations entre « Objectifs Environnementaux » et « Règles DfE » pour limiter les choix possibles (figure 30).



Le premier élément de mise en relation (**Domaine-Objectif**) permet d'identifier, par rapport à un objectif fixé de l'entreprise, quelle est la compétence disponible dans l'équipe de conception (Connaissance, Outil, Méthode de calcul) pour réaliser les objectifs environnementaux. Ainsi, l'engagement entre les domaines et les objectifs environnementaux peut être matérialisé comme montré dans le tableau 13: [1] représente une relation directe, [Non] représente le fait qu'il n'y a pas de relation et [X] représente le fait qu'il existe un lien mais indirect.

Valeur de l'engagement	
1	Engagement Direct
X	Engagement Non-Direct
Non	Pas d'Engagement

Tableau 13: Valeur de l'engagement du domaine vis-à-vis des objectifs environnementaux

Dans le tableau 14 suivant, nous avons réalisé une liste d'objectifs que l'on peut potentiellement retrouver au niveau d'une entreprise. Nous avons alors établi les liens entre objectifs et domaines en utilisant les valeurs d'engagement décrites précédemment. Ce tableau montre la diversité des domaines qui sont potentiellement capables d'être considérés dans le processus de conception pour réaliser les objectifs environnementaux choisis.

A partir de cette liste, le concepteur sélectionne les domaines engagés en relation avec les objectifs sélectionnés, d'après son expertise, (compétences, méthodes, moyens, approches et outils disponibles pendant la conception du produit). Pour chaque relation existante, il confirme ou non l'engagement puis sélectionne les domaines à engager.

Il est entendu que la combinaison des domaines choisis doit couvrir l'ensemble des objectifs environnementaux fixés par l'entreprise. Un des objectifs pour l'entreprise peut donc être de minimiser le nombre d'expertises (et donc de moyens) à mettre en œuvre pour couvrir l'ensemble des objectifs fixé.

Dans notre exemple, les 4 domaines choisis par les concepteurs sont : Matière Première, Scenario Fin de vie du produit, Consommation de Matière, DfRecycling. Ils ont été choisis ici en fonction du lien fort avec les objectifs du projet et départagés du fait de l'expertise des acteurs présents qui sont des experts sur l'amélioration de la fin de vie et la recyclabilité de produit et qui ont des compétences non négligeables sur le choix des matières et leur niveau de consommation.

Stratégie d'adaptation		Liste des Objectifs Environnementaux Finaux				Matière Première				Production				Utilisation du produit				Scenario Fin de vie du produit				Prévention (Dommage-Déchets)				Réduction (Dommage-Déchets)				Dépollution				Consommation de Matière				Consommation d'Énergie				Produit-Électronique et Électrique				Produit-Véhicule et Mécanique				Produit-Jetable				Produit-Meubles				DfReuse				DfRemanufacturing				DfRecycling				DfEnvironment				DfDisassembly				DFMA (Manufacturing & Assembly)				DfElimination (landfill Composting)				DfInciheration (safe-Incineration)				DfWM (Waste-Minimisation)				DfDurability				Maintenance				Upgrading				Réparabilité				Bénéfices Économiques				Bénéfices Écologiques				Bénéfices Fonctionnels et Techniques				Bénéfices Sociaux				Nombre de domaines Engagés			
Récupération	Obj_Env-07	Améliorer la recyclabilité	1	1	X	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	15																																																						
Technique (Désassemblabilité,...)	Obj_Env-13	Améliorer la désassemblabilité du produit	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	19																																																																		
Produit	Obj_Env-24	Réduire la diversité de matières utilisées	1	X	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14																																																																						
Pollution	Obj_Env-27	Réduire l'utilisation de matières polluantes	1	X	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	20																																																																										
Stratégie Ecologique	Obj_Env-35	Optimiser la consommation de matières	1	X	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	18																																																																										

Tableau 14: Tableau des relations entre domaines et objectifs

4.2.3. Choix des règles DfE

Le deuxième élément de mise en relation (Domaine-Règle DfE) permet d'identifier quelles règles « traduisibles » sont en relation avec les domaines d'expertise. Une règle traduisible est une règle pour laquelle un indicateur peut être mis en place sous la forme d'un calcul numérique dépendant des variables au niveau du produit (les caractéristiques produit) et ceci dès les phases de conception préliminaires.

Ainsi, une règle DfE traduisible peut être « Minimiser le taux de matières polluantes » avec un indicateur « Taux de matière polluantes = Nombre de composants polluants/nombre de composants du produit », ou bien « Eviter les relations irréversibles (non démontable) entre composants » avec un indicateur « Taux de liaisons irréversibles = nombre de liaisons irréversibles/nombre de liaisons ».

Des règles non traduisibles seraient « Utiliser les technologies les moins consommatrices d'énergie pendant la production », ou bien « Grouper les composants polluants ensemble dans le produit » qui ne peuvent être quantifiées dans les phases de conception préliminaires.

Dans le tableau 15, figure un extrait de règles qualifiées de « traduisibles ». Pour chaque domaine, on a le niveau d'information connu par l'expert du domaine. On peut donc identifier si, selon la disponibilité des caractéristiques du produit, un domaine d'expertise peut quantifier la règle via l'indicateur. Sinon, on va chercher à identifier l'ensemble des expertises nécessaire pour recueillir les informations relatives au calcul de l'indicateur.

Ainsi, une relation entre un domaine d'expertise et une règle est traduite par « 1 » (tableau 15), si l'ensemble des caractéristiques produit (nombre de composants, liaisons, polluants, ...) nécessaires au calcul de l'indicateur sont connues et maîtrisées par ce seul domaine d'expertise. Si elles sont partiellement connues, dans ce domaine d'expertise, on fait figurer un « X » en portant à la connaissance de l'utilisateur les données manquantes.

Ainsi, à partir des différents domaines sélectionnés au regard des objectifs à atteindre, on va sélectionner les règles DfE traduisibles.

Dans notre cas, les 4 domaines choisis par les concepteurs sont : Matière Première, Scenario Fin de vie du produit, Consommation de Matière, DfRecycling. Les règles retenues pour répondre à l'objectif « améliorer la recyclabilité » figurent dans le tableau 16 ci-dessous :

Règle DfE	Indicateur	Règle DfE Générique Évaluable
Règle DfE 01	$I_{p_{m-n-Recyclabilité\%}}$	Augmenter le taux de recyclabilité des matières utilisées dans le produit (No. Matières)
Règle DfE 02	$I_{p_{m-w-Recyclabilité\%}}$	Augmenter le taux de recyclabilité des matières utilisées dans le produit (Quantité)
Règle DfE 03	$I_{p_{c-n-Gp-Comp-Recycl}}$	Améliorer la compatibilité des matériaux recyclables (Quantité) dans le produit
Règle DfE 04	$I_{p_{c-w-Gp-Comp-Recycl}}$	Améliorer la compatibilité des composants recyclables (Nombre) dans le produit
Règle DfE 05	$I_{p_{c-w-Gp-Comp-Recycl}}$	Améliorer la compatibilité des composants recyclables (Poids) dans le produit

Tableau 16: Les Règles DfE pour répondre à l'objectif «Améliorer la recyclabilité »

4.2.4. En résumé

Nous proposons ici une aide à la sélection de règles DfE utilisables en conception. Ces règles vont permettre de répondre aux objectifs environnementaux de l'entreprise. Le choix de ces règles s'effectue en relation avec leur niveau d'expertise au sein de l'entreprise, afin d'assurer une réelle implémentation en conception.

Notre démarche a consisté dans un premier temps à extraire une liste claire des exigences engagées dans la problématique environnementale et à les faire correspondre à des domaines d'expertises qui auraient la capacité d'y répondre. Nous avons ensuite établi une liste de règles DfE traduisibles. Une règle évaluable est donc une règle traduisible, que l'on peut mettre en équation et évaluer dans un (ou des) domaines d'expertise donné(s). Ainsi, il va être possible de quantifier le niveau de réponse d'une solution, tout au long d'un projet, selon l'objectif de conception initial (figure 31)

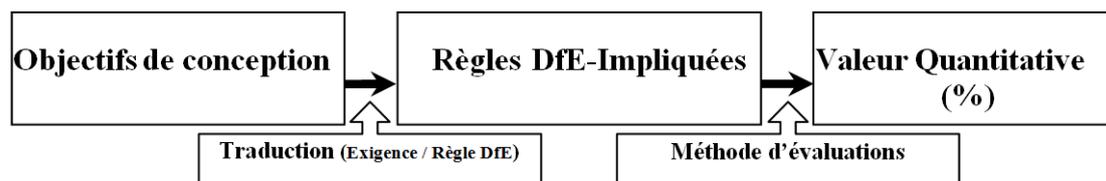


Figure 31: Les règles DfE pour l'évaluation des objectifs de conception

Nous allons dans les paragraphes suivants montrer comment nous avons pu identifier un modèle produit qui supporte les règles DfE dès la phase de conception conceptuelle. Nous verrons également sous quelle forme elles ont été traduites et comment utiliser des facteurs de pondération dans le cas où plusieurs objectifs sont poursuivis par le groupe projet.

Chapitre 5 : Implémentation des règles DfE en conception

Pour bien utiliser les règles DfE dans la démarche de conception de produit, il nous faut mettre en place une méthode d'évaluation de ces règles. Pour cela, nous allons traduire ces règles et définir des indicateurs permettant de les quantifier. Ces indicateurs vont s'appuyer sur des données du produit, contenues dans le modèle produit, qui vont se définir progressivement tout au long du projet.

5.1. Calcul d'indicateurs associés à des règles DfE

L'utilisation de règles DfE dans la conception de produit nécessite que l'on soit capable de les traduire, de les quantifier puis de faire ressortir un indicateur clair aux concepteurs. Différentes étapes sont donc à mener :

- Définir le niveau d'implémentation de la règle DfE selon les compétences en place.
- Choisir une liste de règles DfE à impliquer dans la conception
- Représenter chaque règle DfE par un indicateur $[I_i]$ qui représentera le niveau de satisfaction ou non de la règle.
- Traduire la règle DfE selon les éléments produits évaluables $[K_i]$ mis à disposition au temps t du projet.
- Evaluer la valeur de l'indicateur $[I_i]$ pour chaque règle en utilisant les valeurs des éléments évaluables $[K_i]$ liés.
- Définir la valeur des facteurs de pondération pour les différentes règles.
- Calculer la valeur d'un indicateur global $[I_{Glo}]$ qui prend en compte l'ensemble des indicateurs $[I_i]$ et des facteurs de pondération.

Les indicateurs sont les concepts proposés dans la méthode d'évaluation pour vérifier si la règle est bien implémentée durant la conception. Notre méthode d'évaluation propose en effet de traduire la règle DfE en un indicateur qui permet de retourner une valeur quantitative selon la phase d'examen de la règle DfE. Les indicateurs sont de deux types :

❖ Indicateur $[I_i]$:

C'est un indicateur qui représente une valeur pour une règle DfE dans une phase (ou étape) définie de la conception. La valeur de cet indicateur est calculée en utilisant les caractéristiques connues du produit et est évaluée selon le contexte de la règle DfE impliquée dans la phase étudiée. La symbolisation de l'indicateur $[I_i]$ est liée à l'objectif de la règle DfE que l'indicateur représente selon l'élément engagé du modèle produit (Composant, Relation, Produit). Si l'élément est un polluant, la lettre (P) est ajoutée à la suite du symbole de l'élément (C, R, P). La figure 30, ci-dessous, reprend ces différents pour l'indicateur $[I_i]$:

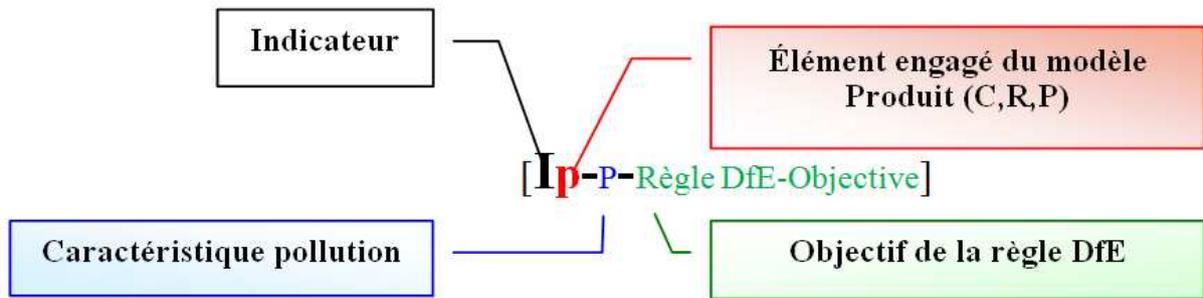


Figure 32: Modèle général pour la symbolisation de l'indicateur [Ii]

On va par exemple avoir pour la règle suivante :

« **Minimiser les variétés de matières premières utilisées(Nombre)** »

L'indicateur [**Ip -p- mns-max**] (figure 31) :

« **Indicateur de la variété des matières premières utilisées(Nombre)** »

Note : Dans cet exemple le symbole (P) grisé signifie qu'il ne s'agit pas d'un polluant.

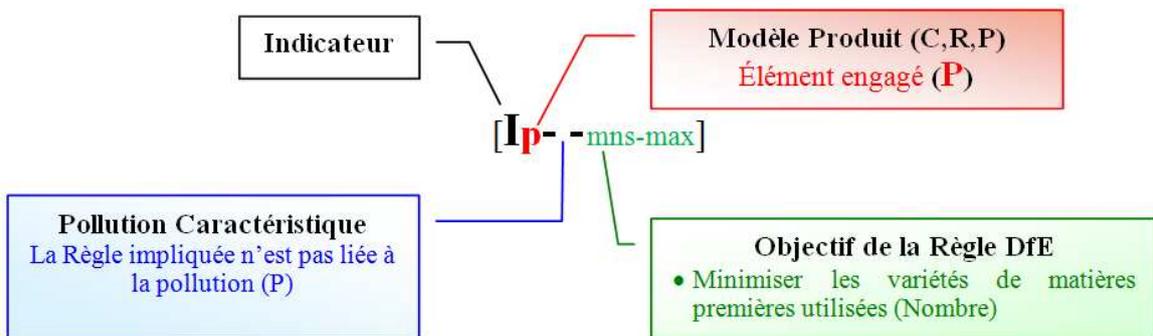


Figure 33: Symbolisation de l'indicateur [Ip - - mns-max]

❖ **Indicateur globale [IGlo] :**

Cet indicateur regroupe des règles DfE impliquées ensemble dans une phase de la conception. La valeur de cet indicateur qui est représentée par une valeur quantitative, donnée en pourcentage, est évaluée par une formule de calcul selon le niveau d'implémentation de chaque règle DfE impliquée et selon l'importance de chaque règle parmi le groupe de règles impliquées par le concepteur dans la phase étudiée.

La symbolisation de l'indicateur global [IGlo] est liée à la phase dans laquelle les règles DfE sont impliquées. L'indicateur globale est représenté avec une apostrophe ['] qui indique le niveau d'évolution de l'indicateur global [IGlo] selon les phases étudiées. Une seule apostrophe ['] concerne la première étape, puis on aura 2 apostrophes ['] pour la deuxième phase et ['] pour la troisième, □ etc (figure 34).

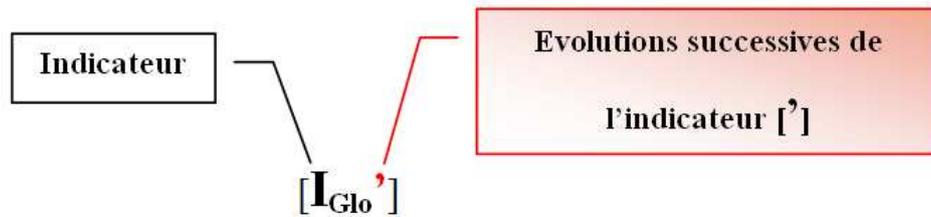


Figure 34: Modèle générale de symbolisation de l'indicateur global [IGlo]

5.1.1. Modèle produit retenu pour identifier les éléments du produit évaluables

Le modèle produit retenu a été déterminé au regard de la combinaison la plus simple dont on aurait besoin pour décrire une structure de produit. Cette structure simple est constituée de deux composants mis en lien par une relation (figure 33). Nous appelons ce modèle, modèle C, R, P [164] pour Composant, Relation(s) entre composants et Produit.

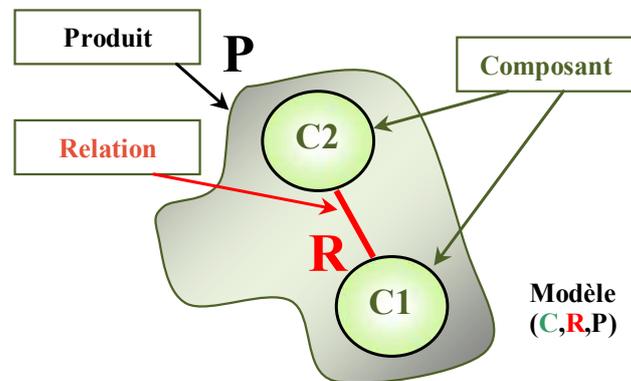


Figure 35: Le modèle (C, R, P)

Ce modèle est inspiré par de précédentes recherches liées à la conception pour le désassemblage dans la première étape du processus de conception {Alhomsy et Zwolinski, 2009} [11], {Haoues et al, 2006} [36]. Ce modèle est compatible avec un modèle de type Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) utilisé lors d'une démarche d'analyse fonctionnelle du produit. Ainsi, le modèle C, R, P, peut être directement extrait d'un BDF (figure 34).

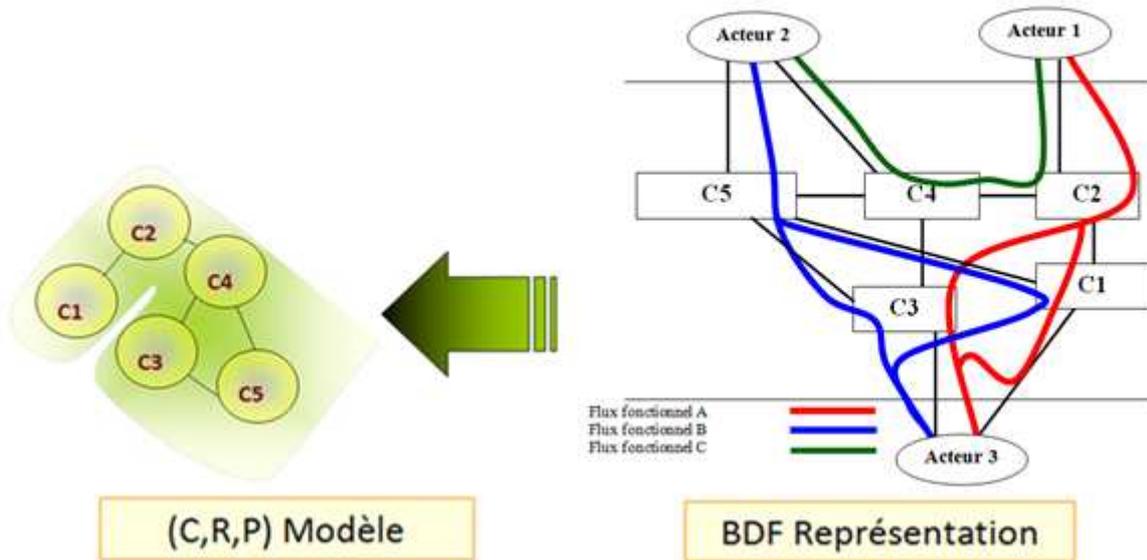


Figure 36: Modèle C, R, P extrait d'un BDF

La relation entre la représentation fonctionnelle (BDF) et le modèle (C, R, P) permet de poursuivre l'évaluation tout au long de la conception. Un changement dans la représentation fonctionnelle et/ou dans les caractéristiques des éléments peut ainsi être facilement pris en compte lors des évaluations (figure 35).

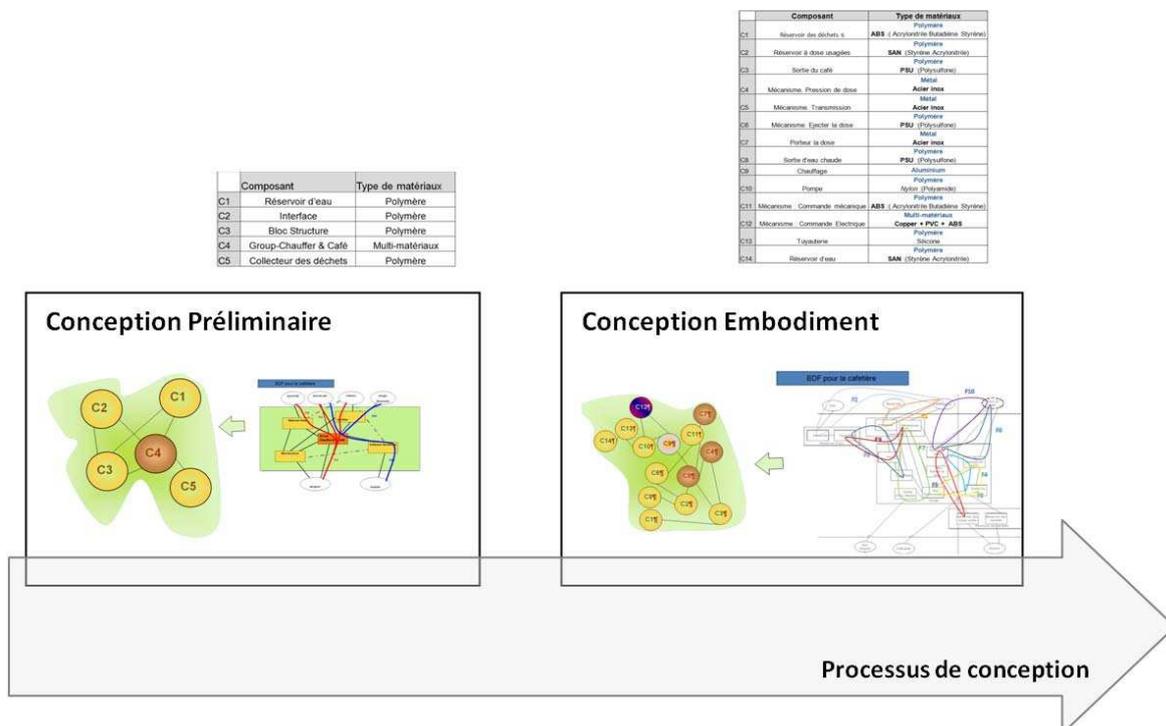


Figure 37: Illustration des différences de données sur le produit selon les phases de la conception

La solution évolue également dans le sens où les propositions de solutions deviennent plus claires et plus détaillées. Le fait de pouvoir facilement retranscrire ces avancées permet, d'une part, de préciser les données au fur et à mesure de la conception et d'autre part, de diminuer l'incertitude sur les indicateurs (figure 38).

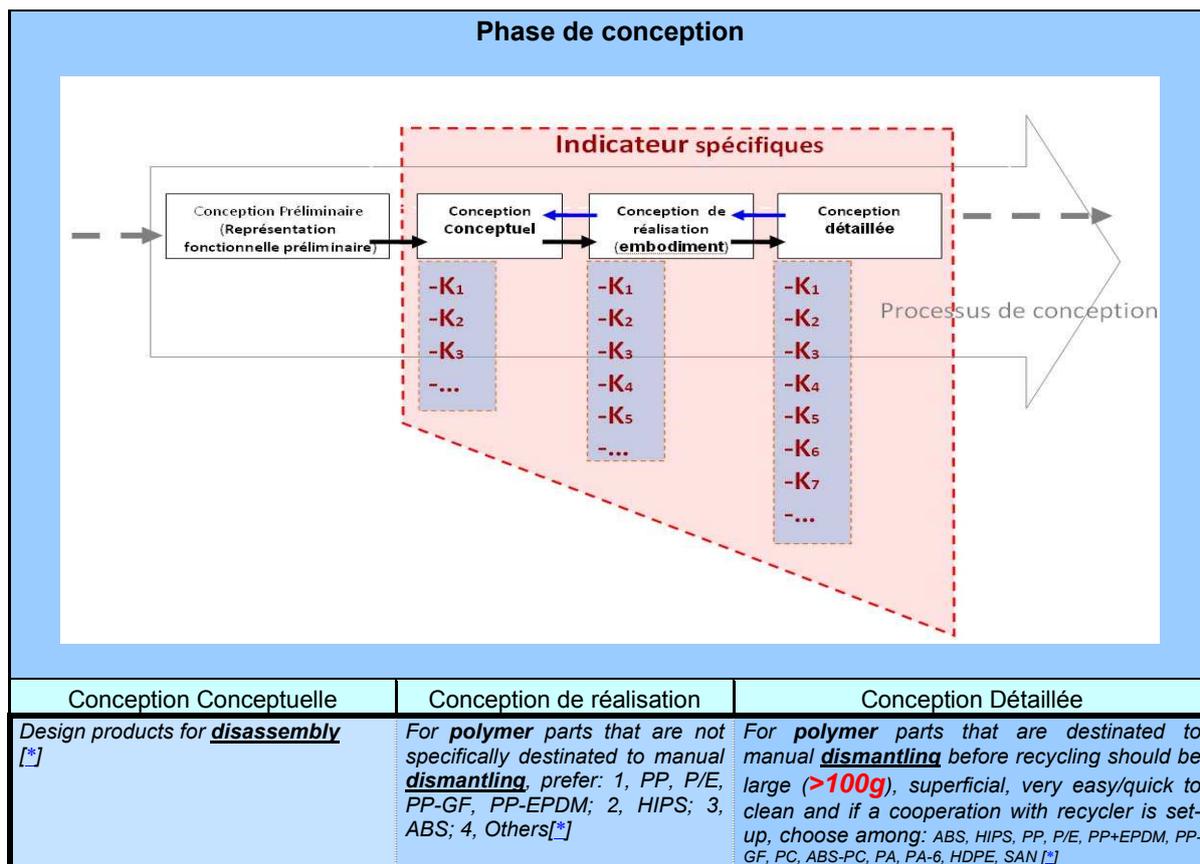


Figure 38: Expression d'une règle DfE selon les phases de conception

Les éléments évaluable (Caractéristique $[K_i]$) qui traduisent les règles deviennent plus nombreux (figure 39). Ils permettent de transférer les caractéristiques du produit conçu en lien avec des exigences physique, technique, environnementale, etc., en valeurs pour mener l'évaluation quantitative de règles selon des expertises données. La valeur de chaque caractéristique est déterminée dès les phases préliminaires de conception selon le niveau de disponibilité des données. Ces valeurs se précisant, l'évaluation des règles DfE a tendance à évoluer au cours de la conception.

Les caractéristiques sont représentées d'une façon symbolisée et classifiées selon les éléments de modèle (C, R, P). Trois types de caractéristiques ont été mis en place (K_c , K_r , K_p) en lien avec le modèle (C, R, P). Pour chacun des trois indicateurs, un niveau est défini selon des caractéristiques spécifiques du produit identifiées par : des valeurs numériques (poids, nombre de composants, etc.) ou des descriptions littérales (matériaux, type de fin de vie, etc.). Une symbolisation a été proposée pour ces indicateurs (figure 37). Ils sont représentés par la lettre (K) et leur groupe d'appartenance est spécifié par une seconde lettre (C, R ou P). La troisième lettre est un (P) si l'indicateur a une relation spécifique avec les composants polluants. A la fin du nom de l'indicateur, figure l'abréviation de la caractéristique considérée, en petites lettres.

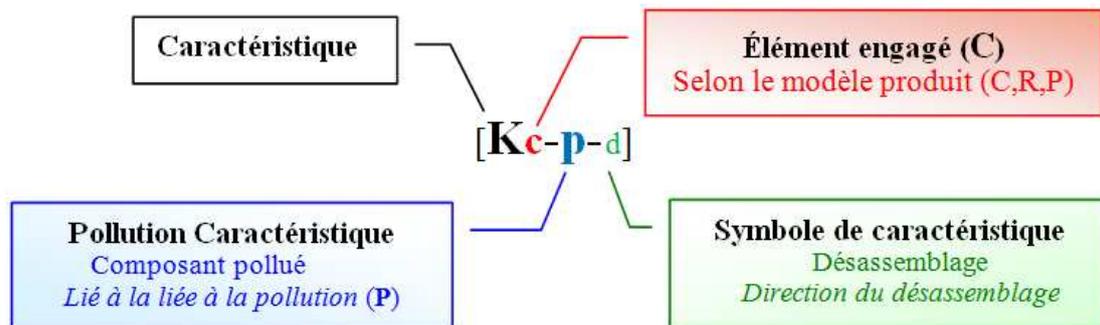


Figure 39: Symbolisation pour les caractéristiques du produit.

On a par exemple :

- Kcda qui est relatif à une caractéristique d'un composant et qui donne des informations sur les axes de désassemblage envisageables
- Krtype qui est relatif à une caractéristique de relation et qui donne des informations sur les types de relations. Un bilan des types de relations a été réalisé sous la forme de listes présentées tableau 17
- Kppcn qui est relatif à une caractéristique de produit et qui permet de caractériser le nombre de composants polluants dans le produit. Un exemple illustratif a été réalisé tableau (17) et dans cet exemple $K_{ppcn} = 3$.

	Composants	Relations	Produit																		
Nom	Axes d'assemblage	Type de lien	Nombre de composants polluants																		
Symbolisation	Kcda	Krtype	Kppcn																		
Valeur	Kcda = Liste (X, Y, Z)	Krtype = Liste (x1, x2, x3 □)	Kppcn = Valeur (nombre réel)																		
Illustration		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Type de relation</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>Clipsage</td></tr> <tr><td>2</td><td>Presse</td></tr> <tr><td>3</td><td>Embouti</td></tr> <tr><td>4</td><td>Boulon & écrou</td></tr> <tr><td>5</td><td>Filetage</td></tr> <tr><td>6</td><td>Pliage</td></tr> <tr><td>7</td><td>Rivet</td></tr> <tr><td>8</td><td>Collage</td></tr> </tbody> </table>	Type de relation		1	Clipsage	2	Presse	3	Embouti	4	Boulon & écrou	5	Filetage	6	Pliage	7	Rivet	8	Collage	<p>Indicateur de nombre de composante polluants</p> <p>Kppcn = 3</p>
Type de relation																					
1	Clipsage																				
2	Presse																				
3	Embouti																				
4	Boulon & écrou																				
5	Filetage																				
6	Pliage																				
7	Rivet																				
8	Collage																				

Tableau 17. Exemple de codification pour les 3 types de caractéristiques

Le tableau suivant présente une liste des caractéristiques engagées dans la traduction de règles DfE selon les normes et symbolisations retenues. La classification selon les éléments du modèle (C, R, P) aide à traduire facilement les règles en lien avec les indicateurs produit du modèle (C, R, P). On va ainsi trouver des règles en lien avec les composants, leurs relations, ou des règles mixtes sur le produit global (Tableau 18).

Caractéristiques évaluable /Indicateur	Modèle (C,R,P)
Type de matériel de composant (liste de choix)	C
Type de toxicité / polluant/ matériel (liste de choix)	C
Type de relation (liste de choix)	R
Type de Relation-condition avec les polluants (liste de choix)	R
Poids total du produit	P
Poids total des matières recyclables	P

Tableau 18: exemple de classification de règles DfE selon les éléments du modèle (C,R,P)

5.1.2. Traduction de règles DfE selon les caractéristiques produit □ Indicateur [I_i]

Dans cette partie, nous allons nous appuyer sur deux exemples : l'exemple d'un réfrigérateur, afin de montrer l'implémentation d'une règle DfE pendant la phase de conception préliminaire. Et l'exemple d'une règle de désassemblage en phase avancée de la conception.

Exemple du réfrigérateur

A ce niveau de l'étude, le concepteur a mis en place une analyse fonctionnelle du produit et va chercher à intégrer une règle DfE. La figure 38, montre le BDF du réfrigérateur avec ses composants principaux, les relations entre eux et les flux fonctionnels qui les parcourent.

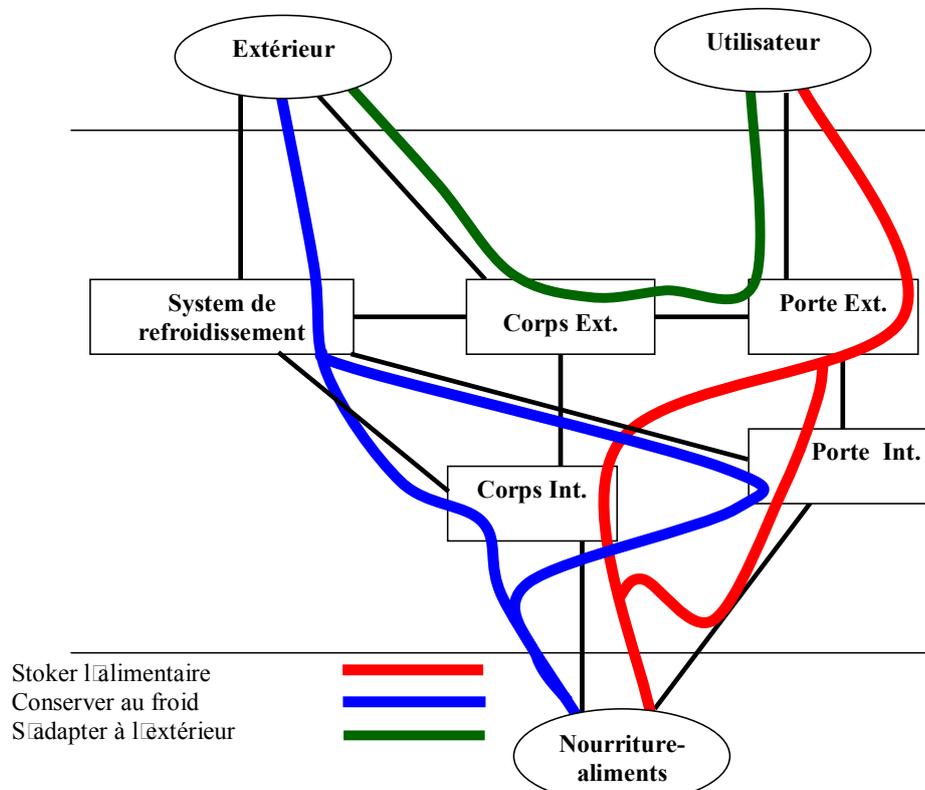


Figure 40: La représentation fonctionnelle (BDF) du réfrigérateur dans la phase de conception préliminaire

- La règle DfE impliquée est :

« *Minimiser les variétés de matières premières utilisées (Nombre)* »

La règle vise à limiter l'utilisation de différents matériaux dans le produit, pour améliorer les scénarios Fin de Vie du produit (en lien avec la récupération massive des matériaux) et pour améliorer la compatibilité des matériaux entre eux (point de vue recyclage). Cela pourra conduire à diminuer le nombre de composants et finalement systématiquement diminuer le nombre de processus attachés.

- L'indicateur qui représente cette règle est $[I_{p_{mns-max}}]$.
- La phase de conception étudiée est la phase préliminaire où le produit est représenté par cinq composants.
- Le produit est représenté par le modèle (C, R, P), sous la forme d'une illustration graphique et d'un tableau avec les données principales (tableau 19).

Composants liés	Relation	Poids du composant (Kg)	Type de matériaux	Composant
C1- C2	R1	2	Acier	C1
C2- C4	R2	4	Polystyrène	C2
C3- C4	R3	10	Acier	C3
C4- C5	R4	15	Polystyrène	C4
C3-C5	R5	30	Multi-matériaux	C5

Tableau (19): illustration d'un produit selon le modèle (C,R, P)

- Les caractéristiques principales engagées dans la traduction de la règle DfE liée avec l'indicateur $[I_{p_{mns-max}}]$ sont présentées dans le tableau 20 suivant :

Caractéristiques	Valeur	Nom de l'indicateur
$K_{C_{Mat-G}}(C1)$	Acier	Type de matériau du composant (Générique)
$K_{C_{Mat-G}}(C2)$	Plastique	Type de matériau du composant (Générique)
$K_{C_{Mat-G}}(C3)$	Acier	Type de matériau du composant (Générique)
$K_{C_{Mat-G}}(C4)$	Plastique	Type de matériau du composant (Générique)
$K_{C_{Mat-G}}(C5)$	Multi-matériaux	Type de matériau du composant (Générique)
$K_{p_{Cn}}(P)$	5	No. des composantes
$K_{p_{mns-Acier}}(P)$	2	Nombre de matériaux Similaires dans le produit
$K_{p_{mns-Plastique}}(P)$	2	Nombre de matériaux Similaires dans le produit
$K_{p_{mns-Multi-matériaux}}(P)$	1	Nombre de matériaux Similaires dans le produit
$K_{p_{mns-max}}(P)$	2	Nombre maximum de matériaux Similaires dans le produit

Tableau 20: liste des caractéristiques impliquées pour le calcul de l'indicateur $I_{p_{mns-max}}$

Voici le calcul de l'indicateur $I_{p_{mns-max}}$

$$I_{p_{mns-max}} = \frac{\text{Nombre maximum de matériaux Similaires dans le produit}}{\text{No.des composantes}}$$

Équation 2: Calcul de l'indicateur [I_{p_{mns-max}}]

- Selon les valeurs des indicateurs liés, la valeur de facteur demandé [I_{p_{mns-max}}] est :

$$[I_{p_{mns-max}}] = 2/5 = 40\%$$

Désassemblage de polluants

- La règle DfE impliquée dans cet exemple est :

« Minimiser le nombre de directions de désassemblage pour les composants polluants. »

La règle vise à limiter le nombre de directions de désassemblage pour les composants polluants dans le produit, pour améliorer les scénarios de dépollution en fin de vie.

- L'indicateur qui représente cette règle est [I_{p_{psd}}]. Il s'intéresse aux directions de désassemblage des composants polluants. Ce facteur appartient au groupe de facteurs caractérisant le produit (P). Il fait référence au nombre de composants polluants (K_{p_{pcn}}) et au nombre de composants polluants ayant la même direction de désassemblage (K_{c_{pd}})
- La phase de conception étudiée est la phase de conception de réalisation
- Le produit est représenté par le modèle (C, R, P), sous la forme d'une illustration graphique (figure 42). Dans cet exemple, nous avons un modèle de produit avec sept composants et trois d'entre eux sont des polluants.

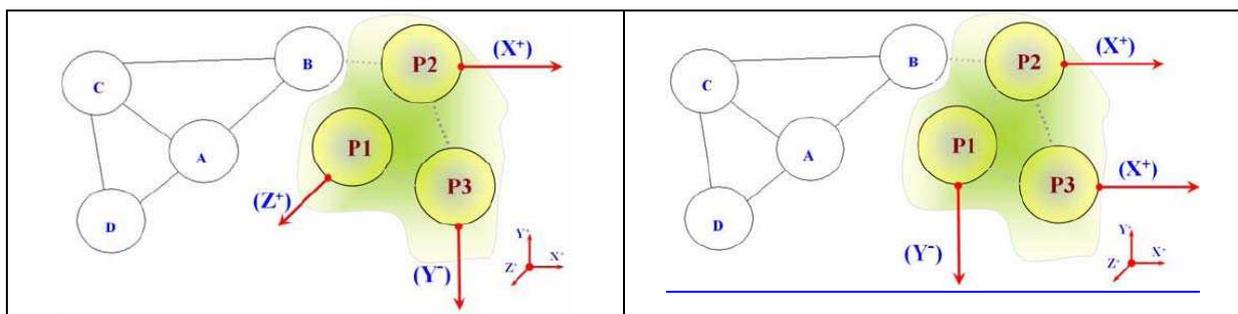


Figure 41: Modèle produit concernant le calcul d'Ip_{psd}. A gauche l'état initial, à droite l'évolution du produit

Voici le calcul de l'indicateur IP_{psd} (Similarity direction factor for the disassembly of Polluting components) :

$$IP_{psd} = \text{interval} [0-1] = \text{Max} (K_{c_{pd}}) / (K_{p_{pcn}}) \quad (1)$$

- K_{c_{pd}}: Nombre de composants polluants ayant la même direction de désassemblage
- K_{p_{pcn}}: Nombre de composants polluants

Dans une première approche (figure 39), chaque composant a sa propre direction de désassemblage, $IP_{psd} = 1/3$. Dans un deuxième temps, on considère que deux des trois polluants ont une direction de désassemblage commune, alors $IP_{psd} = 2/3$.

5.1.3. La pondération des règles DfE

Le système de pondération, qui est impliqué dans la méthode d'évaluation est essentiellement établi sur le principe de valoriser l'importance de chaque règle DfE choisie et impliquée dans la conception. Le mécanisme adapté pour réaliser la pondération des règles DfE impliquées est établi sur deux concepts : le premier est issu de constats extérieurs au projet et s'appuie sur l'origine de la règle et le deuxième est lié au projet, à l'entreprise et s'appuie sur les décisions stratégiques de l'entreprise et/ou les décisions des concepteurs (figure 40).

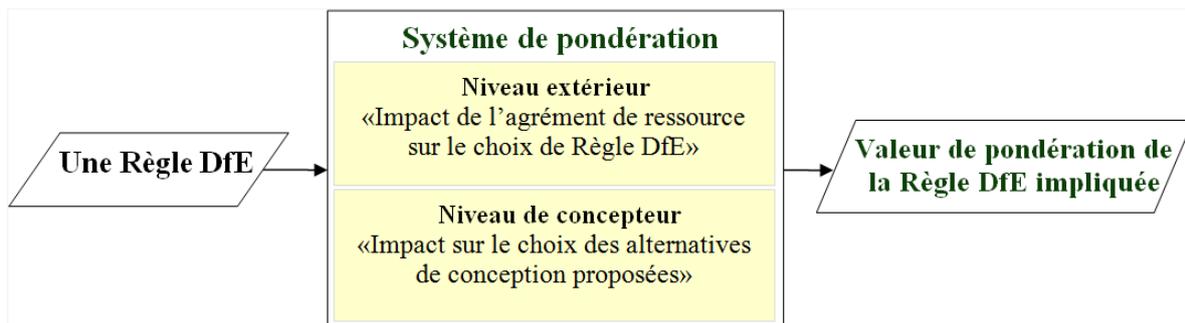


Figure 42: Les concepts mis en jeu dans la pondération des règles DfE impliquées

➤ **Pondération induite par l'extérieur** : ce niveau de pondération est lié aux particularités du cycle de vie du produit et aux domaines d'implémentation des règles DfE. Il existe en effet des standards et des contraintes définis par la législation et des obligations qui imposent des caractéristiques sur le produit en cours de conception. Ainsi, les règles DfE qui visent à satisfaire la législation, les directives, □, auront une valeur de pondération plus forte que les autres règles DfE qui répondent à des recommandations générales.

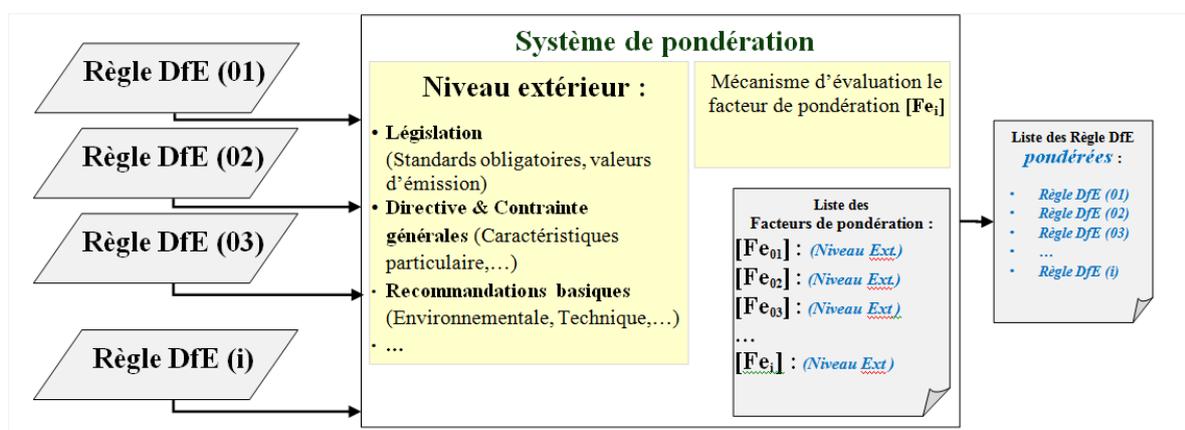


Figure 43: Le mécanisme de pondération des règles DfE impliquée selon les contraintes extérieures

Pour identifier la valeur du facteur de pondération $[Fe_i]$ à ce niveau, on va s'appuyer sur la classification des ressources qui nous ont permis d'identifier les règles DfE. On a ainsi mis en place trois niveaux :

- La **valeur 3** est donnée au facteur de pondération $[Fe_i]$ si la règle DfE est issue d'une ressource de type **Réglementation et législation avec des limites obligatoires**
- La **valeur 2** est donnée au facteur de pondération $[Fe_i]$ si la règle DfE est issue d'une ressource de type **Contrainte environnementale avec des limites reconnues**. Ces contraintes environnementales sont connues de la plupart des concepteurs car issues de guides environnementaux génériques
- La **valeur 1** est donnée au facteur de pondération $[Fe_i]$ si la règle DfE est issue d'une ressource de type **Recommandations basiques** (Environnementale, Technique, ...). Ces recommandations permettent en général de valoriser les scénarios possibles du cycle de vie du produit d'un point de vue environnemental, mais ne sont pas des références admises par tous.

Des exemples liés à ces différents niveaux sont donnés dans le tableau 21.

Valeur de facteur de pondération $[Fe_i]$	Type de ressource	Exemple
3	<u>Réglementation et législation avec des limites obligatoires</u>	Directive du parlement européen (VHU, DEEE, RoHS,...)
2	<u>Contrainte environnementale avec des limites favorables</u>	Certifications et écolabels (Iso 14000, Énergie star,...)
1	Recommandations basiques	Eco-Guides et Eco-Règle recommandées (EcoDesign Pilot, Ten-golden rules in ecodesign,...)

Tableau 21. : Valeur du facteur de pondération extérieur Fe selon de type de ressources dont est issue la règle DfE

- **Pondération induite par l'entreprise/le concepteur** : ici, la pondération est en lien avec le cahier des charges établi en début de conception. Le cahier des charges peut intégrer des objectifs environnementaux sous la forme de standards écologiques et environnementaux (ISO-14000), de stratégies écologiques adaptées pour la conception (l'approche éco-conception et *Cleaner Production*), d'efficacité énergétique (*Energy Star*), de bilans des matières (*Material Declaration*), d'écolabels (l'éco-label européen, NF Environnement, ...), etc. Les solutions vont alors dépendre de l'expérience des concepteurs (stratégies de conception) et des ressources disponibles (expertise, base des données). La valeur de pondération pour les règles est donc choisie en accord avec les exigences du cahier des charges (figure 42).

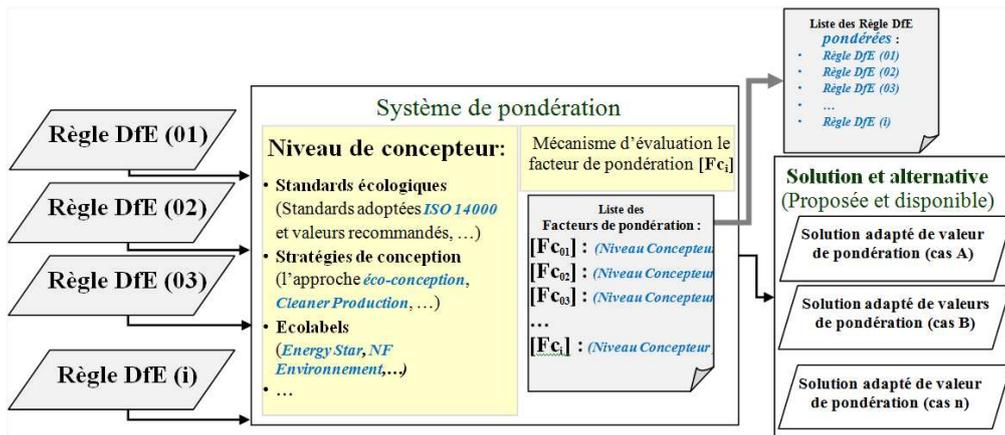


Figure 44: Le mécanisme de pondération de la règle DfE impliquée selon le concepteur/l'entreprise

Ainsi, le mécanisme d'évaluation du facteur de pondération $[F_{c_i}]$ dépend du niveau de prise en compte de la règle DfE par les concepteurs en réponse aux objectifs environnementaux. La valeur des facteurs de pondération pour chaque règle DfE impliquée est évaluée selon le niveau d'implication de la règle DfE pour satisfaire ces objectifs. Ce niveau d'influence est estimé par le concepteur selon de sa propre expérience et selon les ressources et données disponibles utilisées par le concepteur et l'équipe engagée dans la conception.

Pour identifier la valeur du facteur de pondération $[F_{c_i}]$ à ce niveau, on va s'appuyer sur le niveau d'implication de la règle DfE dans le cahier des charges. On a ainsi mis en place trois niveaux :

- La **valeur 3** est donnée au facteur de pondération $[F_{c_i}]$ si la règle DfE influence directement la future solution
- La **valeur 2** est donnée au facteur de pondération $[F_{c_i}]$ si la règle DfE influence non directement la future solution
- La **valeur 1** est donnée au facteur de pondération $[F_{c_i}]$ si la règle DfE n'influence pas a priori la future solution.

Valeur de facteur de pondération $[F_i]$	Type de l'influence la Règle DfE sur la solution proposée
3	influence DIRECTE
2	l'influence NON-DIRECTE
1	il n'y a PAS D'INFLUENCE

Tableau 22. Valeur de F_{c_i} selon l'influence de la règle DfE sur la future solution

On a par exemple :

- des règles liées à la désassemblabilité du produit qui influencent de manière non directe la valorisation en fin de vie du produit (Recyclage ou Remanufacturing),
- des règles sur la compatibilité de matières utilisées qui ont une influence directe sur la valorisation de fin de vie de produit (surtout le recyclage)
- des règles liées à la consommation d'énergie pendant la phase d'utilisation qui n'ont pas d'influence sur la valorisation de fin de vie de produit.

On va donc adopter comme facteur de pondération pour les règles DfE impliquées, le facteur F_i avec :

$$F_i = [F_{e_i}] * [F_{c_i}]$$

$[F_i]$: Facteurs de pondération

$[F_{e_i}]$: Facteurs de pondération selon le niveau extérieur

$[F_{c_i}]$: Facteurs de pondération selon le niveau concepteur

Équation 3: Le calcul de facteur de pondération pour les règles DfE

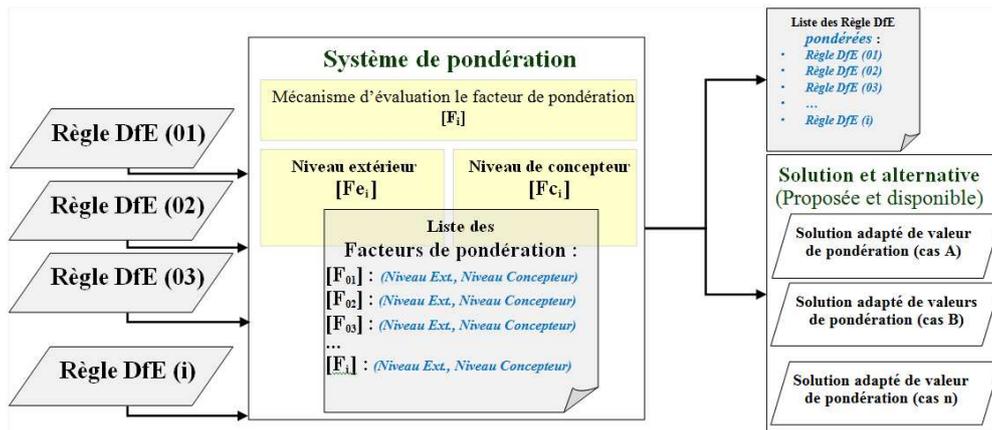


Figure 45: Le système de pondération de la règle DfE impliquée

5.1.4. Evaluation de la solution □ indicateur $[I_{Glo}]$

Après avoir déterminé pour chaque règle, les indicateurs et facteurs de pondération, nous pouvons calculer l'indicateur global pour la solution en cours de développement. Ce facteur total est calculé pour l'ensemble du produit et représente l'agrégation en une valeur de l'ensemble des indicateurs. La valeur du facteur total est obtenue en pondérant chaque facteur (pondération définie par le concepteur) et en divisant la somme des facteurs pondérés par la somme des pondérations.

I_{Glo} : Indicateur global pour le produit (P)
 F_i : Pondération pour l'indicateur (I_i)
 I_i : Indicateur lié à la règle à réaliser
 n : Nombre de facteurs utiles

$$F_{p_{tot}} = interval [0-1] = \frac{\sum_{i=1}^n I_i * F_i}{\sum_{i=1}^n I_i}$$

Équation 4: Le calcul de l'Indicateur Global pour le produit (P)

L'indicateur global fournit une première estimation concernant l'adaptation du produit aux contraintes environnementales et ceci dès la phase de conception conceptuelle. Ainsi, au cours de la conception, le concepteur répond aux problématiques techniques et fonctionnelles en proposant des alternatives de conception qui s'adaptent aux exigences et aux demandes environnementales figurant au cahier des charges. L'intégration de l'évaluation du niveau d'implémentation des règles DfE lors des différentes étapes/phases de la conception, permet

au concepteur de contrôler les alternatives de solution en considérant les contraintes du cycle de vie.

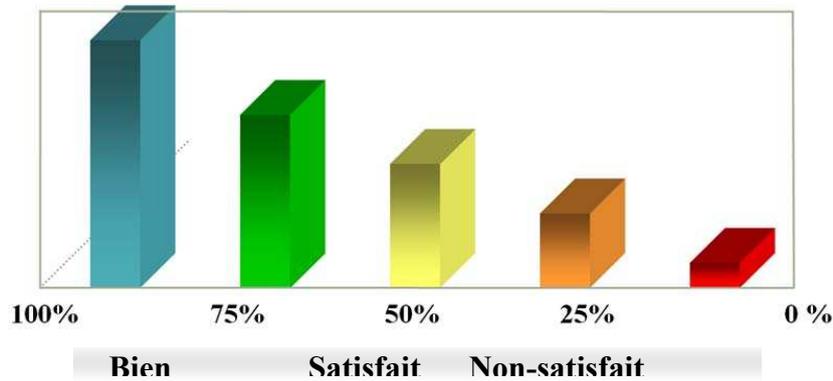


Figure (44) Niveau de satisfaction pour les indicateurs ([Ii] & [IGIo])

L'échelle de satisfaction de la valeur de chaque indicateur ([Ii] & [IGIo]) est déterminée selon l'expérience des concepteurs, expérience acquise lors de l'implémentation de chaque règle. L'échelle « Générique » proposée dans la méthode d'évaluation et présentée figure 44 est flexible et modifiable selon les conditions de conception.

5.2. Implémentation des règles DfE en conception

Après avoir défini le concept de règle DfE et le principe de l'évaluation quantitative de ces règles, nous allons présenter comment ces éléments s'implémentent au cours de la démarche de conception. Nous allons décrire ici trois situations auxquelles le concepteur peut être confronté pendant l'implémentation des règles DfE :

1^{ère} situation : « Evaluation d'une règle DfE dans une phase de conception ».

2^{ème} situation : « Evaluation d'une règle DfE dans plusieurs phases de conception ».

3^{ème} situation : « Evaluation d'une liste de règles DfE dans une phase de conception ».

Ces situations vont nous permettre de mieux comprendre les apports liés à l'application de cette méthode. La quatrième situation « Evaluation d'une liste de règles DfE dans plusieurs phases de conception » qui sera rencontrée fréquemment au niveau des projets de conception, fera l'objet du chapitre 6, dans lequel sera décrit un projet de conception supporté par la méthode.

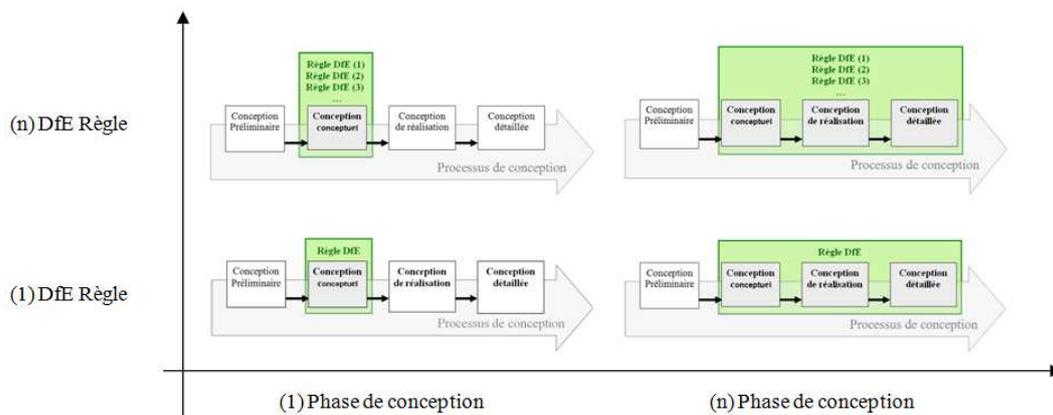


Figure 46: Les différents cas d'implémentation des règles DfE dans les phases de conception

5.2.1. Cas 1: «Evaluation d'une règle DfE dans une phase de conception»

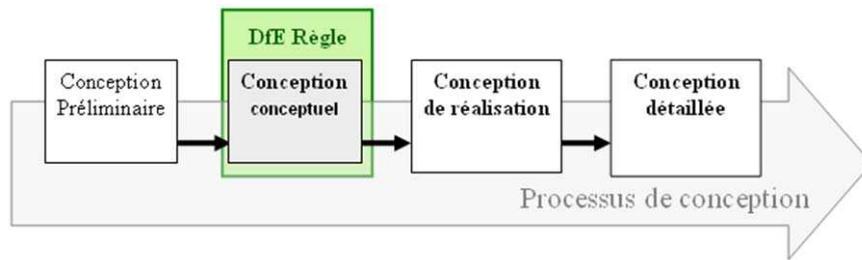


Figure 47: Implémentation d'une seule règle DfE dans une seule phase de conception

- Dans ce 1^{er} cas le concepteur vérifie le niveau d'implémentation d'une seule règle DfE dans une phase déterminée du processus de conception.
- La valeur finale de l'Indicateur Global [I_{Glo}] dépend directement du niveau d'implémentation de la règle DfE choisie selon l'objectif Environnemental ciblé (figure 47).

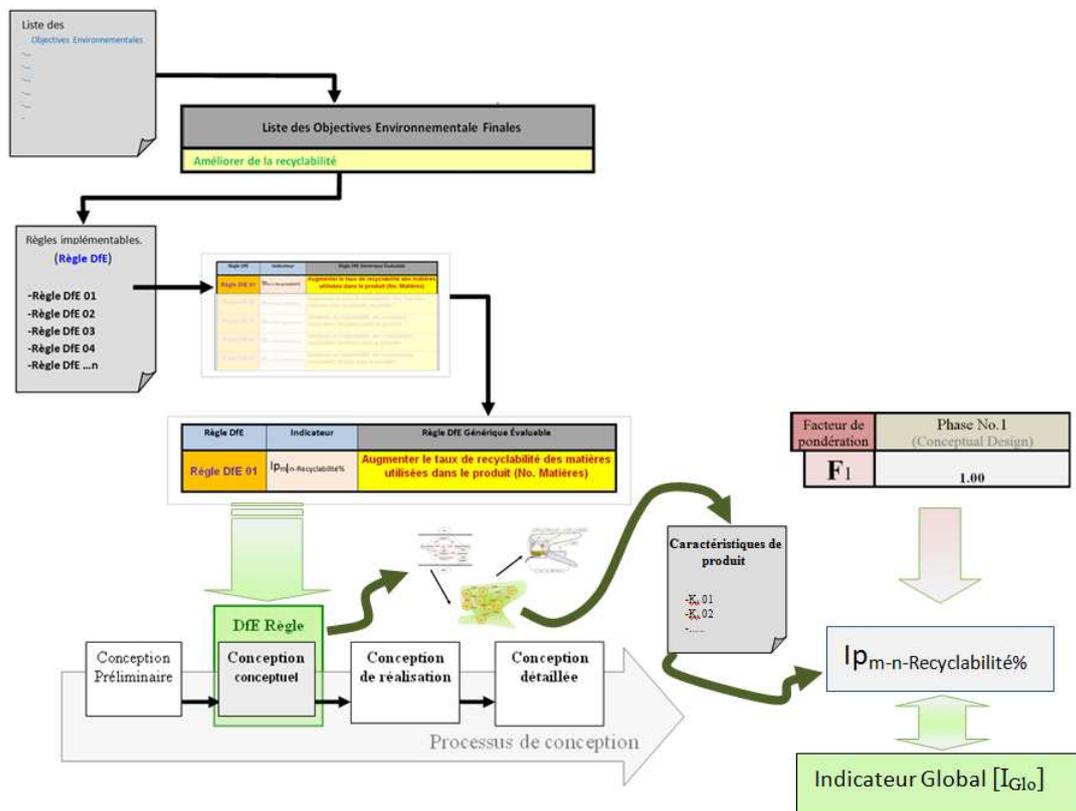


Figure 48: Eléments impliqués dans le calcul de [I_{Glo}] pour une seule règle DfE

Dans cet exemple, nous sommes sur le scénario prise en compte des stratégies de fin de vie et nous nous intéressons à la recyclabilité. La démarche proposée suit l'approche DfR (DfRecyclability) en choisissant l'objectif Environnemental « **Améliorer la recyclabilité** » dans la conception du produit. L'étape étudiée pour présenter ce calcul est la phase de Conception conceptuelle.

A partir de la liste en lien avec l'Objectif Environnemental ciblé « Améliorer la recyclabilité », nous choisissons la règle DfE suivante « Augmenter le taux de recyclabilité des matières utilisées dans le produit (No. Matières) ». Cette règle DfE s'adapte avec la réalisation de l'Objectif Environnemental et les éléments évaluables (Caractéristiques du produit). Cette règle DfE est représentée par l'indicateur [Ip_{m-n-Recyclabilité%}]. Le tableau suivant représente la règle DfE implémentée avec la formule de calcul de l'indicateur.

Indicateur		Règle DfE
Symbole	Ip _{m-n-Recyclabilité%}	
Réduction	Taux (Nombre) des matières recyclables dans le produit	Augmenter le taux de recyclabilité des matières utilisées dans le produit (No. Matières)
Formule de calcul de l'Indicateur	= $\frac{[\text{Nombre de type de chaque matières recyclables}]}{[\text{Nombre des matières dans le produit}]}$	

Tableau 17: Formule de calcul l'indicateur [Ip_{m-n-Recyclabilité%}].

Les éléments évaluables (Caractéristiques du produit [K_i]) qui sont engagés dans le calcul des indicateurs sont des données extraites de la conception du produit et des représentations réalisées au cours de la conception. Le modèle [C,R,P] permet de visualiser ces données dans les différentes phases de la conception.

La disponibilité de ces caractéristiques est mise en relation avec les domaines de compétences et selon l'expérience de l'équipe de conception. Les outils et moyens qui supportent la conception jouent aussi un rôle important dans la définition de ces caractéristiques dans chaque phase de la conception et pour la détermination de leurs valeurs dans ces phases.

Pour calculer l'indicateur représentant la règle DfE implémentée, il y a besoin de déterminer les caractéristiques principales qui sont engagées directement dans ce calcul. Dans notre exemple, les caractéristiques principales sont :

- Nombre de type de chaque matière recyclable
- Nombre des matières dans le produit.

La simulation des résultats de l'indicateur et la possibilité de représenter les caractéristiques engagées donnent au concepteur la possibilité de comprendre l'influence de ces caractéristiques dans les résultats finaux. Il peut alors faire des choix et des propositions de solutions sur le plan technique, fonctionnel, matières, □

La figure suivante montre la valeur de l'indicateur [Ip_{m-n-Recyclabilité%}] qui représente la règle DfE « Augmenter le taux de recyclabilité des matières utilisées dans le produit (No. Matières) » dans la phase de « Conceptual Design ». A droite, la visualisation de l'engagement des caractéristiques principales dans la valeur de l'indicateur (en pourcentage).

Phase (i)	Phase No. 1 (Conceptuelle, Agrafeuse)	Phase No. 2 (Embodiment, Agrafeuse)	Phase No. 3 (Détailée, Agrafeuse)
-----------	---------------------------------------	-------------------------------------	-----------------------------------

Règle DfE / Indicateur

Règle DfE 01	I ₁ :Règle DfE 01	100.00%	0.00%	0.00%
--------------	------------------------------	---------	-------	-------

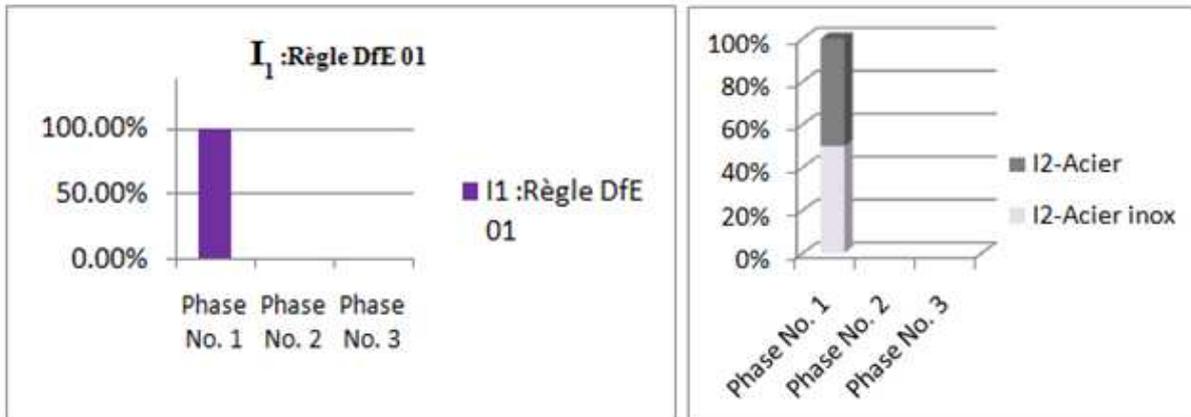


Figure 49: Influence des caractéristiques dans le calcul de la valeur de l'indicateur

Nous verrons dans le paragraphe suivant, que la variabilité de la valeur de l'indicateur dépend de son mode de calcul, qui peut être un pourcentage cumulé, un ratio entre deux caractéristiques ou une formule de calcul impliquant plusieurs caractéristiques. La mise en évidence de la contribution des caractéristiques produit dans le calcul de la valeur de l'indicateur constitue un élément essentiel afin d'aider les concepteurs à modifier leurs propositions en cours de conception.

5.2.2.Cas 2 : Poursuivre l'implémentation d'une seule règle DfE dans plusieurs phases de conception ».

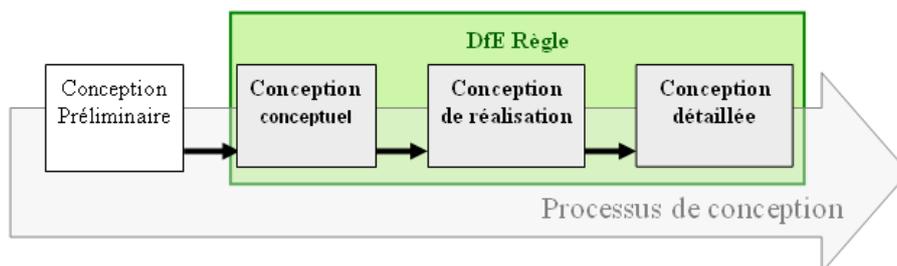


Figure 50: Implémentation d'une règle DfE au cours des phases de conception.

Nous présentons ici comment se déroule l'évaluation d'une règle DfE au cours des phases de conception du projet. Dans ce cas l'Indicateur Global [I_{Glo}] est égal à l'Indicateur [I_i] parce que l'on ne considère qu'un seul indicateur.

Les variations de valeur de l'indicateur entre les étapes de conception étudiées dépend de :

- Des différentes valeurs des caractéristiques du produit [K_i] engagées pour la traduction de la règle DfE selon les étapes de conception étudiées
- Des différents calculs d'indicateur mis en place pour chaque étape de conception.

a) Différentes valeurs selon les caractéristiques Ki du produit

Dans l'évolution de la conception, la traduction du niveau d'implémentation de la règle DfE implique un changement de valeur pour la même caractéristique.

Cette évolution qui s'adapte au rythme des développements permet une évaluation plus fine, avec un niveau plus haut de certitude pour le choix des caractéristiques du produit. Ce changement est représenté dans l'exemple suivant, basé sur le calcul de l'indicateur $[I_{p_{m-n-Recyclabilité\%}}]$ s'appuyant sur les deux caractéristiques suivantes :

- Nombre de types de matières recyclables
- Nombre des matières dans le produit

La valeur de $[I_{p_{m-n-Recyclabilité\%}}]$ va ainsi varier selon le niveau de définition du produit :

- Dans la phase de « Conceptual Design », la liste des matières s'appuie sur une liste de matériaux classée selon de grandes catégories (tableau 18).

Type de matières (Groupe) dans le Produit (Les grandes classes de matériaux)
Minéraux
Métaux non ferreux
Métaux ferreux / alliages
Plastiques

Tableau 18: Catégories de matières en phase de Conception Conceptuelle

- Dans la phase d'« Embodiment Design » la liste des matières se précise, avec une liste de « Matière Générique » comme l'acier, l'inox, l'ABS, le PTFE, □

Type de matériaux (Groupe) dans le Produit (Les grandes classes de matériaux)	Nom de matière (Générique) /Abréviation
Minéraux	
Métaux non ferreux	
Métaux ferreux / alliages	
Métaux ferreux / alliages	Acier
Métaux ferreux / alliages	Fer
Métaux ferreux / alliages	Fonte
Métaux ferreux / alliages	Acier spéciaux TTH
Plastiques	
Plastiques	ABS - Acrylonitrile
Plastiques	TPE - Thermoplastic
Plastiques	Autre polymères-Spécifique

Tableau 19: Catégories de matières plus précises en phase d'Embodiment Design

- Dans la phase de « Detailed Design » la liste des matières est connue de façon détaillée.

Type de matières (Categorisé dans les Produits Les grandes catégories de matériaux)	Noms de matières (Categorisés / Abréviés)	Nom de matière (Détailée) /Abréviation
Non Métal (Matériaux Minéraux...)		
Métaux non ferreux		
Métaux ferreux / alliages		
Métaux ferreux / alliages	Acier	
Métaux ferreux / alliages	Acier inox	
Métaux ferreux / alliages	Acier inox	XXCrNi18-10 (AISI 304L)
Métaux ferreux / alliages	Acier inox	XXCrNiMo17-12 (AISI 316L)
Métaux ferreux / alliages	Acier inox	XXCr17 (AISI 430)
Métaux ferreux / alliages	Acier inox	XXCrTi12 (AISI 409)
Métaux ferreux / alliages	Bronze	
Métaux ferreux / alliages		
Métaux ferreux / alliages	Plomb	
Plastiques		
Plastiques	ABS - Acrylonitrile...	
Plastiques	ABS - Acrylonitrile...	ABS
Plastiques	ABS - Acrylonitrile...	AMMA
BR - Polybutadiène	BR	BR
Plastiques	Autre polymères-Spécifique	DAP
Plastiques	Autre polymères-Spécifique	PFA
Plastiques		
Plastiques	Autre polymères-Spécifique	UF

Tableau 20: Liste de matières en phase de conception détaillée

Les tableaux ci-dessus, montrent un exemple de variation des valeurs des caractéristiques produit qui se précisent au cours de la conception.

b) Différents calculs d'indicateurs mis en place pour chaque étape de conception

Les représentations conceptuelles (préliminaires) au début de la conception ne permettent pas toujours d'avoir un calcul d'indicateur très élaboré, de nombreuses informations étant manquantes (fixations entre composants, détail des matériaux, □). Arrivé à un certain stade de la conception, une fois la solution plus détaillée, on peut être amené à modifier la façon de calculer l'indicateur. On va ainsi chercher à affiner l'information pour le calcul des valeurs des indicateurs, tout en essayant de ne pas dénaturer le calcul de l'indicateur, afin de pouvoir suivre son évolution.

Pour la réalisation de l'objectif environnemental « **Améliorer la recyclabilité** », nous choisissons la règle DfE suivante « **Augmenter le taux de recyclabilité des matières utilisées dans le produit (No. Matières)** ». Dans ce cas, la formule de calcul de l'indicateur dépend du **Nombre de matières recyclables** et du **Nombre total de matières** :

Formule de calcul l'Indicateur	=	$\frac{[\text{Nombre de type de chaque matières recyclables}]}{[\text{Nombre des matières dans le produit}]}$
-----------------------------------	---	---

Équation 5: Formule de calcul d'un indicateur

En phase d'études détaillées, nous aurons des informations plus précises sur les matières utilisées, sur leur compatibilité ou désassemblabilité, qui sont d'autres caractéristiques des composants. Dans ce cas, et selon l'option de fin de vie choisie (désassemblage ou broyage), on examinera d'autres caractéristiques que les 2 retenues pour la phase de « *Conceptual Design* ». Le nombre des matières recyclables deviendra ainsi le nombre des matières recyclables compatibles au broyage et/ou le nombre de matières recyclables désassemblables.

5.2.3. Cas 3 : « Liste des règles DfE dans la phase de conception ».

Ce dernier cas va nous permettre de montrer comment est prise en compte la diversité de règles possibles à retenir lors d'un projet de conception et ceci pour une seule phase de conception.

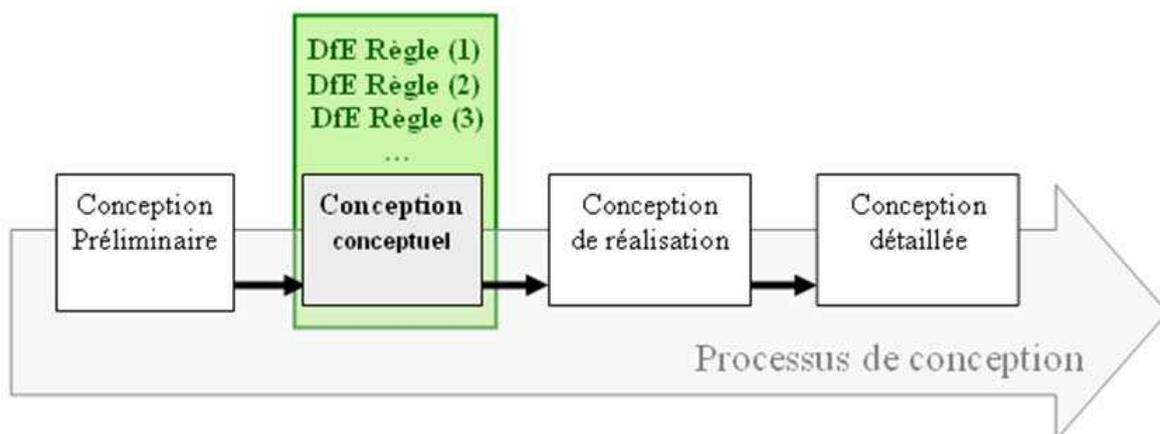


Figure 51: Implémentation d'un groupe de règles DfE dans une phase de conception

Ici, le concepteur va chercher à obtenir une information globale sur l'implémentation de ses règles DfE. Si le résultat global ne le satisfait pas, il va alors chercher à identifier d'où vient le problème via la mise en évidence des résultats pour chaque règle. Pour un calcul au plus juste de ses besoins, il aura auparavant identifié un système de pondération entre ses règles. Ainsi, dans cette démarche, les indicateurs sont calculés, comme précédemment, selon les formules attachées à chaque indicateur. Chaque formule dépend des caractéristiques des produits et le résultat est donné sous la forme d'un taux (%), pour faciliter la comparaison des valeurs des indicateurs. Chaque indicateur $[I_i]$, et donc chaque règle, a un facteur de pondération $[F_i]$ et la valeur finale de l'Indicateur Global $[I_{Glo}]$ est calculée en prenant en compte les valeurs des facteurs de pondération pour chaque règle DfE.

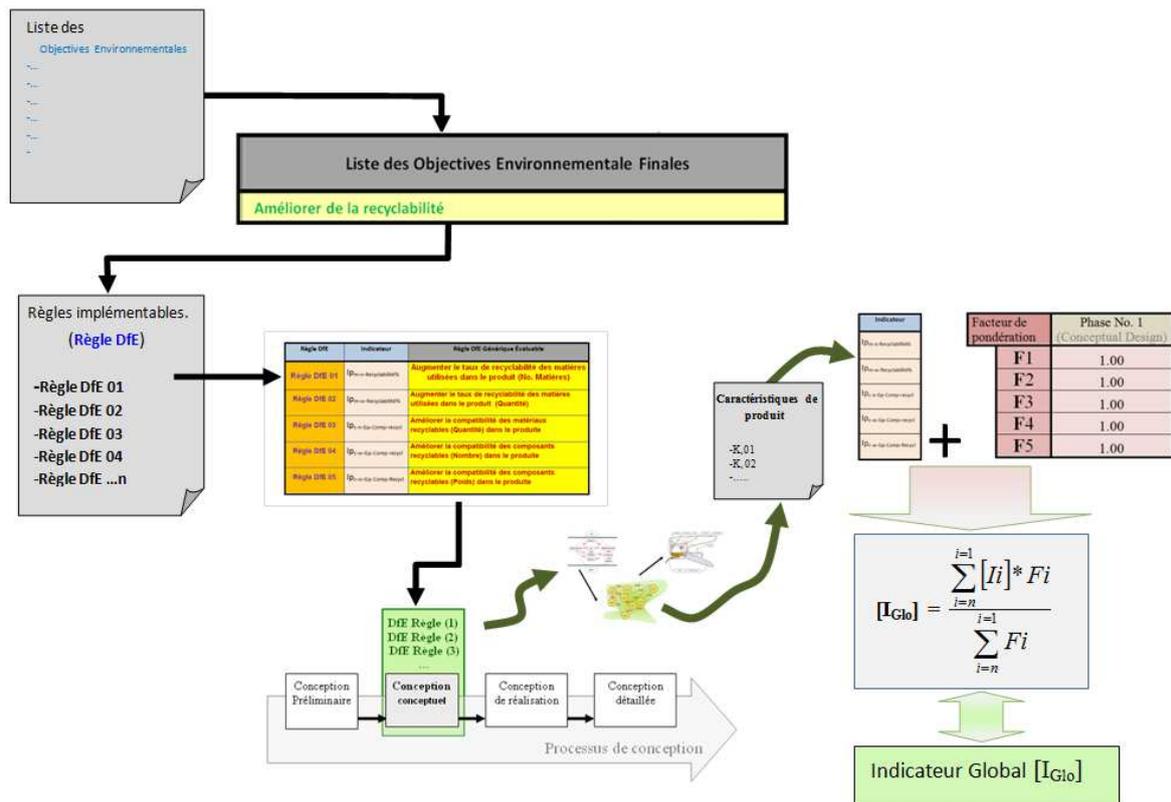


Figure 52: Valeur de l'indicateur globale d'implémentation des Règles DfE dans l'étape étudiée

Restant sur un exemple orienté fin de vie, nous allons présenter l'adaptation au scénario « Recyclabilité ». Cette objectif de conception s'adapte avec l'approche DfX (DfRecyclability) et l'on choisit l'Objectif Environnemental « Améliorer la recyclabilité » dans la conception du produit en général. L'étape étudiée ici pour présenter la façon de calculer est la phase de conception conceptuelle.

A partir de la liste de règles qui s'adapte à l'Objectif Environnemental ciblé « Améliorer la recyclabilité », nous choisissons un groupe de 5 règles DfE :

- « Augmenter le taux de recyclabilité des matières utilisées dans le produit (No. Matières) ».
- « Augmenter le taux de recyclabilité des matières utilisées dans le produit (Quantité) ».
- « Améliorer la compatibilité des matériaux recyclables (Quantité) dans le produit ».
- « Améliorer la compatibilité des composants recyclables (Nombre) dans le produit ».
- « Améliorer la compatibilité des composants recyclables (Poids) dans le produit ».

Chaque indicateur est traduit par des éléments évaluable spécifiques (Caractéristiques du produit) selon le contexte et la rédaction de la règle DfE qui la représente. Le tableau suivant représente les formules de calcul pour chaque règle DfE implémentée.

Indicateur		Règle DfE
Symbole	$I_{p_{m-n-Recyclabilité\%}}$	Augmenter le taux de recyclabilité des matières utilisées dans le produit (No. Matières)
Rédaction	Taux (Nombre) des matières recyclables dans le produit	
Formule de calcul l'Indicateur	$= \frac{[\text{Nombre de type de chaque matières recyclables}]}{[\text{Nombre des matières dans le produit}]}$	
Symbole	$I_{p_{m-w-Recyclabilité\%}}$	Augmenter le taux de recyclabilité des matières utilisées dans le produit (Quantité)
Rédaction	Taux (Quantité) des matières recyclables dans le produit	
Formule de calcul l'Indicateur	$= \frac{\sum[\text{Quantité de chaque matière recyclable}]}{[\text{Quantité (Poids) des matières dans le produit}]}$	
Symbole	$I_{p_{m-w-Gp-Comp-recycl}}$	Améliorer la compatibilité des matériaux recyclables (Quantité) dans le produit
Rédaction	Taux des matières (Quantité) compatibles à la recyclabilité	
Formule de calcul l'Indicateur	$= \frac{\sum \text{[Quantité de chaque matière compatible (à la recyclabilité) au chaque groupes principaux]}}{[\text{Quantité (Poids) des matières dans le produit}]}$	
Symbole	$I_{p_{c-n-Gp-Comp-recycl}}$	Améliorer la compatibilité des composants recyclables (Nombre) dans le produit
Rédaction	Taux des Composants (Nombre) compatibles à la recyclabilité	
Formule de calcul l'Indicateur	$= \frac{\sum \text{[Nombre des Composants compatibles (à la recyclabilité) au chaque groupes principaux]}}{[\text{Nombre des Composante dans le produit}]}$	
Symbole	$I_{p_{c-w-Gp-Comp-recycl}}$	Améliorer la compatibilité des composants recyclables (Quantité) dans le produit
Rédaction	Taux des matières (Quantité) compatibles à la recyclabilité	
Formule de calcul l'Indicateur	$= \frac{\sum \text{[Quantité des Composants compatibles (à la recyclabilité) au chaque groupes principaux]}}{[\text{Quantité (Poids) des composants dans le produit}]}$	

Tableau 21: Formules de calcul traduisant la Règle DfE à partir d'indicateurs produit.

Chaque indicateur est calculé et donc chaque niveau d'implémentation des règles DfE est déterminé. Le calcul de l'indicateur global $[I_{Glo}]$ peut alors être effectué :

$$[I_{Glo}] = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [I_i] * F_i}{\sum_{i=1}^{i=n} F_i}$$

Équation 6: Valeur de l'indicateur globale selon les indicateurs et les facteurs de pondération

On peut ici chercher à pondérer plus fortement les règles mettant en avant des aspects « masses de matières recyclables » dans les formules, dans la mesure où ce sont des taux relatifs aux masses qui sont demandés par la norme. On mettrait alors ces règles au taux 1 et les autres au taux 0,5 par exemple.

Le chapitre suivant va nous permettre d'illustrer la globalité de la démarche sur un cas simple.

Chapitre 6 : Implémentation de la méthode lors de la conception d'une agrafeuse

6.1. Présentation du projet de conception d'une agrafeuse

6.1.1. Présentation du produit retenu

Afin d'illustrer comment s'implémentent les différents concepts précédemment présentés, nous proposons dans ce chapitre de traiter une étude de cas : la conception d'une agrafeuse à partir de règles DfE. L'agrafeuse est un produit mécanique dont la mission principale est de fixer des objets de faible épaisseur à l'aide d'une agrafe. Ce produit peut posséder plusieurs types de conception pour répondre à la diversité des tâches et des besoins et à la variété des utilisateurs et des conditions d'utilisation. Les différents types d'agrafeuses que l'on retrouve aujourd'hui sur le marché sont répertoriés dans le tableau 22.

	Agrafeuse de bureau
	Agrafeuse-cloueuse (manuel, pneumatique, électrique)
	Agrafeuse « à carton »
	Agrafeuse sans agrafe
	Agrafeuse chirurgicale

Tableau 22: La diversité des agrafeuses selon les besoins et les conditions d'utilisation

Le but de ce cas d'étude est de concevoir une « agrafeuse à carton » qui peut répondre aux différents besoins (Multi-usage) de l'utilisateur et qui s'adapte à une utilisation manuelle sans consommation d'énergie externe (pneumatique ou électrique).

La Figure 53 présente les différentes formes de conception d'une agrafeuse à carton.



Figure 53: Différentes agrafeuses à carton

6.1.2. Processus de conception proposé

Dans le cas de cet exemple, la démarche de conception du produit suit deux démarches parallèles : une démarche de conception classique selon le modèle Pahl et Beitz et une démarche d'éco-conception basée sur la mise en place de règles de conception pour l'environnement (démarche proposée dans cette thèse).

Modèle Pahl et Beitz

La démarche classique selon le modèle Pahl et Beitz repose sur quatre phases principales :

- Conception préliminaire, cahier des charges, analyse de la pré-conception [*Task Clarification & Design Specification*]
- Conception conceptuelle [*Conceptual Design*]
- Conception de réalisation [*Embodiment Design*]
- Conception détaillée [*Detailed Design*]

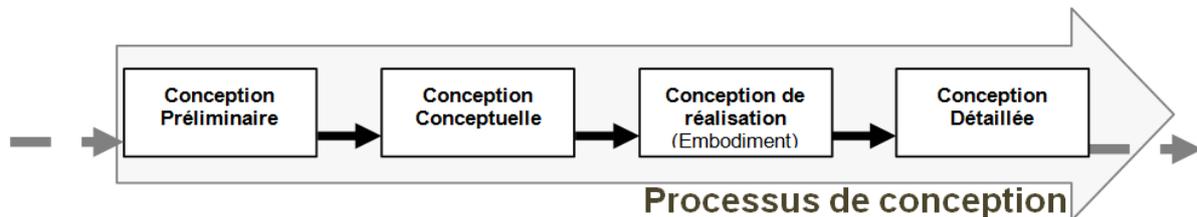


Figure 54: Processus de conception selon le modèle de Pahl et Beitz

Evaluation Environnementale (Règles DfE)

En parallèle de la démarche de Pahl & Beitz, une autre démarche est menée pour concevoir le produit en intégrant des critères environnementaux. Cette démarche consiste à implémenter des règles environnementales pour tenter de répondre aux exigences environnementales du projet. L'utilisation de cette démarche permet de tenir compte de ces exigences environnementales en utilisant un guide au début de la conception (Stratégies et Objectifs environnementaux) et de choisir une liste de règles « DfE » à respecter tout au long de la conception. Ainsi, en respectant ces règles, on évite d'avoir à faire des changements fondamentaux pour l'environnement à la fin du projet de conception, alors que le produit est

quasiment « figé ». Cette démarche permet d'intégrer des changements dès la phase de conception conceptuelle.

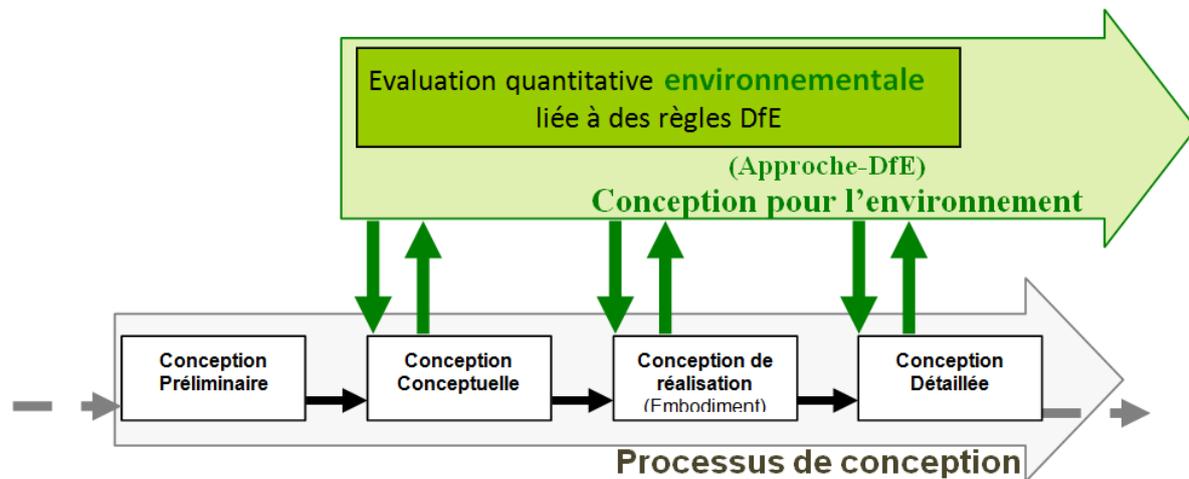


Figure 55: Processus de conception proposé en appui sur les règles DfE

6.2. Démarche d'implémentation des règles DfE dans le processus d'éco-conception

Tel qu'il est connu, le concept d'éco-conception vise à intégrer les problématiques environnementales dans le processus de conception du produit et/ou du service. La démarche présentée ici a pour objectif de caractériser la vision globale de l'intégration du concept de règles DfE dans le processus d'éco-conception. Cette intégration est basée sur le cahier des charges du produit. Ce cahier peut comporter deux parties :

- Le CdCF (Cahier des Charges Fonctionnel) : il est présent sous la forme d'une représentation fonctionnelle (Fonctions externes et internes).
- Le CdCT (Cahier des Charges Technique) : il présente une simulation des caractéristiques du produit (Physique et techniques, □).

6.2.1. Cahier des Charges et Définition des besoins

Dans notre étude de cas, le type d'agrafeuse choisi pour présenter la démarche d'intégration des règles DfE dans le processus de conception sera une « agrafeuse à carton ». Au niveau de son utilisation, ce type d'agrafeuse est multifonctions. Elle permet de fixer deux épaisseurs de carton entre elles. Elle donne aussi une possibilité d'utilisation multiple, avec différents types de cartons (carton plat, multi-pli, □).

En ce qui concerne l'énergie pour sa mise en marche, ce type d'agrafeuse fonctionne avec l'énergie humaine (utilisation manuelle). Elle respecte la sécurité de son utilisateur. C'est un produit pratique, simple à entretenir et à réparer, qui doit pouvoir s'adapter à un scénario de fin de vie de type « recyclage matière ».

Une présentation du cahier des charges est donnée dans le tableau 23, avec l'ensemble des concepts qui seront nécessaires à notre démarche.

CdC	Note	Valeur
Durée de vie	- 5 ans (300x8x60x40)	- 30 Millions de frappe
Besoin de l'utilisateur	- « Agrafeuse à carton » qui réponde aux différents besoins (Multi-usage) de l'utilisateur	- Agrafeuse à carton - Multi-usage
Fonctions principales	- Agrafeuse à carton - Fixer les deux cotés d'un carton - Différents types de cartons (carton plats)	- Cartons plats et autres types - 1 utilisateur pour multiples usages
Coût	- Prix raisonnable	- 40-50 €
Exigences environnementales	- Récupérable à la fin de vie (Recyclable, Disassemblable) - Moins polluante (Nombre de composantes, Taux de pollution) - Caractéristiques écologiques (Diversité des matières, Dématérialisation)	- 85 % Recyclable, 100 Disassemblabilité - (0) pollution
Fonctionnalités	- Ergonomie confortable - Adaptée aux multi-matériels (carton) de multi-épaisseurs - Possibilité de réglage de la force/ puissance de frappe - Multi-usages	- 3mm-28mm - Puissance variée
Caractéristiques-Tech	- Poids léger - Tailles d'agrafe - Chargement aisé - Blocage de sécurité (agrafe) - Capacité d'agrafes (cartons entre 3 et 14mm) - Capacité d'agrafes (papier entre 0.29 mm et 0.48 mm) - Corps en métal résistant et inoxydable - Forme esthétique, ergonomique et confortable permettant le transfert optimal de la force - Utilisation manuelle et rapide - Utilisation professionnelle - Utilitaire lourd et robuste - Réglage facile - Entretien et réparation (facile, simple et rapide)	- 400 et 600 grammes - 3 - 17mm - 100 agrafes - Mécanique - 7 - 2 couches de carton - 170 - 150 feuilles - Milieu industriel
Processus / production	Pliage et pression	
Utilisateurs ciblés	professionnels	

Tableau 23: Le cahier des charges de l'agrafeuse à carton et ses exigences environnementales

La démarche de conception proposée pour ce produit vise à intégrer des exigences environnementales parallèlement aux exigences de conceptions « classiques », afin d'aboutir à un éco-produit. Dès l'élaboration du cahier des charges de l'agrafeuse, le concepteur doit déterminer les exigences environnementales que la démarche de conception doit prendre en charge. Ces exigences sont choisies selon les concepts environnementaux que le produit s'engage à respecter et selon l'image écologique et environnementale qu'il veut renvoyer. Mais la seule présence d'exigences environnementales au niveau du cahier des charges ne suffit pas forcément à leur prise en compte durant la conception. C'est pour cela que nous proposons ici de tenir compte des exigences environnementales du projet via la mise en place de règles de conception pour l'environnement.

6.2.2. Choix des objectifs environnementaux

A partir du CDC du produit, le concepteur peut déterminer les exigences environnementales qui sont nécessaires à intégrer dans la conception de l'agrafeuse. Le choix des objectifs

environnementaux est effectué par les responsables et les concepteurs selon l'orientation environnementale du secteur d'activité et/ou du message que l'entreprise veut faire passer pour ce produit (récupérable en fin de vie, moins polluant, caractéristiques de produit plus écologiques, □).

Les cinq objectifs environnementaux pour l'agrafeuse sont :

- Améliorer la recyclabilité
- Améliorer le désassemblage du produit
- Réduire la diversité des matières utilisées
- Réduire l'utilisation de matières polluantes
- Optimiser la consommation de matière (dématérialisation)

6.2.3. Domaines d'implémentation des règles DfE

En s'appuyant sur la définition des objectifs environnementaux et le tableau d'engagement objectifs/domaines (tableau 24), le concepteur définit les domaines de compétences qui seront engagés dans cette démarche.

Le tableau 24 suivant montre l'engagement des cinq objectifs en lien avec les domaines. Les liens entre les domaines et les objectifs sont représentés sous la forme de [1, X, Non] (lien direct, lien indirect, pas de lien).

Après l'extraction de la liste complète des domaines liés aux objectifs environnementaux, les domaines impliqués effectivement dans la conception de l'agrafeuse sont déterminés selon les compétences du concepteur, les outils et les moyens supports disponibles au projet (techniques et analytiques) employés tout au long du processus de conception.

Les domaines choisis dans notre étude de cas sont :

- **Cycle de Vie du produit** (Matière première, Production, Utilisation du produit, Scénario de fin de vie du produit)
- **Toxicité et Pollution** (Prévention, Réduction, Dépollution)
- **Consommation des ressources** (Consommation de matière, Consommation d'énergie)
- **Type du produit** (Électronique et Électrique, Produit automobile et mécanique, Produit jetable, Mobilier, □)
- **Approche DfX** (DfReuse, DfRemanufacturing, DfRecycling, DfEnvironment, DfDisassembly, DfMA (Manufacturing & Assembly), DfElimination (safe-landfill Composting), DfIncineration (safe-Incineration), DfWM (Waste-Minimisation), DfDurability.

- **Maintenance et Upgrading** (Maintenance, Upgrading, Réparabilité)
- **Developpement Durable & Eco-Innovation** (Bénéfices économiques, Bénéfices écologiques, Bénéfices fonctionnels et techniques, Bénéfices sociaux)

Liste des Objectives Environnementales Finales	Matière Première				Prévention (Damage-Déchets)			Consommation de Matière		Produit-Électronique et Électrique				Produit-Véhicule et Mécanique				Produit-Jetable				Produit-Meubles				D/Reuse				D/Remanufacturing				D/Recycling				D/Environment				D/Disassembly				D/MA (Manufacturing & Assembly)				D/Elimination (safe-landfill)				D/Incineration (safe-incineration)				D/WM (Waste-Minimisation)				D/Durability				Maintenance				Upgrading				Réparabilité				Bénéfices Economiques				Bénéfices Ecologiques				Bénéfices Fonctionnelle et				Bénéfices Sociales			
	Production	Utilisation du produit	Scenario	Fin de vie du produit	Prévention	Reduction	Dépollution	Consommation de Matière	Consommation d'Énergie	Produit-Électronique et Électrique	Produit-Véhicule et Mécanique	Produit-Jetable	Produit-Meubles	D/Reuse	D/Remanufacturing	D/Recycling	D/Environment	D/Disassembly	D/MA (Manufacturing & Assembly)	D/Elimination (safe-landfill)	D/Incineration (safe-incineration)	D/WM (Waste-Minimisation)	D/Durability	Maintenance	Upgrading	Réparabilité	Bénéfices Economiques	Bénéfices Ecologiques	Bénéfices Fonctionnelle et	Bénéfices Sociales																																																															
Améliorer de la recyclabilité	1	1	X	1	1	1	1	1	Non	1	1	X	1	Non	Non	1	Non	1	Non	Non	Non	1	X	Non	Non	Non	1	X	1	Non																																																															
Améliorer de la désassemblabilité du produit	1	1	1	1	1	1	1	Non	Non	1	1	Non	1	1	1	1	X	1	X	Non	X	1	1	1	X	1	X	X	1	Non																																																															
Réduire de la diversité des matières utilisés	1	X	1	1	1	1	Non	1	Non	1	1	1	1	Non	Non	1	X	1	1	X	1	Non	Non	X	Non	X	Non	X	Non	Non																																																															
Réduire de l'utilisation de matière polluant	1	X	1	1	1	1	1	1	X	1	1	X	1	1	1	1	1	X	Non	1	1	1	Non	X	Non	X	1	1	X	1																																																															
Optimiser de la consommation de Matériel consommées (Dématérialisation)	1	X	1	1	1	1	Non	1	1	1	X	Non	Non	1	X	Non	1	Non	1	Non	Non	1	X	1	1	X	1	1	1	1																																																															

Tableau 24: Domaines engagés selon les objectifs environnementaux pour la conception de l'agrafeuse

6.2.4. Règles DfE implémentées et évaluable

Partant de la détermination des objectifs environnementaux et des domaines d'implémentation des règles DfE, le concepteur est capable de choisir les règles applicables et traduisibles.

➤ Choix des Règles DfE implémentées dans la conception de l'agrafeuse

A partir de la liste des objectifs environnementaux, et en se basant sur le tableau de l'engagement des objectifs environnementaux avec les règles DfE liées (tableau 25), le concepteur est capable d'extraire le tableau d'engagement Objectifs/ Règles DfE pour son étude.

No. Des Obj-En engagée (Directe)	Obj-En-7	Obj-En-13	Obj-En-24	Obj-En-27	Obj-En-35	Règle DfE Générique	
	Améliorer la recyclabilité	Améliorer la désassemblabilité du produit	Réduire la diversité des matières utilisées	Réduire l'utilisation de matière polluantes	Optimiser la consommation de Matériel première consommés (Dématérialisation)		
1	3	1	X	1	X	1	Améliorer la compatibilité des matériaux recyclables dans le produit
2	2	1	1	Non	X	Non	Améliorer la désassemblabilité du composant polluante
3	2	1	1	Non	Non	Non	Améliorer la désassemblabilité du produit (Nombre des composants desassemblés)
5	2	1	1	Non	Non	Non	Améliorer la désassemblabilité de la relation entre des composants
6	1	Non	Non	Non	Non	1	Améliorer la fonctionnalité du produit (Optimiser de la fonctionnalité du produit/ No. composant)
7	1	X	1	Non	Non	X	Améliorer la modularité du composant
8	1	Non	1	Non	Non	X	Améliorer la modularité du produit
99	2	1	Non	X	Non	1	Choisir les matières recyclés dans le produit
100	2	1	Non	Non	Non	1	Choisir les matières recyclés engagées dans l'emballage du produit
101	1	Non	Non	Non	Non	1	Concevoir de produit multifonctions
102	1	Non	Non	Non	Non	1	Concevoir des produits adaptables à différents utilisateurs
103	1	Non	X	Non	Non	1	Maximiser le taux de valorisation de réutilisation de produit (Reutisation)
112	1	Non	Non	1	1	X	Minimiser la diversité des matières polluantes dans le produit
113	2	X	X	1	1	Non	Minimiser la diversité des matières polluantes recyclables dans le produit
114	3	1	X	1	1	Non	Minimiser la diversité des matières polluantes recyclables dans le produit
115	2	1	X	1	Non	X	Minimiser la diversité des matières recyclables dans le produit
201	2	X	Non	1	1	X	Eviter l'utilisation de matière polluante pendant la production de produit
202	4	1	Non	1	1	1	Remplacer le produit physique par un produit non-physique ou par un service
203	2	X	Non	Non	1	1	Utiliser des matières polluantes compatibles à traiter à la fin de vie du produit
204	2	X	Non	Non	1	1	Utiliser des matières polluantes recyclable
205	2	X	Non	Non	1	1	Utiliser des matières polluantes recyclés
206	3	1	Non	1	1	X	Utiliser des matière polluantes compatibles à traiter ensemble à la fin de vie du produit

119 75 83 45 130

Tableau 25: Tableau objectifs / règles pour notre étude de cas

Dans ce tableau, nous voyons la liste finale des règles DfE pouvant être engagées pour la réalisation des objectifs environnementaux de notre étude de cas. Mais toutes ces règles ne sont pas forcément traduisibles selon les caractéristiques du produit. En effet, la traduction des règles DfE en valeurs quantitatives dépend de la disponibilité des caractéristiques du produit qui sont traduisibles selon les éléments du modèle [CRP]. La détermination de ces règles DfE

traduisibles est précisée une fois que sont établies la disponibilité des caractéristiques du produit et la liste des domaines qui sont engagés dans la conception de l'agrafeuse.

➤ **Choix des règles DfE traduisibles pour la conception de l'agrafeuse**

Tel qu'expliqué précédemment, les règles DfE traduisibles sont déterminées par la disponibilité des caractéristiques du produit (éléments évaluables) qui sont capables de traduire les caractéristiques de produit selon chaque domaine d'implémentation. Le tableau suivant représente les domaines liés aux objectifs environnementaux choisis et en même temps les règles DfE liées. Ces domaines représentent les caractéristiques du produit qui sont engagées et qui sont nécessaires pour traduire les règles DfE liées.

Nombre des caractéristiques engagées	Indicateur	Règle DfE Générique Évaluable	Domaines d'implémentation																													
			Matière Première Production	Utilisation du produit	Scenario Fin de vie du produit	Prévention (Damage-Dechets)	Réduction (Damage-Dechets)	Dépollution	Consommation de Matière	Consommation d'Énergie	Produit Électronique et Électrique	Produit Véhicule et Mécanique	Produit-Jetable	Produit-Réutilisables	DfReuse	DfRemanufacturing	DfRecycling	DfEnvironment	DfDisassembly	DfMSA (Manufacturing & Assembly)	DfElimination (safe-lanfill Composting)	DfInnovation (safe-actualization)	DfMA (Micro-Administration)	DfDurability	Maintenance	Upgrading	Repairable	Bénéfices Économiques	Bénéfices Écologiques	Bénéfices Fonctionnelle et Techniques	Bénéfices Sociales	
Règle DfE 01	Ip=0-Rcyclabilite%	Augmenter le taux de recyclabilité des matières utilisées dans le produit. (No. Matières)	1	X	1				X							1	X												X	X		
Règle DfE 02	Ip=0-Rcyclabilite%	Augmenter le taux de recyclabilité des matières utilisées dans le produit. (Quantité)	1	X	1				1							1	X											X	X			
Règle DfE 03	Ip=0-Op-Comp-recycl	Améliorer la compatibilité des matériaux recyclables. (Quantité) dans le produit	1	X	1				1							1	X										X	X				
Règle DfE 04	Ip=0-Op-Comp-recycl	Améliorer la compatibilité des composants recyclables. (Nombre) dans le produit	1	1	1				X								X										X	X				
Règle DfE 05	Ip=0-Op-Comp-Rcycl	Améliorer la compatibilité des composants recyclables. (Poids) dans le produit	1	X	1				1							1	X										X	X				
Règle DfE 06	Ip=0-Op-Comp-Rcycl	Améliorer la désassemblabilité de relation entre des composants	1	1	1												X	X	1			X			X	X			X			
Règle DfE 10	Ip=0-Op-Comp-Rcycl	Augmenter la quantité (Poids) des composants mono-matériels	1	1	1												X					X					X	X				
Règle DfE 11	Ip=0-Op-Comp-Rcycl	Améliorer la désassemblabilité du composant polluante	1	1	1		X	X	1																							
Règle DfE 21	Ip=0-Op-Comp-Rcycl	Minimiser le nombre des relations entre les composants polluants et non-polluants	1	1		X	1	X									X	X	X	1							X	X	X			
Règle DfE 22	Ip=0-Op-Comp-Rcycl	Minimiser la diversité des matières dans le produit	1	1		X	1	X									X	X	X	1					X	X	X	X	X			

Tableau 26: Règles DfE traduisibles définies par les domaines d'implémentation et les caractéristiques engagées pour la traduction des Règles DfE implémentées.

Etant donné les points mentionnés ci-dessus, le concepteur détermine la liste finale des règles DfE en fonction de la disponibilité des domaines de compétences et des outils mis en place tout au long du processus de conception. Pour cet exemple, nous choisissons les domaines de compétences suivants :

1. Matière première
2. Utilisation du produit
3. Scenario de fin de vie du produit
4. Consommation de matière
5. DfRecycling

Onze règles ont donc ainsi été choisies parmi les règles DfE engagées pour les cinq domaines sélectionnés dans l'étape précédente (tableau 27). Ces onze règles DfE figurent dans le tableau 27.

Les objectifs Environnementaux	Règle DfE	Indicateur
Améliorer la recyclabilité	Améliorer la compatibilité des composants recyclables (Quantité) dans le produit	Taux de composants (Quantité) compatibles pour le recyclage
	Améliorer la compatibilité des composants recyclables (Nombre) dans le produit	Taux de composants (Nombre) compatibles pour le recyclage
Améliorer le désassemblage du produit	Réduire la relation (Nombre) entre les composants.	Taux (Nombre) de relations dans le produit
	Améliorer la désassemblabilité des relations dans le produit (Nombre)	Taux (Nombre) des relations désassemblables dans le produit
Réduire la diversité de matières utilisées	Minimiser la diversité des matières dans le produit (Nombre).	Taux (Nombre) de similarités des matières dans le produit.
	Augmenter la similarité (Quantité) des matériaux des composants dans le produit	Taux (Max-Quantité) de composants de même matière dans le produit
Réduire l'utilisation de matière polluant	Réduire le nombre de matériaux polluants dans le produit (Nombre)	Taux (Nombre) de matières polluantes dans le produit.
	Réduire la quantité des composants polluants dans le produit (Quantité)	Taux (Quantité) de composants sans polluants dans le produit.
	Améliorer le désassemblage des composants polluants (Nombre)	Taux (Nombre) de relations entre les composants polluants et non-polluants.
Optimiser la consommation de matière (Dématérialisation)	Améliorer la fonctionnalité du produit par rapport au nombre de composants (Nombre). (Fonctionnalité/Nombre)	Taux (nombre) de fonctions du produit selon le nombre de composants dans le produit. (Nombre)
	Améliorer la fonctionnalité du produit par rapport à la quantité des composants (Quantité) (Fonctionnalité/Quantité)	Taux (nombre) de fonctions du produit selon le poids de produit. (Quantité)

Tableau 27: Les 5 domaines et 11 règles engagées dans la conception de l'agrafeuse

6.3. Processus de conception de l'agrafeuse

Une fois la détermination des règles DfE effectuées, il s'agit de voir comment ces règles sont traduites sous forme d'indicateurs. Le tableau 28 suivant représente les caractéristiques pouvant être engagées dans la traduction des règles DfE, selon le modèle [CRP]. Le tableau 28 présente, lui, le calcul des indicateurs qui sera réalisé à partir de la liste des caractéristiques du produit.

Caractéristiques évaluable [K]	Symbole de Caractéristique	Modèle [C,R,P]	Valeur	Unité
1 Complexité de forme de composant	KCComplexité-Forme-1Comp	C	Symbole (liste de choix)	/
2 Complexité de forme de composant multi-matériels	KCComplexité-Forme-2Comp	C	Symbole (liste de choix)	/
3 Condition de codage liée à la désassemblabilité	KCCodage-Désassemblabilité	C	Oui/No	neutre
4 Condition de codage liée à la maintenance	KCCodage-Maintenance	C	Oui/No	neutre
5 Condition de codage liée à la modularité	KCCodage-Modularité	C	Oui/No	neutre
6 Condition de codage liée à la Récupération	KCCodage-Récupération	C	Oui/No	neutre
7 Condition de codage liée à la recyclabilité	KCCodage-Recyclabilité	C	Oui/No	neutre
8 Condition de codage liée au recyclage (recyclé)	KCCodage-Recyclage	C	Oui/No	neutre
9 Condition de codage liée à la remanufacturabilité	KCCodage-Remanufacturabilité	C	Oui/No	neutre
10 Condition de codage liée à la remanufacturing (Remanufacture)	KCCodage-Remanufacturing	C	Oui/No	neutre
11 Condition de codage liée à la réparabilité	KCCodage-Réparabilité	C	Oui/No	neutre
12 Condition de codage liée à la réutilisabilité	KCCodage-Réutilisabilité	C	Oui/No	neutre
13 Condition de codage liée à la séparabilité	KCCodage-Séparabilité	C	Oui/No	neutre
14 Condition de codage liée à la toxicité (Pollution)	KCCodage-Toxicité	C	Oui/No	neutre
<hr/>				
73 Condition le produit réutilisés/nettoyés (Réutilisation/Nettoyage)	KPRéutilisation	P	Oui/No	neutre
75 Condition le produit teste	KPTest	P	Oui/No	neutre
76 désassemblabilité (Démontabilité) de la relation	KCDés	R	Oui/No	neutre
77 désassemblabilité (Démontabilité) du composant	KCDés	C	Oui/No	neutre
78 désassemblabilité (Démontabilité) du produit	KCDés	C	Oui/No	neutre
79 Direction d'axe de désassemblage de composant	KCAxe-Dés	C	Symbole (liste de choix)	/
80 Direction de l'axe de désassemblage de composant polluant	KCAxe-Dés-p	C	Symbole (liste de choix)	/
81 Epaisseur de composant	KEp	C	Nombre	mm
82 Epaisseur de produit	KEp	P	Nombre	mm
83 Facilité de déconnection de relation	KFac	R	Pourcentage	%
84 Facilité de désassemblabilité (démontabilité) de composant	KFac	C	Pourcentage	%
85 Facilité de désassemblabilité (démontabilité) de produit	KFac	P	Pourcentage	%
86 Hauteur de composant	KHa	C	Nombre	mm
87 Hauteur de produit	KHa	P	Nombre	mm
<hr/>				
153 Nombre des tests nécessaires du composant	KPN-Test	C	Nombre	/
154 Nombre des tests nécessaires du produit	KPN-Test	P	Nombre	/
155 Nombre des scénarios fin de vie du composant (similaire) dans le produit	KPN-Test	P	Nombre	/
156 Quantité (Poids) de chaque matière dans le produit	KPm	P	Nombre	gr
157 Quantité (Poids) de composant	KPm	C	Nombre	gr
158 Quantité (Poids) de matériaux consommables utilisés pendant l'utilisation de produit	KPm-Consumable	P	Nombre	/
159 Quantité (Poids) de matière recyclable dans le produit	KPm-Recyclabilité	P	Nombre	/
160 Quantité (Poids) de matière premier consommés et utilisés pendant tout le CV du produit	KPm-Recyclabilité	P	Nombre	/
161 Quantité (Poids) de matière première consommés et utilisés pendant tout le CV du produit	KPm-Recyclabilité	P	Nombre	gr
162 Quantité (Poids) de matière première consommés et utilisés pendant tout le CV du produit	KPm-Recyclabilité	P	Nombre	gr
163 Quantité (Poids) total des matières recyclés dans le produit	KPm-Recyclé	P	Nombre	gr
164 Quantité (Poids) de matière première consommés et utilisés pendant tout le CV du produit	KPm-Recyclabilité	P	Nombre	/
<hr/>				
202 Temps de désassemblage le produit (les composants cibles)	KPDes-Temps	P	Nombre	Second
203 Temps de récupération le produit à la FdV de produit (pour les produits discrets) (3R)	KPRécl-Temps-Récl	P	Nombre	Second
204 Type (Nom) de matière additive dans le produit	KCMat-Additif	C	Symbole (liste de choix)	/
205 Type (Nom) de matière de composant (Détailée) dans le produit	KCMat-D	C	Symbole (liste de choix)	/
206 Type (Nom) de matière de composant (Générale) dans le produit	KCMat-G	C	Symbole (liste de choix)	/
207 Type de composant	KCType	R	Symbole (liste de choix)	/
208 Type de fixation	KFixa-Type	R	Symbole (liste de choix)	/
209 Type de la relation	KCType	R	Symbole (liste de choix)	/
270 Type de l'architecture du produit	KPArch	P	Symbole (liste de choix)	/
271 Type de matière consommable	KPm-Consumable-Type	C	Symbole (liste de choix)	/
272 Type de récupération fonctionnelle (Recovery)	KCRéutilisation-Type	C	Symbole (liste de choix)	/
273 Type de ressource d'énergies consommée pendant l'emballage Transport du produit	KPEnergie-Type-Emball	P	Symbole (liste de choix)	/
274 Type de ressource d'énergies consommée pendant la production du produit	KPEnergie-Type-Prod	P	Symbole (liste de choix)	/
275 Type de ressource d'énergies consommée pendant le triage de produit à la FdV du produit	KPEnergie-Type-FdV	P	Symbole (liste de choix)	/
276 Type de ressource d'énergies consommée pendant utilisation du produit	KPEnergie-Type-Use	P	Symbole (liste de choix)	/
277 Type de scénario de fin de vie	KESc-Type	C	Symbole (liste de choix)	/
278 Type des tests nécessaires du composant	KPN-Test-Type	C	Symbole (liste de choix)	/
279 Type des tests nécessaires du produit	KPN-Test-Type	P	Symbole (liste de choix)	/
280 Type d'intert	KCIntert-Type	C	Symbole (liste de choix)	/

Tableau 28: Liste des caractéristiques du produit pouvant être engagées dans la traduction des règles DfE

Les objectifs environnementaux	Règle DfE	Indicateur	Symbole	Formule de calcul de l'indicateur
Améliorer la recyclabilité	Améliorer la compatibilité des composants recyclables (Quantité) dans le produit	Taux de composants (Quantité) compatibles pour le recyclage	$I_{p-c-w-Gp-Comp-recycl}\%$	$= \frac{\sum [\text{Quantité des Composants compatibles (à la recyclabilité) au chaque groupes principaux}]}{[\text{Quantité des Composante dans le produit}]}$
	Améliorer la compatibilité des composants recyclables (Nombre) dans le produit	Taux de composants (Nb) compatibles pour le recyclage	$I_{p-c-n-Gp-Comp-recycl}\%$	$= \frac{\sum [\text{Nombre des Composants compatibles (à la recyclabilité) au chaque groupes principaux}]}{[\text{Nombre des Composante dans le produit}]}$
Améliorer la désassemblabilité du produit	Réduire la relation (Nombre) entre les composants.	Taux (Nb) de relations dans le produit	$I_{p-r-n-C}\%$	$= \frac{[\text{Nombre des composantes dans le produit}]}{[\text{Nombre des relations dans le produit}] + 1}$
	Améliorer la désassemblabilité des relations dans le produit (Nombre)	Taux (Nb) de relations désassemblables dans le produit	$I_{p-r-n-Désassemblabilité}\%$	$= \frac{[\text{Nombre des relations désassemblables}]}{[\text{Nombre des relations dans le produit}]}$
Réduire la diversité de matières utilisées	Minimiser la diversité des matières dans le produit (Nombre).	Taux (Nb) de similarités des matières dans le produit.	$I_{p-m-n-Similarité}\%$	$= \frac{[1]}{[\text{Nombre de matières dans le produit}]}$
	Augmenter la similarité (Quantité) des matériaux des composants dans le produit	Taux (Quantité) de composants de même matière dans le produit	$I_{p-m-w-Similarité}\%$	$= \frac{\text{Max}[\text{Quantité de composantes de la même matière}]}{[\text{Quantité (Poids) des composants dans le produit}]}$
Réduire l'utilisation de matières polluantes	Réduire le nombre de matières polluantes dans le produit (Nombre)	Taux (Nb) de matières polluantes dans le produit.	$I_{p-c-m-p-n}\%$	$= \frac{[\text{Nombre des matières}] - [\text{Nombre des matières polluants}]}{[\text{Nombre des matières}]}$
	Réduire la quantité de composants polluants dans le produit (Quantité)	Taux (Quantité) de composants sans polluants dans le produit.	$I_{p-c-p-w}\%$	$= \frac{[\text{Quantité des composants}] - [\text{Quantité des composants polluants}]}{[\text{Quantité des composants}]}$
	Améliorer la désassemblabilité des composants polluants (Nombre)	Taux (Nombre) de relations entre les composants polluants et non-polluants pour les relations liées aux composants polluants.	$I_{p-r-p-N-n}\%$	$= \frac{1}{[\text{Nombre des Relations entre les composants polluants et non - polluants}]}$
Optimiser la consommation de matières (Dématisation)	Améliorer la fonctionnalité du produit par rapport au nombre de composants (Nombre). (Fonctionnalité/Nombre)	Taux nombre de fonctions du produit selon le nombre de composants dans le produit. (Nombre)	$I_{p-f-c-n-Fonctionnalité}\%$	$= \frac{[\text{Nombre des Fonctions du produit}]}{[\text{Nombre des composants dans le produit}]}$
	Améliorer la fonctionnalité du produit par rapport à la quantité des composants (Quantité) (Fonctionnalité/Quantité)	Taux nombre de fonctions du produit selon le poids de produit. (Quantité)	$I_{p-f-c-w-Fonctionnalité}\%$	$= \frac{[\text{Nombre des Fonctions dans le produit}]}{[\text{Quantité (Poids) des composants dans le produit}]}$

Tableau 29: Définition des indicateurs retenus pour chaque règle en lien avec les objectifs de l'entreprise

6.3.1. Conception

Dans la phase de conception conceptuelle, une fois la définition des règles DfE et des caractéristiques engagées pour la traduction de chaque règle, l'analyse fonctionnelle externe (CdCF) débute. Cette analyse permet de caractériser, hiérarchiser et valoriser les fonctions attachées à l'agrafeuse (Fonction de service, Fonction technique)

Expression fonctionnelle du besoin:

A partir du cahier des charges et de l'ensemble des relations de l'agrafeuse avec tout ce qui l'environne, nous déterminons les besoins attendus de cette agrafeuse. En nous appuyant sur le graphe d'interaction (Figure 57), nous déterminons les fonctions externes suivantes :

Fonction d'interaction:

Fi1: Transformer la force de la main en force de pression sur une agrafe pour maintenir les cartons (feuilles) ensemble.

Fonctions d'adaptation

Fa1: Avoir une capacité de stockage des agrafes prêtes à l'utilisation.

Fa2: Retour à l'état initial de l'agrafeuse après chaque cycle de fonctionnement

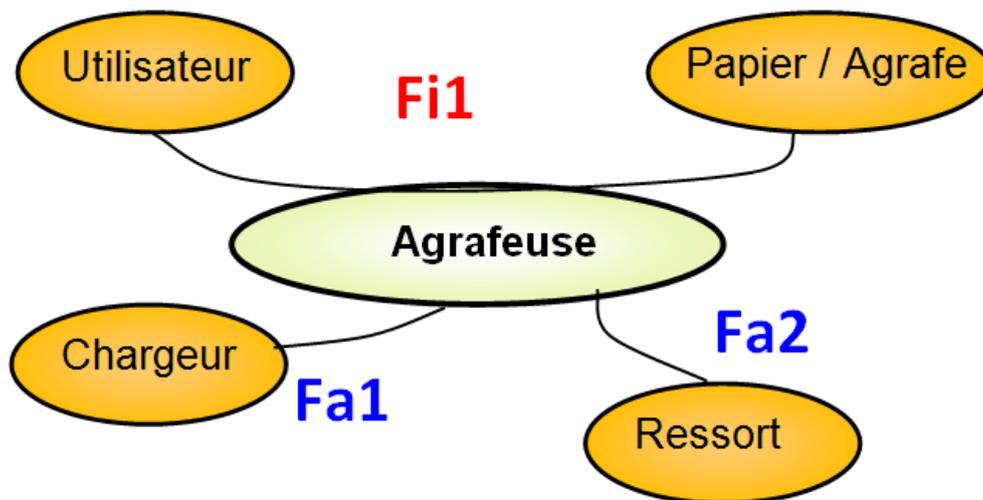
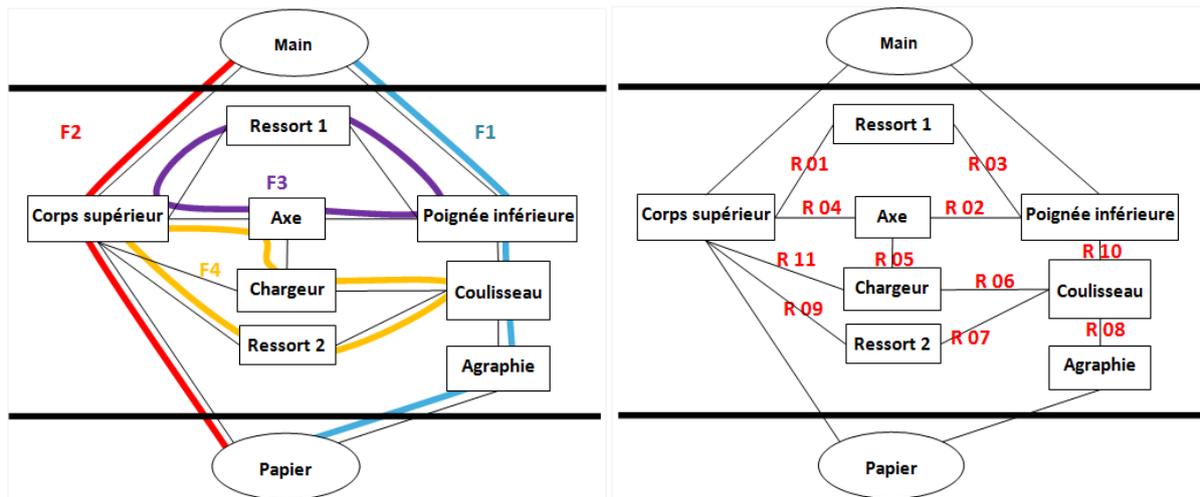


Figure 56: Graphe d'interaction() de l'agrafeuse

Fonctions techniques (internes)

Pour la représentation fonctionnelle, nous utilisons le Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) qui s'appuie sur une première représentation des éléments fonctionnels du produit et leurs relations. Nous pouvons ainsi suivre l'évolution de la conception et des solutions proposées à partir de l'évolution de cette représentation fonctionnelle BDF. Cette représentation, qui est accompagnée par des propositions de composants indique les choix correspondant à des solutions techniques pour chaque flux fonctionnel. La figure 58 ci-dessous montre la représentation fonctionnelle de l'agrafeuse avec les composants principaux proposés et les relations qui sont déjà établies à cette phase de conception.



F1 : exercer l'effort de pression sur l'agrafe F3 : Ecarter les poignées
 F4 : Stocker/distribuer les agrafes F2 : Positionner l'agrafeuse

Figure 57: BDF de l'agrafeuse en phase de conception préliminaire

Notre démarche s'appuie sur une représentation du produit selon le modèle [CRP] qui joue un rôle intermédiaire entre la représentation fonctionnelle externe et les dessins techniques du produit (l'agrafeuse) pour chaque phase de conception. Le modèle CRP, de par la mise en évidence des caractéristiques géométriques et techniques, joue un rôle important dans la traduction des règles DfE selon les caractéristiques du produit (composants, relation entre les composants).

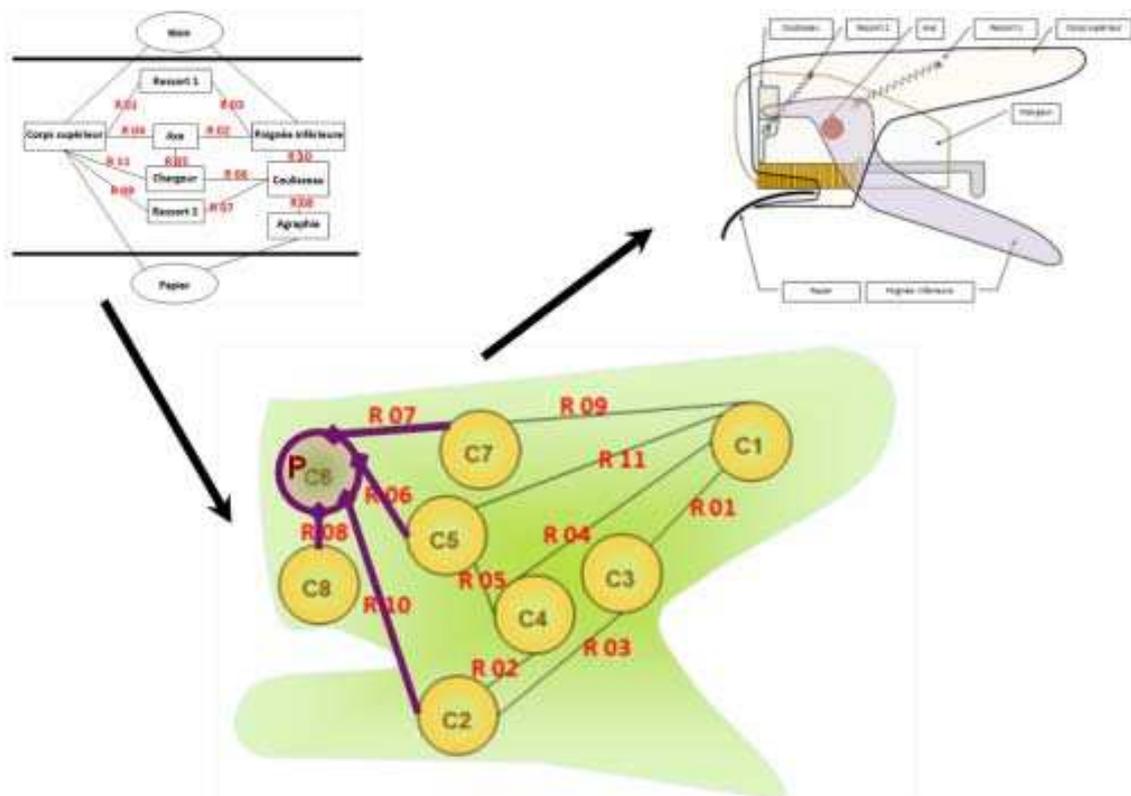


Figure 58: Le modèle [CRP] et les liens tirés de la représentation fonctionnelle (BDF) et/ou du croquis technique.

Implémentation des Règles DfE (phase de conception préliminaire)

En nous appuyant sur le tableau 30 présentant les 11 règles DfE qui ont été retenues par l'équipe de conception et le calcul des indicateurs correspondants, nous allons pouvoir calculer la valeur des indicateurs. Le tableau 30) ci-dessous, présente les caractéristiques techniques des composants de l'agrafeuse définis lors de la phase de conception conceptuelle.

Tableau de Caractéristiques Générales des Composants [C]

Symbole de Composant	Nom de Composant	Type de matériaux (Groupe principal)	Condition de matière d'être recyclable	Condition de composant à être recyclable (Recyclabilité)	Bois Estimé (g)	Type des groupes principaux des matières (Compatibilité de recyclabilité)	Taux de composants (Nombre) compatibles pour le recyclage .	Taux de composants (Quantité) compatibles pour le recyclage.	Condition de matière d'être polluant	Nombre de relations engagée	Relation Engagée
C1	Corps supérieur	Matériaux composites	Oui	Oui	50	Matériaux Métalliques et Composites	12.5%	35.21%	Non	4	R1 R4 R9 R11
C2	Poignée inférieure	Polymère	Oui	Oui	30	Matériaux organiques (Bois, Polymère-Plastique,...)	12.5%	21.13%	Non	3	R2 R3 R10
C3	Ressort 1	Matériaux composites	Oui	Oui	5	Matériaux Métalliques et Composites	12.5%	3.52%	Non	2	R1 R3
C4	Axe	Matériaux composites	Oui	Oui	5	Matériaux Métalliques et Composites	12.5%	3.52%	Non	3	R2 R4 R5
C5	Chargeur	Polymère	Oui	Oui	35	Matériaux organiques (Bois, Polymère-Plastique,...)	12.5%	24.65%	Non	3	R5 R6 R11
C6	Coulisseau	Matériaux composites+ (alliage de caractéristiques -Polluantes)	Oui	Oui	10	Matériaux Métalliques et Composites	12.5%	7.04%	Oui	4	R6 R7 R8 R10
C7	Ressort 2	Matériaux composites	Oui	Oui	2	Matériaux Métalliques et Composites	12.5%	1.41%	Non	2	R7 R9
C8	Agraphe	Matériaux composites	Oui	Oui	5	Matériaux Métalliques et Composites	12.5%	3.52%	Non	1	R8

Tableau 30: Tableau des caractéristiques générales des composants (C) de l'agrafeuse en phase conceptuelle

Ce second tableau (tableau 31) montre les caractéristiques techniques des relations entre les composants de l'agrafeuse dans la phase conceptuelle.

Tableau des Caractéristiques de Relations (R)				
Symbole de Relation	Composantes engagées	Desassemblabilité	Lien avec la Pollution : [P-P] ou [P-N]	Note (Type)
R 01	C1-C3	OUI	Non	Fixation
R 02	C2-C4	OUI	Non	Tourne
R 03	C2-C3	OUI	Non	Contact
R 04	C1-C4	NON	Non	Fixation
R 05	C4-C5	OUI	Non	Tourne
R 06	C5-C6	OUI	Oui [P-N]	Glissant
R 07	C6-C7	OUI	Oui [P-N]	Fixation
R 08	C6-C8	OUI	Oui [P-N]	Contact
R 09	C1-C7	OUI	Non	Contact
R10	C2-C6	OUI	Oui [P-N]	Glissant

Tableau 31: Caractéristiques générales des relations [R] pour l'agrafeuse en phase de conception conceptuelle

Le tableau 32 montre les caractéristiques techniques de l'agrafeuse, engagées dans la traduction des règles DfE.

Tableau des Caractéristiques Générales et des indicateurs du produit [P]		Obj-En-7		Obj-En-13		Obj-En-24		Obj-En-27			Obj-En-35		
Symbole Produit		Règle DfE 01	Règle DfE 02	Règle DfE 03	Règle DfE 04	Règle DfE 05	Règle DfE 06	Règle DfE 07	Règle DfE 08	Règle DfE 09	Règle DfE 10	Règle DfE 11	
Agrafeuse	Nom du Produit												
	Nb. Composants	8											
	Nb. Relations	10											
	Poids estimé (g) (Quantité de Composants / Matières)	142											
	Nombre de matière	3											
	Nombre de matières (Groupe)	2											
	[Polluant-Polluant]	0											
	[Polluant-Non-Polluant]	4											
	Nombre des matières polluants	1											
	Nombre des relations dissemblables	9											
	Nombre des fonctions du produit	1											
	Quantité des composants polluants	10											
	Matériaux Métalliques et Composites	67											
	Matériaux composites+ (alliage polluants)	10											
	Polymères	65											
Matériaux Métalliques et Composites	77												
Matériaux organiques (Bois, Polymère-Plastique,...)	65												
Matériaux Métalliques et Composites	6												
Matériaux organiques (Bois, Polymère-Plastique,...)	2												
Type de matières (Max-Quantité)	142												
Quantité des Composants compatibles (à la recyclabilité)	142												
Nombre des Composants compatibles (à la recyclabilité)	8												
Taux des Composants (Quantité) compatibles à la recyclabilité.	100%	54.23%	45.77%	75.0%	25.0%								
Taux des Composants (Nombre) compatibles à la recyclabilité	100%												
Taux (Nombre) des relations dans le produit	72.7%												
Taux (Nombre) des relations desassemblables dans le produit	90.0%												
Taux (Nombre) de similarité des matières dans le produit.	33.3%												
Taux (Max-Quantité) de composants de même matières dans le produit	47.18%												
Taux (Nombre) des matières polluants dans le produit.	66.6%												
Taux (Quantité) des composants polluants dans le produit.	92.95%												
Taux (Nombre) des relations entre les composants polluants et non-polluants pour les relations liées aux composants polluants	25%												
Taux nombre des fonctions du produit selon les nombre des composantes dans le produit. (Nombre)	12.50%												
Taux nombre des fonctions du produit selon le poids de produit. (Quantité)	0.71%												

Tableau 32: Tableau des caractéristiques générales des composants [C] pour l'agrafeuse en phase de conception conceptuelle

Niveau d'implémentation des Règles DfE (phase de conception conceptuelle)

Niveau d'implémentation de chaque règle

Le tableau suivant montre les valeurs de chaque indicateur (niveau de l'implémentation de la règle DfE) en phase de conception conceptuelle. La variation entre les valeurs des indicateurs signale la déviation dans la réalisation de chaque objectif environnemental sachant que chaque indicateur indique le niveau de réalisation de chaque objectif environnemental ciblé.

Règle DfE	Valeur de l'indicateur en phase de conception conceptuelle
Règle DfE 1	100.00%
Règle DfE 2	100.00%
Règle DfE 3	72.70%
Règle DfE 4	90.00%
Règle DfE 5	33.33%
Règle DfE 6	47.18%
Règle DfE 7	66.67%
Règle DfE 8	92.96%
Règle DfE 9	25.00%
Règle DfE 10	12.50%
Règle DfE 11	0.70%

Tableau 33: Indicateurs (Niveau d'implémentation de la règle DfE) dans la phase conceptuelle

Facteur de pondération

La pondération des règles DfE implémentées dans chaque phase de conception est représentée par un facteur de pondération pour chaque règle. Dans cette étude de cas, les valeurs de ces facteurs $[F_i]$ sont représentées dans le tableau 34 ci-dessous. Les valeurs de ces facteurs de pondération $[F_i]$ sont choisies par les concepteurs selon l'expérience et selon leur influence dans l'engagement de chaque règle lors du calcul du facteur global $[I_{Glo}]$, qui représente le niveau total d'adaptation de la conception du produit aux règles DfE choisies. Pour cet exemple, nous avons mis en place deux niveaux de pondération, avec les valeurs **[1 & 2]**.

Le facteur de pondération $[F_i]$ pour « Améliorer la recyclabilité, Améliorer la désassemblabilité du produit & Réduire de l'utilisation de matières polluantes » est représenté par la valeur [2], et la valeur pour l'objectif secondaire « Optimiser la consommation de matériaux » correspond à la valeur [1]. Pour l'objectif « Réduire la diversité de matières utilisées » nous avons deux règles avec des valeurs différentes, car la règle avec la valeur de pondération [2] « Règle DfE No.[5] » liée « au nombre de matières similaires dans le produit » est plus importante que la règle concernant la « quantité des matières similaires ».

Facteur de Pondération		Phase No. 3 (Detailed Design)
I1 : Règle DfE implimentée 01	F1	2.00
I2 : Règle DfE implimentée 02	F2	2.00
I3 : Règle DfE implimentée 03	F3	2.00
I4 : Règle DfE implimentée 04	F4	2.00
I5 : Règle DfE implimentée 05	F5	2.00
I6 : Règle DfE implimentée 06	F6	1.00
I7 : Règle DfE implimentée 07	F7	2.00
I8 : Règle DfE implimentée 08	F8	2.00
I9 : Règle DfE implimentée 09	F9	2.00
I10 : Règle DfE implimentée 10	F10	1.00
I11 : Règle DfE implimentée 11	F11	1.00

$\sum F_i$	19.00
------------	-------

Tableau 34: Valeur des facteurs de pondération de chaque Règle DfE implimentée

Dans la démarche proposée et pour cet exemple, la valeur du facteur de pondération au cours du processus de conception reste constante, dans toutes les phases de conception.

Niveau d'implémentation de l'ensemble des règles – Indicateur Global [I_{Glo}]

Après avoir pris en compte les valeurs des facteurs de pondération des onze règles DfE choisies, on peut calculer [I_{Glo}], qui représente le niveau d'implémentation de chacune de ces règles. La valeur de cet indicateur [I_{Glo}] donne une indication sur le niveau d'adaptation de la conception du produit avec les objectifs environnementaux ciblés au début de la conception. Le calcul de la valeur de cet indicateur dans chaque phase de conception se fait avec la formule ci-après sachant que les valeurs de chaque indicateur (niveau d'implémentation de la Règle DfE) et son facteur de pondération jouent un rôle clé.

$$I_{Glo} = \sum (F_i * I_i) / \sum F_i$$

Équation 7: Formule de calcul de l'indicateur global [IGlo] pour chaque phase de conception.

La valeur de l'indicateur global est déterminée à [64,3 %].pour cette phase de conception conceptuelle.

6.3.2. Conception de réalisation (*Embodiment Design*)

Dans la phase de conception de réalisation (*Embodiment Design*), la forme prévue de l'agrafeuse se précise, techniquement et géométriquement.



Figure 59: Forme prévue de l'agrafeuse au début de la phase No.2 (*Embodiment Design*)

Comme pour la première phase, nous présentons ici l'évolution de la conception de l'agrafeuse par la représentation fonctionnelle (BDF).

Représentation fonctionnelle

De nouveaux composants ont fait apparaître de nouveaux flux et de nouveaux choix de conceptions (boucles). Le bloc diagramme fonctionnel est ainsi représenté de la manière suivante (Figure 60: Représentation fonctionnelle l'agrafeuse lors de la phase No.2 (*Embodiment Design*)) :

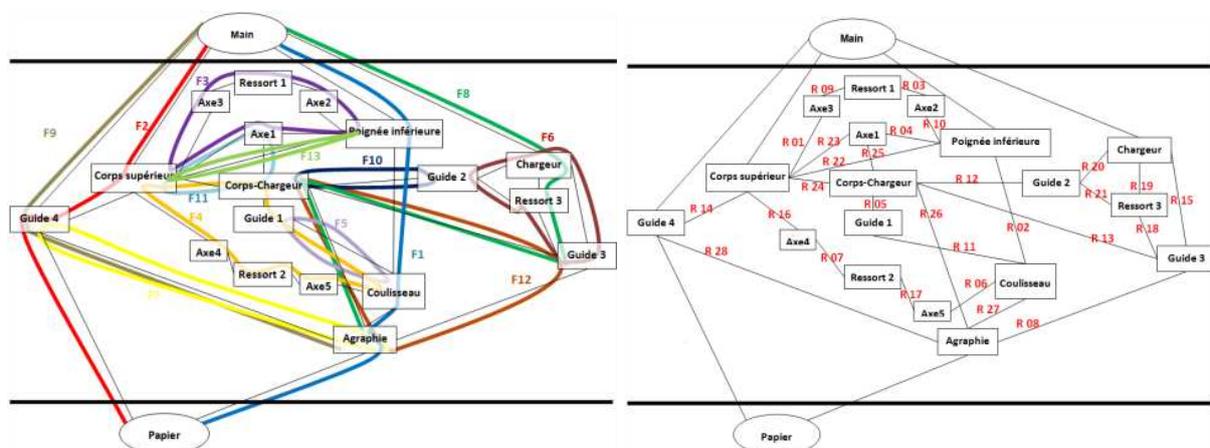


Figure 60: Représentation fonctionnelle l'agrafeuse lors de la phase No.2 (*Embodiment Design*)

Modèle [CRP] et dessin technique

Dès la mise en place de ce diagramme présentant des composants et les relations entre eux, on peut établir le modèle [CRP] qui s'inspire à la fois de la représentation fonctionnelle et des dessins techniques correspondants à l'agrafeuse (Figure 61: Modèle [CRP], BDF et dessin technique de l'agrafeuse lors de la phase No.2 (Embodiment Design)).

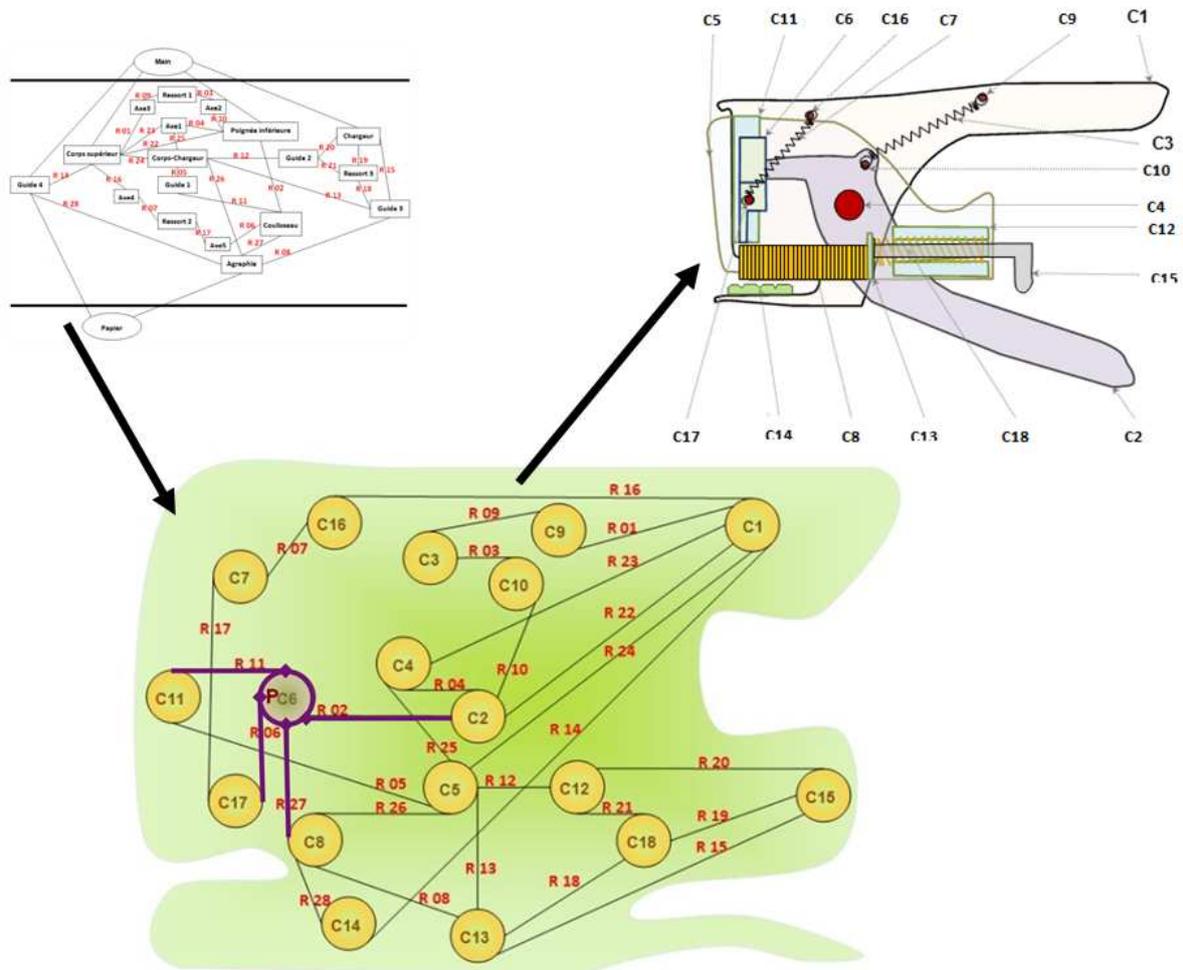


Figure 61: Modèle [CRP], BDF et dessin technique de l'agrafeuse lors de la phase No.2 (Embodiment Design)

A partir de ce diagramme et des autres représentations nous pouvons réaliser les trois tableaux concernant les éléments du modèle [CRP] pour cette phase (tableau 35, tableau 36 et tableau 37).

Tableau C :

Tableau de Caractéristiques Générales de Composant [C]												
Symbole de Composant	Nom de Composant	Type de matériaux (Groupe principal)	Type de matériaux (Général)	Condition de matière d'être recyclable	Condition de composant à être recyclable (Recyclabilité)	Bois Estimé (g)	Type des groupes des matières (Compatibilité de recyclabilité)	Taux des Composants (Nombre) compatibles à la recyclabilité.	Taux des Composants (Quantité) compatibles à la recyclabilité.	Condition de matière d'être polluant	No. Relations Engagées	Relation Engagée
C1	Corps supérieur	Matériaux composites	Acier inox	Oui	Oui	50	Acier inox-Chromium	5.55%	24.39%	Non	6	R1, R14, R16, R22, R23, R24
C2	Poignée inférieure	Polymère	Polymères-Spécifique	Non	Non	30	Polymères-Spécifique	5.55%	14.63%	Non	4	R2, R4, R10, R22
C3	Ressort 1	Matériaux composites	Laiton (Brass)	Oui	Oui	5	Brass, Laiton et Bronze	5.55%	2.44%	Non	2	R3, R9
C4	Axe 1	Matériaux composites	Laiton (Brass)	Oui	Oui	5	Brass, Laiton et Bronze	5.55%	2.44%	Non	3	R4, R23, R25
C5	Corps-Chargeur	Polymère	EP-Thermodurissable	Oui	Oui	35	EP - Fibre de verre (Fibreglass), Si - Silicone	5.55%	17.07%	Non	6	R5, R12, R13, R24, R25, R26
C6	Coulisseau	Matériaux composites	Acier + (alliage de caractéristique-Polluante)	Oui	Oui	10	Acier et métal fer	5.55%	4.88%	Oui	4	R2, R6, R11, R27
C7	Ressort 2	Matériaux composites	Laiton (Brass)	Oui	Oui	2	Brass, Laiton et Bronze	5.55%	0.98%	Non	2	R7, R17
C8	Agraphie	Matériaux composites	Laiton (Brass)	Oui	Oui	5	Brass, Laiton et Bronze	5.55%	2.44%	Non	4	R8, R26, R27, R28
C9	Axe3	Matériaux composites	Laiton (Brass)	Oui	Oui	2	Brass, Laiton et Bronze	5.55%	0.98%	Non	2	R1, R9
C10	Axe2	Matériaux composites	Laiton (Brass)	Oui	Oui	2	Brass, Laiton et Bronze	5.55%	0.98%	Non	2	R3, R10
C11	Guide 1	Matériaux composites	Acier	Oui	Oui	10	Acier et métal fer	5.55%	4.88%	Non	2	R8, R11
C12	Guide 2	Polymère	Polymères-Spécifique	Non	Non	10	Polymères-Spécifique	5.55%	4.88%	Non	3	R12, R20, R21
C13	Guide 3	Matériaux composites	Acier inox	Oui	Oui	5	Acier inox-Chromium	5.55%	2.44%	Non	4	R8, R13, R15, R18
C14	Guide 4	Matériaux composites	Acier inox	Oui	Oui	5	Acier inox-Chromium	5.55%	2.44%	Non	2	R8, R28
C15	Chargeur	Matériaux composites	Acier inox	Oui	Oui	20	Acier inox-Chromium	5.55%	9.76%	Non	3	R15, R19, R20
C16	Axe 4	Matériaux composites	Laiton (Brass)	Oui	Oui	2	Brass, Laiton et Bronze	5.55%	0.98%	Non	2	R7, R16
C17	Axe 5	Matériaux composites	Laiton (Brass)	Oui	Oui	2	Brass, Laiton et Bronze	5.55%	0.98%	Non	2	R6, R17
C18	Ressort3	Matériaux composites	Laiton (Brass)	Oui	Oui	5	Brass, Laiton et Bronze	5.55%	2.44%	Non	3	R18, R19, R21

Tableau 35: Tableau des caractéristiques générales des composants [C] lors de la phase No.2 (Embodiment Design)

Tableau R :

Tableau de Caractéristiques de Relation (R)				
Symbole de Relation	Composante engagées	Desassemblabilité	Lien avec la Pollution : [P-P] ou [P-N]	Note (Type)
R 01	C1-C9	NON	Non	Fixation
R 02	C2-C6	OUI	Oui [P-N]	Glissant
R 03	C3-C10	OUI	Non	Contact
R 04	C2-C4	OUI	Non	Tourne
R 05	C5-C11	NON	Non	Contact
R 06	C6-C17	NON	Oui [P-N]	Fixation
R 07	C7-C16	OUI	Non	Contact
R 08	C8-C13	OUI	Non	Guidage
R 09	C3-C9	OUI	Non	Contact
R 10	C2-C10	NON	Non	Fixation
R 11	C6-C11	OUI	Oui [P-N]	Guidage
R 12	C5-C12	OUI	Non	Contact
R 13	C5-C13	OUI	Non	Glissant
R 14	C1-C14	OUI	Non	Guidage
R 15	C13-C15	NON	Non	Fixation
R 16	C1-C16	NON	Non	Fixation
R 17	C7-C17	OUI	Non	Contact
R 18	C13-C18	OUI	Non	Contact
R 19	C15-C18	OUI	Non	Guidage
R 20	C12-C15	OUI	Non	Guidage
R 21	C12-C18	OUI	Non	Contact
R 22	C1-C2	OUI	Non	Glissant
R 23	C1-C4	NON	Non	Fixation
R 24	C1-C5	OUI	Non	Glissant
R 25	C4-C5	OUI	Non	Guidage
R 26	C5-C8	OUI	Non	Contact
R 27	C6-C8	OUI	Oui [P-N]	Contact
R 28	C8-C14	OUI	Non	Guidage

Tableau 36: Caractéristiques Générales des relations [R]-lors de la phase No.2 (Embodiment Design)

Tableau P :

Caractéristiques Générales et les Indicateurs du produit [P]

		No. Composants	
		No. Relation	
	(9)	Bois Estimé (g) (Quantité des Composants / Matières)	
	6	Nombre de matière	
	5	Nombre de matière (Groupe)	
	4	[Polluant-Polluant]	Nombre des relations liées aux composants polluant. [P-N] & [P-P]
		0	
	4	[Polluant-Non-Polluant]	
	1	Nombre des matières polluants	
	21	Nombre des relations dissemblables	
	1	Nombre des fonctions du produit	
	(9)	Quantité des composants polluants	
	205	10 Acier	Type de matières (Max-Quantité)
		10 Acier (alliage de caractéristique-Polluante)	
		30 Acier inox	
		35 EP-Thermodurcissable	
		30 Laiton (Brass)	
		40 Polymères-Spécifique	
	165	20 Acier et métal fer	Quantité des Composants compatibles (à la recyclabilité) au chaque groupes principaux
		80 Acier inox-Chromium	
		30 Brass, Laiton et Bronze	
		5 EP - Fibre de verre (Fibreglass), Si - Silicone	
	16	2 Acier et métal fer	Nombre des Composants compatibles (à la recyclabilité) au chaque groupes principaux
		4 Acier inox-Chromium	
		9 Brass, Laiton et Bronze	
		1 EP - Fibre de verre (Fibreglass), Si - Silicone	
	9.7 %	Acier et métal fer	Taux des Composants (Quantité) compatibles à la recyclabilité.
	39 %	Acier inox-Chromium	
	14.6 %	Brass, Laiton et Bronze	
	17.1 %	EP - Fibre de verre (Fibreglass), Si - Silicone	
	11.1 %	Acier et métal fer	Taux des Composants (Nombre) compatibles à la recyclabilité
	12.2 %	Acier inox-Chromium	
	2.5 %	Brass, Laiton et Bronze	
	5.5 %	EP - Fibre de verre (Fibreglass), Si - Silicone	
	62 %	Taux (Nombre) des relations dans le produit	Obj-En-7
	75 %	Taux (Nombre) des relations desassemblables dans le produit	Obj-En-13
	17 %	Taux (Nombre) de similarité des matières dans le produit.	Obj-En-24
	39 %	Taux (Max-Quantité) de composants de même matières dans le produit	Obj-En-27
	83 %	Taux (Nombre) des matières polluants dans le produit.	Obj-En-35
	95 %	Taux (Quantité) des composants polluants dans le produit.	
	25 %	Taux (Nombre) des relations entre les composants polluants et non-polluants pour les relations liées aux composants polluants	
	5.55 %	Taux nombre des fonctions du produit selon les nombre des composantes dans le produit. (Nombre)	
	0.48 %	Taux nombre des fonctions du produit selon le poids de produit. (Quantité)	

Tableau 37: Caractéristiques Générales du produit [P]-Icors de la phase No.2 (Embodiment Design)

Niveau d'implémentation de chaque règle dans la phase no.2 (Embodiment Design)

La valeur d'implémentation de chaque règle DfE dans cette phase est représentée dans le tableau 38 suivant.

Règle DfE	Valeur de l'indicateur en phase d'embodiment design
Règle DfE 1	80.48%
Règle DfE 2	88.88%
Règle DfE 3	62.10%
Règle DfE 4	75.00%
Règle DfE 5	16.67%
Règle DfE 6	39.02%
Règle DfE 7	83.33%
Règle DfE 8	95.12%
Règle DfE 9	25.00%
Règle DfE 10	5.56%
Règle DfE 11	0.49%

Tableau 38: Indicateurs (Niveau d'implémentation de la règle DfE) dans la phase d'embodiment design

Valeur de l'Indicateur Global [IGlo]

Comme expliqué dans le paragraphe précédent, les valeurs des facteurs de pondération restent les mêmes et, selon la formule de calcul, l'indicateur global vaut [57,8 %].

6.3.3. Conception détaillée (Detailed Design)

Dans la phase 3 de conception de l'agrafeuse [Conception détaillée] la forme détaillée de l'agrafeuse est définie (techniquement et géométriquement).



Figure 62: Forme prévue de l'agrafeuse au début de la phase No.3 (Detailed Design)

Comme précédemment (Phase No. 1 et No. 2), nous présentons l'évolution de la conception de l'agrafeuse par la représentation fonctionnelle (BDF).

Représentation fonctionnelle

La figure 63 représente le BDF de l'agrafeuse dans la phase de conception détaillée et montre les flux fonctionnels entre les composants et les sous assemblages.

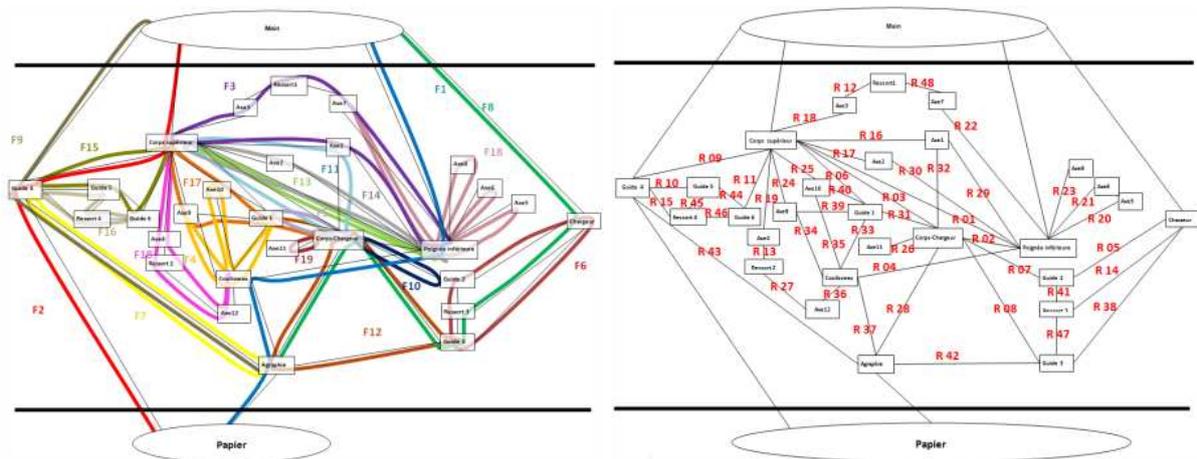


Figure 63: Représentation fonctionnelle de l'agrafeuse lors de la phase No.3 (Conception détaillée)

Modèle [CRP] et dessin technique

Comme précédemment, on extrait de ces représentations les données pour construire le modèle [CRP] (figure 65).

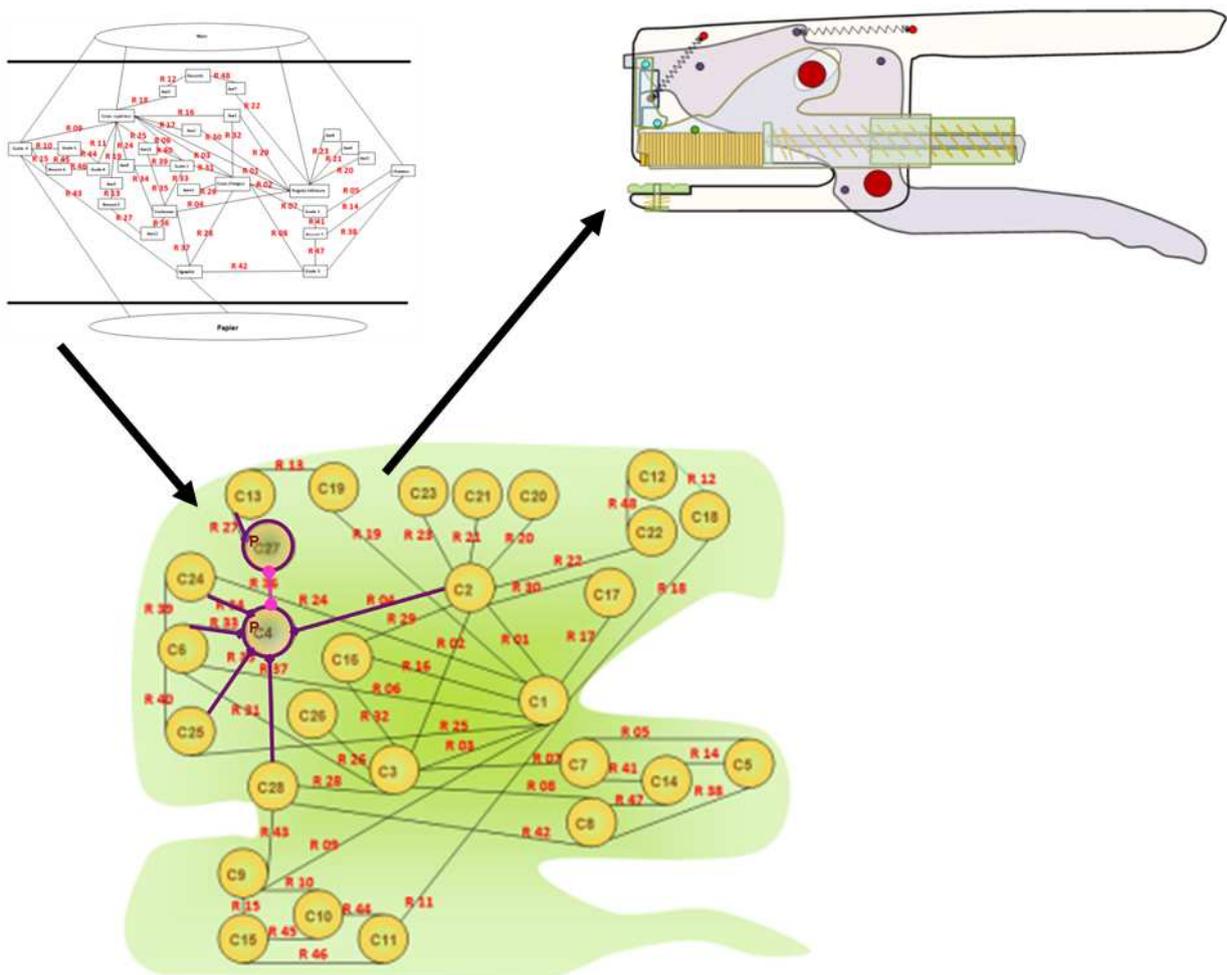


Figure 64: Modèle [CRP], BDF et dessin technique lors de la phase No.3 (conception détaillée)

A partir de ce diagramme et des représentations nous pouvons préparons les trois tableaux concernant les éléments du modèle [CRP].

Tableau C :

Tableau de Caractéristiques Générales de Composant [C]													
Symbole de Composant	Nom de Composant	Type de matériaux (Groupe principale)	Type de matériaux (Général)	Type de matériaux (Détail)	Condition de matériau d'être recyclable	Condition de composant à être recyclable (Recyclabilité)	Poids (kg)	Type des groupes principaux des matériaux (Compatibilité de recyclabilité)	Taux des Composants (Nombre) compatibles à la recyclabilité	Taux des Composants (Quantité) compatibles à la recyclabilité	Condition de matériau d'être polluant	No. Relations Engagées	Relation Engagée
C1	Corps supérieur	Matériaux composites	Acier Inox	X8Cr17 (AISI 430)	Oui	Oui	76	Acier Inox-Chromium	3.571%	18.10%	Non	11	111111111111
C2	Poignée inférieure	Polymère	Polymères-Spécifique	Bakélite	Non	Non	66	Polymères-Spécifique	3.571%	15.71%	Non	9	111111111111
C3	Corps-Chargeur	Polymère	EP- Thermodurcis sable	Fibre de verre époxyde (Fibreglass)	Oui	Oui	42	EP - Fibre de verre (Fibreglass), Si - Silicone	3.571%	10.00%	Non	8	111111111111
C4	Coulisseau	Matériaux composites	Acier	Alliage-Mild-Steel caractéristique -Polluant)	Oui	Oui	12	Acier et métal fer	3.571%	2.86%	Oui	6	111111111111
C5	Chargeur	Matériaux composites	Acier Inox	X8Cr17 (AISI 430)	Oui	Oui	21	Acier Inox-Chromium	3.571%	5.00%	Non	3	111111111111
C6	Guide 1	Matériaux composites	Acier	Mild-Steel	Oui	Oui	13	Acier et métal fer	3.571%	3.10%	Non	5	111111111111
C7	Guide 2	Polymère	Polymères-Spécifique	Bakélite	Non	Non	23	Polymères-Spécifique	3.571%	5.48%	Non	3	111111111111
C8	Guide 3	Matériaux composites	Acier Inox	X8Cr17 (AISI 430)	Oui	Oui	3	Acier Inox-Chromium	3.571%	0.71%	Non	4	111111111111
C9	Guide 4	Matériaux composites	Acier Inox	X8Cr17 (AISI 430)	Oui	Oui	7	Acier Inox-Chromium	3.571%	1.67%	Non	4	111111111111
C10	Guide 5	Matériaux composites	Acier Inox	X8Cr17 (AISI 430)	Oui	Oui	5	Acier Inox-Chromium	3.571%	1.19%	Non	3	111111111111
C11	Guide 6	Matériaux composites	Acier Inox	X8Cr17 (AISI 430)	Oui	Oui	4	Acier Inox-Chromium	3.571%	0.95%	Non	3	111111111111
C12	Ressort 1	Matériaux composites	Laiton (Brass)	High Brass	Oui	Oui	4	Brass, Laiton et Bronze	3.571%	0.95%	Non	2	111111111111
C13	Ressort 2	Matériaux composites	Laiton (Brass)	High Brass	Oui	Oui	4	Brass, Laiton et Bronze	3.571%	0.95%	Non	2	111111111111
C14	Ressort 3	Matériaux composites	Laiton (Brass)	High Brass	Oui	Oui	13	Brass, Laiton et Bronze	3.571%	3.10%	Non	3	111111111111
C15	Ressort 4	Matériaux composites	Laiton (Brass)	High Brass	Oui	Oui	3	Brass, Laiton et Bronze	3.571%	0.71%	Non	3	111111111111
C16	Axe 1	Matériaux composites	Laiton (Brass)	Common brass (Rivet brass)	Oui	Oui	12	Brass, Laiton et Bronze	3.571%	2.86%	Non	3	111111111111
C17	Axe 2	Matériaux composites	Laiton (Brass)	Common brass (Rivet brass)	Oui	Oui	12	Brass, Laiton et Bronze	3.571%	2.86%	Non	2	111111111111
C18	Axe 3	Matériaux composites	Acier	Mild-Steel	Oui	Oui	2.5	Acier et métal fer	3.571%	0.60%	Non	2	111111111111
C19	Axe 4	Matériaux composites	Acier	Mild-Steel	Oui	Oui	2.5	Acier et métal fer	3.571%	0.60%	Non	2	111111111111
C20	Axe 5	Polymère	Polymères-Spécifique	X8Cr17 (AISI 430)	Oui	Oui	3	Polymères-Spécifique	3.571%	0.48%	Non	2	111111111111
C21	Axe 6	Polymère	Polymères-Spécifique	X8Cr17 (AISI 430)	Oui	Oui	3	Polymères-Spécifique	3.571%	0.48%	Non	2	111111111111
C22	Axe 7	Polymère	Polymères-Spécifique	X8Cr17 (AISI 430)	Oui	Oui	3	Polymères-Spécifique	3.571%	0.48%	Non	3	111111111111
C23	Axe 8	Polymère	Polymères-Spécifique	X8Cr17 (AISI 430)	Oui	Oui	3	Polymères-Spécifique	3.571%	0.48%	Non	2	111111111111
C24	Axe 9	Matériaux composites	Acier	Mild-Steel	Oui	Oui	1.8	Acier et métal fer	3.571%	0.43%	Non	3	111111111111
C25	Axe 10	Matériaux composites	Acier	Mild-Steel	Oui	Oui	1.8	Acier et métal fer	3.571%	0.43%	Non	3	111111111111
C26	Axe 11	Matériaux composites	Acier	Mild-Steel	Oui	Oui	1.7	Acier et métal fer	3.571%	0.40%	Non	1	111111111111
C27	Axe 12	Matériaux composites	Acier	Alliage-Mild-Steel caractéristique -Polluant)	Oui	Oui	1.7	Acier et métal fer	3.571%	0.40%	Oui	2	111111111111
C28	Agraphie	Matériaux composites	Laiton (Brass)	High Brass	Oui	Oui	80	Brass, Laiton et Bronze	3.571%	19.05%	Non	4	111111111111

Tableau 39: Caractéristiques Générales des Composant [C] lors de la phase No.3 (detailed design)

Tableau R :

Tableau de Caractéristiques de Relation (R)				
Symbole de Relation	Composante engagées	Desassemblabilité	Lien avec la Pollution : [P-P] ou [P-N]	Note (Type)
R 01	C1-C2	OUI	Non	Guidage
R 02	C2-C3	OUI	Non	Glissant
R 03	C1-C3	OUI	Non	Contact
R 04	C2-C4	OUI	Oui [P-N]	Glissant
R 05	C5-C7	OUI	Non	Guidage
R 06	C1-C6	OUI	Non	Guidage
R 07	C3-C7	OUI	Non	Guidage
R 08	C3-C8	OUI	Non	Contact
R 09	C1-C9	OUI	Non	Guidage
R 10	C9-C10	NON	Non	Fixation
R 11	C1-C11	OUI	Non	Guidage
R 12	C12-C18	OUI	Non	Contact
R 13	C13-C19	OUI	Non	Contact
R 14	C5-C14	OUI	Non	Glissant
R 15	C9-C15	OUI	Non	Contact
R 16	C1-C16	NON	Non	Fixation
R 17	C1-C17	NON	Non	Fixation
R 18	C1-C18	NON	Non	Fixation
R 19	C1-C19	NON	Non	Fixation
R 20	C2-C20	OUI	Non	Fixation
R 21	C2-C21	OUI	Non	Fixation
R 22	C2-C22	OUI	Non	Fixation
R 23	C2-C23	OUI	Non	Fixation
R 24	C1-C24	NON	Non	Fixation
R 25	C1-C25	NON	Non	Fixation
R 26	C3-C26	OUI	Non	Guidage
R 27	C13-C27	OUI	Oui [P-N]	Contact
R 28	C3-C28	OUI	Non	Contact
R 29	C2-C16	OUI	Non	Guidage
R 30	C2-C17	OUI	Non	Guidage
R 31	C3-C6	OUI	Non	Guidage
R 32	C3-C16	OUI	Non	Tourne
R 33	C4-C6	OUI	Oui [P-N]	Guidage
R 34	C4-C24	OUI	Oui [P-N]	Contact
R 35	C4-C25	OUI	Oui [P-N]	Contact
R 36	C4-C27	NON	Oui [P-P]	Guidage
R 37	C4-C28	OUI	Oui [P-N]	Contact
R 38	C5-C8	NON	Non	Fixation
R 39	C6-C24	OUI	Non	Guidage
R 40	C6-C25	OUI	Non	Guidage
R 41	C7-C14	OUI	Non	Contact
R 42	C8-C28	OUI	Non	Contact
R 43	C9-C28	OUI	Non	Guidage
R 44	C10-C11	NON	Non	Fixation
R 45	C10-C15	OUI	Non	Contact
R 46	C11-C15	OUI	Non	Contact
R 47	C8-C14	OUI	Non	Contact
R 48	C12-C22	OUI	Non	Contact

Tableau 40: Caractéristiques générales des relations [R]-lors de la phase No.3 (conception détaillée)

Niveau d'implémentation de chaque règle dans la phase no.3 (Detailed Design)

La valeur d'implémentation de chaque Règle DfE dans cette phase est représentée dans le tableau suivant.

Règle DfE	Valeur de l'indicateur en phase d'embodiment design
Règle DfE 1	76.90%
Règle DfE 2	78.57%
Règle DfE 3	57.10%
Règle DfE 4	70.83%
Règle DfE 5	14.29%
Règle DfE 6	27.62%
Règle DfE 7	85.71%
Règle DfE 8	96.74%
Règle DfE 9	16.67%
Règle DfE 10	3.57%
Règle DfE 11	0.24%

Tableau 42: Indicateurs (Niveau d'implémentation de la règle DfE) dans la phase de conception détaillée

Nous verrons par la suite que l'outil proposé pour calculer ces indicateurs met en place des diagrammes pour une vision plus détaillée de la contribution des caractéristiques du produit. Dans cet exemple concernant l'agrafeuse, nous présenterons le type de matière comme un élément principal dans le choix et la proposition des solutions techniques en cours de conception.

Valeur de l'Indicateur Global [IGlo]

Selon la formule de calcul, l'indicateur global vaut [53,95 %] en phase de conception détaillée.

Evolution de l'Indicateur Global [IGlo] au cours des phases des conceptions.

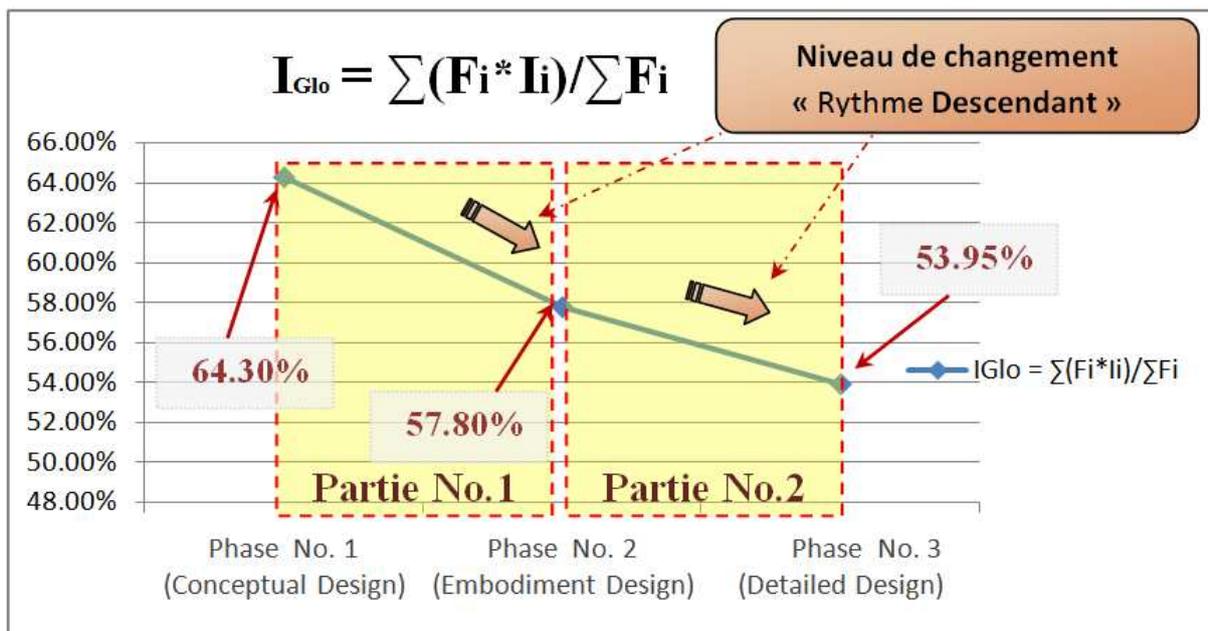


Figure 65: Valeur de l'indicateur global [IGlo] au cours de la conception

La figure 66 présente l'évolution de l'indicateur $[I_{Glo}]$ tout au long du projet de conception. Nous pouvons remarquer que la pente de la courbe de l'indicateur global $[I_{Glo}]$ entre la phase No.2 et No.3 est légèrement plus faible qu'entre les phases No.1 et No.2. Il est intéressant de visualiser ces évolutions, afin de pouvoir agir sur la bonne caractéristique du produit en vue de l'amélioration de cet indicateur $[I_{Glo}]$.

La figure 67 suivante montre les évolutions des différents indicateurs au cours des phases de conception.

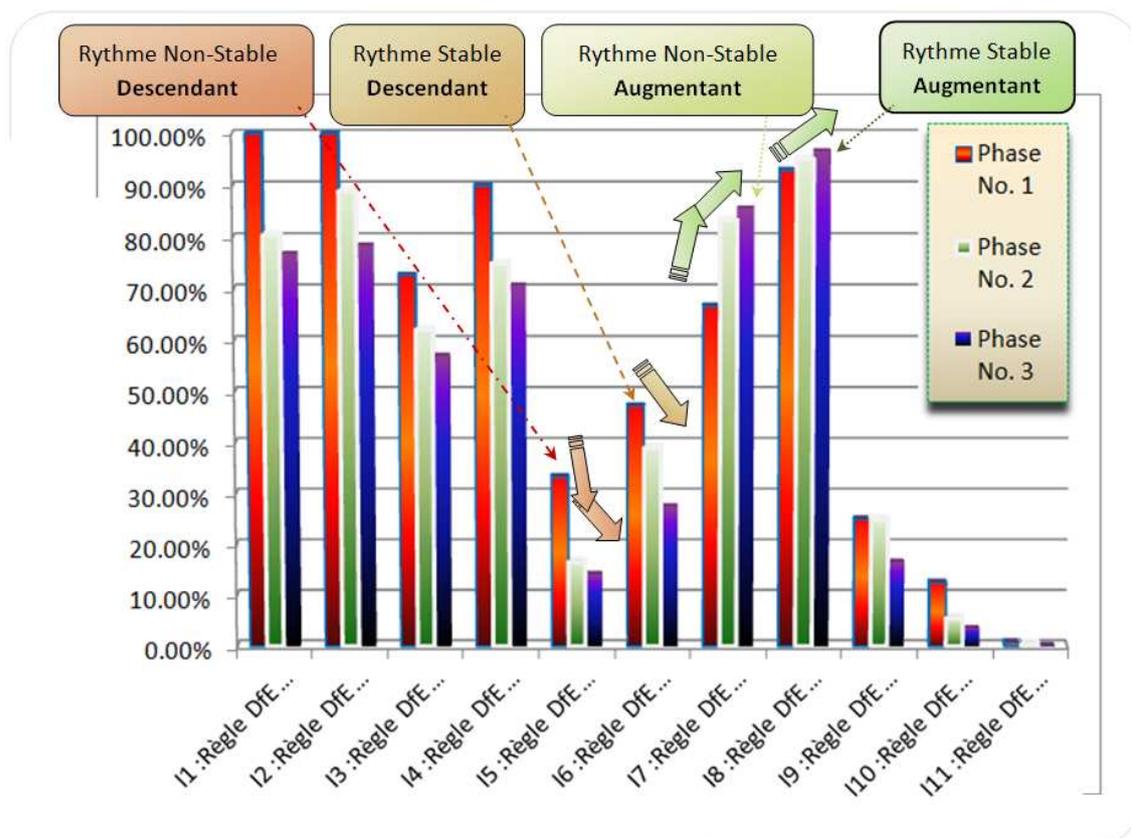


Figure 66: Variation des valeurs des indicateurs au cours de la conception

On voit apparaître les indicateurs dont la valeur va décroître tout au long du projet, avec une tendance relativement constante ou au contraire, avec une forte chute à un instant donné. Nous allons nous intéresser en priorité aux indicateurs présentant une pente décroissante, avec un fort changement de pente entre les phases. C'est le cas, par exemple, des règles DfE 5 et 9.

Pour la règle No.5 « Minimiser la diversité des matières dans le produit (Nombre) », on voit figure 68, que le nombre de matières double entre la phase de conception préliminaire et la phase de conception de réalisation. Ceci fait donc chuter l'indicateur relatif à la minimisation de la diversité des matières.

Pour la règle No.9 « Améliorer la désassemblabilité des composants polluants (Nombre) », la variation apparat entre la phase de réalisation et la phase de conception détaillée. Le nombre de relations passe de 4 à 7, ce qui à une incidence sur la désassemblabilité.

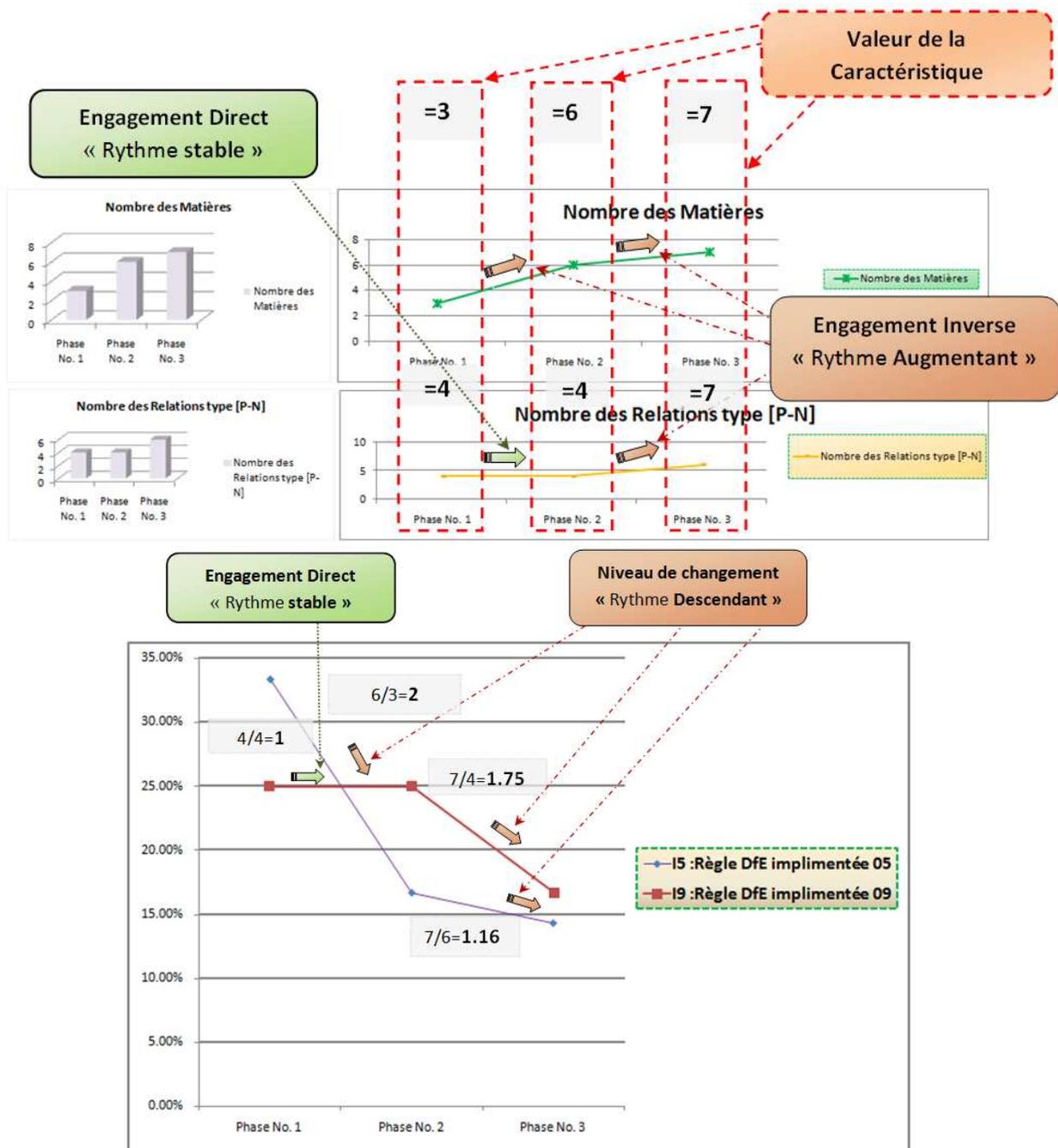


Figure 67: Evolution des valeurs des caractéristiques et de l'indicateurs pour les Règles DfE No. [5 & 9].

6.3.4. Modifications de conception liées à l'examen du niveau d'implémentation des Règles DfE

Pour améliorer la valeur de l'indicateur globale $[I_{G10}]$ dans la dernière phase de conception, nous déterminons les règles DfE cibles à améliorer ainsi que les caractéristiques engagées pour cette amélioration. (Figure 69)

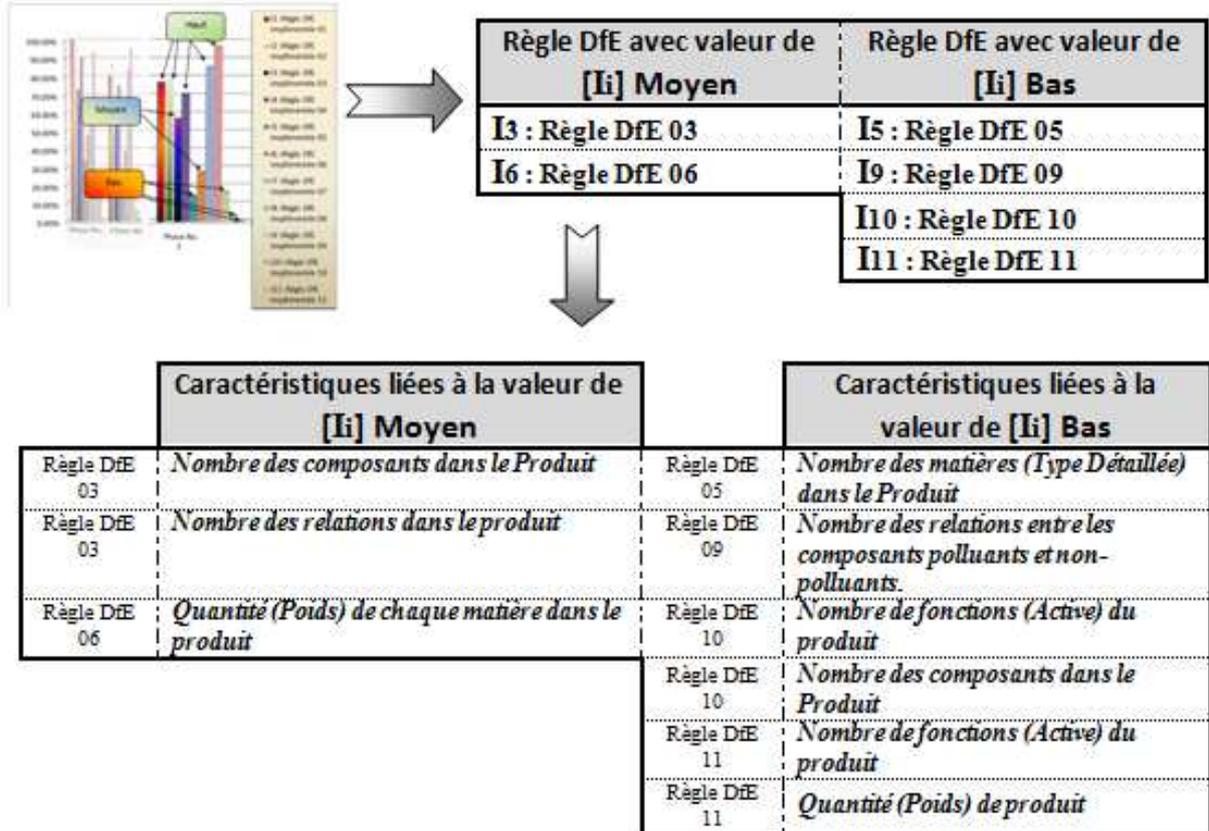


Figure 68: Caractéristiques engagées pour l'amélioration des valeurs des indicateurs $[I_i]$.

La démarche proposée pour l'amélioration de la valeur globale $[I_{G10}]$ dans cet exemple s'appuie sur la caractéristique « type de matière » afin d'éviter des changements fondamentaux dans la conception et pour montrer l'influence positive des propositions en fin de conception.

Pour l'agrafeuse, la liste des matières identifiées dans la phase de conception détaillée est :

- Acier
- Acier inoxydable
- Laiton et Bronze
- EP
- Bakélite.

La proposition No. 1 repose sur le remplacement tous les axes de l'agrafeuse qui sont fabriqués en **Bakélite**. Ils sont remplacés par des axes en **Acier inox** (X8Cr17 (AISI 430)). Cette proposition concerne les pièces suivantes :

C20	Axe 5
C21	Axe 6
C22	Axe 7
C23	Axe 8

Tableau 43: Pièces engagées pour la proposition No.1

Les tableaux suivants représentent les changements dans les valeur des caractéristiques liés aux éléments [C,R,P] en phase de conception détaillée.

Tableau de Caractéristiques Générales de Composant de composant (C) @ 3ème phase / 1ère proposition

Tableau de Caractéristiques Générales de Composant [C]													
Symbole de Composant	Nom de Composant	Type de matériau (Groupe principale)	Type de matériau (Détail)	Type de matériau (Détail)	Condition de matière d'origine recyclable	Condition de matière d'origine recyclable (Recyclabilité)	Poids (Nominale)	Type des groupes principaux des matériaux (Compatibilité de recyclabilité)	Taux des Composants (Nombre) compatibles à recyclabilité	Taux des Composants (Quantité) compatibles à recyclabilité	Condition de matière d'origine polluant	No. Relation trapèze	Relation trapèze
C1	Corps supérieur	Matériaux composites	Acier Inox	X8Cr17 (AISI 430)	Oui	Oui	76	Acier Inox-Chromium	3.571%	18.10%	Non	11	11
C2	Poignée intérieure	Polymère	Polymères-Spécifique	Bakélite	Non	Non	66	Polymères-Spécifique	3.571%	15.71%	Non	9	9
C3	Corps-Chargeur	Polymère	EP-Thermoplastique sable	Fibre de verre époxyde (Fibreglass)	Oui	Oui	42	EP - Fibre de verre (Fibreglass), Si-Silicone	3.571%	10.00%	Non	8	8
C4	Coulisseau	Matériaux composites	Acier	Alliage-Mild-Steel (caractéristique -Polluants)	Oui	Oui	12	Acier et métal fer	3.571%	2.86%	Oui	6	6
C5	Chargeur	Matériaux composites	Acier Inox	X8Cr17 (AISI 430)	Oui	Oui	21	Acier Inox-Chromium	3.571%	5.00%	Non	3	3
C6	Guide 1	Matériaux composites	Acier	Mild-Steel	Oui	Oui	13	Acier et métal fer	3.571%	3.10%	Non	5	5
C7	Guide 2	Polyimide	Polymères-Spécifique	Bakélite	Non	Non	23	Polymères-Spécifique	3.571%	5.48%	Non	3	3
C8	Guide 3	Matériaux composites	Acier Inox	X8Cr17 (AISI 430)	Oui	Oui	3	Acier Inox-Chromium	3.571%	0.71%	Non	4	4
C9	Guide 4	Matériaux composites	Acier Inox	X8Cr17 (AISI 430)	Oui	Oui	7	Acier Inox-Chromium	3.571%	1.67%	Non	4	4
C10	Guide 5	Matériaux composites	Acier Inox	X8Cr17 (AISI 430)	Oui	Oui	5	Acier Inox-Chromium	3.571%	1.19%	Non	3	3
C11	Guide 6	Matériaux composites	Acier Inox	X8Cr17 (AISI 430)	Oui	Oui	4	Acier Inox-Chromium	3.571%	0.95%	Non	3	3
C12	Ressort 1	Matériaux composites	Laiton (Brass)	High Brass	Oui	Oui	4	Brass, Laiton et Bronze	3.571%	0.95%	Non	2	2
C13	Ressort 2	Matériaux composites	Laiton (Brass)	High Brass	Oui	Oui	4	Brass, Laiton et Bronze	3.571%	0.95%	Non	2	2
C14	Ressort 3	Matériaux composites	Laiton (Brass)	High Brass	Oui	Oui	13	Brass, Laiton et Bronze	3.571%	3.10%	Non	3	3
C15	Ressort 4	Matériaux composites	Laiton (Brass)	High Brass	Oui	Oui	3	Brass, Laiton et Bronze	3.571%	0.71%	Non	3	3
C16	Axe 1	Matériaux composites	Laiton (Brass)	Common brass (Rivet brass)	Oui	Oui	12	Brass, Laiton et Bronze	3.571%	2.86%	Non	3	3
C17	Axe 2	Matériaux composites	Laiton (Brass)	Common brass (Rivet brass)	Oui	Oui	12	Brass, Laiton et Bronze	3.571%	2.86%	Non	2	2
C18	Axe 3	Matériaux composites	Acier	Mild-Steel	Oui	Oui	2.5	Acier et métal fer	3.571%	0.60%	Non	2	2
C19	Axe 4	Matériaux composites	Acier	Mild-Steel	Oui	Oui	2.5	Acier et métal fer	3.571%	0.60%	Non	2	2
C20	Axe 5	Polymère	Polymères-Spécifique	X8Cr17 (AISI 430)	Oui	Oui	3	Polymères-Spécifique	3.571%	0.48%	Non	2	2
C21	Axe 6	Polymère	Polymères-Spécifique	X8Cr17 (AISI 430)	Oui	Oui	3	Polymères-Spécifique	3.571%	0.48%	Non	2	2
C22	Axe 7	Polymère	Polymères-Spécifique	X8Cr17 (AISI 430)	Oui	Oui	3	Polymères-Spécifique	3.571%	0.48%	Non	3	3
C23	Axe 8	Polymère	Polymères-Spécifique	X8Cr17 (AISI 430)	Oui	Oui	3	Polymères-Spécifique	3.571%	0.48%	Non	2	2
C24	Axe 9	Matériaux composites	Acier	Mild-Steel	Oui	Oui	1.8	Acier et métal fer	3.571%	0.43%	Non	3	3
C25	Axe 10	Matériaux composites	Acier	Mild-Steel	Oui	Oui	1.8	Acier et métal fer	3.571%	0.43%	Non	3	3
C26	Axe 11	Matériaux composites	Acier	Mild-Steel	Oui	Oui	1.7	Acier et métal fer	3.571%	0.40%	Non	1	1
C27	Axe 12	Matériaux composites	Acier	Alliage-Mild-Steel (caractéristique -Polluants)	Oui	Oui	1.7	Acier et métal fer	3.571%	0.40%	Oui	2	2
C28	Agraphie	Matériaux composites	Laiton (Brass)	High Brass	Oui	Oui	80	Brass, Laiton et Bronze	3.571%	19.05%	Non	4	4

Tableau 44: Valeurs des caractéristiques liées aux composants [C] selon la proposition No.1

Tableau de Caractéristiques de Relation (R) @ 3ème phase

Tableau de Caractéristiques de Relation (R)				
Symbole de Relation	Composante engagées	Desassemblabilité	Lien avec la	Note (Type)
			Pollution : [P-P] ou [P-N]	
R 01	C1-C2	OUI	Non	Guidage
R 02	C2-C3	OUI	Non	Glissant
R 03	C1-C3	OUI	Non	Contact
R 04	C2-C4	OUI	Oui [P-N]	Glissant
R 05	C5-C7	OUI	Non	Guidage
R 06	C1-C6	OUI	Non	Guidage
R 07	C3-C7	OUI	Non	Guidage
R 08	C3-C8	OUI	Non	Contact
R 09	C1-C9	OUI	Non	Guidage
R 10	C9-C10	NON	Non	Fixation
R 11	C1-C11	OUI	Non	Guidage
R 12	C12-C18	OUI	Non	Contact
R 13	C13-C19	OUI	Non	Contact
R 14	C5-C14	OUI	Non	Glissant
R 15	C9-C15	OUI	Non	Contact
R 16	C1-C16	NON	Non	Fixation
R 17	C1-C17	NON	Non	Fixation
R 18	C1-C18	NON	Non	Fixation
R 19	C1-C19	NON	Non	Fixation
R 20	C2-C20	OUI	Non	Fixation
R 21	C2-C21	OUI	Non	Fixation
R 22	C2-C22	OUI	Non	Fixation
R 23	C2-C23	OUI	Non	Fixation
R 24	C1-C24	NON	Non	Fixation
R 25	C1-C25	NON	Non	Fixation
R 26	C3-C26	OUI	Non	Guidage
R 27	C13-C27	OUI	Oui [P-N]	Contact
R 28	C3-C28	OUI	Non	Contact
R 29	C2-C16	OUI	Non	Guidage
R 30	C2-C17	OUI	Non	Guidage
R 31	C3-C6	OUI	Non	Guidage
R 32	C3-C16	OUI	Non	Tourne
R 33	C4-C6	OUI	Oui [P-N]	Guidage
R 34	C4-C24	OUI	Oui [P-N]	Contact
R 35	C4-C25	OUI	Oui [P-N]	Contact
R 36	C4-C27	NON	Oui [P-P]	Guidage
R 37	C4-C28	OUI	Oui [P-N]	Contact
R 38	C5-C8	NON	Non	Fixation
R 39	C6-C24	OUI	Non	Guidage
R 40	C6-C25	OUI	Non	Guidage
R 41	C7-C14	OUI	Non	Contact
R 42	C8-C28	OUI	Non	Contact
R 43	C9-C28	OUI	Non	Guidage
R 44	C10-C11	NON	Non	Fixation
R 45	C10-C15	OUI	Non	Contact
R 46	C11-C15	OUI	Non	Contact
R 47	C8-C14	OUI	Non	Contact
R 48	C12-C22	OUI	Non	Contact

Tableau 45: Valeurs des caractéristiques liées aux relations selon la proposition No.1

Le tableau 47 suivant représente les valeurs des indicateurs pour la proposition No.01 et permet d'effectuer des comparaisons avec les précédentes étapes.

Phase (i)	Phase No. 1 (Conceptuelle, Agrafeuse)	Phase No. 2 (Embodiment, Agrafeuse)	Phase No. 3 (Détailée, Agrafeuse)	
			Avant les propositions	Proposition No.01
Règle DfE / Indicateur				
I1 : Règle DfE implémentée 01	100.00%	80.48%	76.90%	↗ 78.26%
I2 : Règle DfE implémentée 02	100.00%	88.88%	78.57%	↗ 92.88%
I3 : Règle DfE implémentée 03	72.70%	62.10%	57.10%	↔ 57.10%
I4 : Règle DfE implémentée 04	90.00%	75.00%	70.83%	↗ 79.17%
I5 : Règle DfE implémentée 05	33.33%	16.67%	14.29%	↔ 14.29%
I6 : Règle DfE implémentée 06	47.18%	39.02%	27.62%	↗ 29.48%
I7 : Règle DfE implémentée 07	66.67%	83.33%	85.71%	↔ 85.71%
I8 : Règle DfE implémentée 08	92.96%	95.12%	96.74%	↗ 96.77%
I9 : Règle DfE implémentée 09	25.00%	25.00%	16.67%	↔ 16.67%
I10 : Règle DfE implémentée 10	12.50%	5.56%	3.57%	↔ 3.57%
I11 : Règle DfE implémentée 11	0.70%	0.49%	0.24%	↗ 0.24%

Tableau 47: Evolution des valeurs des indicateurs [Ii] suivant la proposition No.1

La prise en compte de la même valeur des facteurs de pondération [F_i], l'évolution de l'indicateur global [I_{Glo}] avant la proposition et après la proposition No.01 comme la figure suivant la montre.

$I_{Glo} = \frac{\sum(F_i * I_i)}{\sum F_i}$	Phase No. 1 (Conceptual Design)	Phase No. 2 (Embodiment Design)	Phase No. 3 (Detailed Design)
	64.30%	57.80%	56.58%
	64.30%	57.80%	53.95%

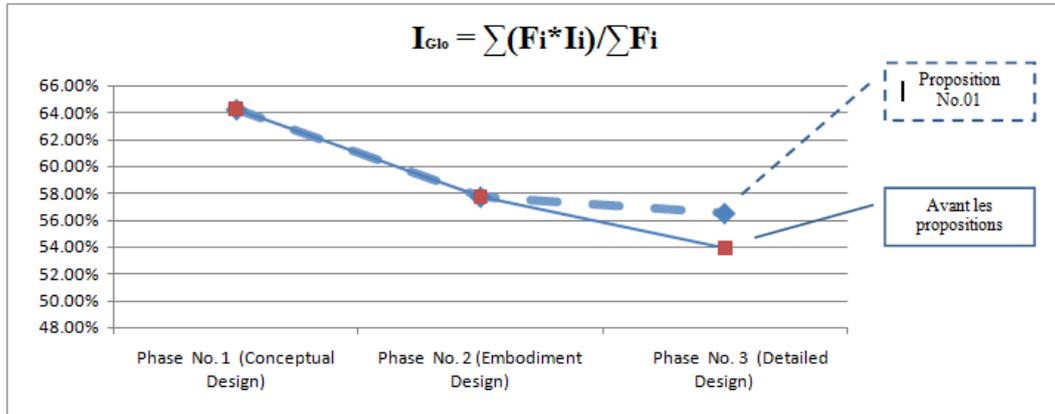


Figure 69: Evolution des valeurs de l'indicateur globale [IGlo] selon la proposition No.1

La proposition No.2, implique un remplacement de toutes les pièces de l'agrafeuse qui sont fabriquées en Bakélite par des pièces Acier inox. Cette proposition concerne les pièces comme les Poignée inférieure, le guide et les axes. Cette proposition aide à remplacer l'utilisation toutes les matières non-recyclables « Bakélite » par des matières recyclable en « Acier inox ». Cela permet d'augmenter l'utilisation d'un type de matière très présent dans le produit : l'Acier inox-[X8Cr17 (AISI 430)].

C2	Poignée inférieure
C7	Guide 2
C20	Axe 5
C21	Axe 6
C22	Axe 7
C23	Axe 8

Tableau 48: Pièces engagées pour la proposition No.2

Les tableaux suivants montrent les caractéristiques [K_i] de chaque éléments du modèle [C,R,P] et leurs valeurs pour la proposition No.02. Le tableau des valeurs des caractéristiques [C] a des valeurs modifiés selon la proposition No.02, mais le tableau des caractéristiques qui correspondent aux relations [R] dans le cas de la modification No.2 et le même tableau que pour la proposition No.01.

Le tableau suivant représente les valeurs des indicateurs [I_i] selon la proposition No.02 (phase de conception détaillée)

Phase (i)	Phase No. 1 (Conceptuelle, Agrafeuse)	Phase No. 2 (Embodiment, Agrafeuse)	Phase No. 3 (Détailée, Agrafeuse)		
	Règle DfE / Indicateur		Avant les propositions	Proposition No.02	
I1 : Règle DfE implémentée 01	100.00%	80.48%	76.90%	☐	100.00%
I2 : Règle DfE implémentée 02	100.00%	88.88%	78.57%	☐	100.00%
I3 : Règle DfE implémentée 03	72.70%	62.10%	57.10%	↔	57.10%
I4 : Règle DfE implémentée 04	90.00%	75.00%	70.83%	☐	79.17%
I5 : Règle DfE implémentée 05	33.33%	16.67%	14.29%	☐	16.67%
I6 : Règle DfE implémentée 06	47.18%	39.02%	27.62%	☐	29.48%
I7 : Règle DfE implémentée 07	66.67%	83.33%	85.71%	↔	83.33%
I8 : Règle DfE implémentée 08	92.96%	95.12%	96.74%	☐	96.88%
I9 : Règle DfE implémentée 09	25.00%	25.00%	16.67%	↔	16.67%
I10 : Règle DfE implémentée 10	12.50%	5.56%	3.57%	↔	3.57%
I11 : Règle DfE implémentée 11	0.70%	0.49%	0.24%	☐	0.23%

Tableau 51: Evolution des valeurs des indicateurs [I_i] suivant la proposition No.2

	Phase No.1 (Conceptual Design)	Phase No.2 (Embodiment Design)	Phase No.3 (Detailed Design)
$I_{Glo} = \frac{\sum(F_i * I_i)}{\sum F_i}$	64.30%	57.80%	59.63%
	64.30%	57.80%	53.95%

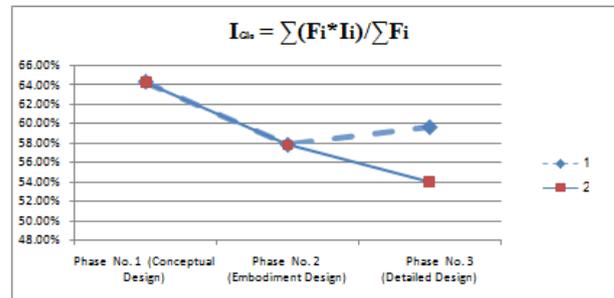


Figure 70: Evolution des valeurs de l'indicateur globale [IGlo] selon la proposition No.2

6.4. Bilan de l'étude de cas « agrafeuse »

Cette étude de cas nous a permis de décrire la façon dont la méthode peut être utilisée en cours de conception. Plusieurs points ont ainsi été mis en évidence. Nous pouvons souligner que la démarche proposée donne la possibilité de faire plusieurs simulations et donc d'établir un meilleur diagnostic au cours de conception. Le calcul d'indicateurs donne au concepteur des repères pour améliorer la conception selon un point de vue qu'il ne maîtrise pas forcément. Les informations sont données dès le début du projet et suivies tout au long du projet, ce qui permet de guider les possibles évolutions du produit.

Le produit choisi : l'agrafeuse, est un produit simple, ne consommant pas d'énergie en phase d'usage. Nous avons ainsi pu faire jouer des règles DfE « classiques » pour tenter d'améliorer ce produit du point de vue de l'environnement. Le choix des objectifs environnementaux et des Règles DfE a été facilité pour permettre une utilisation par des concepteurs non experts de la démarche d'éco-conception. Le calcul des indicateurs pour traduire les Règles DfE a été présenté pour mieux illustrer l'approche. Il est entendu que pour ce type de produit, nous n'aurions sûrement pas besoin de déployer une telle approche, mais que ceci est nécessaire à titre d'illustration.

Conclusion

Afin d'aider les concepteurs à considérer l'environnement dans leur projet de conception de produit, tout en minimisant le temps consacré à cette démarche, une évaluation environnementale simplifiée utilisable dès la phase de conception préliminaire a été définie. Cette évaluation peut débuter en phase de conception préliminaire mais peut être poursuivie jusqu'à la phase de conception détaillée (figure 71). Notre objectif a été de proposer un outil d'évaluation utilisant les premiers éléments de la représentation fonctionnelle du produit (composants principaux, liens fonctionnels, ...) pour calculer des indicateurs environnementaux simples du point de vue des concepteurs. Ainsi, pour chaque étape du processus de conception, une évaluation des exigences environnementales peut être réalisée pour éviter de trop longues boucles essais/erreurs pendant la conception. Les indicateurs développés ne sont pas relatifs à une évaluation d'impacts environnementaux (du type ACV) du fait d'un manque de données sur le produit à cette étape de la conception. Mais une première estimation du profil environnemental du produit est possible en utilisant les règles DfE.

L'objectif ici n'est pas de remplacer les ACV qui peuvent et doivent être réalisées à la fin des études détaillées: l'objectif est de guider le concepteur au plus tôt vers un bon compromis, par des estimations simples. Cette approche est nécessaire afin d'éviter des modifications significatives à la fin des études détaillées.

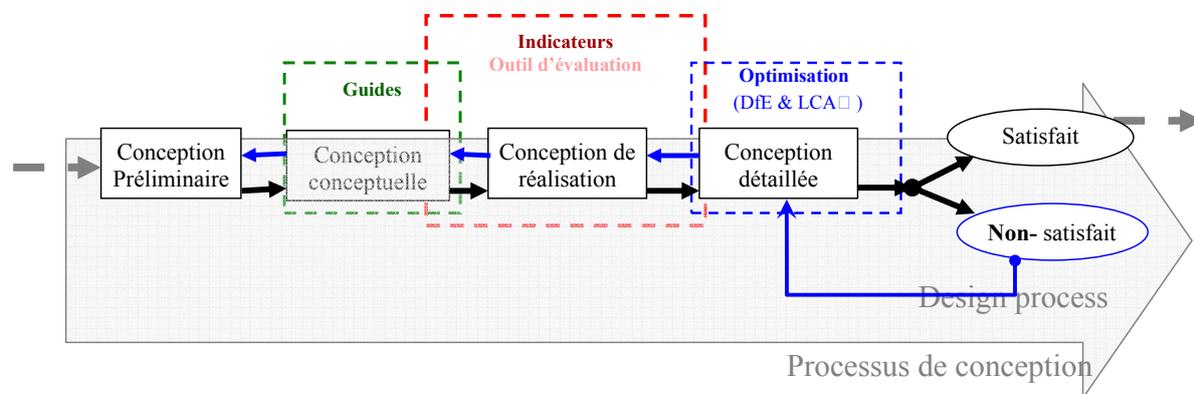


Figure 71: Approche proposée pour concevoir des produits respectueux de l'environnement

La démarche proposée vise à intégrer les règles DfE dans la conception des produits en proposant une méthode d'évaluation qui traduit des règles DfE en indicateurs :

- **L'évaluation de la Règle DfE** est réalisée par l'obtention d'une valeur, calculée différemment selon le niveau de définition du produit et ayant un sens du point de vue de l'environnement. Deux types d'indicateurs sont utilisés selon que l'on cherche à respecter une ou plusieurs règles DfE : Indicateur [I_i], Indicateur globale [I_{Glo}]. Si on utilise plusieurs règles DfE ensemble, un système de pondération (Facteur de pondération) doit intervenir dans la formule de calcul de l'Indicateur globale [I_{Glo}] selon l'importance de chaque règle impliquée.

- **L'intégration de la Règle DfE** dans la conception dépend des éléments évaluables à un instant (t) du projet. Compte tenu des évolutions des caractéristiques du produit, il faut pouvoir être flexible pour traduire la Règle DfE. C'est le modèle produit « Composant, Relation, Produit » (C,R,P) qui a été choisi, car adapté à la représentation fonctionnelle du produit de type Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF)

Pour mener à bien ce travail de thèse, il nous a fallu:

Construire une base des données des Règles DfE

Lors de cette étape, nous avons défini et caractérisé ce qu'est une règle DfE. Nous avons :

- 1) identifié un ensemble de ressources permettant d'établir une liste de règles,
- 2) déterminé différentes catégories de règles afin de les classer,
- 3) identifié les domaines d'influence de chaque Règle DfE sur le produit,
- 4) et finalement déterminé les domaines de compétences des concepteurs qui auront à mettre en œuvre des solutions pour répondre au mieux à ces règles.

Etablir une méthode de choix des règles en fonction du contexte du projet de conception

Les entreprises, avant même de raisonner règles DfE, vont se fixer des objectifs environnementaux, du fait d'incitations externes ou de règles internes. Nous avons donc mis en place une méthode favorisant un choix cohérent de règles DfE selon les objectifs de l'entreprise et les ressources disponibles.

Etablir les règles de calcul des indicateurs liés aux règles DfE

Dans cette étape nous avons déterminé le principe des méthodes de calcul pour déterminer le niveau d'implémentation d'une ou de plusieurs règles DfE. Ainsi, une évaluation quantitative des règles est effectuée, par le calcul des indicateurs [Ii] et [IGlo]. Ce calcul repose sur des données produit déterminées à partir de la représentation fonctionnelle du produit (Bloc Diagramme Fonctionnel) et de ses représentations techniques. Un facteur de pondération permet également de prioriser certaines actions.

Mettre en place des représentations adaptées pour l'interprétation des résultats lors de projets de conception

Ici, nous avons déterminé la façon de représenter visuellement l'évolution des valeurs des indicateurs [Ii] et [IGlo]. En effet, la variation de ces facteurs au cours du temps, donne une indication précieuse au concepteur lorsqu'il souhaite apporter une modification de conception et prioriser ses actions.

En termes de perspectives, il s'agirait de:

Mettre en place des outils d'interface pour valider cette approche sur un produit plus complexe

L'étude de cas «agrafeuse» menée dans cette thèse, permet d'illustrer le fonctionnement de la démarche. Mais l'application de la méthode sur des cas simples n'est pas très

pertinente au sens où le concepteur est capable seul de maîtriser l'ensemble des indicateurs liés aux quelques règles DfE choisies. Cette méthode ne prendra sens que sur des cas ou des produits comportant de nombreuses pièces conçues par un groupe de concepteurs. Pour mener ce type d'étude il est nécessaire de s'appuyer sur des outils informatiques pour la collecte d'informations. Une mise en relation de la méthode avec les outils de conception actuellement utilisés (analyse fonctionnelle, CAO, PLM, ...) doit être développée pour permettre une récupération plus « automatique » des informations du modèle [C, R, P].

Elargir la représentation du produit en phase de conception préliminaire pour être capable de traduire les Règles DfE qui ne sont pas traduisibles aujourd'hui par le modèle C,R,P

Des règles comme « diminuer l'énergie consommée en usage » ou « réutiliser le produit en fin d'usage » ne sont pas traduisibles aujourd'hui via le modèle produit classiquement utilisés en phase de conception préliminaire. Il s'agit donc de trouver une traduction de ces règles pouvant être supportée par le modèle C, R, P ou de compléter ce modèle C,R,P par des attributs fonctionnels, afin de pouvoir réellement considérer l'ensemble des règles DfE aujourd'hui énoncées dans la littérature ou par les concepteurs. L'expertise métier « éco-conception » reste à enrichir.

Tester la validité de cette approche via un autre métier utilisant l'approche DfX

Nous avons besoin de plusieurs études de cas pour illustrer et valider les différentes règles DfE identifiées ainsi que pour valider la méthode de calcul. Dans nos analyses, nous nous sommes essentiellement penchés sur l'étape de fin de vie du produit, mais les exigences liées aux phases de production, aux phases de choix de matériaux peuvent également être prises en compte avec notre approche.

L'expertise métier lié à la fabrication et à l'assemblage a déjà été bien formalisée, en particulier au travers des outils DFMA (Design for Manufacturing and Assembly). On pourrait, à ce stade de l'étude, vérifier si notre démarche est compatible avec ces règles et s'interroger sur leur cohérence.

Valider la pertinence de l'application de règles DfE pour l'amélioration de l'impact environnemental

Une de nos hypothèses de base est qu'il faut appliquer des règles DfE pour faire de l'éco-conception et ainsi améliorer l'impact environnemental du produit en cours de développement. Pour valider cette hypothèse, il faudrait pouvoir mesurer le niveau de réponse en termes d'impacts environnementaux (ACV), selon les variations des indicateurs DfE. Cette dernière perspective permettrait de faire un lien direct entre certains impacts environnementaux et des caractéristiques du produit, ce qui simplifierait considérablement la tâche des concepteurs et donc l'intégration de l'environnement dans la conception des produits.

Table des références

Articles scientifique, conférence, thèses, livres

2. BARTHOD, C. La Conférence des Nations-Unies sur l'environnement et le développement et la forêt. In la conférence des Nations-Unies sur l'environnement et le développement 1992. Rio de Janeiro □Bresil.
3. Nations_Unies. La Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (CNUED) -Sommet planète Terre. 2002 [cited; Available from: <http://www.un.org/french/events/wssd/pages/cnued.html>.
7. POCHAT, S.L., D. FROELICH, and G. BERTOLUCI, Integrating ecodesign by conducting changes in SMEs. *Journal of Cleaner Production*, 2007. 15(7): p. 671-680.
8. JANIN, M., Démarche d'éco-conception en entreprise. Un enjeu : construire la cohérence entre outils et processus, in (ENSAM. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers. France). 2000, Arts et Métiers ParisTech: Paris.
11. ALHOMSI, H. and P. ZWOLINSKI, The use of DfE rules during the conceptual design phase of a product to give a quantitative environmental evaluation to designers, in 19 CIRP design Conference, E.S. Rajkumar R. , Editor. 2009, Cranfield University Press: Cranfield.
12. Schiesser, P., *Eco-conception - Indicateurs, Méthodes, Réglementation*. 2011: Dunod. 196 pages
13. Linkov, I., et al., Weight-of-evidence evaluation in environmental assessment: Review of qualitative and quantitative approaches. *Science of The Total Environment*, 2009. 407(19): p. 5199-5205.
14. Baumann, H., F. Boons, and A. Bragd, Mapping the green product development field: engineering, policy and business perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 2002. 10(5): p. 409-425.
16. Wim DEWULF, J.D. (2003) simplifying LCA using indicateuo Approche - AFRAMEWORK-. CIRP Seminaire on life engineering Volume,
17. Kaebemick, H., M. Sun, and S. Kara, Simplified Lifecycle Assessment for the Early Design Stages of Industrial Products. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2003. 52(1): p. 25-28.
19. Seager, T.P. and T.L. Theis, A uniform definition and quantitative basis for industrial ecology. *Journal of Cleaner Production*, 2002. 10(3): p. 225-235.
20. Tingström, J. and R. Karlsson, The relationship between environmental analyses and the dialogue process in product development. *Journal of Cleaner Production*, 2006. 14(15-16): p. 1409-1419.
21. Mattias, L., Engineering designers' experience of design for environment methods and tools â□□ Requirement definitions from an interview study. *Journal of Cleaner Production*, 2006. 14(5): p. 487-496.

22. Lindahl, M., Engineering designers' experience of design for environment methods and tools - Requirement definitions from an interview study. *Journal of Cleaner Production*, 2006. 14(5): p. 487-496.
23. Sonnemann, G., F. Castells, and M. Schuhmacher, Integrated life-cycle and risk assessment for industrial processes. 2004, Tarragona, Spain: LEWIS PUBLISHERS. 366.
24. Brissaud, D. and P. Zwolinski, End-of-Life-Based Negotiation Throughout the Design Process. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2004. 53(1): p. 155-158.
25. Kurk, F. and P. Eagan, The value of adding design-for-the-environment to pollution prevention assistance options. *Journal of Cleaner Production*, 2008. 16(6): p. 722-726.
26. Luttrupp, C. and J. Lagerstedt, EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. *Journal of Cleaner Production*, 2006. 14(15-16): p. 1396-1408.
27. Hauschild, M.Z., J. Jeswiet, and L. Alting, Design for Environment -- Do We Get the Focus Right? *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2004. 53(1): p. 001-4.
28. Mascle, C. and H.P. Zhao, Integrating environmental consciousness in product/process development based on life-cycle thinking. *International Journal of Production Economics*, 2008. 112(1): p. 5-17.
29. FINKBEINER, M., Towards Life Cycle :Sustainability Management. *Science+Business Media*. 2011, Berlin: Springer. 591.
30. Tillman, A.-M., Significance of decision-making for LCA methodology. *Environmental Impact Assessment Review*, 2000. 20(1): p. 113-123.
31. BAUMANN, H., Life Cycle Assessment and Decision Making: Theories and Practices, in Doctoral thesis. 2006, Chalmers University of Technology: Göteborg.
32. Tang, Y.K., et al. Decision Support Systems for Eco-friendly Electronic Products. in *Electronic Materials and Packaging*, 2006. EMAP 2006. International Conference on. 2006.
34. Gehin, A., Développement d'une méthodologie de conception de produits durables, in *laboratoire G-SCOP*. 2008.
35. Zwolinski, P., M.-A. Lopez-Ontiveros, and D. Brissaud, Integrated design of remanufacturable products based on product profiles. *Journal of Cleaner Production*, 2006. 14(15-16): p. 1333-1345.
36. HAOUES, N., Contribution à l'intégration des contraintes de désassemblage et de recyclage dès les premières phases de conception des produits, in *Sciences de l'économie, de la gestion et de la société*. 2006, Arts et Métiers ParisTech.
38. Wimmer, W. and R. Züst, ECODESIGN Pilot: Product-Investigation-, Learning- and Optimization-Tool for Sustainable Product Development. January 31, 2003. 2003, Norwell-USA: Springer. 112
41. Fiksel, D.J., *Design for Environment : A Guide to Sustainable Product Development*. 2009.
42. ALHOMSI, H., Développement d'un support pour l'élaboration des scénarios liés au cycle de vie des produits durables, in *INP-Grenoble*. 2007.

43. Hur, T., et al., Simplified LCA and matrix methods in identifying the environmental aspects of a product system. *Journal of Environmental Management*, 2005. 75(3): p. 229-237.
45. Zhou, X. and J.M. Schoenung, An integrated impact assessment and weighting methodology: Evaluation of the environmental consequences of computer display technology substitution. *Journal of Environmental Management*, 2007. 83(1): p. 1-24.
46. LEMMOUCHI, F., □Modélisation des exigences en conception de produits industriels : apports de l'outil BDF □ in INP-Grenoble. 2009.
50. Johns, L.S., *Green products by design : choices for a cleaner environment*. 1992: DIANE Publishing.
51. MORRIS, A.S., *ISO 14000 Environmental Management Standards Engineering and Financial Aspects* ALAN S. 2004: John Wiley & Sons, Ltd.
52. Gehin, A., P. Zwolinski, and D. Brissaud, A tool to implement sustainable end-of-life strategies in the product development phase. *Journal of Cleaner Production*, 2008. 16(5): p. 566-576.
55. Mathieux, F., *ECO'DEEE RECOVERY-CONSCIOUS DESIGN GUIDELINES*. 2008.
56. Hertwich, E.G., W.S. Pease, and C.P. Koshland, Evaluating the environmental impact of products and production processes: a comparison of six methods. *Science of The Total Environment*, 1997. 196(1): p. 13-29.
58. Van der Werf, H.M.G. and J. Petit, Evaluation of the environmental impact of agriculture at the farm level: a comparison and analysis of 12 indicator-based methods. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002. 93(1-3): p. 131-145.
60. FROELICH, D., et al., Development of a new methodology to integrate ELV treatment limits into requirements for metal automotive part design. *Minerals Engineering*, 2007. 20(9): p. 891-901.
61. MAUSSANG, N., *Conception intégrée de systèmes produits-services*, , in INPG. 2008, Université de Grenoble: Grenoble.
62. Jeganova, J., *Product Life Cycle Design: Integrating Environmental Aspects into Product Design and Development Process at Alfa Laval*, in Lund University, Sweden 2004, Lund University, Sweden p. 51.
63. Fargnoli, M. and T. Sakao, Coordinating Ecodesign Methods in Early Stages of Industrial Product Design. *International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing*, 2008. Vol. 14, (No. 2,).
64. BOVEA, M.D. and V. PEREZ_BELIS, A taxonomy of ecodesign tools for integrating environmental requirements into the product design process. *Journal of Cleaner Production*, 2010. 20(1): p. 61-71.
66. Ammenberg, J. and E. Sundin, Products in environmental management systems: the role of auditors. *Journal of Cleaner Production*, 2005. 13(4): p. 417-431.
67. Nicholas_P. Cheremisinoff and A. Bendavid-Val, *GREEN PROFITS "The Manager's Handbook for ISO 14001 and Pollution Prevention"*. 2001, Burlington, USA: Elsevier.
68. DeSimone, L.D. and F. Popoff, *Eco-efficiency: The Business Link to Sustainable Development*, ed. T.W.B.C.f.S. Development. 2005, Cambridge, Massachusetts London, England, MIT Press.

69. Adu, I.K., et al., Comparison of methods for assessing environmental, health and safety (EHS) hazards in early phases of chemical process design. *Process Safety and Environmental Protection*, 2008. 86(2): p. 77-93.
70. M. DeMendonca, T.E.B., Design for the environment (DFE) □ An approach to achieve the ISO 14000 international standardization. *Environmental Management and Health*, 2001. 12(1): p. 51 □ 56
72. Ferdinand Quella, W.-P.S., Integrating Environmental Aspects into Product Design and Development The new ISO TR 14062 □ Part 2: Contents and Practical Solutions. *Life Cycle Management 2007*: p. 1-7.
74. Esty, D.C. and A.S. Winston, *Green to gold: how smart companies use environmental strategy to innovate ...* 2009: John Wiley and Sons. .
75. Frank, F. and H. Tobias, Is green and profitable sustainable? Assessing the trade-off between economic and environmental aspects. *International Journal of Production Economics*, 2010(0).
76. Swallow, L., *Green Business Practices for Dummies*. 2009, Hobken, USA: John Wiley & Sons Ltd. 384 pages.
78. VEZZOLI, C. and E. MANZINI, *Design for Environmental Sustainability*. 2008: Springer.
80. Islama, S.M.N., M. Munasingheb, and M. Clarkea, Making long-term economic growth more sustainable: evaluating the costs and benefits. *Ecological Economics*, 2003. Vol. 47(2-3): p. pp. 149- 166.
85. Coatanéa, E., et al. Analysis of the concept of sustainability: definition of conditions for using exergy as a uniform environmental metric. in 13th edition of the CIRP. 2006. K.U.Leuven, Mechanical Engineering Department, Heverlee, Belgium.
86. Laszlo, C., *The Sustainable Company: How to Create Lasting Value through Social and Environmental Performance* 2005: Island Press.
88. Nelson, B., *Building a Sustainable Business: A Guide to Developing a Business Plan for Farms and Rural Businesses*. 2003: Sustainable Agriculture Research and Education (SARE).
93. Sakao, T. and M. Lindahl, *Introduction to Product/Service-System Design*. 2009: Springer; 1st Edition. edition (December 1, 2009). 301.
95. DyllickTHOMAS and H. KAI, Beyond the business case for corporate sustainability, in *Business Strategy and the Environment*, W. InterScience, Editor. 2002, John Wiley & Sons, Ltd: Fontainebleau, France. p. 130-141.
97. Savard, R., Principes directeurs pour l'enseignement du marketing dans la formation des bibliothécaires, documentalistes et archivistes. *Organisation des Nations Unies pour l'éducation. la science et la culture*, ed. P.g.d.i.e. UNISIST. 1988, Paris: © Unesco 1988. 115 98.Pahl, G. and W. Beitz, *Engineering Design (A Systematic Approach)*. 3rd edition 2007: 3.
99. Nielsen, P.H. and H. Wenzel, Integration of environmental aspects in product development: a stepwise procedure based on quantitative life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 2002. 10(3): p. 247-257.
100. FROELICH, D., et al., State of the art of plastic sorting and recycling: Feedback to vehicle design. *Minerals Engineering*, 2007. 20(9): p. 902-912.

101. MATHIEUX, F., D. FROELICH, and P. MOSZKOWICZ, ReSICLED: a new recovery-conscious design method for complex products based on a multicriteria assessment of the recoverability. *Journal of Cleaner Production*, 2008. 16(3): p. 277-298.
102. LOPEZ, M., Intégration des contraintes de remanufacturabilité en conception de produits, in University of Grenoble, 2004.
103. Matsumoto, M., Development of a simulation model for reuse businesses and case studies in Japan. *Journal of Cleaner Production*, 2010. 18(13): p. 1284-1299.
104. GENHIN, A., D. BRISSAUD, and P. ZWOLINSKI, Integrated design of product lifecycles--The fridge case study. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2009. 1(4): p. 214-220.
109. Poole, S. and M. Simon, Technological trends, product design and the environment. *Design Studies*, 1997. 18(3): p. 237-248.
111. Joshi, K., Venkatachalam, A. and Jawahir, I.S. A New Methodology for Transforming 3R Concept into 6R Concept for Improved Product Sustainability. in IV Global Conference on Sustainable Product Development and Life Cycle Engineering. 2006. São Carlos, Brazil.
112. Zameri, M. and M. Saman, Strategic Guidance Model for Product Development in Relation with Recycling Aspects for Automotive Products... *Journal of Sustainable Development*, 2010. 3.
113. Kuik, S.S., S.V. Nagalingam, and Y. Amer, Sustainable supply chain for collaborative manufacturing. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2004.
115. Ammenberg, J. and E. Sundin, Products in environmental management systems: drivers, barriers and experiences. *Journal of Cleaner Production*, 2005. 13(4): p. 405-415.
116. Matsumoto, M., Business frameworks for sustainable society: a case study on reuse industries in Japan. *Journal of Cleaner Production*, 2009. 17(17): p. 1547-1555.
117. Casper Gray , M.C., Remanufacturing and Product Design Designing for the 7th Generation 2009.
120. Canter, L.W., Environmental impact assessment. 1995.
121. ALHOMSI, H. and P. ZWOLINSKI. UTILISATION DE REGLES DFE EN CONCEPTION PRELIMINAIRE. in 11ème Colloque National AIP PRIMECA. 2009. La Plagne - France
124. Mrtensson, A., et al., Chapter 341 - A European "Green" Electricity Accreditation Standard, in World Renewable Energy Congress VI. 2000, Pergamon: Oxford. p. 1649-1652.
125. Hindle, P., P. White, and K. Minion, Achieving real environmental improvements using value: Impact assessment. *Long Range Planning*, 1993. 26(3): p. 36-48.
126. Bovea, M.D. and R. Vidal, Increasing product value by integrating environmental impact, costs and customer valuation. *Resources, Conservation and Recycling*, 2004. 41(2): p. 133-145.
127. NEUMANN, K., Life-Cycle Approaches in European Companies: The influence of internal and external drivers on the application of life-cycle tools. 2007.

128. Frischknecht, R. and G. Rebitzer, The ecoinvent database system: a comprehensive web-based LCA database. *Journal of Cleaner Production*, 2005. 13(13-14): p. 1337-1343.
132. Knight, P. and J.O. Jenkins, Adopting and applying eco-design techniques: a practitioners perspective. *Journal of Cleaner Production*, 2009. 17(5): p. 549-558.
134. Betz, M., H. Florin, and H. Schoch. DfE tools - a way for application of LCA in product design? . in *Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, 2001. *Proceedings EcoDesign 2001: Second International Symposium on*. 2001.
135. Chulvi, V. and R. Vidal, Usefulness of evolution lines in eco-design. *Procedia Engineering*, 2011. 9(0): p. 135-144.
136. REMERY, M., Une méthode de évaluation des scénarios de fin de vie pour des produits en phase de conception préliminaire. 2011, UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL: MONTRÉAL.
137. Gehin, A., P. Zwolinski, and D. Brissaud, Integrated design of product lifecycles--The fridge case study. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2009. 1(4): p. 214-220.
140. Choi, J.K.N., L. F.; Ramani, K., A framework for the integration of environmental and business aspects toward sustainable product development. *Journal of Engineering Design*, , 2008. 19(Number 5): p. 431-446(16).
142. Lahonde, N., F. Omhover, and A. Aoussat. Proposition of a Methodology for Developing a Database of Design Methods. in *20th CIRP Design Conference*. 2010. Nante-France SpringerLink.
143. Zuo, J. and S. Director. An Integrated Design Environment for Early Stage Conceptual Design. in *DATE2000: Design, Automation and Test in Europe 2000*. 2000. Palais des Congres / Paris, France
144. PERRY, N., et al., Customised high-value document generation. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2005. 54(1): p. 123-126.
145. Wim Dewulf, J.R.D., INTEGRATING ECO-DESIGN INTO BUSINESS ENVIRONMENTS A multi-level approach *Product Engineering*. 2005: Springer Netherlands-55-76.
146. Hung, M.-L., et al., A novel multiobjective programming approach dealing with qualitative and quantitative objectives for environmental management. *Ecological Economics*, 2006. 56(4): p. 584-593.
148. Fargnoli, M., Coordinating Ecodesign Methods in Early Stages of Industrial Product Design. *International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing*, , 2008. Vol. 14(No. 2): p. 35-65.
149. Nizar, H., Contribution à l'intégration des contraintes de désassemblage et de recyclage dès les premières phases de conception des produits, in *Sciences de l'économie, de la gestion et de la société*. 2006, Arts et Métiers ParisTech.
150. Meerkamm, H., Design for Xâ A Core Area of Design Methodology. *Journal of Engineering Design*, 2007. 5(2): p. 165-181.

151. DeMendonca, M. and T.E. Baxter, Design for the environment (DFE) □ An approach to achieve the ISO 14000 international standardization. Environmental Management and Health, 2001. 12(1): p. 51 □ 56
153. Hauschild, M.Z., J. Jeswiet, and L. Alting, Design for Environment -- Do We Get the Focus Right? CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2004. 53(1): p. 1-4.
154. LEROY, Y., DEVELOPPEMENT D'UNE METHODOLOGIE DE FIABILISATION DES PRISES DE DECISIONS ENVIRONNEMENTALES DANS LE CADRE D'ANALYSES DE CYCLE DE VIE BASEE SUR L'ANALYSE ET LA GESTION DES INCERTITUDES SUR LES DONNEES D'INVENTAIRES, in Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. 2009, Arts et Métiers ParisTech: Chambéry. p. 194.
155. Siddhaye, S., et al., Design for environment: A printed circuit board assembly example, in Green Electronics/Green Bottom Line. 2000, Butterworth-Heinemann: Woburn. p. 113-122.
157. Fitzgerald DP, H.J., Sandborn PA, Schmidt LC, Gogoll TH., DESIGN FOR ENVIRONMENT (DfE): STRATEGIES, PRACTICES, GUIDELINES, METHODS, AND TOOLS, in Environmentally conscious mechanical design. 2007: London.
158. FROELICH, D. and E. HARSCOET, Use of LCA to evaluate the environmental benefits of substituting chromic acid anodizing (CAA). Journal of Cleaner Production, 2008. 16(12): p. 1294-1305.
160. Renaud, C.J., Design for Eco-efficiency at SC Johnson. Corporate Environmental Strategy, 1997. 5(1): p. 26-31.

Rapport techniques, site-Web, pratiques industrielles

1. RICHARDS, D.J. and A.B. FULLERTON, Industrial Ecology: U.S.-Japan Perspectives, in Report on the U.S.-Japan Workshop on Industrial Ecology, N.A. PRESS, Editor. 1993, NATIONAL ACADEMY OF ENGINEERING: Irvine, California.
4. BRUNDTLAND, H., Report: Our Common Future "Closing Ceremony of the Eighth and Final Meeting of the World Commission on Environment and Development". 1987, World Commission on Environment and Development: Tokyo, Japan.
5. Brundtland, G.H., Rapport Brundtland "Notre Avenir à Tous", in Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future 1989, UN Documents: Montréal.
6. European Union, Directive 2008/1/CE du Parlement européen et du Conseil du 15 janvier 2008 relative à la prévention et à la réduction intégrées de la pollution. 2008.
9. Apple Computer Inc, Design for Environment: A Case Study of the Power Mac G4 Desktop Computer, in Environmental Technologies and Strategies. 2000.
10. United States Environmental Protection Agency, Design for the Environment Projects. 2002.
15. (ISO), I.O.f.S., ISO 14040 - Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. 2006..

18. Singhal, P., et al., Key Environmental Performance Indicators (KEPIs): A New Approach to Environmental Assessment. Report-International Institute for Industrial Environmental Economics (IIIEE) at Lund University, Sweden, 2004.
33. pe-international. Design for Environment & Ecodesign. 2009 [cited; Available from: <http://www.gabi-software.com/france/solutions/design-for-environment-ecodesign/>].
37. FERRENDIER, S., et al., Eco-Design Guide- Ecolife Thematic Network ENVIRONMENTALLY IMPROVED PRODUCT DESIGN CASE STUDIES OF THE EUROPEAN ELECTRICAL AND ELECTRONICS INDUSTRY. 2002, THE ECOLIFE NETWORK.
39. EPA, U.E.P.A. CHECKLIST FOR LIFECYCLE DESIGN & DESIGN FOR ENVIRONMENT. 2008 [cited; Available from: www.epa.gov].
40. Hans Brezet, C.v.H., THE ECOCODESIGN CHECKLIST 1997.
44. PRé-Consultants, What is Life Cycle Assessment? 2008.
47. UE, Environmental Definitions UE 2009 2009.
48. Gil Friend, N., The truth about green business. 2009: QUE.
49. International_Organization_for_Standardization_(ISO). EISO_14040_Environmental_Management_Life_cycle_assessment_Principles_and_framework. 2006.
53. UNEP, U.-N.-E.-P., Applying Cleaner Production to Multilateral Environmental Agreements: A Training Kit. Cleaner Production | Training ed. I. Division of Technology, and Economics and S.C.P. Branch. 2006.
54. Ministère_du_Développement_Durable_Française, Véhicules Hors d'Usage (VHU), P.d. risques, Editor. 2009, Website.
57. Lehni, M., Eco-efficiency -Creating more value with less impact. 2000, Geneva - Switzerland: World Business Council for Sustainable Development (WBCSD).
59. AFNOR. Association Française de Normalisation. 2010 [cited; Available from: <http://www.afnor.org/>].
65. Organisation_Internationale_de_Normalisation. Les fondements d'ISO 14000 2010 [cited; Available from: http://www.iso.org/iso/fr/iso_14000_essentials].
71. Charter, M. ISO 14006:2011 □ Guidelines for implementing Eco design in Environmental Management Systems. 2011 [cited; Available from: <http://cfsd.org.uk/training1/eco-design/ISO14006/index.html>].
73. ISO, O.-I.-d.-N., Mise à jour de la brochure ISO 14000 avant le Sommet mondial sur le développement durable in ISO Management Systems, www.iso.org/ims. 2002.
77. Ventère, J.-P., La qualité écologique des produits □ Des écobilans aux écolabels. Éditions Sang de la Terre. 1995: AFNOR.
79. AFNOR. La marque NF Environnement - Qu'est-ce que c'est ? [cited; Available from: <http://www.ecolabels.fr/fr/la-marque-nf-environnement-qu-est-ce-que-c-est>].
81. Elkington, J., Enter the Triple Bottom Line. 1994.
82. Dieren, W.V., Taking Nature into Account: Toward a Sustainable National Income. A Report to the Club of Rome. Springer; 1 edition (July 21, 1995). 1995: Springer. 350.
83. Jensen, A.A. and A. Remmen, Background Report for a UNEP Guide to LIFE CYCLE MANAGEMENT - A bridge to sustainable products. 2006.

84. EurActiv.com. Commerce durable. 2004 [cited; Available from: <http://www.euractiv.com/fr/commerce/commerce-durable/article-120364>].
87. Gueret, M. Marketing et développement durable: Définition des concepts. 2004 [cited; Rapports de stage]. Available from: http://www.memoireonline.com/07/07/514/m_stage-marketing-et-developpement-durable5.html.
89. Minnesota, U.o., The Minnesota Institute for Sustainable Agriculture (MISA) / Website. 2010.
90. Vanhellemont, P.D.A.-M. Les cosmétiques du commerce équitable, durable/ (Trade For Development Centre). 2009 [cited; Available from: <http://befair.dnc-group.net/site/clickmail.cfm?NID=21057&VID=0&USER=0&DWLD=21060&LG=2>].
91. Bristol-Myers_Squibb. Go Green at Bristol-Myers Squibb. 2010.
92. AFNOR-Certification, Règles générales de la marque -NF Environnement, N. environnement, Editor. 2011, NF-Environnement.
94. UNEP, Applying Cleaner Production to Multilateral Environmental Agreements: A Training Kit. Global Status Report. 2006: Cleaner Production | Training
96. Web-Site. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). 2011 [cited; Available from: <http://www.wbcsd.org/home.aspx>].
105. Ministère de l'écologie et du développement durable France. Prévention de la production de déchets-2004. Février 2004 [cited; Available from: <http://www.developpement-durable.gouv.fr/>].
106. Commission, E., Directive 2008/98/EC on waste (Waste Framework Directive). 2008.
107. (WBCSD), W.B.C.f.S.D. The 4Rs - reduction, reuse, recycling and recovery. 2010 [cited; Available from: http://www.bsddglobal.com/tools/bt_4r.asp].
108. Global_Renewables. UR-3R Process ® Description @ UR-3R Facility. 2010 [cited; Available from: <http://www.globalrenewables.eu/ur3r-process/description>].
110. Fishbein, B.K., The EPR Policy Challenge for the United States. 2007: INFORM, Inc.
114. Ehrenfeld, J.R., Sustainability and Enterprise: An Inside View of the Corporation, in Extended Producer Responsibility: A Materials Policy for the 21st Century, M.I.o. Technology, Editor. 2000.
118. ISO/14062, ISO/TR 14062:2002 "Management environnemental - Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit". 2002.
119. AFNOR. Le cycle de vie des produits. 2009 [cited; Available from: <http://www.ecolabels.fr/fr/tout-savoir-sur-les-ecolabels/le-cycle-de-vie-des-produits>].
122. ISO, O.I.d.N., Environmental management: The ISO 14000 family of International Standards. ISO and the environment ed. I.C. Secretariat. 2009.
123. KÅrberger, T., Environmental labelling of electricity delivery contracts in Sweden. Energy Policy, 2003. 31(7): p. 633-640.
129. Pré. Eco-indicator 99 impact assessment method for LCA. 2010 [cited; Available from: www.pre-sustainability.com/.../eco-indicator-99].
130. PRé. The Ecoi-Indicator 99 - Adamage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment - Methodolgy Report. PRé product Ecology Consultants 2001 [cited; Available from: <http://www.pre-sustainability.com/content/eco-indicator-99>].
131. PRé_Consultants, SimaPro 7.1 Manual. 2010.

133. Yarwood, J.M. and P.D. Eagan, Design for the Environment A Competitive Edge for the Future Toolkit, in Minnesota Technical Assistance Program (MnTAP), M.T.A.P. (MnTAP), Editor. 2003, Minnesota Office of Environmental Assistance: Minnesota - USA.
138. Crul, M.R.M. and J.C. Diehl, Design for Sustainability a practical approach for Developing Economies, I. United Nations Environment Programme's Division of Technology, and Economics, Editor. 2006, Supervision, technical editing and support.
139. UNEP, Cost-benefit analysis of SCP & markets for sustainable products ToR for consultancy assignment 2007, ToRs for consultancy on cost-benefit analysis and markets for sustainable products
141. ECODESIGN-PILOT. Preferably use single material components and/or reduce number of different types of material [website] 2008 2008 [cited; Available from: <http://www.ecodesign.at/pilot/ONLINE/ENGLISH/>].
147. Bras, D.B., Incorporating Environmental Issues in Product Design and Realization. Industry and Environment, Special Issue on Product Design and the Environment, United Nations Environment Programme Industry and Environment (UNEP/IE), , 1997 Vol. 20, No. 1-2 (double issue), 1997 Invited contribution.
152. CROW, K., VALUE ANALYSIS AND FUNCTION ANALYSIS SYSTEM TECHNIQUE. DRM Associates, 2002.
156. Vadim Kotelnikov. Design for environment (DfE)-Design and environmental objectives. 2004 [cited; Available from] http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:O5iOFssuvsWJ:techmonitor.net/04mar_apr/tm/pdf/04mar_apr_green_productivity.pdf+dfE+design+for+iso&hl=fr&gl=fr&pid=bl&srcid=ADGEEsiWEApUiKDp4Ycur8bdYP557_ZnR3U8cw4uaAcQsT-QX_lm3mJ_aEk6RFnWVchwPPUq9HvGIN4lZKh2bje1PzuKmchdJ27YQxGO7wxb3Ka0mxwZSFSCJ2wRfIBoLRAaOuIuxM_z&sig=AHIEtbTvhKuq7gugZWYubh-DxN7zeqrZPA.
159. Resetar, S., WHAT IS DESIGN-FOR-ENVIRONMENT?, in Environmental Management in Design Lessons from Volvo and Hewlett-Packard for the Department of Defense, R.n.d.r.i.s.m. ca, Editor. 1998, Collaborateur Rand national defense research inst santa monica ca. p. 13-20.

Table des tableaux

Tableau 1. Exemples de normes de la série ISO 14000 [selon le www.iso.org]	14
Tableau 2. Liens entre les méthodes EIA utilisées et les objectifs recherchés	27
Tableau 3. Exemples de règles d'éco-conception (règles DfE) [Alhoms, 2009] [121]	28
Tableau 4: Ressources utilisées pour identifier une liste de règles DfE	41
Tableau 5: Règles d'éco-conception d'après Telenko et al.[2008]	43
Tableau 6: Règles d'éco-conception chez Schneider Electric	46
Tableau 7: Classification des règles selon le niveau de décision en conception.....	48
Tableau 8: Classification de règles selon énergie/matériaux/fin de vie	49
Tableau 9: Domaines identifiés pour la classification des règles DfE	50
Tableau 10: Extrait de règles DfE identifiées dans nos ressources.....	52
Tableau 11: Liste d'objectifs environnementaux à choisir selon les stratégies de l'entreprise	56
Tableau 12: Tableau 12: Liste des objectifs environnementaux choisis	56
Tableau 13: Valeur de l'engagement du domaine vis-à-vis des objectifs environnementaux .	57
Tableau 14: Tableau des relations entre domaines et objectifs	59
Tableau 15: Les règles DfE traduisibles selon les domaines d'implémentation.....	61
Tableau 16: Les Règles DfE pour répondre à l'objectif «Améliorer la recyclabilité »	62
Tableau 17: Formule de calcul l'indicateur [Ipm-n-Recyclabilité%].	80
Tableau 18: Catégories de matières en phase de Conception Conceptuelle	82
Tableau 19: Catégories de matières plus précises en phase d'Embodiment Design.....	82
Tableau 20: Liste de matières en phase de conception détaillée.....	83
Tableau 21: Formules de calcul traduisant la Règle DfE à partir d'indicateurs produit.	86
Tableau 22: La diversité des agrafeuses selon les besoins et les conditions d'utilisation	87
Tableau 23: Le cahier des charges de l'agrafeuse à carton et ses exigences environnementales	90
Tableau 24: Domaines engagés selon les objectifs environnementaux pour la conception de l'agrafeuse	93
Tableau 25: Tableau objectifs / règles pour notre étude de cas	94
Tableau 26: Règles DfE traduisibles définies par les domaines d'implémentation et les caractéristiques engagées pour la traduction des Règles DfE implémentées.	95
Tableau 27: Les 5 domaines et 11 règles engagées dans la conception de l'agrafeuse	96
Tableau 28: Liste des caractéristiques du produit pouvant être engagées dans la traduction des règles DfE.....	97
Tableau 29: Définition des indicateurs retenus pour chaque règle en lien avec les objectifs de l'entreprise.....	98
Tableau 30: Tableau des caractéristiques générales des composants (C) de l'agrafeuse en phase conceptuelle.....	102
Tableau 31: Caractéristiques générales des relations [R] pour l'agrafeuse en phase de conception conceptuelle	103
Tableau 32: Tableau des caractéristiques générales des composants [C] pour l'agrafeuse en phase de conception conceptuelle	104
Tableau 33: Indicateurs (Niveau d'implémentation de la règle DfE) dans la phase conceptuelle.....	105
Tableau 34: Valeur des facteurs de pondération de chaque Règle DfE implémentée	106
Tableau 35: Tableau des caractéristiques générales des composants [C] lors de la phase No.2 (Embodiment Design)	109
Tableau 36: Caractéristiques Générales des relations [R]-lors de la phase No.2 (Embodiment Design)	110

Tableau 37: Caractéristiques Générales du produit [P]-lors de la phase No.2 (Embodiment Design)	111
Tableau 38: Indicateurs (Niveau d'implémentation de la règle DfE) dans la phase d'embodiment design	112
Tableau 39: Caractéristiques Générales des Composant [C] lors de la phase No.3 (detailed design)	114
Tableau 40: Caractéristiques générales des relations [R]-lors de la phase No.3 (conception détaillée)	115
Tableau 41: Caractéristiques générales du produit [P]-lors de la phase No.3 (conception détaillée)	116
Tableau 42: Indicateurs (Niveau d'implémentation de la règle DfE) dans la phase de conception détaillée	117
Tableau 43: Pièces engagées pour la proposition No.1	121
Tableau 44: Valeurs des caractéristiques liées aux composants [C] selon la proposition No.1	122
Tableau 45: Valeurs des caractéristiques liées aux relations selon la proposition No.1	123
Tableau 46: Caractéristiques générales du produit [P]-lors de la phase No.3 (conception détaillée), proposition No.	124
Tableau 47: Evolution des valeurs des indicateurs [Ii] suivant la proposition No.1	125
Tableau 48: Pièces engagées pour la proposition No.2	126
Tableau 49: Valeurs de caractéristiques liées aux composantes [C] pour la proposition No.2	127
Tableau 50: Caractéristiques générales du produit [P]-lors de la phase No.3 (conception détaillée), proposition No.2	128
Tableau 51: Evolution des valeurs des indicateurs [Ii] suivant la proposition No.2	129

Table des figures

Figure 1: Démarche d'implémentation de règles DfE dans la conception	11
Figure 2: ISO-14001 logos.....	15
Figure 3. Relation entre l'ISO 14000 et le développement de produit [ISO, 2002].	16
Figure 4: La diversité des écolabels « privés » sur le marché et les labels français et européens	17
Figure 5. Le développement Durable et le triptyque: social, économique et environnemental [UNEP 2006].....	18
Figure 6: Les étapes du cycle de vie de produit, du point de vue des ventes (© Unesco 1988)	19
Figure 7: Figure 8. CdV de produit selon Pahl & Beitz.....	20
Figure 8. Le cycle de vie du produit pour la prise en compte de l'environnement.....	20
Figure 9. Le cycle de vie proposé par Gehin [Gehin, 2008]	22
Figure 10. Prévention des déchets et gestion des déchets [adopté par Ministère de l'écologie et du développement durable]	22
Figure 11. La hiérarchie des stratégies de traitement des déchets [Directive 2008/98/EC].....	23
Figure 12. Le concept 3R dans gestion durable des déchets urbains [GRL/UR-3R Process]..	23
Figure 13. Le concept 3R au niveau du produit [Gehin-Thèse 2008].....	24
Figure 14. Bénéfices économiques en lien avec le concept 6R	24
Figure 15. Evolution des pratiques pour l'intégration de l'environnement en conception	25
Figure 16. Déroulement de la démarche de calcul en ACV (eco-indicateur 99)	29
Figure 17. Résultat d'une ACV sur le diesel (SimaPro - Eco-Indicator 99).....	30
Figure 18. Exemple d'une Eco-design Strategy Wheel	31
Figure 19. Résultats concernant les axes d'amélioration dans Ecodesign pilot (cas du rasoir)32	
Figure 20. Exemple de règles pour guider la conception (Ecodesign Pilot).....	33
Figure 21. Approche actuelle pour la conception de produits respectueux de l'environnement	34
Figure 22. Approche pour intégrer des règles DfE dans le processus de conception	37
Figure 23. Eléments à mettre en place pour notre méthode d'intégration de règles DfE en conception	38
Figure 24. Représentation la Règle DfE par un Indicateur [Ii]	39
Figure 25. . Traduction des règles DfE selon les éléments évaluable	39
Figure 26: Eléments à considérer pour définir les impacts environnementaux du produit.....	48
Figure 27: Les domaines d'implémentation des règles DfE	51
Figure 29: Les principales étapes conduisant au choix des règles DfE	54
Figure 30: L'engagement des domaines d'implémentation dans le choix des règles DfE	57
Figure 31: Les règles DfE pour l'évaluation des objectifs de conception	62
Figure 32: Modèle général pour la symbolisation de l'indicateur [Ii]	66
Figure 33: Symbolisation de l'indicateur [Ip - - mns-max]	66
Figure 34: Modèle générale de symbolisation de l'indicateur global [IGlo]	67
Figure 35: Le modèle (C, R, P)	67
Figure 36: Modèle C, R, P extrait d'un BDF	68
Figure 37: Illustration des différences de données sur le produit selon les phases de la conception	68
Figure 38: Expression d'une règle DfE selon les phases de conception.....	69
Figure 39: Symbolisation pour les caractéristiques du produit.	70
Figure 40: La représentation fonctionnelle (BDF) du réfrigérateur dans la phase de conception préliminaire	71

Figure 41: Modèle produit concernant le calcul d'IPpsd. A gauche l'état initial, à droite l'évolution du produit.....	73
Figure 42: Les concepts mis en jeu dans la pondération des règles DfE impliquées.....	74
Figure 43: Le mécanisme de pondération des règles DfE impliquée selon les contraintes extérieures	74
Figure 44: Le mécanisme de pondération de la règle DfE impliquée selon le concepteur/l'entreprise	76
Figure 45: Le système de pondération de la règle DfE impliquée	77
Figure 46: Les différents cas d'implémentation des règles DfE dans les phases de conception	78
Figure 47: Implémentation d'une seule règle DfE dans une seule phase de conception	79
Figure 48: Eléments impliqués dans le calcul de [IGlo] pour une seule règle DfE	79
Figure 49: Influence des caractéristiques dans le calcul de la valeur de l'indicateur	81
Figure 50: Implémentation d'une règle DfE au cours des phases de conception.	81
Figure 51: Implémentation d'un groupe de règles DfE dans une phase de conception	84
Figure 52: Valeur de l'indicateur globale d'implémentation des Règles DfE dans l'étape étudiée	85
Figure 53: Différentes agrafeuses à carton.....	88
Figure 54: Processus de conception selon le modèle de Pahl et Beitz.....	88
Figure 55: Processus de conception proposé en appui sur les règles DfE	89
Figure 56: Graphe d'interaction() de l'agrafeuse.....	99
Figure 57: BDF de l'agrafeuse en phase de conception préliminaire	100
Figure 58: Le modèle [CRP] et les liens tirés de la représentation fonctionnelle (BDF) et/ou du croquis technique.....	100
Figure 59: Forme prévue de l'agrafeuse au début de la phase No.2 (<i>Embodiment Design</i>)..	107
Figure 60: Représentation fonctionnelle l'agrafeuse lors de la phase No.2 (<i>Embodiment Design</i>)	107
Figure 61: Modèle [CRP], BDF et dessin technique de l'agrafeuse lors de la phase No.2 (<i>Embodiment Design</i>)	108
Figure 62: Forme prévue de l'agrafeuse au début de la phase No.3 (<i>Detailed Design</i>).....	112
Figure 63: Représentation fonctionnelle de l'agrafeuse lors de la phase No.3 (<i>Conception détaillée</i>).....	113
Figure 64: Modèle [CRP], BDF et dessin technique lors de la phase No.3 (<i>conception détaillée</i>).....	113
Figure 65: Valeur de l'indicateur global [IGlo] au cours de la conception.....	117
Figure 66: Variation des valeurs des indicateurs au cours de la conception.....	118
Figure 67: Evolution des valeurs des caractéristiques et de l'indicateurs pour les Règles DfE No. [5 & 9].	119
Figure 68: Caractéristiques engagées pour l'amélioration des valeurs des indicateurs [Ii]..	120
Figure 69: Evolution des valeurs de l'indicateur globale [IGlo] selon la proposition No.1 ..	126
Figure 70: Evolution des valeurs de l'indicateur globale [IGlo] selon la proposition No.2 ..	130
Figure 71: Approche proposée pour concevoir des produits respectueux de l'environnement	131

Table des équations:

Équation 1. Calcul de la valeur de l'Indicateur global	40
Équation 2: Calcul de l'indicateur [Ipmns- max]	73
Équation 3: Le calcul de facteur de pondération pour les règles DfE	77
Équation 4: Le calcul de l'Indicateur Global pour le produit (P).....	77
Équation 5: Formule de calcul d'un indicateur	84
Équation 6: Valeur de l'indicateur globale selon les indicateurs et les facteurs de pondération	86
Équation 7: Formule de calcul de l'indicateur global [IGlo] pour chaque phase de conception.	106