



HAL
open science

Contribution à l'intégration de la valorisation en fin de vie dès la conception d'un produit . Une méthode basée sur l'évaluation multicritères de la recyclabilité du produit et sur l'identification de ses points faibles de conception

Fabrice Mathieux

► **To cite this version:**

Fabrice Mathieux. Contribution à l'intégration de la valorisation en fin de vie dès la conception d'un produit . Une méthode basée sur l'évaluation multicritères de la recyclabilité du produit et sur l'identification de ses points faibles de conception. Autre. Arts et Métiers ParisTech, 2002. Français. NNT: . tel-00005689

HAL Id: tel-00005689

<https://pastel.hal.science/tel-00005689>

Submitted on 5 Apr 2004

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.

École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers
Institut Conception, Mécanique et Environnement
Chambéry

THÈSE

Présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR

DE

L'ÉCOLE NATIONALE SUPERIEURE
D'ARTS ET METIERS

Spécialité : Génie Industriel

PAR

Fabrice MATHIEUX

**CONTRIBUTION À L'INTÉGRATION DE LA VALORISATION EN FIN DE VIE DÈS
LA CONCEPTION D'UN PRODUIT**

**Une méthode basée sur l'évaluation multicritères de la recyclabilité du produit
et sur l'identification de ses points faibles de conception**

Thèse soutenue le 18 décembre 2002, devant le jury d'examen :

M.	D.	FROELICH, Professeur E.N.S.A.M., Chambéry	Directeur de thèse
M.	P.	MOSZKOWICZ, Professeur I.N.S.A., Lyon	Co-directeur de thèse
M.	G.	COGNET, Professeur I.N.P., Grenoble	Rapporteur
M.	M.	SIMON, Professeur S.H.U., Sheffield (Royaume-Uni)	Rapporteur
M.	Y.	BOUZIDI, Enseignant - Chercheur, U.T.T., Troyes	Examinateur
M.	J.P.	HAUTIER, Professeur E.N.S.A.M., Lille	Examinateur
M.	P.	DUBOTS, Responsable Environnement Produit, Alcatel	Membre invité

L'ENSAM est un grand établissement composé de huit centres:

AIX-EN-PROVENCE - ANGERS - BORDEAUX - CHÂLONS-EN-CHAMPAGNE - CLUNY - LILLE - METZ - PARIS

LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS REALISEES

Revue Internationale :

- Mathieux, F., Rebitzer, G., Ferrendier, S., Simon, M., Froelich, D. (2002), *Ecodesign in the European Electr(on)ics Industry: an analysis of the current practices based on cases studies*, The Journal of Sustainable Product Design, Sous Presse.

Congrès Internationaux avec actes :

- Mathieux, F., Rebitzer, G., Simon, M., Ferrendier, S., Froelich, D. (2002), Implementation of Ecodesign in the European Electr(on)ics Industry, 9th CIRP International Seminar on Life Cycle Engineering, Erlangen (Allemagne), pp.143-149, ISBN 3-87525-167-9.
- Mathieux, F., Froelich, D., Moszkowicz, P. (2001), *Development of recovery indicators to be used during product design process: method, potentialities and limits*, EcoDesign 2001: Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokyo (Japan), 12-15 décembre 2001, pp.281-286, ISBN 0-7695-1266-6.
- Mathieux, F., Froelich, D., Moszkowicz, P. (2001), *Development of recovery indicators to be integrated into the design process of complex products* (Poster), 1st International Conference on Life Cycle Management (LCM 2001), Copenhagen (Denmark), 26-29 Août 2001, pp.235-239, ISBN 87-7782-077-0.
- Mathieux, F., Froelich, D., Moszkowicz, P. (2001), *Developing a recovery performance methodology to enhance Design for End-of-Life of Products* (Poster), Setac annual meeting, Madrid (Spain), 6 mai 2001.

Congrès Internationaux et Nationaux sans acte :

- Froelich, D., Mathieux, F. (2002), *Best Practice Guide on EcoDesign*, Going Green – Care Innovation, Vienna (Austria), 26 Novembre 2002.
- Janin, M., Mathieux, F., Froelich, D. (2000), *L'environnement dans les métiers de la conception: un nouveau paramètre à intégrer dans le processus de développement des produits - Cas d'une stratégie de valorisation en fin de vie*, Journée Primeca, Méthodes de conception, Outils et Systèmes de Management pour l'intégration de l'environnement, ENSAM Chambéry, 16 novembre 2000.
- Mathieux, F., Froelich, D. (2000), *Evaluation of recyclability of products and materials to enhance ecodesign*, Journées Transalpines 2000, Polymer and composite materials - innovations and sustainable development, Université de Savoie, Chambéry, 23 octobre 2000.

Rapport :

- Ferrendier, S., Mathieux, F., Rebitzer, G., Simon, M., Froelich, D. (2002) *EcoDesign guide: Environmentally improved product design - Case studies of the European electric and electronic industry*; Rapport technique du réseau thématique européen Ecolife, 134p, accessible sur <http://www.iht.tuwien.ac.at/sat/base/Ecolife/ECOIndex.html> .

Présentations dans le cadre du réseau Européen Ecolife :

- Mathieux, F., Rebitzer, G., Simon, M., Ferrendier, S., Froelich, D. (2002), *Introduction to the best practices guide on ecodesign – Contents and benefits*, Workshop régional français du réseau thématique européen Ecolife, ENSAM Chambéry, 21 janvier 2002.
- Mathieux, F., Froelich, D. (2001), *Definition of a comprehensive guide for Ecodesign*, 2nd Ecolife Public Workshop, Bruxelles (Belgique), 5 mars 2001.

SOMMAIRE GÉNÉRAL

Sommaire général	7
-------------------------	----------

Glossaire et abréviations	17
----------------------------------	-----------

Remerciements	21
----------------------	-----------

Introduction générale	27
------------------------------	-----------

Chapitre 1 - Conception de produits et valorisation en fin de vie - Récents développements et complémentarité des approches	37
--	-----------

Introduction – Vers l’adéquation produit / procédés de valorisation	39
--	-----------

Partie 1. Etat de l’art du système de valorisation des produits complexes en fin de vie et de sa modélisation	40
--	-----------

1.1. La valorisation : une activité ancienne en pleine mutation	40
1.2. Valorisation en fin de vie et innovations technologiques : état de l’art des développements applicables aux PEEFV	41
valorisation applicables aux PEEFV	48
1.3. Variabilité des scénarii de valorisation	48
1.4. Conclusions concernant les sources de données des performances des filières	49
1.5. Conclusions sur l’état de l’art du système de valorisation	50

Partie 2. Intégration des contraintes de la valorisation en fin de vie lors de la conception de produit	51
--	-----------

2.1. Objectifs de l’approche et terminologie	51
2.2. Classification de quelques méthodes d’ECOV selon les caractéristiques du système de valorisation considérées	52
2.3. Caractère incertain des filières de valorisation	62
2.4. Les critères de recyclabilité considérés dans les méthodes d’ECOV	65
2.5. Intégration de la valorisation en fin de vie dans le processus de conception de produit	67
2.6. Conclusions de l’analyse des méthodes d’ECOV	72

Conclusions : énoncé des lacunes méthodologiques et des opportunités de recherche	75
--	-----------

Chapitre 2 - Proposition d’une méthode visant l’amélioration de l’aptitude d’un produit à la valorisation en fin de vie	79
--	-----------

Introduction	81
Partie 1. Présentation globale de la méthode	82
1.1. Une méthode basée sur l'évaluation de la recyclabilité de produit	84
1.2. Proposition de gestion des scénarii de valorisation dans la méthode	87
1.3. Synoptique global de la méthode	91
Partie 2. Présentation des modèles permettant le calcul des indicateurs de recyclabilité	92
2.1. Le modèle « produit »	92
2.2. Le modèle « valorisation »	92
2.3. Les indicateurs de recyclabilité : une évaluation de l'adéquation entre produit et procédés de valorisation	98
Partie 3. Structuration du modèle valorisation	108
3.1. Objectifs	108
3.2. Etape de démontage manuel	108
3.3. Etape de tri	111
3.4. Etape de recyclage	113
3.5. Etape d'incinération avec récupération d'énergie	115
3.6. Etape de revente de matériaux secondaires	117
3.7. Autres étapes de valorisation	118
3.8. Résumé des modélisations des cinq étapes de valorisation	118
Partie 4. Structuration du modèle produit	120
4.1. Identification des caractéristiques pertinentes d'un produit d'un point de vue de la recyclabilité	120
4.2. Proposition d'une structure d'organisation des caractéristiques d'un produit influençant sa recyclabilité	122
4.3. Présentation graphique de la structure du modèle produit	124
Partie 5. Amélioration de l'aptitude d'un produit à la valorisation en fin de vie	126
5.1. Présentation générale de la démarche	126
5.2. Identification de procédés « problématiques » dans un scénario de valorisation	127
5.3. Détermination de points faibles de conception	128
5.4. Identification de voies d'amélioration de conception	129
5.5. Elaboration de voies d'amélioration de conception dans un contexte multi-scénarii et multicritères	131
5.6. Amélioration de la conception du produit et des pièces qui le constituent : vers des règles d'additivité	133
Conclusions du Chapitre 2	134
Chapitre 3 – Application de la méthode à des études de cas - Evaluation de la recyclabilité de cartes électroniques et d'un téléviseur - Enseignements de conception	137
Introduction – Objectifs de la validation	139

Partie 1. Produits, données, et hypothèses considérés	140
1.1. Produits considérés	140
1.2. Scénarii de valorisation considérés	140
1.3. Les modes d'acquisition des données	140
1.4. Hypothèses liées aux choix des critères de recyclabilité	142
1.5. Mise en œuvre d'une démarche d'amélioration de conception	143
Partie 2. Application de la méthode à l'étude de la recyclabilité de cartes électroniques	144
2.1. Introduction	144
2.2. Etude de cas n°1 : évaluation de la recyclabilité de la carte électronique d'un téléviseur	144
2.3. Etude de cas n°2 : évaluation de la recyclabilité de plusieurs générations de cartes électroniques de téléphones portables	148
2.4. Etude de cas n°3 : évaluation de la recyclabilité du mélange de plusieurs générations de cartes électroniques	151
2.5. Conclusions concernant la recyclabilité des cartes électroniques	151
Partie 3. Application de la méthode en vue de l'amélioration de la conception d'un téléviseur	153
3.1. Etude de cas n°4 : évaluation globale de la recyclabilité d'un téléviseur - Voies d'amélioration de sa conception	153
3.2. Etude de cas n°5 : évaluation de la recyclabilité des pièces plastiques d'un téléviseur dans un schéma prospectif - Voies d'amélioration de leur conception	167
3.3. Conclusions sur les études de cas n°4 et n°5	178
Conclusions du Chapitre 3	179

Chapitre 4 - Vers l'utilisation de la méthode en entreprise	185
--	------------

Introduction	186
Partie 1. Les développements à réaliser avant l'utilisation de la méthode en entreprise	187
1.1. Vers des sources de données variées pour le calcul des indicateurs	187
1.2. Incertitudes concernant les évaluations de la recyclabilité	188
1.3. Vers la transposition de la méthode en langage informatique	189
Partie 2. Recommandations en vue d'une utilisation optimale de la méthode en entreprise	191
2.1. Recommandations concernant les choix effectués par l'entreprise	191
2.2. Recommandations en vue de la structuration et la gestion des règles de conception	192
2.3. Recommandations en vue de la structuration et la gestion de la base de données de procédés	194
Partie 3. Intégration de la méthode dans le processus de conception de produit	196
3.1. La recyclabilité : un critère parmi d'autres en conception	196
3.2. Deux utilisations possibles de la méthode en phase de conception de produit	199
3.3. Positionnement plus large de la méthode dans un processus de conception	200
Conclusions du Chapitre 4	202

Conclusion générale	205
----------------------------	------------

Références bibliographiques	211
------------------------------------	------------

Références Internet	223
----------------------------	------------

Annexes	227
----------------	------------

Résumé	286
---------------	------------

LISTE DES FIGURES

Introduction

Figure 1. Les perceptions de la recyclabilité de produit pour quelques acteurs concernés et pour plusieurs horizons temporels.	29
Figure 2. Démarche de recherche adoptée.	31
Figure 3. Représentation synoptique du mémoire de recherche.	33

Chapitre 1

Figure 1.1. Représentation synoptique du Chapitre 1.	40
Figure 1.2. Schématisation des deux tendances actuelles du recyclage de matériaux.	46
Figure 1.3. Les quatre axes d'analyse des méthodes d'ECOV.	52
Figure 1.4. Adéquation du produit et du système de valorisation pour la CpD.	52
Figure 1.5. Adéquation du produit et du système de valorisation pour la CpDV.	54
Figure 1.6. Adéquation du produit et du système de valorisation pour la CpND.	57
Figure 1.7. Adéquation du produit et du système de valorisation pour la CpSV.	58
Figure 1.8. Schématisation du processus de sélection de matériau par le logiciel euroMat'.	60
Figure 1.9. Règles d'appartenance des groupes de méthodes CpD, CpDV, CpND et CpSV.	61
Figure 1.10. Positionnement de quelques méthodes d'éco-conception orientée valorisation selon les procédés de valorisation considérés.	62
Figure 1.11. Facteurs influençant le devenir des systèmes de valorisation des PEEFV.	65
Figure 1.12. Tentative de positionnement des méthodes d'ECOV recensées dans un processus de conception séquentiel.	70
Figure 1.13. Extraction de règles générales pour en faire des règles de conception spécifiques.	71

Chapitre 2

Figure 2.1. La recyclabilité comme évaluation de l'adéquation entre conception de produit et scénarii de valorisation.	81
Figure 2.2. Représentation synoptique du Chapitre 2.	82
Figure 2.3. Synoptique de la méthode.	82
Figure 2.4. Correspondances entre les moteurs de l'amélioration de la recyclabilité de produit et les critères de recyclabilité retenus.	84
Figure 2.5. Schématisation de la gestion des scénarii de valorisation adoptée dans la méthode.	90
Figure 2.6. Synoptique global de la méthode basée sur l'évaluation de la recyclabilité d'un produit.	91
Figure 2.7. Schématisation des niveaux considérés dans le modèle modélisation.	93
Figure 2.8. Représentation schématique des entrants et sortants principaux et secondaires consommés et rejetés par une opération unitaire de valorisation numérotée (i,j).	95
Figure 2.9. Représentation schématique de la construction d'un procédé de valorisation par l'association d'opérations unitaires de valorisation.	97
Figure 2.10. Représentation schématique des flux de matières et des flux monétaires partant et arrivant à l'acteur mettant en œuvre le premier procédé de la chaîne de valorisation.	101
Figure 2.11. Schématisation des flux financiers contribuant à l'IER dans une chaîne de procédés.	102

Figure 2.12. Les différents cas de figures du calcul de l'IIER.	106
Figure 2.13. Périmètres considérés pour les critères de recyclabilité considérés.	106
Figure 2.14. Evolutions des indicateurs de recyclabilité au cours de l'enchaînement des procédés de valorisation : (a) indicateur massique de recyclabilité (b) indicateur de économique recyclabilité (c) indicateur d'impact environnemental de recyclabilité.	107
Figure 2.15. Transformation d'un produit ou d'un sous-ensemble au cours d'un procédé de démontage manuel.	109
Figure 2.16. Transformation d'un mélange de matériaux ou de pièces au cours d'un procédé de tri.	112
Figure 2.17. Transformation d'un mélange concentré de matériau au cours d'un procédé de recyclage.	114
Figure 2.18. Transformation des déchets au cours d'une étape d'incinération avec récupération d'énergie.	116
Figure 2.19. Représentation du transfert d'un cycle de vie d'un produit à un autre cycle de vie lors de la revente de matériaux secondaires.	117
Figure 2.20. Schématisation des relations existantes entre les niveaux structurant le modèle produit.	125
Figure 2.21. Etapes de la démarche d'amélioration de conception d'un produit.	127
Figure 2.22. Enchaînement des étapes menant à l'identification de points faibles du produit.	129
Figure 2.23. Limites de la sphère d'application de la méthode et du domaine d'expertise de l'équipe de conception.	131
Figure 2.24. Mode de combinaison de règles de conception ; (a) Deux groupes de règles élaborées par une équipe de conception ; (b) Caractère commun, antagoniste et non antagoniste des règles des deux groupes ; (c) Mode de gestion « élitiste » des règles ; (d) Mode de gestion « what-if » des règles.	132
Figure 2.25. Schématisation de l'application de la méthode aux pièces qui constituent un produit.	133
Figure 2.26. Schématisation des principales caractéristiques originales de la méthode.	134

Chapitre 3

Figure 3.1. Représentation synoptique du Chapitre 3.	139
Figure 3.2. Evaluation de l'IIER de la carte électronique d'un téléviseur selon 11 classes d'impact environnemental – Evaluation comparée à l'IIER d'un scénario de réutilisation totale et l'IIER d'un scénario de recyclage total.	146
Figure 3.3. Résultats des IMR de trois générations de cartes de téléphones portables.	148
Figure 3.4. Résultats des IIER de trois générations de cartes de téléphones portables pour quatre classes d'impact.	150
Figure 3.5. Schématisation partielle des trois scénarii de valorisation du téléviseur.	154
Figure 3.6. Evaluation multicritères de la recyclabilité d'un téléviseur pour plusieurs scénarii de valorisation.	155
Figure 3.7. Evaluation des contributions négatives de plusieurs procédés de valorisation à la recyclabilité massique d'un téléviseur.	156
Figure 3.8. Evaluation des contributions négatives de plusieurs procédés de valorisation à la recyclabilité économique d'un téléviseur.	157
Figure 3.9. Evaluation des contributions négatives de plusieurs procédés de valorisation à la recyclabilité environnementale d'un téléviseur pour quatre classes d'impact.	158
Figure 3.10. Schématisation de la procédure menant de la hiérarchisation de procédés problématiques à l'élaboration de règles de conception pour le téléviseur.	164
Figure 3.11. Evaluation multicritères de la recyclabilité de pièces plastiques extraites d'un téléviseur pour trois scénarii de valorisation.	169

Figure 3.12. Schématisation de la procédure de passage de la hiérarchisation de procédés problématiques à la proposition de voies d'amélioration de conception pour les pièces plastiques du téléviseur.	172
Figure 3.13. Evaluation des contributions négatives des procédés du scénario B à la recyclabilité massive de pièces plastiques.	176
Figure 3.14. Deux modes d'utilisation de la méthode pour proposer des voies d'amélioration de conception.	178
Figure 3.15. Nombre de types de polymères possibles pour l'enveloppe du téléviseur, pour trois époques différentes.	179

Chapitre 4

Figure 4.1. Représentation synoptique du Chapitre 4.	186
Figure 4.2. Proposition de combinaison des modèles de broyage et de tri par flottation pour le calcul des indicateurs de recyclabilité de pièces plastiques.	188
Figure 4.3. Modes d'influence des « choix et savoir » de l'entreprise sur le déroulement de la méthode.	191
Figure 4.4. Proposition d'une structuration d'une base de règles de conception.	193
Figure 4.5. Relations ambivalentes entre base de règles et recherche de voies d'amélioration.	194
Figure 4.6. Proposition d'un mode de structuration et d'évolution de la base de données de procédés, filières et scénarii de valorisation.	195
Figure 4.7. Notre perception de l'échelle de priorité de critères de conception en vigueur dans quelques entreprises du secteur électr(on)ique.	197
Figure 4.8. Proposition d'une nouvelle échelle de priorité des critères de conception en considérant trois sous critères de recyclabilité.	198
Figure 4.9. Schématisation des modes de gestion « élitiste » et « what-if » lors de l'établissement de compromis selon plusieurs critères de conception.	199
Figure 4.10. Schématisation de l'utilisation de l'évaluation de la recyclabilité (a) en fin du processus de conception, (b) en cours de processus de conception.	200
Figure 4.11. Positionnement de la méthode dans un processus de conception séquentiel.	201

LISTE DES TABLES

Chapitre 1

Table 1.1. Récapitulatif de quelques recherches récentes dans le domaine du broyage de produit.	43
Table 1.2. Récapitulatif de quelques recherches récentes dans le domaine du tri de matériaux, applicables à la problématique des PEEFV.	45
Table 1.3. Limites d'admission des ferrailles E40 en vue de leur recyclage.	47
Table 1.4. Règles de CpD.	53
Table 1.5. Extrait de la grille d'analyse des caractéristiques principales de quelques méthodes d'ECOV.	74

Chapitre 2

Table 2.1. Plusieurs hiérarchies envisageables parmi les critères de recyclabilité d'un produit.	87
Table 2.2. Présentation de six méthodologies du futur potentiellement utilisables en ACV.	88
Table 2.3. Fonctions visées par les principales étapes contribuant à la valorisation d'un PEEFV.	94
Table 2.4. Ecriture mathématique des entrants et sortants principaux et secondaires d'une opération unitaire de valorisation numérotée (i,j).	95
Table 2.5. Ecriture mathématique des entrants et sortants principaux et secondaires d'un procédé de valorisation.	97
Table 2.6. Temps de démontage alloués à quelques opérations unitaires de démontage.	110
Table 2.7. Grandeurs nécessaires à la modélisation d'une étape de démontage manuel ; contributions aux indicateurs IMR, IER et IIER.	110
Table 2.8. Grandeurs nécessaires à la modélisation d'une étape de tri ; contributions aux indicateurs IMR, IER et IIER.	112
Table 2.9. Grandeurs nécessaires à la modélisation d'une étape de recyclage ; contributions aux indicateurs IMR, IER et IIER.	114
Table 2.10. Grandeurs nécessaires à la modélisation d'une étape d'incinération avec valorisation énergétique ; contributions aux indicateurs IMR, IER et IIER.	116
Table 2.11. Grandeurs nécessaires à la modélisation d'une étape de revente de matériaux secondaires ; contributions aux indicateurs IMR, IER et IIER.	118
Table 2.12. Conditions d'entrée et informations nécessaires à la détermination des transformations des entrants principaux et aux calculs des indicateurs IMR, IER et IIER de quelques étapes de valorisation applicables aux PEEFV.	119
Table 2.13. Grille d'analyse de la pertinence des caractéristiques d'un produit pour certains procédés de valorisation.	121
Table 2.14. Caractéristiques propres d'une substance, élément générique du modèle produit.	122
Table 2.15. Caractéristiques propres d'un matériau, élément générique du modèle produit.	122
Table 2.16. Caractéristiques propres d'une pièce, élément de produit du modèle produit.	123
Table 2.17. Caractéristiques propres d'une fixation entre pièces et/ou ensembles, élément de produit du modèle produit.	124
Table 2.18. Caractéristiques propres d'un ensemble, élément de produit du modèle produit.	124

Table 2.19. Expressions mathématiques devant être minimisées ou maximisées lors de la recherche de procédés de valorisation problématiques.	128
Table 2.20. Exemple de règles communes, antagonistes et non antagonistes dans deux groupes de voies.	132

Chapitre 3

Table 3.1. Résultats des IER de trois générations de cartes de téléphones portables.	149
Table 3.2. Classement des scénarii de valorisation pour chaque critère de valorisation.	155
Table 3.3. Hiérarchisation des procédés problématiques de la valorisation du téléviseur selon le scénario 2.	159
Table 3.4. Table de correspondance entre impacts des « procédés problématiques » et « points faibles de conception » pour le scénario 2.	160
Table 3.5. Voies possibles d'amélioration de la conception du téléviseur pour les différents types de contributions à la recyclabilité de produit.	162
Table 3.6. Règles de conception établies pour l'amélioration de la conception du téléviseur selon le scénario 2.	163
Table 3.7. Comparaison des évaluations de recyclabilité du téléviseur original et du téléviseur re-conçu pour le scénario 2 de valorisation.	165
Table 3.8. Variations des indicateurs de recyclabilité du téléviseur re-conçu pour les trois scénarii de valorisation.	166
Table 3.9. Voies d'amélioration de conception applicables à des pièces plastiques pour deux scénarii de valorisation	171
Table 3.10. Combinaison de règles de conception visant l'amélioration de recyclabilité massique selon les modes « élitiste » et « what-if ».	173
Table 3.11. Règles de conception visant l'amélioration de recyclabilité économique résultant d'une combinaison de règles selon les modes « élitiste » et « what-if ».	173
Table 3.12. Variations constatées sur la recyclabilité massique et économique des pièces plastiques lors du changement de matériaux du coffret du téléviseur.	174
Table 3.13. Variations subies par les indicateurs de recyclabilité massique et économique lors du changement de matériau des châssis-holders.	175
Table 3.14. Résumé des illustrations et des enseignements lors de l'application de la méthode à des études de cas.	181

Chapitre 4

Table 4.1. Sources possibles des informations de chacun des niveaux du modèle produit.	189
--	-----

GLOSSAIRE ET ABREVIATIONS

Les termes utilisés dans ce mémoire et notés par « □ » sont définis dans cette section.

Acteur de valorisation

Entreprise participant à la valorisation d'un produit en fin de vie y compris la collecte, le transport, le tri, le traitement, le recyclage, la valorisation et l'élimination des déchets. Il met en œuvre des procédés qui transforment les éléments extraits d'un produit en fin de vie.

Analyse de Cycle de Vie (ACV)

Méthode d'évaluation environnementale visant à établir de façon quantitative les impacts environnementaux d'un produit sur l'ensemble de son cycle de vie.

CAO

Conception assistée par ordinateur.

Coefficient de substitution (KS)

Rapport entre la masse de matériau vierge et la masse de matériau recyclé nécessaires à la réalisation d'une même pièce.

Contribution d'un procédé à la recyclabilité de produit

Impact du procédé sur la recyclabilité multicritères du produit. Cet impact est soit positif (il améliore la recyclabilité), soit négatif (il diminue la recyclabilité).

Composition massique en substances

Composition d'un élément, d'un matériau en molécules et substances constitutives.

Condition d'entrée

Spécifications que doit respecter un entrant principal afin d'être traité par une opération unitaire, un procédé ou un scénario de valorisation.

Contenu environnemental

Impacts environnementaux associés à la production d'une unité de composant, d'une unité de masse d'un matériau, ou d'une unité énergétique d'un type d'énergie.

CpD

Conception pour le désassemblage.

CpDV

Conception pour le désassemblage en vue de la valorisation.

CpND

Conception pour le non désassemblage.

CpSV

Conception pour le système de valorisation.

Cycle technologique

Temps pendant lequel le produit est à la pointe de la technologie (ROSE 2000).

Déchet ultime

Déchet qui « n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux » (JO 1992).

DEEuE

Directive Européenne concernant l'éco-conception des équipements.

Démontabilité

Aptitude d'un produit à être démonté.

DEPEEFV

Directive Européenne sur les Produits Electriques et Electroniques en Fin de Vie.

Dépollution

Extraction d'un élément dit « polluant » d'un produit.

DEVHU

Directive européenne sur les Véhicules hors d'usage.

Durée de vie technique du produit

Temps pendant lequel le produit remplit ses fonctions initiales (ROSE 2000).

Eco-conception orientée valorisation (ECOV)

Démarche visant à intégrer la valorisation en fin de vie dès la conception d'un produit.

Élément à caractère dangereux

Un élément présente un caractère dangereux s'il ne peut pas être manipulé sans risque par un opérateur ; la dangerosité est en particulier régie par les listes de substances dangereuses.

Élément dit « polluant »

Élément qui, en vertu de l'article 5 de la directive DEPEEFV (UE 2000b), doit subir un traitement sélectif. Sont en particulier visés « les condensateurs contenant des PCB, les composants contenant du mercure, les piles, les cartes de circuits imprimés, les matières synthétiques contenant des retardateurs de flamme bromés, les tubes cathodiques, les écrans à cristaux liquides d'une surface supérieure à 100 cm² ».

Entrant principal

Élément extrait d'un produit en fin de vie et traité par une opération unitaire, un procédé, ou un scénario de valorisation.

Entrant secondaire

Élément consommé par une opération unitaire, un procédé, ou un scénario de valorisation au cours de la valorisation d'un produit en fin de vie.

Étape de valorisation

Segment d'un scénario de valorisation pouvant être réalisé par plusieurs procédés alternatifs.

Fixation

Lien réel entre deux pièces ou deux ensembles d'un produit : une fixation est en particulier définie par le type de liaison et le nombre de fixations.

Inadéquation (d'un produit avec un procédé, ou avec un scénario) ou **Point faible de conception** ou **Caractéristique problématique d'un produit**

Caractéristique d'un produit qui conduit à une contribution négative du procédé sur la recyclabilité du produit.

Indicateur Massique de Recyclabilité (IMR)

C'est le pourcentage massique du produit qui est valorisé ; l'indicateur est exprimé en pourcentage massique (%).

Indicateur Economique de Recyclabilité (IER)

C'est le coût (éventuellement le bénéfice économique) de la valorisation du produit ; l'indicateur est exprimé en € par produit, ou encore en € par unité de masse de produit ; par convention, l'IER est positif s'il représente un coût pour le dernier détenteur et négatif s'il représente un bénéfice économique.

Indicateur d'Impact Environnemental de Recyclabilité (IIER)

C'est l'impact (éventuellement le bénéfice) environnemental induit par la valorisation du produit ; l'indicateur est exprimé dans les unités relatives aux classes d'impacts environnementaux ; par convention, l'IIER est positif s'il représente un impact environnemental et est négatif s'il représente un bénéfice environnemental.

Liaison

Type de contact permanent entre deux éléments ; une liaison peut être de type vissage, clipsage ou encore collage.

MPS

Matières premières secondaires.

Opération unitaire de valorisation

Opération menant à la transformation d'un produit en fin de vie ou de l'un de ses composants.

Procédé de valorisation

Association d'opérations unitaires menant à la transformation d'un produit en fin de vie ou de l'un de ses composants.

Produit complexe

Un produit est dit « complexe » lorsqu'il est composé de plusieurs ensemble et sous-ensemble et de plusieurs matériaux. Les produits électriques et électroniques et les véhicules sont des produits complexes.

Produit électrique ou électronique (PEE)

« Equipements fonctionnant grâce à des courants électriques ou à des champs électromagnétiques, et les équipements de production, de transport et de mesure de ces courants et champs [...] conçus pour être utilisés à une tension ne dépassant pas 1000 Volts en courant alternatif et 1500 Volts en courant continu » (UE 2000b).

PEEFV

Produit électrique ou électronique en fin de vie.

Recyclabilité

Aptitude d'un produit à être valorisé en fin de vie.

Sortant principal

Élément extrait d'un produit en fin de vie et généré par une opération unitaire, un procédé,

ou un scénario de valorisation.

Sortant secondaire

Élément rejeté par une opération unitaire, un procédé, ou un scénario de valorisation au cours de la valorisation d'un produit en fin de vie.

Scénario de valorisation

Association structurée de procédés menant à la valorisation d'un produit en fin de vie.

Système de valorisation

Ensemble des scénarii de valorisation applicables à un produit en fin de vie.

Taux d'acceptation d'un matériau sur le marché ($K_{\text{marché}}$)

Fraction d'un matériau recyclé absorbable par le marché au moment de sa vente

Taux de libération

Part massique d'un matériau libéré au cours d'un broyage, c'est-à-dire constitué de particules libres.

Taux de purification

Le taux de purification d'un matériau i dans un sortant j est le taux d'accroissement de la pureté de i lors de son passage de l'entrant vers le sortant j .

Taux de récupération

Le taux de récupération d'un matériau i dans un sortant j est défini par la fraction de matériau i de l'entrant récupéré dans le sortant j .

Véhicule Hors d'Usage (VHU)

Produit rentrant dans le cadre du projet de directive DEVHU (UE 2000a) devant être collecté et subir des traitements de valorisation appropriés.

REMERCIEMENTS

Les recherches exposées dans ce mémoire ont été menées à l'Institut « Conception, Mécanique et Environnement » de l'ENSAM de Chambéry. Elles ont été réalisées avec le soutien financier de la Région Rhône-Alpes et de l'Ademe.

Je tiens à remercier tout particulièrement :

Monsieur Daniel Froelich, Professeur et Directeur délégué de l'Institut, pour m'avoir confié ce sujet de recherche et en avoir assuré la direction, pour sa confiance constante et pour ses encouragements tout au long de ces trois années,

Monsieur Pierre Moszkowicz, Professeur et Directeur du LAEPSI à l'INSA de Lyon, pour avoir assuré la direction de ces travaux, pour ses remarques toujours pertinentes et pour son soutien dans les moments difficiles,

Messieurs Gérard Cognet, Professeur à l'INPG de Grenoble, et Matthew Simon, Professeur à la SHU de Sheffield (Royaume-Uni) pour avoir accepté d'évaluer ces recherches en tant que rapporteurs,

Messieurs Youcef Bouzidi, Enseignant - Chercheur à l'UTT de Troyes, et Jean-Paul Hautier, Professeur à l'ENSAM de Lille, pour avoir accepté d'être examinateurs de ces travaux,

Monsieur Patrick Dubots, Ingénieur et responsable « environnement produit » dans la société Alcatel, pour avoir accepté de participer au jury en tant que membre invité et pour avoir orienté les recherches avec sa vision industrielle,

Messieurs Alain Clément et Michel Lauraire, Ingénieurs et responsables « environnement produit » dans les sociétés Thomson et Schneider Electric, pour avoir alimenté et orienté mes recherches et pour avoir répondu à mes nombreuses questions,

Madame Gwenola Bertolucci et Messieurs Alain Cornier, Nizar Haoues et Stéphane Lepochat, membres de la jeune équipe de recherche de l'Institut, pour avoir largement commenté le présent manuscrit et avoir ainsi contribué à lui donner sa forme finale,

L'ensemble des acteurs de la valorisation de produits en fin de vie rencontrés et interviewés lors des enquêtes sur le terrain ; je tiens à remercier tout particulièrement Madame Thérèse Garreau et Monsieur Laurent Magnin de la société Valdelec, Monsieur

Takateru Imai de la société Technopolymer (Japon) et Monsieur Ronald Kobler de la société RPI (Etats-Unis), pour avoir livré les informations sur leurs activités qui ont permis de mener à bien les validations du modèle,

Les collègues rencontrés dans le cadre du projet européen Ecolife, notamment Evolène, Isabelle, Martina, Andrew, Gerald, Gregor, Heiko, Marc, Martin, Siegfried et Steve, pour avoir contribué à rendre mes recherches plaisantes, même en déplacement, et pour m'avoir aidé à mieux comprendre le contexte environnementaliste européen,

L'équipe du Centre for Design at RMIT, Dominique Hess, Shauna Walsh, Michael Abdilla, Nick Alsop, Kell Dummett, John Gertsakis, Tim Grant et Nicola Morelli, pour l'accueil chaleureux pendant mon séjour à Melbourne et pour leurs critiques constructives sur ma recherche,

Sophie Ferrendier, pour avoir, grâce à son énergie et sa disponibilité, concrétisé le fameux guide Ecolife (et bienvenue à Florian !),

Les membres, enseignants et étudiants de l'Institut rencontrés au cours des ces années, en particulier Béatrice, Caroline, Elisabeth, Marianne, Mylène, Suzanne, Virginie, Andrew, Bertrand, Emmanuel, Florent, Henri, Jacques, Luc, Marc, René, Richard, et bien d'autres encore, pour leur précieuse aide, leurs conseils et leur gentillesse (et bienvenue à Louis !),

Les « étrangers » de l'Institut, Adriana, Daniella, Luicilaine, Marilina, Nancy, Vanessa, Christian, Flavio mineiro, Flavio paulista, Leandro, Leonardo, Lucas mineiro, Luciano, Yunare, pour avoir traversé l'Atlantique et l'Equateur pour découvrir notre thématique et pour avoir contribué à « sud américanisé » l'Institut (et bienvenue à Lucas frances !),

Mes amis savoyards du Technolac, en particulier Anne-Gaëlle, Sandrine, Laurent, Mamadou, Patrice, Philippe, Thierry, qui ont fait en sorte que nous échangions sur d'autres sujets que le recyclage,

Mes camarades Camille, Corinne, Cédric, Christophe, Pascal et Yannick, pour contribuer à la construction perpétuelle de l'esprit d'Anthropie (et bienvenue à Yaëlle !),

Sabine Feroul, pour sa disponibilité, sa gentillesse et son soutien de tous les instants,

Toute ma famille, pour m'avoir toujours encouragé à prolonger mes études, et m'avoir transmis une envie de découvertes,

Patrycja, pour m'avoir soutenu pendant ces années, et pour partager les aventures sans cesse renouvelées qui s'offrent à nous désormais.

Alors, je ressens le bonheur de savoir que, des neuf mille espèces d'oiseaux qui vivent sur la planète, presque mille sont concentrées à Manú. Pourtant ce bonheur est bref, car aussitôt je me rappelle que dans la vieille et savante Europe, des trois mille espèces répertoriées au début du siècle, il n'en reste que cinq cents.

Luis Sepúlveda
Les Roses d'Attacama, 2000

Garantir et promouvoir l'éclosion de la complexité. Seule une société régie par des lois souples (...) peut assurer à la fois l'organisation de la vie et l'éclosion de la créativité.

Hubert Reeves
Malicorne - Réflexions d'un observateur de la nature, 1990

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

De la première réunion internationale sur l'état de la planète à Stockholm en 1972, jusqu'au sommet mondial sur le développement durable à Johannesburg en 2002, toutes les réunions internationales réunissant experts, politiques et représentants de la société civile ne cessent de rappeler le caractère particulièrement insoutenable¹ du mode actuel de développement humain. En 1987, la Commission Brundtland énonce le principe de la nécessaire mise en place au niveau mondial d'un mode de développement qui « *satisfait les besoins des générations actuelles sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs* » (BRUNTLAND 1987). Le glissement vers un développement plus soutenable vise à réaliser des compromis entre les exigences environnementales, sociales et économiques des communautés.

La nécessité et l'urgence de l'instauration d'un tel développement sont aujourd'hui reconnues quasi unanimement et les modalités de sa mise en œuvre dans toutes les régions du monde sont aujourd'hui en discussion. Les difficultés résident désormais dans l'identification et la mise en application de mesures qui contribuent efficacement à diminuer les menaces environnementales globales et les inégalités sociales et à améliorer les conditions de vie de la population tout en assurant le développement économique.

Développement durable et valorisation de produits en fin de vie

Les rôles de la valorisation / recyclage de produits et de matériaux dans l'instauration d'un développement plus soutenable sont nombreux et variés : le passage d'une société industrielle fortement dissipatrice en matières premières à une *recycling-based society* devrait par exemple favoriser la croissance économique d'un secteur fortement créateur d'emplois; il devrait aussi permettre de « découpler croissance économique et utilisation des ressources », comme prôné par l'Union Européenne, UE (UE 2001a) ; d'un point de vue stratégique, il pourrait même contribuer à atténuer la vulnérabilité des industries occidentales face aux risques de ruptures d'approvisionnement de certains matériaux sensibles.

Pressentant l'importance de l'activité, l'UE met en place depuis quelques années des législations concernant la fin de vie de produits ciblés : après l'adoption en 2000 de la Directive Européenne sur les *Véhicules Hors d'Usage*[□], ou *DEVHU*[□] (UE 2000a), l'UE discute aujourd'hui des modalités de mise en œuvre d'une proposition de Directive

¹ Les termes « durable » et « soutenable » (traduction du mot anglo-saxon « sustainable ») sont synonymes.

Européenne sur les *Produits Electriques et Electroniques en Fin de Vie*^[1], ou *DEPEEFV*^[1] (UE 2000b). La multiplication de telles mesures réglementaires, associée aux règles concernant la valorisation des déchets et à des approches orientées cycle de vie des produits, devraient constituer à l'avenir une stratégie intégrée permettant une utilisation soutenable des ressources naturelles.

Afin d'illustrer les positionnements multiples de la valorisation de produit en fin de vie dans la problématique du développement durable, les perceptions de la *recyclabilité*^[2] de produit sont présentées dans ce paragraphe pour quelques uns des acteurs concernés et pour plusieurs horizons temporels :

- Le *dernier utilisateur d'un produit* considère qu'un produit est valorisable si un système de collecte est à sa disposition et si sa valorisation n'induit pas de coûts supplémentaires. Puisque ce dernier utilisateur a été aussi acquéreur du produit, il est vraisemblable que sa perception de la recyclabilité du produit pourrait à l'avenir être liée à des aspects « marketing » du produit, tels que par exemple le respect de critères définis par les écolabels, ou encore la garantie d'une reprise gratuite du produit en fin de vie.
- Un *recycleur* considère un produit valorisable s'il peut être valorisé selon un mode de traitement adapté et bien dimensionné et s'il jouit d'une collecte séparée. Un produit apparaît d'autant plus recyclable que le recycleur peut en extraire un maximum de matières de valeur, donc un maximum de bénéfices économiques, et que la masse de matières destinée à l'élimination à la sortie de son entreprise est minimisée. Par ailleurs, un produit lui apparaît recyclable si sa valorisation ne pose pas de problèmes d'hygiène et de sécurité pour les employés.
- Pour un *producteur de produits*, les produits fabriqués sont avant tout valorisables s'ils respectent les taux de valorisation massiques imposés par la DEPEEFV ; ils sont d'autant plus valorisables que leur valorisation est économiquement intéressante. Pour un producteur, la recyclabilité de produit pourrait également à l'avenir devenir un aspect concurrentiel consistant à satisfaire les attentes du client. Enfin, en vertu du principe de responsabilité, le producteur est concerné par l'impact environnemental des cycles de vie de ses produits : il veille ainsi à ce que la valorisation du produit en fin de vie limite l'impact global du cycle de vie du produit, tel que précisé dans l'annexe 2 du projet de directive européenne concernant l'éco-conception des équipements, appelé dans la suite du document *DEEuE*^[1] (UE 2002).
- Pour un *producteur de matières premières*, la recyclabilité représente l'aptitude d'un produit à fournir des matières premières secondaires de bonne qualité et à un coût

² Aptitude d'un produit à être valorisé en fin de vie.

inférieur à celui des matériaux vierges. La quantité de matières recyclées contenues dans le produit peut aussi être importante pour lui, dans la mesure où elle contribue à renforcer le marché des matières recyclées.

- Pour une *collectivité publique*, la recyclabilité de produits est liée à la mise en place d'un système de collecte de produits en fin de vie adapté au gisement, et à l'acheminement de ces produits chez des recycleurs. Ces systèmes doivent atteindre des taux massiques de valorisation suffisants au moindre coût pour la collectivité. Une collectivité publique peut également être favorable à l'installation d'une unité de valorisation de produit sur son territoire afin de favoriser les créations d'emplois.
- Pour la *société*, en particulier pour le *législateur* qui la représente, des produits sont considérés suffisamment valorisables s'ils respectent les taux proposés dans les textes réglementaires. Plus généralement, la valorisation des produits en fin de vie constitue pour le législateur européen une priorité environnementale faisant partie d'une stratégie d'utilisation durable des ressources et de réduction des émissions polluantes (UE 2001a; UE 2001b). La valorisation des produits en fin de vie représente aussi une priorité économique et sociale, puisqu'elle devrait conduire à l'émergence et à la structuration d'une activité industrielle dynamique et créatrice d'emplois (UE 2000c).

Sur la Figure 1, nous tentons de synthétiser les perceptions multiples de la recyclabilité de produit pour les acteurs concernés et les différents horizons temporels envisagés.

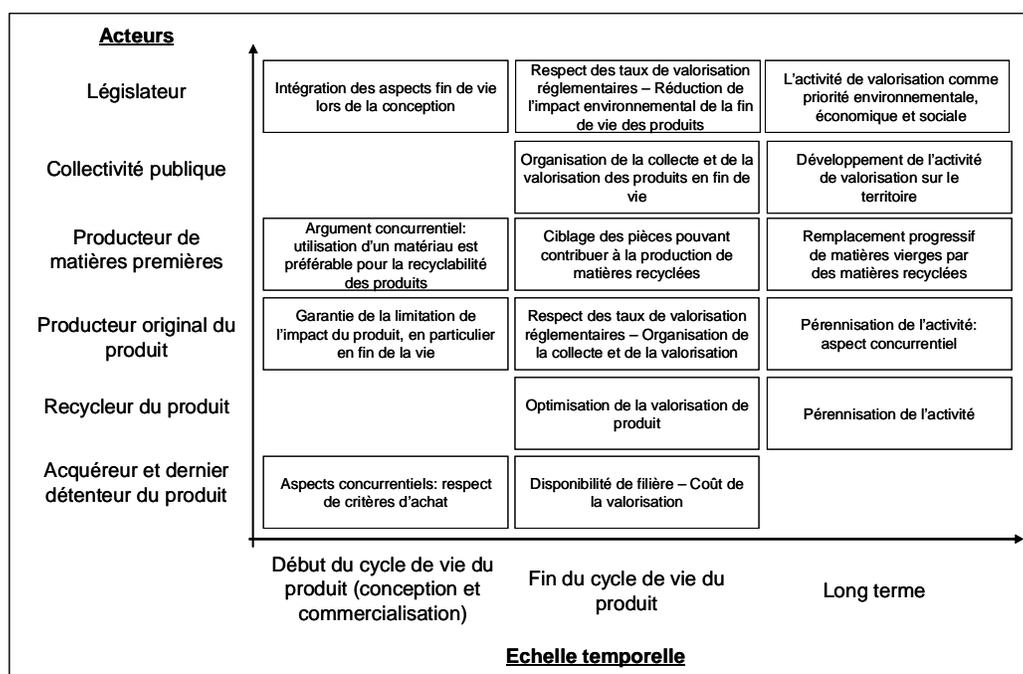


Figure 1. Les perceptions de la recyclabilité de produit pour quelques acteurs concernés et pour plusieurs horizons temporels.

Des mesures correctives aux mesures préventives

Du seul respect des lois dans les années 70, aux traitements curatifs des années 80, les pratiques industrielles de protection de l'environnement ont peu à peu évolué dans les années 90 vers la prévention de pollution (KHALIFA 1998). Cette approche, initialement appliquée aux procédés, est depuis peu étendue aux produits et vise la limitation de leurs impacts environnementaux sur leurs cycles de vie.

La prévention de pollution appliquée à la seule problématique de la valorisation des produits en fin de vie consiste à orienter la conception des produits afin que ceux-ci soient valorisés au mieux.

Problématique de recherche

Dès lors, il s'agit pour les producteurs de matériels de développer des méthodes et outils utilisables en cours de conception et leur permettant d'améliorer les performances des produits lorsque ceux-ci atteignent leurs fins de vie. Or, au contraire d'autres critères traditionnels de conception, tel que par exemple le coût, ils disposent de peu de visibilité sur l'aptitude d'un produit à être valorisé et sur les aspects de conception qui pourraient être améliorés. Les approches disponibles aujourd'hui sont de plus essentiellement axées sur le traitement par démontage, alors que la réalité de la valorisation des produits en fin de vie est plus complexe et est marquée par de grands bouleversements technologiques. Notre recherche s'inscrit dans cette problématique.

L'objectif de la recherche est formulé comme suit :

« La recherche vise à définir une méthode originale et efficiente permettant à une équipe de conception d'identifier les points faibles de recyclabilité d'un produit dès sa conception, en vue de l'amélioration de ses performances, et ce, dans un contexte de non maîtrise des filières de valorisation ».

Afin de répondre à cette problématique générale, notre recherche s'est en particulier attachée à répondre aux questions suivantes :

- « Comment définir la recyclabilité d'un produit et comment l'évaluer ? »,*
- « Comment évaluer la recyclabilité en prenant en compte autant que possible les performances actuelles et futures du système de valorisation de produit ? »,*
- « Quelle est l'influence du système de valorisation de produit sur cette recyclabilité ? »,*
- « Quelles caractéristiques d'un produit influencent sa recyclabilité ? »,*
- « Comment traduire les performances du système de valorisation à la compréhension des équipes de conception ? »,*
- « Selon quelles procédures une équipe de conception peut-elle améliorer l'aptitude d'un produit à la valorisation ? ».*

Contribution de la recherche

Notre recherche conduit à la construction d'une méthode globale permettant d'identifier les points faibles de la conception d'un produit vis-à-vis de son aptitude à être valorisé en fin de vie. Cette méthode s'appuie sur l'évaluation de la recyclabilité de produit à l'aide d'indicateurs multicritères, dont le mode de calcul est également développé au cours de nos travaux. A partir des résultats de la mise en œuvre de la méthode, une équipe de conception doit être en mesure d'orienter les voies d'amélioration de la conception du produit.

La méthode peut ainsi être utilisée en cours de processus de conception de produit, et peut être également combinée à des méthodes classiques de conception. La méthode est développée de telle façon que sa traduction en langage logiciel soit aisée.

Les applications de la méthode à des études de cas montrent l'intérêt de la méthode et permettent d'établir des règles concrètes d'amélioration de conception de produit. Ces applications étant largement alimentées de contacts et de données du terrain, elles permettent d'explorer le problème de la disponibilité des données.

Démarche adoptée

La démarche adoptée au cours de notre recherche est présentée sur la Figure 2 suivante. Elle a consisté en de nombreux allers et retours entre la construction de la proposition méthodologique et son application à des produits, rendant possible le développement d'une méthode qui répond aux préoccupations des entreprises.

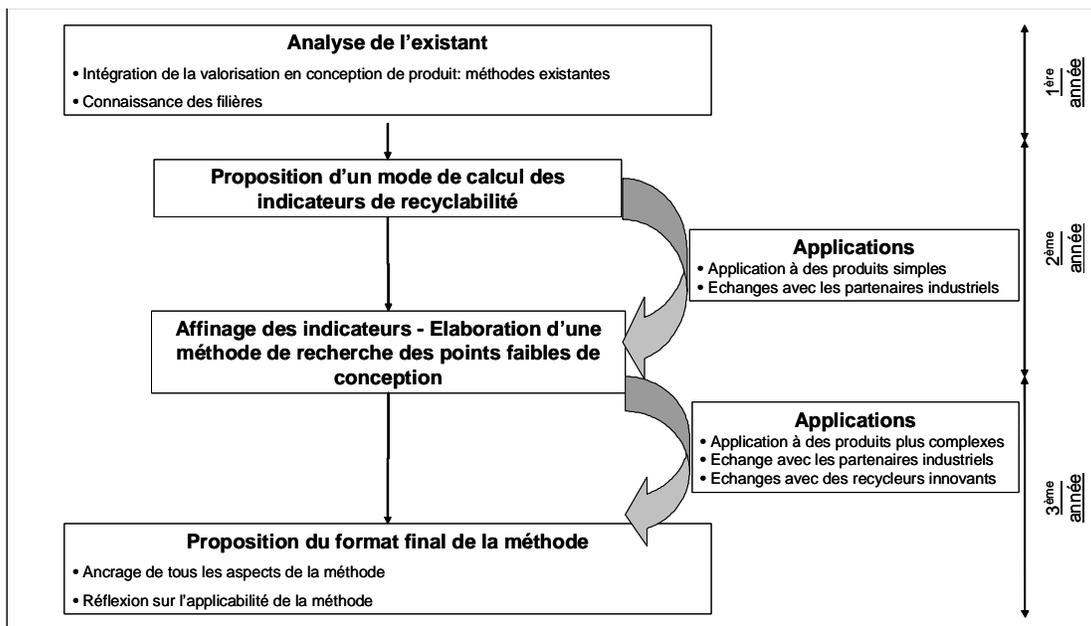


Figure 2. Démarche de recherche adoptée.

Limitations et domaines d'application de la recherche

Les produits considérés

La recherche présentée dans ce mémoire a été essentiellement développée pour être appliquée lors de la conception de produits électriques et électroniques. La fin de vie de ces produits est en effet l'objet d'une grande actualité législative et les activités de valorisation de ces produits connaissent un développement important. Face à cette nouvelle problématique, les entreprises du secteur construisent actuellement leurs stratégies et sont à la recherche d'approches innovantes : ceci nous a permis d'établir des collaborations fructueuses avec des industriels. Nos recherches ont également été alimentées par les travaux du réseau thématique européen Ecolife, auquel nous avons participé, qui a consisté en des échanges entre producteurs, recycleurs et centres de recherches européens sur la valorisation des PEEFV.

Les modèles composant la méthode ont ainsi été spécifiquement développés pour ces produits et pour les scénarii de valorisation qui devraient leur être appliqués. Néanmoins, chaque fois que cela s'est avéré nécessaire, la méthode a été alimentée d'expériences concernant d'autres produits, en particulier les véhicules hors d'usage.

Echelle géographique: l'Europe

L'Europe est aujourd'hui le continent moteur dans la valorisation des produits élect(ron)iques en fin de vie et dans sa prise en compte lors de la conception des produits (BOKS 1998a). La méthode a été ainsi adaptée spécialement aux préoccupations des producteurs de matériels européens. La méthode d'amélioration de conception proposée devrait cependant être applicable sur d'autres continents, pour peu que le contexte, notamment législatif, soit proche du contexte européen.

La stratégie de ré-utilisation non prise en compte

Bien que la réutilisation et la re-fabrication de composants et de produits devraient induire des gains environnementaux substantiels (KERR 2000) et pourraient à l'avenir graduellement remplacer le recyclage (AYRES 1997), ces stratégies sont peu abordées dans la construction de la méthodologie et dans son application à des études de cas: ce choix est en particulier lié à leur trop faible déploiement industriel qui ne permet pas encore leur modélisation. La méthode est cependant construite de telle façon que ces stratégies soient intégrables à l'avenir.

Structure du mémoire

Le mémoire retraçant nos recherches est composé de quatre chapitres.

Le premier chapitre réalise un état des lieux des développements récents et en cours des technologies de valorisation applicables aux PEEFV et des méthodes permettant d'intégrer

la valorisation en fin de vie dès la conception de produit. La complémentarité de ces deux approches est en particulier établie.

Le deuxième chapitre expose les développements méthodologiques réalisés : des indicateurs de recyclabilité sont ainsi définis et construits ; leur utilisation dans une démarche d'amélioration de conception de produit est alors présentée.

Le troisième chapitre consiste en l'application de la méthode à des études de cas concrets, en particulier à l'évaluation de la recyclabilité de cartes électroniques et à l'amélioration de la conception d'un téléviseur. Les hypothèses émises au Chapitre 2 sont discutées et justifiées. La richesse et l'intérêt de l'utilisation de la méthode en cours de conception de produit sont soulignés. Des voies concrètes d'amélioration de conception sont identifiées et l'applicabilité en conception de ces voies est discutée.

Le quatrième chapitre discute de l'intégration d'une telle méthode dans les pratiques industrielles réelles. Sont ainsi explorées les étapes à réaliser avant l'utilisation de la méthode en entreprise. Des recommandations en vue d'une utilisation optimale de la méthode sont énoncées et l'intégration de la méthode dans le processus de conception de produit est discutée.

L'organisation du mémoire est présentée dans le synoptique de la Figure 3.

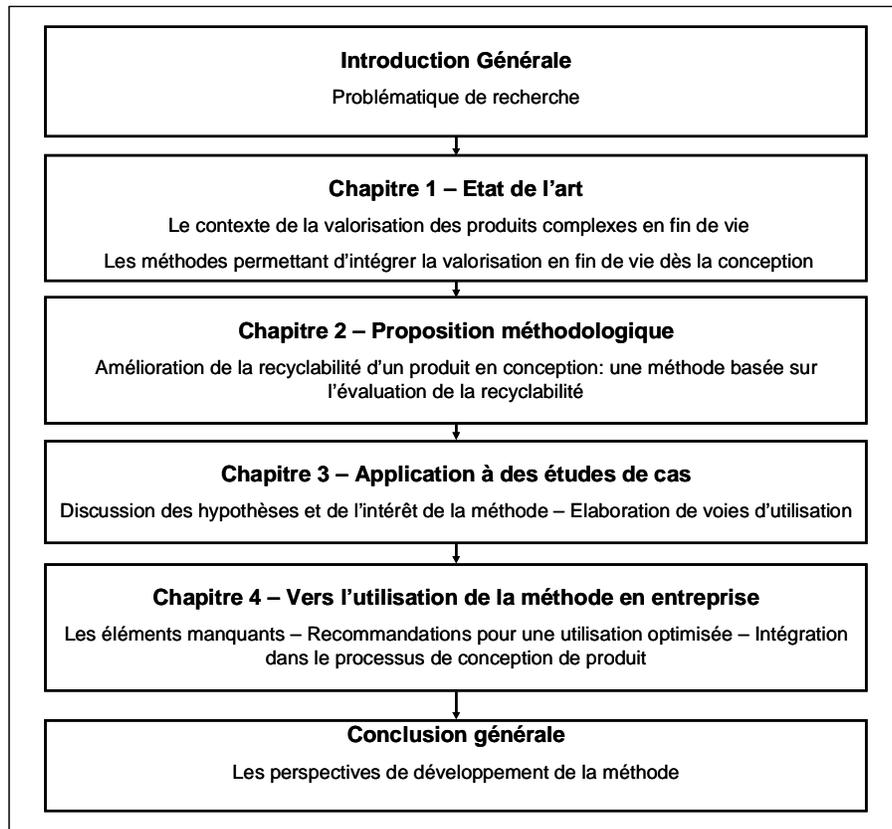


Figure 3. Représentation synoptique du mémoire de recherche.

CHAPITRE 1

**CONCEPTION DE PRODUITS ET VALORISATION EN FIN
DE VIE**

-

**RECENTS DEVELOPPEMENTS ET COMPLEMENTARITE
DES APPROCHES**

CHAPITRE 1

CONCEPTION DE PRODUITS ET VALORISATION EN FIN DE VIE

-

RECENTS DEVELOPPEMENTS ET COMPLEMENTARITE DES APPROCHES

Introduction – Vers l'adéquation produit / procédés de valorisation	39
Partie 1. Etat de l'art du système de valorisation des produits complexes en fin de vie et de sa modélisation	40
1.1. La valorisation : une activité ancienne en pleine mutation	40
1.2. Valorisation en fin de vie et innovations technologiques : état de l'art des développements applicables aux PEEFV	41
1.2.1. Collecte de produits en fin de vie ou logistique inverse	41
1.2.2. Démontage de produit et de pièces	41
1.2.3. Broyage de produit, de pièces, de mélanges de matériaux	42
1.2.4. Tri des matériaux	44
1.2.5. Remise à niveau et réutilisation de produit, de composants	46
1.2.6. Recyclage de matériaux	46
1.2.7. Le cas particulier de la valorisation énergétique des plastiques	47
1.2.8. Synthèse: vers une approche combinatoire et systémique des procédés de valorisation applicables aux PEEFV	48
1.3. Variabilité des scénarii de valorisation	48
1.3.1. Variabilité géographique des scénarii de valorisation de PEEFV	48
1.3.2. Variabilité temporelle des scénarii de valorisation	49
1.4. Conclusions concernant les sources de données des performances des filières	49
1.4.1. Données extraites de la littérature	50
1.4.2. Une collecte de données auprès d'acteurs de la valorisation	50
1.4.3. L'utilisation de modèles de procédés	50
1.5. Conclusions sur l'état de l'art du système de valorisation	50
Partie 2. Intégration des contraintes de la valorisation en fin de vie lors de la conception de produit	51
2.1. Objectifs de l'approche et terminologie	51
2.2. Classification de quelques méthodes d'ECOV selon les caractéristiques du système de valorisation considérées	52
2.2.1. Méthodes de conception pour le désassemblage (CpD)	52
2.2.2. Méthodes de conception pour le désassemblage en vue de la valorisation (CpDV)	54
2.2.3. Méthodes de conception pour le non désassemblage (CpND)	56
2.2.4. Méthodes de conception pour le système de valorisation (CpSV)	58
2.2.5. Conclusions concernant les caractéristiques du système de valorisation considérées dans les méthodes d'ECOV	61
2.3. Caractère incertain des filières de valorisation	62
2.3.1. Les sources d'incertitudes temporelles et géographiques	62
2.3.2. Prise en compte des incertitudes sur les filières dans quelques méthodes d'ECOV	64
2.4. Les critères de recyclabilité considérés dans les méthodes d'ECOV	65
2.4.1. Des critères massique et économique largement prioritaires	65

2.4.2.	Bénéfice environnemental de la valorisation : un critère primordial trop peu considéré	66
2.4.3.	Conclusion : vers une évaluation multicritère de la recyclabilité.....	67
2.5.	Intégration de la valorisation en fin de vie dans le processus de conception de produit	67
2.5.1.	Valorisation en fin de vie et processus de conception de produit	68
2.5.2.	Les bénéfices de l'utilisation des méthodes d'ECOV en conception.....	69
2.5.3.	La nécessité de développer des méthodes originales d'évaluation	70
2.5.4.	Importance des bases de règles en ECOV.....	71
2.5.5.	Vers une approche collaborative de l'intégration de la recyclabilité en conception	72
2.6.	Conclusions de l'analyse des méthodes d'ECOV	72
Conclusions : énoncé des lacunes méthodologiques et des opportunités de recherche		75

Introduction – Vers l'adéquation produit / procédés de valorisation

La prise de conscience récente de l'impact environnemental de la fin de vie des produits et « l'effervescence » législative se sont essentiellement traduits depuis quelques années par le développement technique et industriel de systèmes de collecte et de traitement. Pourtant, les textes législatifs concernant la fin de vie des produits, notamment automobiles (UE 2000a) et électri(que)s (UE 2000b) insistent également sur le fait que l'amélioration de la conception des produits constitue l'un des axes majeurs de solution du problème. D'un point de vue économique par exemple, Y. Pnuelli rappelle que seulement 10 à 20% des coûts de valorisation dépendent de l'optimisation des procédés de valorisation : le reste est déjà établi lors de l'étape de conception du produit (PNUELI 1997). Il apparaît donc nécessaire de combiner la mise en place de systèmes de valorisation performants et l'amélioration de la conception de produit.

C. Rose établit que la plupart des recherches orientées fin de vie de produit sont « *soit orientées vers l'amélioration de produit, soit vers l'amélioration des procédés de valorisation* » (ROSE 2000). C. Coppens rappelle cependant pour les produits automobiles que « *les actions curatives [, concernant les améliorations du système de valorisation,] ne sont optimisées que si elles sont complétées par des actions préventives* », c'est-à-dire par des améliorations du produit (COPPENS 1999). Comme affirmé par T. Gaucheron dans (GAUCHERON 2000), l'adéquation produit / procédé de valorisation constitue ainsi l'enjeu majeur de la conception intégrant la valorisation en fin de vie. Les objectifs d'une telle approche apparaissent, à ce titre, assez similaires aux objectifs d'approches plus traditionnelles en mécanique visant à assurer l'adéquation du couple produit / procédé, et regroupées dans le concept de « Design for X » : il s'agit, par exemple, de la conception pour la fabrication (BRISSAUD 1998) ou encore de la conception pour l'assemblage (AOUSSAT 1998), pour lesquels les procédés sont respectivement la fabrication et l'assemblage.

Ce chapitre vise à établir la complémentarité des approches produit et procédé dans la mise en place de systèmes optimaux de valorisation des produits en fin de vie. Dans la première partie, le contexte de la valorisation des produits en fin de vie est présenté : les développements récents ou en cours des technologies de traitement applicables aux PEEFV y sont ainsi exposés et les performances des procédés décrites ; afin de préparer les chapitres suivants, des modélisations des procédés, lorsqu'elles existent, sont citées. La deuxième partie réalise un état de l'art des méthodes permettant d'intégrer la valorisation en fin de vie lors de la conception de produit : les caractéristiques principales des méthodes sont établies et analysées. En conclusion, les vides méthodologiques recensés sont résumés.

La Figure 1.1 schématise le déroulement de ce chapitre.

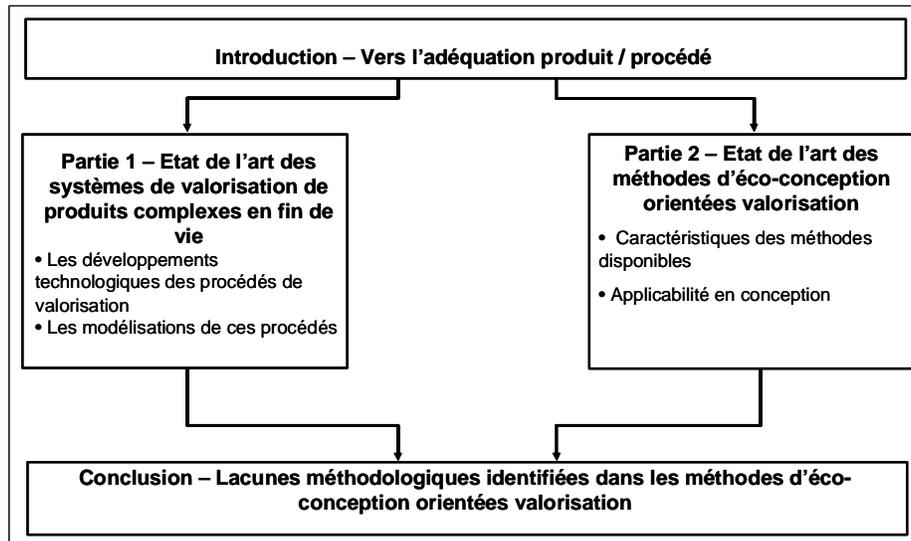


Figure 1.1. Représentation synoptique du Chapitre 1.

Partie 1. Etat de l'art du système de valorisation des produits complexes en fin de vie et de sa modélisation

1.1. La valorisation : une activité ancienne en pleine mutation

Comme proposé par le Forum Européen du Recyclage, l'industrie du recyclage de matériaux peut être divisée en deux secteurs (UE 2000c) : le *secteur traditionnel*, déjà largement implanté, et constitué des recycleurs de métaux, ferreux, non ferreux et précieux, et des recycleurs de verre et de papier ; le *secteur émergent*, qui regroupe notamment le recyclage du plastique, du bois, des pneus, des batteries portables, des huiles usagées et des déchets de construction et de démolition. Avec la mise en place progressive des législations concernant les déchets et avec les innovations technologiques, les performances techniques et économiques de ces deux secteurs devraient évoluer sensiblement dans les prochaines années en Europe.

La valorisation des *produits complexes*^[1] en fin de vie est elle aussi en pleine émergence : en raison d'une pression législative de plus en plus forte et de l'émergence d'un marché des matières recyclées, l'activité générale de la valorisation est marquée par une véritable effervescence technologique et industrielle. Peuvent en témoigner la croissance du nombre de conférences, dédiées exclusivement ou en partie aux développements technologiques dans ce domaine, telles que Identiplast, R'00 et R'02, International Electronics Recycling Congress ou encore International Automobile Recycling Congress.

1.2. Valorisation en fin de vie et innovations technologiques : état de l'art des développements applicables aux PEEFV

Les relations liant la structuration de systèmes de valorisations de produits et l'innovation technologique dans le domaine de la valorisation apparaissent *ambivalentes* (BUCHINGER 2000) : d'une part les technologies disponibles contribuent au développement de systèmes performants ; d'autre part, le développement de ces systèmes, exigé par la législation, encourage les innovations. Ces technologies peuvent être soit des développements originaux, soit des adaptations de technologies innovantes, soit même des adaptations et optimisations de technologies traditionnelles, comme par exemple celles développées dans le passé par l'industrie minière : L.M. Amaratunga rappelle à ce propos que de nombreuses technologies mises au point pour les mines pourraient contribuer au développement de systèmes efficaces de valorisation de produits et de matériaux (AMARATUNGA 2001).

Les paragraphes qui suivent dressent un état des lieux des développements actuels des technologies contribuant à la valorisation des produits complexes, notamment des PEEFV. Pour chacune des étapes de valorisation envisagée, un état de l'art des développements technologiques est établi ; dans le cas où une modélisation des procédés est disponible, cette dernière est également présentée. Dans cet état de l'art sont présentés en priorité les procédés connaissant des développements récents et servant l'application de la méthode à des études de cas dans le Chapitre 3.

1.2.1. Collecte de produits en fin de vie ou logistique inverse

La collecte des produits en fin de vie est une étape essentielle puisqu'elle alimente l'ensemble de la filière. L'application de la DEPEEFV dans les pays européens devrait provoquer le développement de cette collecte. Pour l'instant, comme le souligne J. Furuholm, il est encore difficile de prévoir à quoi ressembleront la collecte et le retour des produits (FURUHJELM 2000a) et des questions telles que « *la collecte sera-t-elle organisée par les municipalités ?* » ou « *y aura-t-il des collectes de produits spécifiques aux producteurs ?* » restent encore sans réponse. Certaines organisations ont néanmoins développé des modèles d'optimisation de la collecte des produits en fin de vie : il s'agit par exemple du modèle développé par l'Institut Fraunhofer de Dortmund (Allemagne) (NAGEL 1999a). Puisque la collecte des PEEFV est encore peu établie, et qu'elle devrait peu influencer les choix de conception des entreprises, cette étape n'est pas explorée davantage.

1.2.2. Démontage de produit et de pièces

Le démontage est une étape généralement préalable à la valorisation des produits en fin de vie : il vise la séparation des matériaux et l'extraction de certains éléments polluants.

Le démontage est, la plupart du temps, réalisé manuellement. L'outillage utilisé est généralement classique, mais certaines opérations peuvent requérir un outillage spécifique. Ces opérations nécessitent peu de qualification et, en France, elles sont aujourd'hui souvent réalisées par du personnel en insertion.

Des développements de cellules de démontage automatisé de produits sont également en cours en Europe, incluant par exemple les travaux de recherche de D. Chevron (CHEVRON 1999) et de G. Eckerth (ECKERTH 2001). Les cellules de démontage automatisé de composants spécifiques, tels que les composants de cartes électroniques font également l'objet de recherches et de développements industriels (KNOTH 2000; KOPACEK 1999). Ces travaux n'offrent généralement que peu de flexibilité sur la nature et la géométrie des produits à démonter, ce qui explique leurs faibles déploiements industriels.

Précisons enfin que des recherches concernant le désassemblage actif de produits, qui repose sur l'utilisation de matériaux à mémoire de forme, sont en cours à la Brunel University (Royaume-Uni) (CHIODO 1998; CHIODO 1999). Ces travaux sont encore trop récents et les coûts induits trop importants pour pressentir l'importance que pourrait occuper un tel démontage dans les filières de valorisation avenir.

1.2.3. Broyage de produit, de pièces, de mélanges de matériaux

L'activité de broyage est une activité industrielle largement empirique. Elle vise à casser les liaisons entre les pièces, à libérer les matériaux et enfin à réduire la taille des produits, pièces et particules. Le broyage est réalisé par des broyeurs à marteaux ou à couteaux ou par des broyeurs cryogéniques.

Récemment, avec l'émergence de la problématique de la valorisation des produits en fin de vie, des recherches visant l'optimisation de l'activité ont été menées. Quelques uns des travaux récents dans ce domaine sont répertoriés dans la Table 1.1 : les principaux produits en fin de vie visés sont les VHU et les PEEFV ; les performances étudiées du broyage sont en général la distribution granulométrique et la forme des particules; l'influence des paramètres de fonctionnement du broyage et de propriétés des éléments broyés sur ces performances est généralement étudiée.

Table 1.1. Récapitulatif de quelques recherches récentes dans le domaine du broyage de produit.

Intitulé	Broyage de produits métalliques	Broyage de produits électroniques	Broyage de cartes électroniques	Broyage de pièces en matériaux plastiques	Broyage de véhicules hors d'usage
Éléments broyés	<ul style="list-style-type: none"> • Boîtes boissons • VHU 	<ul style="list-style-type: none"> • Ordinateurs • Cartes électroniques 	Cartes électroniques	Pièces en matériaux plastiques	VHU
Performances étudiées	<ul style="list-style-type: none"> • Distribution granulométrique des particules • Distribution de forme des particules 	<ul style="list-style-type: none"> • Distribution granulométrique des particules • Distribution de forme des particules • Degré de libération des matériaux 	<ul style="list-style-type: none"> • Distribution granulométrique des particules • Distribution de forme des particules • Degré de libération des matériaux 	<ul style="list-style-type: none"> • Distribution granulométrique des particules • Distribution de forme des particules 	<ul style="list-style-type: none"> • Taux de destruction des liaisons démontables (vissage, boulonnage) • Taux de destruction des liaisons non démontables (soudure, rivetage)
Approche expérimentale	✓	✓	✓	✓	✓
Approche théorique (paramètres étudiés)	✓ (temps de broyage, vitesse de rotation)				
Références	(ABOUSSOUAN 1999a; ABOUSSOUAN 1999b)	(ZHANG 1997; ZHANG 1999a)	(KOYANAKA 1997)	(SHEN 2001)	(ALZIARI 2001)

Peu de modèles de broyage existent et aucun des modèles recensés ne permet de disposer d'une expression prédictive des effets du broyage sur un produit ou sur une pièce. Tant que cette situation perdurera, la modélisation du système devra utiliser des données empiriques recueillies sur le terrain ou établies par un expert.

1.2.4. Tri des matériaux

Le tri des matériaux est l'une des activités qui connaît le plus fort développement actuellement. Ceci est dû à la nécessité d'obtenir des matériaux suffisamment purs pour alimenter les procédés de recyclage et d'extraire des matériaux posant problème.

La Table 1.2 récapitule un certain nombre de travaux de recherche et de développement des technologies de tri de matériaux pouvant être appliquées aux mélanges de matériaux issus des PEEFV. Les tris bien connus, par exemple le tri magnétique, ne sont ici pas recensés.

D'un point de vue théorique, M. Sodhi et W. Knight proposent un modèle de séparation de matériaux, visant un ou plusieurs matériaux : pour des paramètres de fonctionnement donnés, le taux de récupération de matériaux peut être déterminé (KNIGHT 2000; SODHI 1999). Cette modélisation peut s'appliquer à tout type de tri et elle vise, pour une composition en matériaux donnée, à déterminer la séquence de procédés de séparation à mettre en œuvre pour limiter le coût.

A la suite des travaux expérimentaux menés à l'Université de Luleå (Suède) sur le tri par courants induits (ou de Foucault), une simulation logicielle de la séparation de particules métalliques et non métalliques a été développée : elle permet de lier taux de récupération des matériaux, caractéristiques des particules entrantes et paramètres de fonctionnement (ZHANG 1998; ZHANG 1999b; ZHANG 1999c).

J. Wei, du Georgia Institute of Technology (Etats-Unis), propose une modélisation du procédé de tri par flottation (WEI 2002): à partir du modèle développé par G. Dobby pour l'industrie minière (DOBBY 1986), cette modélisation permet de relier taux de récupération des matériaux et pureté des mélanges sortants à quelques caractéristiques des mélanges entrants et aux paramètres de fonctionnement du procédé.

Table 1.2. Récapitulatif de quelques recherches récentes dans le domaine du tri de matériaux, applicables à la problématique des PEEFV.

Intitulé	Tri par criblage	Tri manuel	Tri par densité	Tri par courant de Foucault	Tri électrostatique	Tri électrostatique (2)	Tri par flottation	Tri par flottation (2)	Tri par identification
Éléments séparés	Métaux issus du broyage de VHU (Cu/Fe)	Cuivre / métaux ferreux	Métaux de PEEFV (Cu / Al / Fe / Pb / Zn)	Métaux de PEEFV (Cu / Al / Fe / Pb / Zn) ; métaux / non métaux	ABS / HIPS	Cu / PVC	PS / ABS / PC / PVC / PET	PP / ABS / HIPS / PVC	Tout type de matériaux plastiques
Performance étudiée	<ul style="list-style-type: none"> • Taux de purification 	<ul style="list-style-type: none"> • Taux de récupération • Taux de purification 	<ul style="list-style-type: none"> • Taux de récupération • Taux de purification 	<ul style="list-style-type: none"> • Taux de récupération • Taux de purification 	<ul style="list-style-type: none"> • Taux de récupération • Taux de purification 	<ul style="list-style-type: none"> • Taux de récupération • Taux de purification 	<ul style="list-style-type: none"> • Taux de récupération • Taux de purification 	<ul style="list-style-type: none"> • Taux de récupération • Taux de purification 	<ul style="list-style-type: none"> • Taux de récupération • Taux de purification
Approche expérimentale	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
Approche théorique (paramètres étudiés)				✓ (matériaux, taille et forme des particules)		✓ (taille et forme des particules ; rotation d'électrode)		✓ (distribution granulométrique, paramètres fonctionnement)	
Référence	(ABOUSSOUAN 1999a ; ABOUSSOUAN 1999b)	(ABOUSSOUAN 1999a)	(ZHANG 1997)	(ZHANG 1998 ; ZHANG 1999b)	(AROLA 1999 ; BROWN 1999)	(IUGA 2001)	(FRAUNHOLZ 1997; SHEN 2001; SHEN 2002)	(WEI 2002)	(AROLA 1999)

1.2.5. Remise à niveau et réutilisation de produit, de composants

La réutilisation de composants est placée très en amont dans la hiérarchie des stratégies de traitement des produits en fin de vie. Certaines études montrent que cette stratégie semble effectivement performante environnementalement (MC LAREN 1999). Pourtant, le déploiement de cette activité, en particulier en liaison avec la mise au point de technologies automatisées de démontage, de test et de remise à niveau, est encore faible. Des expériences de re-fabrication de produits blancs sont pourtant recensées en Suède (SUNDIN 2001). Comme souligné en introduction, cette stratégie n'est pas explorée.

1.2.6. Recyclage de matériaux

Le recyclage des matériaux est l'aboutissement de la mise en œuvre des procédés de démontage, de broyage et de tri appliqués aux PEEFV. Les matériaux secondaires aujourd'hui produits lors de la valorisation des PEEFV sont les métaux, ferreux, non ferreux et précieux, le verre, issus notamment des tubes cathodiques, et dans une moindre mesure les plastiques.

Au cours de nos enquêtes sur le terrain, nous avons identifié deux tendances essentielles du recyclage des matériaux qui consistent :

- soit à adapter les procédés de production de matières vierges afin d'admettre des matières d'origines secondaires, et produire des matériaux dont des propriétés sont équivalentes à celles des matériaux d'origine vierge (cf. schématisation 1.2(a)),
- soit à développer des procédés spécifiques permettant la production de matériaux recyclés présentant des propriétés spécifiques, la plupart du temps destinés à des applications dégradées ; cette filière n'est cependant envisageable que s'il existe un marché de ces matières secondaires (cf. schématisation 1.2(b)).

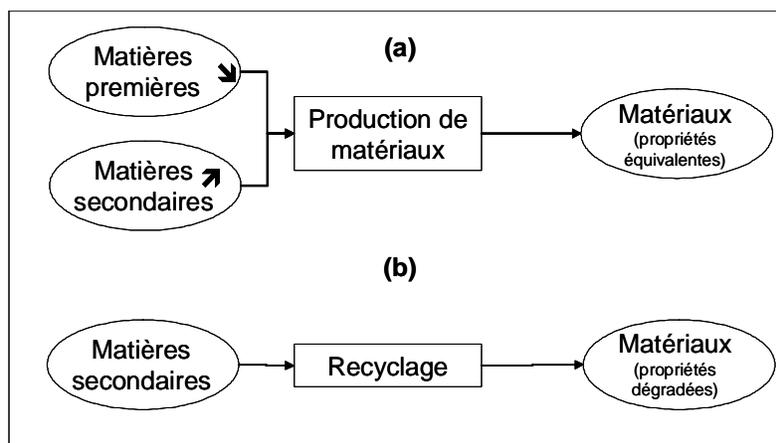


Figure 1.2. Schématisation des deux tendances actuelles du recyclage de matériaux.

La mise en œuvre du recyclage appartient aujourd'hui au savoir-faire des *acteurs de la valorisation*^[4] et nous n'avons identifié aucune modélisation générique liant par exemple la

pureté d'un mélange de matériaux entrants aux propriétés des matériaux générés. Des enquêtes auprès des acteurs permettent cependant d'établir les caractéristiques que doivent présenter les matières afin d'être admises en recyclage : par exemple, afin d'être admises en recyclage, des ferrailles issus de filières de valorisation doivent présenter des concentrations de cuivre, d'étain et autres stériles, inférieures à des valeurs limites (cf. Table 1.3) (USINOR 1995).

Table 1.3. Limites d'admission des ferrailles E40 en vue de leur recyclage (USINOR 1995).

Description	Densité	Stériles	Teneur en Cu	Teneur en Sn
Ferraille E40 broyées	≥0.9	≤0.4%	≤0.25	≤0.02

Il n'est aujourd'hui pas possible d'établir laquelle des deux tendances du recyclage devrait à l'avenir être la plus performante, d'un point de vue économique et environnemental, pour les différents matériaux. Le débat est en particulier d'actualité pour les matériaux plastiques mais aussi pour les verres extraits des tubes cathodiques : ces derniers pourraient soit être réintroduits dans la production de nouveaux tubes, soit être introduits dans des filières de production de matériaux moins techniques (cf. Table A.2 de l'Annexe 1).

1.2.7. Le cas particulier de la valorisation énergétique des plastiques

La valorisation énergétique des plastiques contribue à la diminution de volume des déchets résiduels, à la destruction de quelques substances et à la production d'énergie.

La valorisation énergétique des plastiques extraits des produits en fin de vie, notamment des VHU et des PEEFV, fait l'objet de nombreux développements industriels : elle peut être ainsi réalisée soit en co-combustion dans les fours d'incinération d'ordures ménagères (VEHLOW 1997), soit par combustion dans les fours de cimenterie (MARK 2001), soit par gazéification (YUKUMOTO 2001), soit par pyrolyse (RAMLOW 1999), soit dans les fours métallurgiques de production de métaux non ferreux (MARK 2000). Bien que ces études montrent que les rejets gazeux de ces procédés respectent les normes d'émissions gazeuses, la validité environnementale et économique de ces stratégies et leur acceptabilité par le public est aujourd'hui au centre des discussions.

Bien que des approches simples basées sur le pouvoir calorifique inférieur (PCI) des matériaux valorisés permettent de prévoir les quantités d'énergie produites (cf. Table A.7 de l'Annexe 6), aucun modèle global de transfert entre entrants et sortants de l'incinération n'est encore disponible. Les travaux récents de S. Hellweg permettent d'établir les premiers modèles de transferts de métaux lourds lors de l'incinération (HELLWEG 2001).

1.2.8. Synthèse: vers une approche combinatoire et systémique des procédés de valorisation applicables aux PEEFV

De nombreux procédés applicables aux PEEFV sont aujourd'hui disponibles ou en cours de développement et en diffusion industrielle. La Table A.1 de l'Annexe 1 répertorie les principaux procédés applicables aux PEEFV. La connaissance de ces procédés de valorisation est cependant largement empirique et peu de modèles prédictifs sont aujourd'hui disponibles.

Notre observation du terrain nous amène à penser que la structuration optimale des systèmes de valorisation des PEEFV devrait vraisemblablement passer par des combinaisons de procédés : *macroscopiquement*, les acteurs de la valorisation devraient coordonner leurs activités respectives afin d'améliorer la rentabilité du système et réduire la masse de déchets résiduels ; *microscopiquement*, les acteurs de la valorisation devraient à l'avenir mettre en œuvre des successions optimisées de procédés pour améliorer les performances de leur activité.

1.3. Variabilité des scénarii de valorisation

1.3.1. Variabilité géographique des scénarii de valorisation de PEEFV

La valorisation des PEEFV est aujourd'hui caractérisée au niveau européen par de grandes disparités, tant du point de vue des quantités traitées, que des modes de traitements et des technologies employés. G. Eckerth établit ainsi que les quantités de PEEFV actuellement collectées varient du simple au quadruple (de 1 à 4 kg par habitant et par an) entre les pays dits d'Europe du sud et certains pays dits d'Europe du Nord, tels que l'Allemagne, l'Autriche, le Royaume-Uni et la Suède (ECKERTH 2002). N. Nagel met en évidence les différences de stratégie de traitement des PEEFV dans trois pays européens où l'activité est très développée, l'Allemagne, les Pays-Bas et la Suède: la stratégie de broyage des produits associé à des procédés de tri en aval est préférée en Allemagne et aux Pays-Bas, tandis que la stratégie de démontage de produit et de tri manuels est représentative de la situation en Suède (NAGEL 1999b). Une étude commandée par l'entreprise Ericsson en 2000 montre ainsi qu'un produit présente des coûts de valorisation différents selon qu'il est valorisé par un recycleur européen, japonais ou nord-américain (FURUHJELM 2000b). L'étude menée par l'Institut ENSAM de Chambéry pour l'ADEME établit de façon similaire les disparités organisationnelles et technologiques de la valorisation des PEEFV dans plusieurs pays européens (ENSAM/ADEME 2002).

Ces disparités géographiques peuvent être expliquées par les facteurs suivants :

- La non homogénéité de la législation (NAGEL 1999b),

- Des niveaux variables de développement des systèmes de collecte des PEEFV (NAGEL 1999a; NAGEL 1999b),
- Des différences dans la nature et le nombre d'unités de traitement des PEEFV et des matériaux qui en sont extraits (EEA 2000),
- Un faible et inégal déploiement de procédés de valorisation innovants (ENSAM/ADEME 2002),
- Des différences de comportements des citoyens (WOLF 2000).

Dans le marché unique européen permettant la libre circulation des biens, il n'est pas rare qu'un produit conçu dans un pays, soit fabriqué/assemblé dans un autre et distribué dans plusieurs autres pays ; de plus, l'existence d'un marché des produits de seconde main explique le fait qu'un produit n'arrive pas toujours en fin de vie dans le pays où il a été distribué. Le continent européen semble donc être un périmètre géographique adapté pour l'étude de la conception et de la fin de vie d'un produit élect(ron)ique.

1.3.2. Variabilité temporelle des scénarii de valorisation

Dans le paragraphe précédent, l'existence de différences qualitatives dans les modes de traitement actuels des PEEFV est établie. Il est probable que cette variabilité sera plus marquée à l'avenir : les scénarii de valorisation qui devraient être disponibles à l'avenir, dans cinq, dix ou vingt ans, devraient être profondément différents d'un point de vue technologique de ce qu'ils sont aujourd'hui. Les innovations technologiques concernant la valorisation des PEEFV étant pressenties (BOKS 1997; BOKS 1998b) et observées (ENSAM/ADEME 2002) dans des pays où leur traitement est déjà très développé, notamment dans les pays d'Europe du Nord, il est vraisemblable que les disparités géographiques seront amplifiées à l'avenir.

Bien que la valorisation future des produits en fin de vie dépende largement des développements technologiques actuels, E. Buchinger rappelle qu'une « *innovation spécifique ne peut à elle seule contribuer à l'amélioration des performances du système de valorisation* », et que « *le processus de développement de compétences et de connaissances doit être considéré dans un cadre systémique* » (BUCHINGER 2000).

1.4. *Conclusions concernant les sources de données des performances des filières*

Avec le développement des systèmes de valorisation de produits, de plus en plus d'informations témoignant de leurs performances sont disponibles. Nous avons au cours de nos recherches identifié trois sources essentielles de données : les données extraites de la littérature, les données collectées sur le terrain auprès des acteurs de la valorisation et les

données établies à partir de modèles de procédés. Ces trois sources sont présentées et discutées dans ce paragraphe.

1.4.1. Données extraites de la littérature

Cette première source apparaît très peu abondante puisque peu de textes analysant les performances techniques, économiques et environnementales de procédés de démontage, de broyage, de séparation ou encore de recyclage applicables aux PEEFV sont aujourd'hui disponibles. Les données disponibles sont spécifiques à quelques cas de figures.

1.4.2. Une collecte de données auprès d'acteurs de la valorisation

La collecte de données auprès d'*acteurs de la valorisation*^[1] s'articule en général autour d'une visite de site et d'un renseignement de questionnaire ; elle est souvent longue et coûteuse.

Cette source permet de disposer d'informations plus complètes, notamment en ce qui concerne les performances techniques de procédés innovants ; ces informations restent cependant partielles, puisqu'elles portent sur quelques cas de figures rencontrés par l'acteur. Par ailleurs, la valorisation de produit est aujourd'hui un secteur très compétitif et les acteurs sont peu disposés à livrer des informations économiques sur leur activité. Enfin, les informations sur les performances environnementales des activités restent difficiles à obtenir puisque les acteurs n'en disposent pas toujours eux-mêmes.

1.4.3. L'utilisation de modèles de procédés

Une troisième source de données consiste à utiliser des modèles de procédés permettant d'évaluer les performances techniques, économiques ou encore environnementales des procédés selon différents paramètres de fonctionnement. Ces modèles peuvent consister en des fonctions, des tables ou encore des abaques et sont élaborés par les équipes qui étudient et développent les procédés. Comme souligné dans les paragraphes précédents, de tels modèles sont encore en cours d'élaboration pour la plupart des procédés.

1.5. *Conclusions sur l'état de l'art du système de valorisation*

Cet état de l'art a permis de présenter le contexte de la valorisation de produit en fin de vie, et d'identifier un certain nombre de procédés qui alimenteront notre réflexion par la suite.

Les performances du système de valorisation sont encore peu connues : il est ainsi nécessaire d'étudier les performances des filières et des procédés qui le constituent, performances restant encore largement empiriques.

Le système de valorisation de produits en fin de vie est en cours de structuration et il consiste de plus en plus en une combinaison de procédés et de filières permettant d'atteindre une valorisation optimale. Ce système est par ailleurs marqué par de grandes disparités géographiques et ses performances avenir sont difficilement prévisibles.

Partie 2. Intégration des contraintes de la valorisation en fin de vie lors de la conception de produit

2.1. Objectifs de l'approche et terminologie

En paraphrasant la définition de l'éco-conception de D. Navin-Chandra (NAVIN-CHANDRA 1993), l'intégration de la valorisation en fin de vie dès la conception d'un produit vise « *au développement de produits commercialement viables et compatibles avec leur valorisation en fin de vie* ». Plutôt que « conception pour le recyclage », ou CpR, il apparaît plus pertinent de nommer une telle approche « *éco-conception orientée valorisation* »[□] (ou ECOV), qui correspondrait pour les anglo-saxons à « Recovery Conscious Design ». Dans la suite du mémoire, le terme *éco-conception orientée valorisation*, ou ECOV, caractérisera toutes les approches visant l'intégration de la valorisation en cours de conception de produit.

L'ECOV vise à orienter la conception d'un produit afin que sa valorisation en fin de vie soit facilitée et favorable environnementalement. Alors que la valorisation des produits en fin de vie est discutée depuis plus de dix ans au niveau législatif, de nombreuses méthodes et outils d'ECOV sont aujourd'hui à la disposition des industriels. Bien entendu, les contextes de développements de ces méthodes sont très variés, et leurs objectifs et leurs performances varient grandement.

Cette partie consiste en une étude critique d'un certain nombre de ces approches. Nous avons choisi de mener cet examen en choisissant quatre axes d'analyse:

- les caractéristiques du système de valorisation considérées,
- l'aptitude à intégrer le caractère incertain des filières de valorisation,
- les critères de recyclabilité,
- l'aptitude à être utilisé au cours du processus de conception de produit.

Une schématisation des quatre axes d'analyse est présentée sur la Figure 1.3. La Table A.3 de l'Annexe 2 présente une grille d'analyse synthétique de toutes les méthodes recensées.

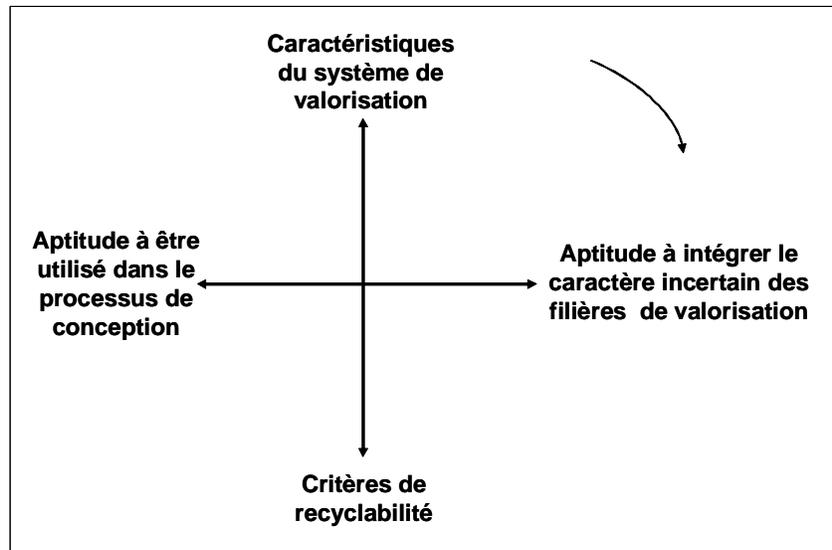


Figure 1.3. Les quatre axes d'analyse des méthodes d'ECOV.

2.2. Classification de quelques méthodes d'ECOV selon les caractéristiques du système de valorisation considérées

Puisque les méthodes d'ECOV visent à assurer une adéquation produit / procédés de valorisation, les produits sont conçus de telle façon qu'ils soient traités au mieux par ces procédés. Or, le système de valorisation considéré varie grandement selon les méthodes d'ECOV : selon les cas, il est assimilé au seul désassemblage, au désassemblage suivi de filières de valorisation, au broyage suivi de filières de valorisation, ou encore à des associations de procédés de démontage, de broyage, de tri, et de recyclage. Dans les paragraphes qui suivent, chacun des cas de figures est décrit et est illustré par des méthodes existantes.

2.2.1. Méthodes de conception pour le désassemblage (CpD)

Cette première catégorie rassemble les méthodes qui visent à optimiser l'aptitude du produit au démontage, c'est-à-dire sa *démontabilité*^[1]. Le système de valorisation est dans ce cas assimilé au seul procédé de démontage, comme schématisé dans la Figure 1.4.

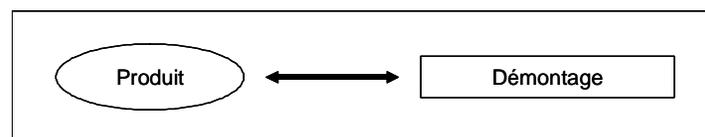


Figure 1.4. Adéquation du produit et du système de valorisation pour la CpD.

Les principes de la CpD sont explorés par G. Johansson : la CpD consiste essentiellement à faciliter l'identification des éléments à démonter, à améliorer leur accessibilité, à faciliter leur séparation, et à rendre plus commode leur manipulation

(JOHANSSON 1997). Dans ce cadre, la norme allemande **VDI 2243** établit qualitativement les aptitudes de certaines liaisons (par exemple adhésif, soudure, clipsage, vissage) à être démontées (VDI 1993). Selon M. Hundal, le désassemblage du produit ne doit pas être considéré comme l'inverse de l'assemblage et les méthodes de CpD doivent contribuer à la réduction du nombre et de la complexité des étapes de désassemblage (HUNDAL 2000). La plupart des logiciels d'ECOV conçus au début des années 90 visent un démontage facilité et plus rapide des produits : c'est par exemple le cas du logiciel **ReStar**, développé pour l'industrie automobile et élect(ron)ique, et qui, dès 1993, permet d'établir une gamme optimisée de démontage d'un produit (NAVIN-CHANDRA 1993). A chaque nœud de l'arbre de désassemblage, l'algorithme détermine si l'assemblage doit être démonté, broyé, vendu, ou éliminé ; le critère de choix est le coût de la valorisation. Cette optimisation nécessite de nombreuses données concernant les performances économiques des filières de valorisation en aval, dont la nature et la source ne sont pas explorées.

Les travaux menés dans ce domaine à l'Université de Manchester, notamment par M. Simon et T. Dowy, permettent de mettre en place une liste de règles de conception permettant un désassemblage facilité et plus rapide (DOWIE 1995; MMU 1997; SIMON 1996). Ces règles sont organisées dans la Table 1.4 ci-dessous, selon qu'elles concernent les matériaux utilisés, les liaisons entre pièces et sous-ensembles ou l'architecture du produit.

Table 1.4. Règles de CpD (d'après (DOWIE 1995; MMU 1997; SIMON 1996)).

Groupe	Règles
Matériau	Minimiser le nombre de matériaux différents
	Réaliser les parties inséparables dans le même matériau, ou dans des matériaux compatibles
	Marquer tous les plastiques pour permettre une identification aisée
	Eliminer les étiquettes incompatibles sur les parties plastiques
	Marquer clairement les éléments contenant des substances dangereuses ou polluantes et faciliter leur extraction
Fixation et connexions	Indiquer les instructions permettant un désassemblage non destructif
	Minimiser le nombre de fixations
	Minimiser le nombre de fixations de types différents
	Permettre le démontage facile des fixations
	Eviter l'utilisation d'adhésif, de colle ou de soudure
	Permettre le désassemblage par destruction rapide de la fixation
Architecture du produit	Permettre un désassemblage facile de deux parties de matériaux non compatibles
	Rendre la conception la plus modulaire possible
	Minimiser le nombre de sous-ensembles
	Faciliter l'accès aux fixations
	Placer les parties non recyclables ou polluantes de telle sorte qu'elles puissent être rapidement retirées

D'autres listes de règles de CpD ont été établies dans un esprit similaire et sont spécialisées pour les produits et composants élect(ron)iques (BERGENDAHL 1995; CLARK 1999; ICER 1997).

Bien que de telles règles soient souvent pertinentes et appréciées des concepteurs, il apparaît, comme le fait remarquer J. Furuholm, qu'elles sont directives et ne laissent pas la possibilité au concepteur de comprendre le contexte global du recyclage de produit (FURUHJELM 2000a). Ces règles réduisent considérablement le degré de liberté d'une équipe de conception et leur aspect qualitatif ne permet pas à l'équipe de les hiérarchiser, ou de prendre une décision lorsque des compromis doivent être réalisés.

Bilan des points faibles de la CpD

- Règles qualitatives et directives,
- Valorisation assimilée au démontage et enseignements de conception limités à l'assemblage et à l'architecture dans le produit,
- Faible compréhension du contexte général de la valorisation.

2.2.2. Méthodes de conception pour le désassemblage en vue de la valorisation (CpDV)

D'autres méthodes se proposent d'améliorer la conception de produit en considérant que le démontage n'est plus la *seule* étape de valorisation, mais la *première* : le démontage est ainsi un préalable aux filières en aval de re-fabrication, de réutilisation de composants ou encore de recyclage de matériaux. Il s'agit alors d'adapter la démontabilité du produit aux étapes de valorisation en aval, qui sont généralement considérées de façon agrégée, comme schématisé dans la Figure 1.5.

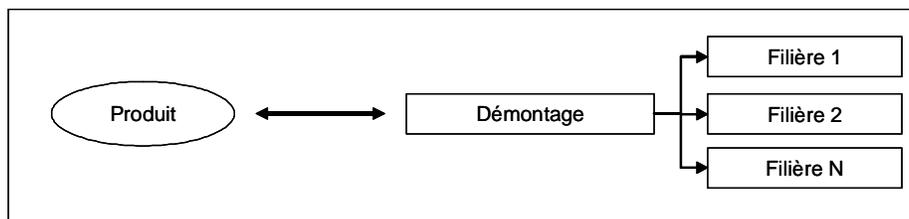


Figure 1.5. Adéquation du produit et du système de valorisation pour la CpDV.

La méthode élaborée par B.H. Lee et K. Ishii à partir du diagramme en arrête de poisson inversé est appelée **Recyclability Map** ; elle vise à minimiser pour un produit le nombre de destinations de valorisation différentes pour les pièces obtenues lors du démontage du produit (LEE 1998). L'amélioration de la conception du produit vise à diminuer le nombre de destinations différentes en diminuant, par exemple, le nombre de matériaux présents, en utilisant des matériaux dits compatibles ou en diminuant la profondeur de désassemblage.

L'intérêt de la méthode est limité puisque aucune hiérarchisation des destinations de valorisation n'est envisagée.

Dans une autre approche, K. Ishii propose une méthode d'évaluation du coût de la valorisation du produit (ISHII 1994). Les destinations de valorisation des composants et ensembles d'un produit étant définis par l'utilisateur, l'algorithme permet d'évaluer le coût de la valorisation, calculé comme la somme des coûts de collecte, des coûts de démontage et des coûts (ou bénéfiques) du traitement en aval des sous-ensembles. A partir des résultats, le concepteur est appelé à re-concevoir le produit, soit en remplaçant des pièces / ensembles et en leur allouant des destinations différentes, soit en redéfinissant l'architecture du produit. Une telle méthode repose sur une base de données devant fournir les valeurs économiques des éléments générés par le démontage.

La méthode développée par M. Sodhi et W. Knight, et concrétisée par le logiciel commercial **DfE**, est un outil de planification de démontage : les effets environnementaux et financiers des séquences de démontage applicables au produit sont évalués et la meilleure séquence est déterminée selon ces deux critères (KNIGHT 1999; SODHI 1998) (@ DFE 2002). Les effets financiers sont fonctions du coût de démontage et des bénéfices de revente des éléments générés ; les effets environnementaux sont liés aux *contenus environnementaux*[□] des éléments générés et valorisés en aval. Cette méthode permet l'analyse de produit déjà manufacturé, mais l'utilisation en conception est peu explorée.

E. Zussman jette les bases de sa méthode qui vise à identifier la séquence optimale de désassemblage d'un produit : il s'agit de définir comment, et dans quelle mesure, le produit doit être désassemblé (ZUSSMAN 1994). Pour ce faire, toutes les séquences de désassemblage faisables techniquement sont identifiées en utilisant la théorie des graphes ; chacune d'elle est ensuite évaluée selon le critère économique : à chaque nœud, l'option « désassemblage supplémentaire » est comparée à l'option « valorisation dans une filière en aval ». Pour cette méthode, les performances économiques du démontage mais aussi des filières en aval du démontage, comme la réutilisation, le tri, le recyclage et la mise en décharge, sont représentées par des fonctions considérées connues. Ces travaux sont complétés par la méthode **Re-design for Recycling**, établie dans (PNUELI 1997) : l'identification de la meilleure séquence de désassemblage d'un produit est réalisée par la maximisation de la fonction objectif « bénéfice économique ». Aux vues des résultats de l'évaluation, Y. Pnueli établit une méthode de détermination automatique de points faibles d'un produit applicable lors d'un processus d'optimisation de conception : cet algorithme permet d'identifier et de hiérarchiser les pièces / ensembles pertinents, notamment ceux présentant une valeur économique faible ou nécessitant un désassemblage coûteux. A partir de ces points faibles, des recommandations de conception sont identifiées parmi un certain

nombre de règles génériques disponibles. Une approche concurrente est développée par K. Penev et A. DeRon (DE RON 1995; PENEV 1996).

Plus récemment, S. Lee détermine de façon assez similaire une séquence optimale de désassemblage selon le critère économique, en considérant les coûts du démontage et les coûts (ou les bénéfices) du traitement en aval, et selon le critère environnemental, en considérant les impacts environnementaux des procédés de valorisation (LEE 2001). L'amélioration de la conception du produit repose alors sur la mise en œuvre de règles génériques de re-conception.

Le logiciel **Green Design Advisor (GDA)**, aujourd'hui utilisé dans l'industrie élect(ron)ique, adopte une démarche similaire en établissant, à partir de la séquence optimale de désassemblage, le temps de démontage et le coût (ou le bénéfice) de la valorisation des éléments générés par le démontage (FELDMANN 1999) (@ FERRENDIER 2002). Des points faibles de conception portant sur des composants et la structure du produit sont générés automatiquement. Les outils logiciel **ATROiD** (KANG 2001) (@ ATROID 2002) et **Demrop** (EBACH 1997) sont conçus sur des principes similaires.

Les recherches de S. Gerner contribuent à générer des séquences de désassemblage optimales d'un produit (GERNER 2000a; GERNER 2000b; GERNER 2001) : à partir de l'orientation des éléments du produit vers des destinations de valorisation, une séquence optimale de démontage par une cellule robotisée est déterminée selon les critères économique et écologique par une résolution du problème multi objectifs. Le critère économique se propose d'intégrer les coûts du processus de désassemblage et les coûts des étapes de valorisation en aval. Le critère écologique, calculé à l'aide d'une note unique, se propose d'intégrer les impacts environnementaux du désassemblage et les bénéfices environnementaux de la valorisation des composants extraits. Les enseignements d'éco-conception découlant de l'évaluation sont cependant peu explorés.

Bilan des points faibles de la CpDV

- Filières de valorisation en aval agrégées,
- Enseignements de conception limités à l'assemblage et à l'architecture dans le produit,
- Faible compréhension du contexte général de la valorisation.

2.2.3. Méthodes de conception pour le non désassemblage (CpND)

Par opposition aux méthodes de CpD, des travaux récents insistent sur la part grandissante qu'occupent les procédés de broyage associés à des procédés de tri comme alternatives au démontage manuel. De tels procédés amènent la mise en place de règles spécifiques qui visent à optimiser la conception du produit ou de ses sous-ensembles afin que ceux-ci soient plus facilement valorisés après broyage : une telle démarche est nommée

ici conception pour le non désassemblage (CpND), comme proposé par B. Ram (RAM 1998) et est schématisée dans la Figure 1.6.

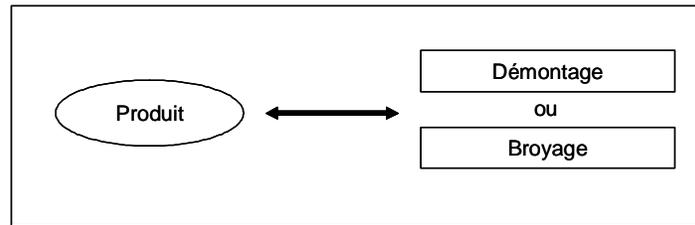


Figure 1.6. Adéquation du produit et du système de valorisation pour la CpND.

L'étude présentée par C. Boks dans (BOKS 1999) traite d'expériences de valorisation de produits électroniques menés en laboratoire : pour certains produits, un scénario de broyage du produit associé à des procédés de séparation de matériaux présente des performances techniques et économiques tout à fait intéressantes. Les leçons tirées pour la conception des produits en vue d'améliorer la valorisation selon le critère massique concernent uniquement la limitation des hétérogénéités de matériaux au sein d'un même produit ; de plus, elles restent qualitatives.

A la suite de leurs travaux sur la démontabilité de produit, W. Knight et M. Sodhi établissent que la viabilité économique d'un scénario de démontage de certains produits, notamment de petite taille, n'est pas garantie (KNIGHT 2000) : il est alors proposé que les produits subissent un broyage préalable, visant la libération des matériaux, avant de subir des chaînes de procédés de séparation.

Parmi les méthodes de CpND, sont recensées les approches visant à choisir pour un produit ou l'un de ses sous-ensembles des matériaux compatibles, c'est-à-dire pouvant être broyés et recyclés sans opération de démontage préalable. C'est par exemple l'approche proposée par l'AFNOR pour le choix des matériaux des pièces multi matériaux d'une automobile (AFNOR 1996). La compatibilité reste cependant qualitative et est seulement envisagée pour les mélanges binaires.

Rentrent également dans cette catégorie les approches orientant le choix des matériaux pour les pièces et les fonctions vers des matériaux séparables, comme proposé par l'AFNOR (AFNOR 1996) ou par M. Hundal (HUNDAL 2000) : une telle démarche amène, par exemple, l'entreprise Faurecia à préférer pour les équipements automobiles les matériaux polyoléfinés de densité inférieure à 1 puisque ceux-ci sont facilement séparables par séparation densimétrique post broyage (RENARD 2001). Malheureusement, la séparabilité est dans ces approches envisagée seulement de manière qualitative, elle ne concerne que les mélanges de deux matériaux et seule la séparation par tri gravimétrique est considérée.

Bilan des points faibles de la CpND

- Concept nouveau et encore peu exploré,

- Approches qualitative et simplistes.

2.2.4. Méthodes de conception pour le système de valorisation (CpSV)

La tendance récente des travaux de recherche en ECOV est de considérer le système de valorisation comme une combinaison de procédés de démontage, de broyage, de tri, de recyclage, comme schématisé dans la Figure 1.7. Une telle démarche est ici nommée conception pour le système de valorisation (CpSV),

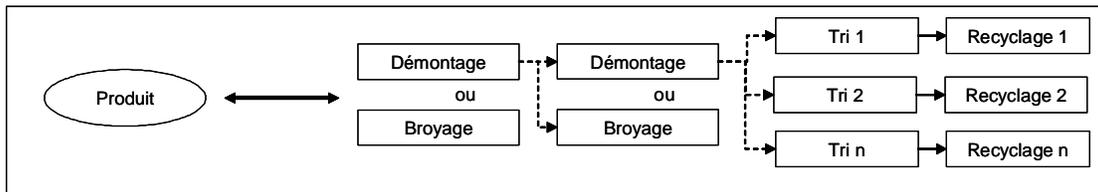


Figure 1.7. Adéquation du produit et du système de valorisation pour la CpSV.

Comme souligné par E. Cobra-Flores, le système nord-américain de valorisation des produits en fin de vie, en particulier automobiles, est dynamique et il est animé de nombreuses interactions, synergies et antagonismes entre acteurs (COBRA-FLORES 1998). Le même auteur montre que la recyclabilité des pièces et matériaux d'un VHU est fonction de ces interactions. Une telle description systémique est applicable à l'Europe, puisque, comme l'affirme H. Renard, les dix dernières années de recherches sur la valorisation des VHU montrent que la recyclabilité des pièces est fonction des propriétés du recyclât, du rendement massique des procédés, de la capacité et du bilan économique des filières, mais aussi de la compatibilité, de la séparabilité et de la démontabilité des éléments constitutifs (RENARD 2001). La méthode développée par C. Coppens au sein des équipes de conception de PSA s'inscrit dans ce cadre systémique : elle consiste à affecter une destination de fin de vie pour tous les composants d'un ensemble et à optimiser la conception pour que la valorisation soit maximale selon les critères massique et économique (COPPENS 1999; COPPENS 2001).

Dans les années 90, les constructeurs automobiles comprennent très vite l'importance de combiner démontage, broyage et tri pour la valorisation des produits. Ils définissent ainsi des méthodes permettant de calculer les taux de recyclabilité des pièces, des fonctions et des produits. Les méthodes **Chrysler**, **Volkswagen**, **AAMA**, **JAMA**, présentées et discutées par T. Gaucheron (GAUCHERON 2000) rentrent dans cette catégorie. Ces évaluations sont réalisées selon le critère massique et elles permettent aux équipes de conception de positionner les pièces et produits par rapport aux objectifs de conception et aux objectifs réglementaires. Des informations agrégées quant aux performances économiques des filières de valorisation sont également intégrées. L'outil **AVF** utilisé dans la méthode développée par C. Coppens et complétée par P. Tonnelier pour PSA présente des

caractéristiques proches (COPPENS 1999; COPPENS 2001; TONNELIER 2002). L'indicateur de recyclabilité destiné aux véhicules récemment proposé par l'ISO permet de considérer une combinaison de démontage de quelques pièces, de broyage du produit et de tri des matériaux non métalliques (AFNOR 2002).

Pour les PEEFV, J. Furuholm rappelle que toute démarche d'amélioration de produit orientée valorisation doit considérer un système de valorisation incluant la collecte des produits, le démontage, le broyage, le tri et le recyclage des matériaux (FURUHJELM 2000a). De la même façon, B. Wolf affirme que l'important pour un concepteur est de connaître l'exact mélange de procédés que devrait subir le produit au cours de sa valorisation (WOLF 2000). L'étude prospective proposée par C. Boks (BOKS 1997; BOKS 1998b) et la vision présentée par l'Institut d'Etudes Technologiques Prospectives (PAPAMELETIOU 1999) dessinent pour l'avenir des systèmes optimisés de traitement des PEEFV combinant démontage, réutilisation de composants, broyage, tri, recyclage et procédé pyrométallurgique. Le démontage apparaît désormais comme l'étape préparant le produit aux filières en aval.

L'outil logiciel développé par l'Université de Darmstadt (Allemagne) **SFB392** considère ainsi que le système de valorisation de produit associe démontage, broyage et tri : dans cette approche collaborative, un expert recyclage informe le concepteur à travers l'interface logicielle des exigences des filières de valorisation en aval quant à la composition en matériaux, la géométrie ou encore la masse du produit et de ses composants (ANDERL 1999) (@ SFB392 2002).

C. Rose adopte, au cours de ses recherches et du développement de son outil logiciel **ELDA**, une vision large de la valorisation en se posant la question des raisons de l'obsolescence de produit. Elle montre qu'à chaque produit correspond une stratégie optimale de valorisation, consistant soit à la re-fabrication, soit à la réutilisation de composants, soit au recyclage des matériaux après désassemblage ou après broyage (ROSE 1998; ROSE 1999; ROSE 2000). Les caractéristiques techniques du produit (*durée de vie technique*[□], *cycle technologique*[□], niveau d'intégration des composants, et nombre de pièces) et les caractéristiques du produit liées au management et au marketing de produit (raison de re-conception du produit et durée du cycle de conception) sont ainsi identifiées comme influençant ces stratégies. **ELDA** est cependant destiné à une utilisation très en amont dans le processus de conception et les recommandations de conception restent générales : à chaque stratégie de valorisation, correspondent des catégories de méthodes de conception spécifiques, comme la conception pour la maintenance, la conception modulaire, la conception pour le désassemblage, ou encore la sélection des matériaux.

Le logiciel d'aide au choix de matériaux environnementalement compatibles développé par l'Université Technique de Berlin (Allemagne) et nommé **euroMat'** contient un module fin

de vie (FLEISCHER 1998; FLEISCHER 2000) (@ EUROMAT 2002). Le choix de matériaux permettant une valorisation optimisée d'une pièce est réalisé selon la procédure suivante : pour chaque matériau répondant au cahier des charges fonctionnels de la pièce, les stratégies de valorisation possibles sont identifiées, parmi la réutilisation, le recyclage et la valorisation énergétique ; cette identification repose sur l'existence actuelle ou future d'un marché pour les sortants, l'existence de procédés permettant la mise en œuvre de la stratégie et sur un bilan environnemental favorable. Les performances des stratégies retenues sont alors évaluées en fonction de l'importance actuelle ou future du marché, de la disponibilité des procédés nécessaires, du nombre de procédés mis en œuvre, du bénéfice économique et de la qualité du matériau obtenu. Cette procédure est schématisée sur la Figure 1.8 suivante :

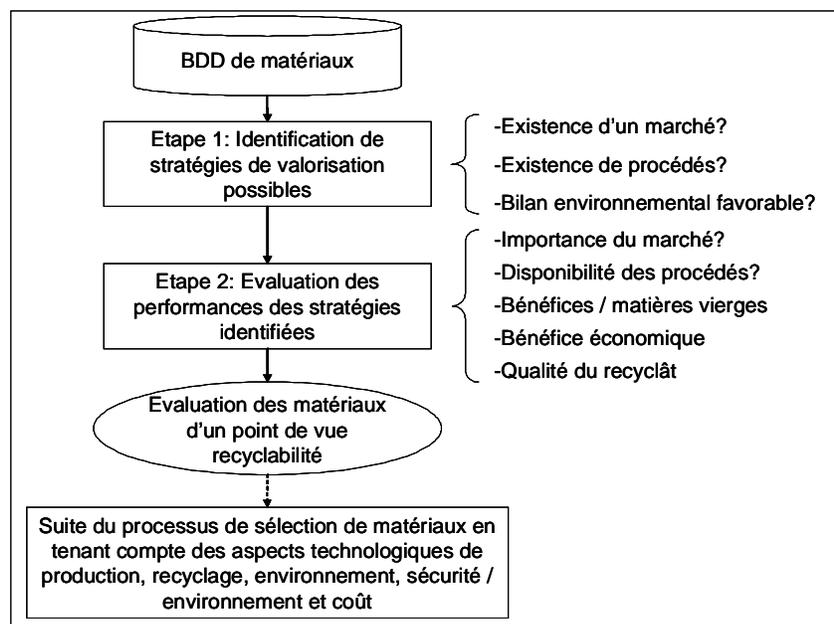


Figure 1.8. Schématisation du processus de sélection de matériau par le logiciel **euroMat**¹ (d'après (FLEISCHER 1998; FLEISCHER 2000)).

L'outil ne permet cependant pas de traiter la globalité de la problématique de recyclabilité puisque seul le choix des matériaux est concerné et la structure du produit est occultée. De plus, les données permettant d'identifier et d'évaluer les stratégies de valorisation possibles sont des données agrégées contenues dans la base de données ; elles sont établies par un expert, et semblent peu transparentes.

L'approche japonaise développée par S. Kanai et concrétisée par un outil logiciel prototype propose, à partir de la méthode des graphes, un système de modélisation de l'information pour représenter les transformations subies au cours de la valorisation par les composants, matériaux et liaisons d'un produit : les modèles classiques de désassemblage sont ainsi étendus pour intégrer les transformations des pièces par désassemblage

destructif, broyage et tri (KANAI 1999). L'algorithme permet alors d'établir une hiérarchie des séquences de désassemblage, broyage et tri applicables à un produit et permettant de maximiser le nombre d'éléments valorisés. La méthode nécessite des données importantes sur les performances techniques des procédés de valorisation et ces données ne sont disponibles que pour un nombre limité de procédés. De plus, les enseignements concernant la conception du produit ne sont pas explorés.

Dans cette même optique, M. Sodhi et W. Knight développent une méthode qui permet d'optimiser par programmation dynamique les séquences des procédés de séparation qui sont appliqués au produit après un broyage préalable (KNIGHT 2000; SODHI 1998; SODHI 1999) : l'établissement d'une séquence optimale de procédés de séparation magnétique, par courant de Foucault, ou encore par densité vise un gain économique maximum de la valorisation. Dans cette approche, seule la composition en matériaux du produit est considérée. La démarche est appelée « planification de valorisation ». Selon des publications récentes, un outil logiciel commercial, construit sur les bases de l'outil **DfE** et intégrant ces derniers développements devrait permettre prochainement à une équipe de conception d'avoir une meilleure perception de la recyclabilité de produit, selon les trois critères législatif, économique et environnemental (KALISVAART 2000; KORSE-NOORDHOEK 2001). Cet outil devrait intégrer un module d'amélioration de conception, concernant notamment le choix des matériaux et l'architecture du produit.

Les méthodes de type CpSV sont en fait une combinaison des méthodes de CpD, CpDV et CpND. Nous proposons ainsi d'inclure CpD, CpDV et CpND dans la CpSV, comme représenté sur la Figure 1.9.

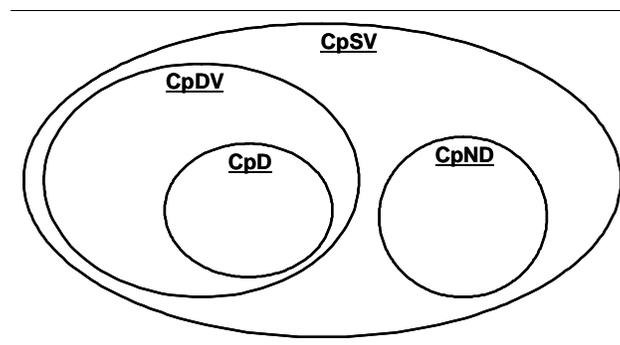


Figure 1.9. Règles d'appartenance des groupes de méthodes CpD, CpDV, CpND et CpSV.

2.2.5. Conclusions concernant les caractéristiques du système de valorisation considérées dans les méthodes d'ECOV

Les méthodes d'éco-conception orientées valorisation présentées et discutées jusqu'ici sont classées dans la Figure 1.10 selon les caractéristiques des systèmes de valorisation

considérées. Les méthodes sont identifiées soit par leur nom soit par la référence de la publication correspondante.

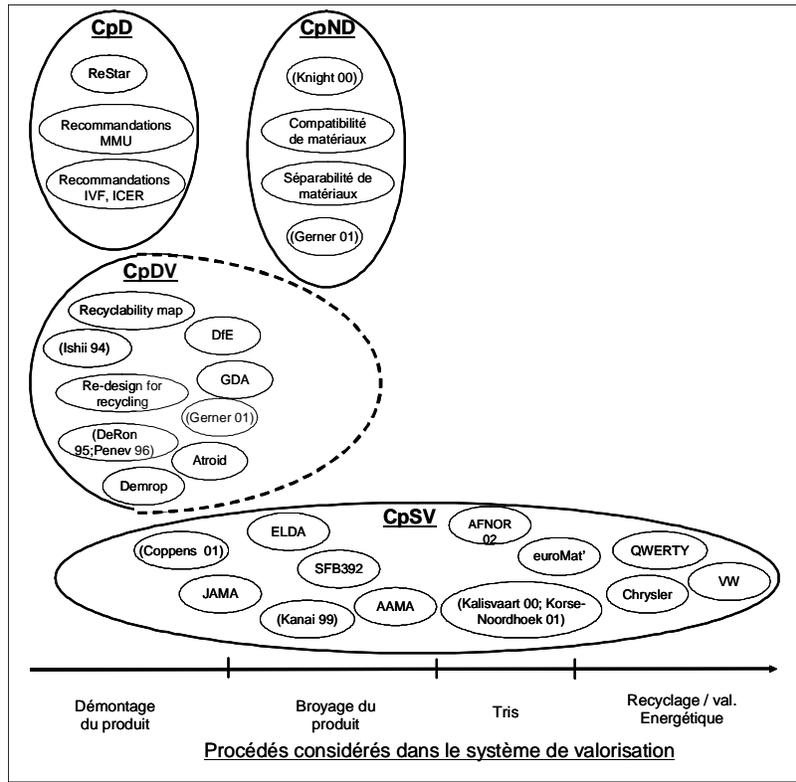


Figure 1.10. Positionnement de quelques méthodes d'éco-conception orientée valorisation selon les procédés de valorisation considérés.

C'est bien entendu vers le type CpSV que doivent être orientées les recherches d'éco-conception orientée valorisation, puisque l'approche systémique adoptée permet d'être fidèle à la réalité de la valorisation et de tirer des enseignements de conception selon toutes les caractéristiques du produit.

2.3. Caractère incertain des filières de valorisation

2.3.1. Les sources d'incertitudes temporelles et géographiques

Alors que les produits à durée de vie longue ne devraient être valorisés que 10 ou 20 ans après leur conception, B. Lee identifie trois principales sources d'incertitudes externes liées au temps séparant conception de produit et valorisation en fin de vie : la variabilité sur la date de traitement du produit, les développements technologiques des systèmes de valorisation et enfin les disparités entre systèmes de valorisation des pays (LEE 1998).

Pour le premier aspect, C. Rose rappelle que la date de traitement du produit est fonction à la fois de la durée de vie technique du produit et de son cycle technologique (ROSE 2000). En particulier, les produits des technologies de l'information présentent un cycle

technologique plus court que la durée de vie technique. Une étude nord-américaine portant sur la valorisation des ordinateurs fait par ailleurs apparaître l'importance de la période du stockage chez les particuliers à la fin de la vie utile des produits (MATTHEWS 1997) : cette période tend à retarder l'entrée des produits dans les systèmes de valorisation. Ces variations sont de nature à influencer les performances des filières de valorisation puisque des produits de générations différentes sont susceptibles d'être valorisés au même moment.

A propos des évolutions technologiques et des disparités entre pays, J. Furuholm note que même si un produit est conçu en vue du désassemblage, il n'est pas certain qu'il soit effectivement désassemblé : en effet, le scénario de valorisation appliqué au produit dépend des pratiques et des technologies disponibles au moment et au lieu du traitement du produit (FURUHJELM 2000a). Il est aujourd'hui difficile de prédire quelles technologies devraient être disponibles et appliquées aux PEEFV à différents horizons de temps : C. Boks et E. Tempelman estiment ainsi qu'à l'avenir les scénarii de démontage des PEEFV devraient être concurrencés par des scénarii où le broyage est associé à des tris automatiques, voire par des scénarii où les produits alimentent les fours de fonderie de métaux non ferreux (BOKS 1997; BOKS 1998b). J. Furuholm ajoute que la disponibilité des technologies de valorisation devrait être liée à l'importance du gisement de produits collectés et aux économies d'échelles des installations (FURUHJELM 2000a). A ce propos, l'étude menée par J. McLaren montre que les systèmes de valorisation, sont de natures dynamiques : leurs performances sont fonctions des innovations technologiques et de changements exogènes, tel que la législation concernant la fin de vie des produits ou encore la demande en matériaux recyclés (MC LAREN 2000). Puisque les acteurs de la valorisation développent les systèmes afin de s'adapter à la qualité et à la quantité du gisement, les produits arrivant en fin de vie dans les prochaines années devraient eux-mêmes influencer les évolutions de ces systèmes.

Les incertitudes temporelles et géographiques sur les performances des systèmes de valorisation apparaissent donc très importantes et il est largement reconnu que le concepteur d'un produit doit adopter une démarche prédictive concernant ces systèmes (FURUHJELM 2000a). De nombreuses méthodologies identifiées dans le paragraphe 2.2 rappellent l'importance de la prise en compte des évolutions techniques et économiques des filières de valorisation : il s'agit notamment des approches présentées dans (DE RON 1995; ISHII 1994; LEE 1998 ; PNUELI 1997; ZUSSMAN 1994). K. Ishii et T. Gaucheron précisent que l'intégration de la valorisation en cours de conception est d'autant plus difficile que les procédés de valorisation appliqués au produit ne seront connus avec précision, notamment par la mesure sur site, qu'une fois que le produit atteindra effectivement sa fin de vie

(GAUCHERON 2000; ISHII 1994). Aucune de ces méthodes ne propose cependant un mode opératoire de cette prise en compte.

La nécessité d'adaptation de la conception de produit aux évolutions des systèmes de valorisation est en accord avec les principaux textes législatifs (par exemple (UE 2000a) et (UE 2000b)) et avec les critères de quelques labels écologiques, tel que (BLUE ANGEL 1999) : ces textes précisent, sans établir comment, que les objectifs doivent être révisés régulièrement afin d'intégrer les progrès scientifiques et techniques.

2.3.2. Prise en compte des incertitudes sur les filières dans quelques méthodes d'ECOV

Comme l'affirme B. Lee, dans les méthodes classiques, notamment les approches prescriptives que sont les recommandations de CpD, les systèmes de valorisation sont considérés statiques, homogènes, contrôlés et bien connus (LEE 1998). Parmi les méthodologies d'ECOV recensées plus tôt, seules quelques unes proposent un mode d'intégration de ces incertitudes. Elles sont présentées ici.

Pour les incertitudes géographiques, nous n'avons identifié aucune méthode d'ECOV permettant d'intégrer les disparités entre pays.

En raison de leur durée de vie, les produits automobiles sont particulièrement touchés par les incertitudes temporelles. Parmi les indicateurs de recyclabilité développés par les constructeurs automobiles, les indicateurs **Chrysler** et **AAMA** intègrent des critères concernant les progrès technologiques attendus et la viabilité économique des filières. Ces informations apparaissent cependant subjectives, puisqu'elles sont essentiellement basées sur la perception de l'utilisateur (GAUCHERON 2000). L'indicateur de recyclabilité proposé par l'ISO permet seulement d'intégrer les technologies de tri et de recyclage dites reconnues, c'est-à-dire « testées avec succès, au moins à l'échelle de laboratoire » (AFNOR 2002). Là encore, le caractère « reconnu » des technologies et leur applicabilité aux matériaux des produits n'est pas entièrement définie et revêt un caractère subjectif.

Les incertitudes sur la recyclabilité de produit, notamment élect(ron)ique, est au cœur du travaux de recherche de C. Boks (BOKS 2001a; BOKS 2001b; BOKS 2002) : l'approche statistique développée permet ainsi d'établir l'influence d'un certain nombre de paramètres sur les performances futures du système de valorisation. Une approche de scénarii permet d'établir l'importance de ces facteurs pour plusieurs futurs possibles. Comme représentées sur la Figure 1.11, cinq sources principales d'incertitudes sont identifiées : la législation, les développements technologique et économique des procédés de valorisation, les évolutions du marché des matières premières et secondaires, et enfin la perception des problèmes

environnementaux par le public et les décideurs. Ces travaux permettent de hiérarchiser l'influence de ces facteurs sur la recyclabilité de produit.

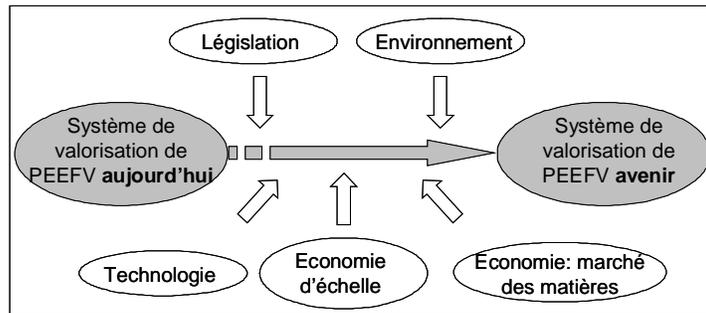


Figure 1.11. Facteurs influençant le devenir des systèmes de valorisation des PEEFV (d'après (BOKS 2001b; BOKS 2002)).

Dans des approches récentes, J. Huisman (HUISMAN 2001; HUISMAN 2002) et C. Herrmann (HERRMANN 2002) définissent des méthodes d'évaluation de la recyclabilité de produits : ils affirment en particulier être en mesure d'intégrer les variabilités temporelles des performances des technologies de valorisation dans les bases de données associées. De la même façon, la méthode **euroMat'** (FLEISCHER 1998; FLEISCHER 2000) et celle proposée par E. Zussman (ZUSSMAN 1994), se proposent d'intégrer partiellement les performances futures des systèmes de valorisation en livrant dans la base de données des tendances sur les cours économiques de matières premières. D'après (KALISVAART 2000; KORSE-NOORDHOEK 2001), un logiciel d'ECOV développé à partir du logiciel **DfE** et des travaux de C. Boks et devant être commercialisé prochainement, devrait également intégrer l'ensemble des ces variabilités temporelles. Aucune information concernant le mode de remplissage de ces bases de données n'est cependant disponible.

Bilan sur la prise en compte du caractère incertain des filières de valorisation dans les méthodes d'ECOV

- Aucune intégration des incertitudes géographiques,
- Aspects prospectifs limités à des données agrégées,
- Approches peu transparentes et subjectives.

2.4. Les critères de recyclabilité considérés dans les méthodes d'ECOV

2.4.1. Des critères massique et économique largement prioritaires

A Gungor et S. Gupta rappellent que les principaux moteurs du développement de l'activité de valorisation de produits sont les facteurs économiques et législatifs (GUNGOR 1999). Il apparaît donc logique que les critères législatif (part massique du produit valorisé) et économique (coût ou bénéfice de la valorisation) soient largement intégrés dans les

méthodes d'ECOV. Dans la Table A.3 de l'Annexe 2 qui résume les principales caractéristiques des méthodologies d'ECOV, la prédominance de ces deux critères apparaît clairement.

2.4.2. Bénéfice environnemental de la valorisation : un critère primordial trop peu considéré

Même si la plupart des législations nationales et européennes concernant la fin de vie des produits ne fixent que des objectifs massiques de collecte et de valorisation (par exemple (UE 2000a; UE 2000b)), il est utile de rappeler que ces textes ont pour objectifs premiers la réduction de la production de déchets, la conservation des ressources renouvelables et non renouvelables et le contrôle des substances toxiques (UE 2001a). Les impacts environnementaux sont donc implicitement intégrés aux législations sur les déchets. La plupart de ces textes contiennent d'ailleurs un article stipulant que s'il est montré que la solution en vigueur est environnementalement meilleure que le respect strict des taux de valorisation, alors l'application du texte peut être remis en cause : cette disposition apparaît clairement dans l'ordonnance allemande sur les emballages ménagers (DB 1991) ; elle est aussi intégrée aux textes européens DEVHU et DEPEEFV sous forme d'une révision régulière des taux réglementaires en fonction des développements technologiques et scientifiques.

W. Schmidt montre par exemple, à l'aide d'une *Analyse de Cycle de Vie (ACV)*^[1], que le recyclage d'enveloppes de batteries automobiles en plastiques n'est pas toujours meilleur d'un point de vue environnemental que leur incinération avec récupération d'énergie ou que leur mise en décharge (SCHMIDT 1999) : ceci est en particulier lié aux impacts de la logistique. J. McLaren montre que d'un point de vue environnemental, le taux massique optimal de valorisation de certains matériaux et produits est vraisemblablement inférieur à 100% (MC LAREN 1999; MC LAREN 2000) : les raisons évoquées sont l'impact de la logistique et des non linéarités entre paramètres du système de valorisation.

Lorsqu'il s'agit d'évaluer les performances environnementales d'un produit, la méthodologie d'*Analyse de Cycle de Vie (ACV)*^[1] est généralement envisagée. L'ACV présente cependant des intérêts limités en phase de conception de produit : de nombreuses études montrent que les études ACV sont trop longues et coûteuses pour être utilisées en conception (ISHII 1994) ; de plus les résultats de cette méthode sont généralement éloignés des problématiques des équipes de conception (DAHLSTRÖM 1999; JANIN 2000b). Enfin, le devenir des substances et matériaux dans les différentes filières de valorisation est encore peu intégré aux ACV (HELLWEG 2001).

Parmi les approches, méthodes et outils identifiés dans cette partie, un certain nombre intègre des critères environnementaux, comme établi dans la Table A.3 de l'Annexe 2. En

particulier, la méthode **Qwerty** de J. Huisman vise à établir la réelle signification environnementale de la valorisation des produits en fin de vie, et à la rapprocher des coûts (ou bénéfiques) économiques associés (HUISMAN 2001; HUISMAN 2002) : les critères environnementaux et économiques apparaissent prioritaires sur le critère législatif.

Par ailleurs, de très rares approches, notamment celle du logiciel **Demrop**, intègrent des critères concernant les problèmes d'hygiène et sécurité pour les opérateurs du démontage et visent à informer les recycleurs des mesures de précaution à prendre (EBACH 1997).

2.4.3. Conclusion : vers une évaluation multicritère de la recyclabilité

Comme établi dès le début des années 90 par D. Navin-Chandra, le problème de la valorisation « *consiste en un équilibre entre la quantité d'émissions, le coût, la consommation énergétique et les impacts environnementaux* » (NAVIN-CHANDRA 1993). En considérant la multiplicité de ces implications, une approche multicritère semble adaptée à l'évaluation de la recyclabilité. Ainsi, parmi les auteurs cités précédemment, E. Zussman propose d'ailleurs une optimisation multi objectifs générique par une opération de pondération des critères (ZUSSMAN 1994). La méthode proposée par C. Coppens pour la conception de produit automobiles propose d'optimiser la conception des pièces en améliorant le couple massique / économique (COPPENS, C. 1999). S. Kalisvaart affirme quant à lui que la corrélation entre la part massique valorisée et le bénéfice économique de la valorisation de produit est faible (KALISVAART 2000), rappelant ainsi la nécessité de les considérer simultanément. C'est bien sûr vers une multicritarité de la recyclabilité que doivent tendre les méthodes d'ECOV.

Bilan sur les critères de recyclabilité considérés dans les méthodes d'ECOV

- Prédominance des critères massique et économique,
- Performance environnementale trop peu considérée,
- Approche multicritère quasi inexistante mais nécessaire.

2.5. *Intégration de la valorisation en fin de vie dans le processus de conception de produit*

Comme envisagé dans les paragraphes précédents, de nombreuses méthodes aux performances variées visent à permettre d'intégrer la valorisation en fin de vie lors de la conception d'un produit. Certaines publications récentes établissent que peu de recherches ont consisté à étudier comment ces méthodes pourraient être intégrées dans un processus de conception (FURUHJELM 2000a), voire articulées au mieux avec le processus de conception d'une entreprise (JANIN 2000a; JANIN 2000b; MATHIEUX 2002) : une méthode d'éco-conception doit, en effet, respecter un certain nombre de propriétés afin d'être utilisée

de façon efficiente par une équipe de conception. Ces propriétés requises sont explorées dans ce paragraphe.

2.5.1. Valorisation en fin de vie et processus de conception de produit

Pour que la mise en œuvre de méthodes d'ECOV conduise à une conception et au développement de produits effectivement plus performants d'un point de vue valorisation en fin de vie, ces aspects doivent être intégrés à toutes les étapes du processus de conception de produit : cette nécessité fait, en particulier, l'objet des travaux de recherche de J. Furuholm qui propose un cadre méthodologique pour « *une intégration de la fin de vie à toutes les étapes, pour permettre une intégration naturelle dans le processus* » (FURUHJELM 2000a) ; sa proposition reste cependant purement organisationnelle. Parmi les méthodes quantitatives déjà recensées, seule celle élaborée par C. Coppens et P. Tonnelier est développée afin de pouvoir s'intégrer dans le processus de conception existant dans l'entreprise, en l'occurrence PSA (COPPENS 1999; COPPENS 2001; TONNELIER 2002).

De nombreuses publications, notamment normatives, insistent sur la nécessité d'intégrer les aspects environnementaux le plus tôt possible dans le processus de conception et de développement de produit (AFNOR 1998; ISO 2002) : ceci est en particulier vrai pour les aspects de valorisation en fin de vie.

L'intégration des méthodes d'ECOV à toutes les phases de conception doit être menée afin de répondre de façon pertinente aux problématiques de l'équipe de conception qui diffèrent à chacune de ces phases. Y. Pnueli développe d'ailleurs sa méthode d'amélioration de conception en considérant que le degré de liberté des équipes de conception diminue au cours du processus (PNUELI 1997) : dans les premières étapes du processus, la liberté est totale et tout changement est toléré ; dans les phases plus en aval, les bases de la conception ne doivent pas être modifiées, mais des modifications majeures sont encore possibles ; dans les phases très avancées, lors d'une optimisation de conception, seules des modifications locales sont tolérées, à condition de limiter les implications sur le voisinage.

De plus, la plupart des processus de conception de produit, notamment lors des phases de conception conceptuelle et de conception détaillée, présente un caractère « itératif » (ISO 2002). Les méthodes d'ECOV doivent donc être développées afin de s'adapter à ce caractère.

Enfin et pour conclure, le caractère multicritère de la conception doit être soigneusement pris en compte : l'aspect valorisation en fin de vie n'est en effet que l'un des nombreux critères affrontés par l'équipe de conception. L. Holloway précise par exemple pour le choix des matériaux en conception que la performance environnementale est un critère parmi d'autres, comme le coût, la densité, les performances mécaniques, ou encore l'aptitude à

être mis en forme (HOLLOWAY 1998). Dans ce contexte « hyper contraint », la solution de conception choisie devrait s'apparenter plus à un *compromis* qu'à un *optimum*.

2.5.2. Les bénéfices de l'utilisation des méthodes d'ECOV en conception

Parmi les méthodes / outils identifiés dans cette partie, seuls quelques uns font l'objet de développements particuliers concernant les bénéfices de leur utilisation en conception. Ils peuvent ainsi être utilisés :

- soit en fin de processus de conception, pour choisir parmi plusieurs options ou les comparer aux précédentes générations ou aux produits concurrents (par exemple **Demrop**, **ATROiD**),
- soit en cours de conception, pour effectuer des choix de conception (par exemple **euroMat'**, **Re-design for Recycling**, **DfE**, les **recommandations**, les **tables de séparabilité** ou les **tables de compatibilité**),
- soit tout au long du processus de conception, pour permettre la définition et le suivi des objectifs (par exemple **l'aptitude à la valorisation**, ou les **indicateurs automobiles**).

D'autres méthodes / outils sont destinés à une utilisation plus en aval dans le processus, notamment lors de la planification de valorisation (par exemple la **méthode S. Gerner**). Enfin, d'autres approches, comme **ELDA**, **Qwerty** ou encore la **méthode C. Boks**, sont destinées à l'établissement et à l'évaluation de la stratégie d'entreprise et sont utilisées lors de prise de décision hors projet.

La Figure 1.12 est une tentative de positionner les approches recensées selon leurs aptitudes à être utilisées au cours des étapes d'un processus séquentiel de conception de produit, comme définies par l'ISO (ISO 2002). Le positionnement de méthode en pointillé indique que l'utilisation de la méthode est pressentie mais pas démontrée.

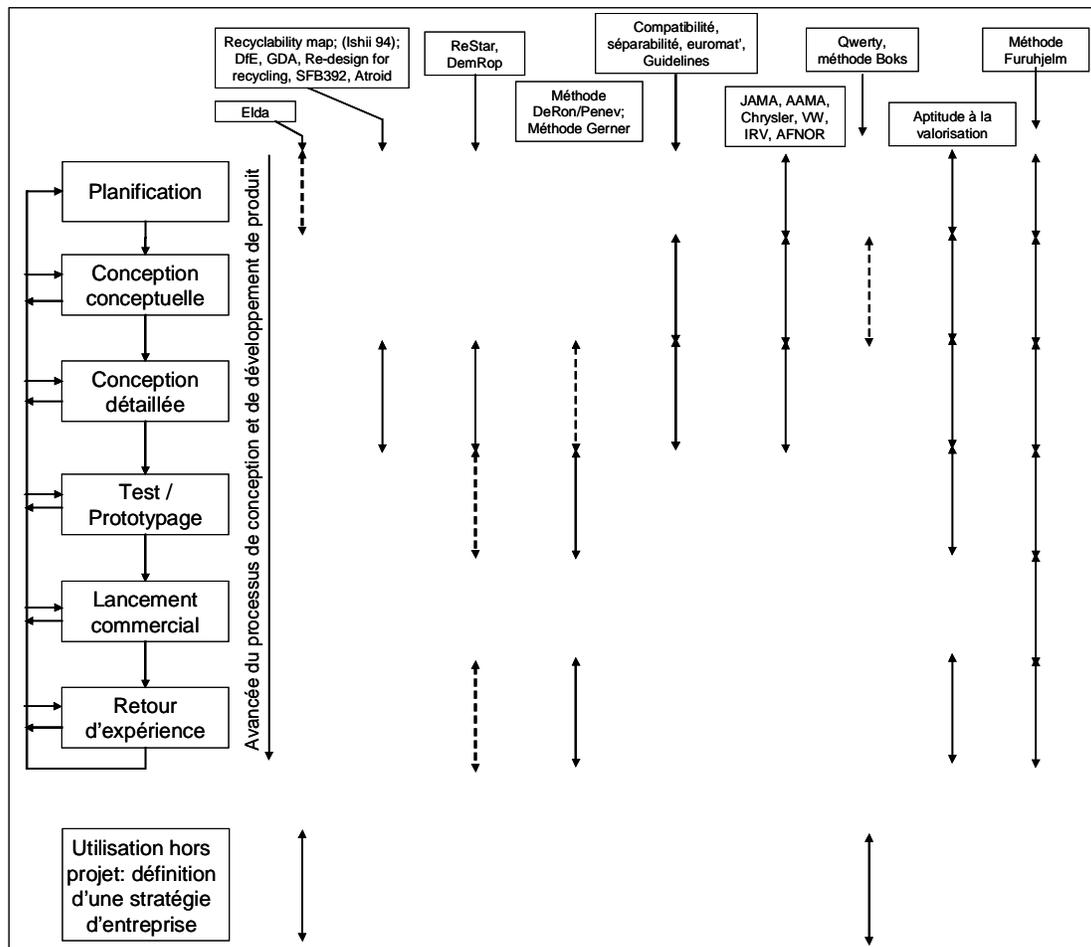


Figure 1.12. Tentative de positionnement des méthodes d'ECOV recensées dans un processus de conception séquentiel.

2.5.3. La nécessité de développer des méthodes originales d'évaluation

Les aspects valorisation en fin de vie sont aujourd'hui peu intégrés lors de la conception de produit car, comme l'affirme J. Furuhejm, « *ces aspects sont intangibles et difficiles à comprendre par une équipe de conception* » (FURUHJELM 2000a) : il est donc urgent de traduire la recyclabilité en critères concrets et manipulables par les concepteurs. De nombreux auteurs s'accordent sur la nécessité de développer des outils d'évaluation de la recyclabilité, en particulier quantitatifs. De telles évaluations doivent néanmoins rester suffisamment simples pour être compréhensibles par l'équipe de conception (TONNELIER 2002) et suffisamment complètes pour permettre de suivre les performances du produit pendant les revues de conception (FURUHJELM 2000a).

Enfin, alors que le support électronique semble très apprécié des concepteurs pour intégrer les critères environnementaux à leurs pratiques (HUNKELER 2000), de nombreux auteurs soulignent la nécessité de lier les évaluations environnementales de produits à des outils logiciels de *Conception Assistée par Ordinateur (CAO)*^[1] (COPPENS 1999; KORSE-

NOORDHOEK 2001; PNUELI 1997). Un certain nombre des approches recensées sont d'ailleurs soit sous forme logicielle (par exemple **ReStar**, **DfE** ou encore **ATROiD**), soit facilement associable à des logiciels de CAO (par exemple la **méthode S. Gerner**, ou **SFB392**).

2.5.4. Importance des bases de règles en ECOV

D. Hunkeler établit que les équipes de conception ne sont pas spécialistes de la problématique environnementale, et à ce titre elles sont à la recherche de règles et de recommandations applicables facilement (HUNKELER 2000).

↳ **Base de règles générales**

Comme présenté précédemment, des règles générales de conception pour le démontage ou pour la valorisation sont disponibles : elles contiennent notamment des règles de choix de matériaux, de liens, d'architectures et de composants. De telles règles sont aussi retrouvées dans les critères des labels écologiques : par exemple pour le label allemand Blue Angel destiné au téléviseur, le nombre maximum de matériaux présents dans le coffret et le cache arrière est fixé à quatre (BLUE ANGEL 1999). Cependant, de telles règles d'amélioration de conception sont nombreuses et souvent arbitraires : elles apparaissent ainsi difficilement manipulables par les équipes de conception.

↳ **Base de règles spécifiques**

Puisqu'une équipe de conception doit être guidée au mieux en recevant des recommandations les plus concrètes possibles (DAHLSTRÖM 1999), il est nécessaire de procéder à un choix ou à une hiérarchisation parmi les règles générales de conception, pour n'en garder qu'un nombre limité. Ce choix, qui mène à la structuration d'une base de règles spécifiques, peut être réalisé selon le type de produit, la stratégie d'entreprise, ou encore les propriétés du produit en développement, comme schématisé sur la Figure 1.13.

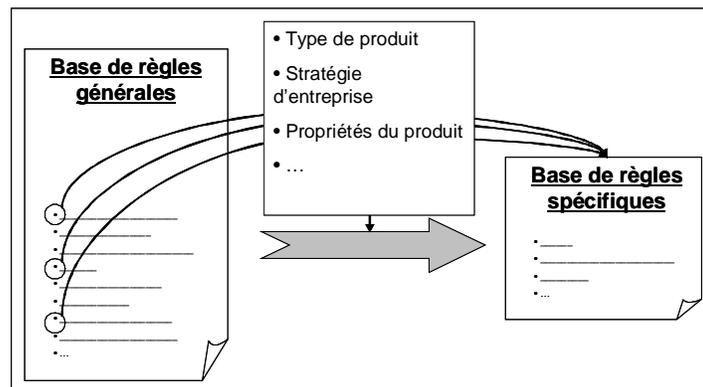


Figure 1.13. Extraction de règles générales pour en faire des règles de conception spécifiques.

C. Coppens précise à ce propos que les bases de règles doivent être adaptées aux utilisateurs et aux étapes de développement du produit (COPPENS 1999).

Enfin, alors que S. Gerner rappelle que la capitalisation des connaissances constitue un aspect fondamental de l'éco-conception orientée valorisation (GERNER 2001a), la construction d'une base de règle propre à chaque entreprise pourrait constituer un format adéquat de cette capitalisation.

2.5.5. Vers une approche collaborative de l'intégration de la recyclabilité en conception

Comme pour toute démarche d'éco-conception, l'intégration de la valorisation en fin de vie lors de la conception de produit implique une coopération et un partenariat accru (AFNOR 1998; MATHIEUX 2002). Afin d'assurer une démarche unifiée et synergique, l'approche de l'entreprise doit ainsi être construite selon des pratiques reconnues et communes à tous les protagonistes du projet, autant internes à l'entreprise qu'externes ; en particulier, une coopération avec les fournisseurs de matériaux ou de composants est primordiale (RENARD 2001).

L'outil logiciel **DfE2** en cours de développement, semble intégrer cette dimension collaborative en interne : comme l'affirme M. Korse-Noordhoek, l'outil est autant utile au manager de produit, qu'au concepteur et qu'à l'expert recyclage (KORSE-NOORDHOEK 2001). Les recherches menées par P. Tonnelier au sein de PSA consistent d'ailleurs à construire un modèle articulant informations, outils et organisation des équipes de conception (TONNELIER 2002), dans lequel des experts recyclage jouent un rôle déterminant de coordination.

Bilan sur l'intégration des méthodes d'ECOV dans le processus de conception

- Faible articulation des méthodes et du processus de conception de produit,
- Peu d'outils et de méthodes d'évaluation quantitative de la recyclabilité,
- Besoin d'une démarche unifiée, permettant la collaboration,
- Rôle essentiel des experts recyclage.

2.6. *Conclusions de l'analyse des méthodes d'ECOV*

L'analyse menée dans cette partie a permis de montrer qu'aucune des méthodes d'ECOV recensées ne rend possible une prise en compte efficiente de la valorisation en fin de vie lors de la conception des produits : elles présentent toutes des atouts, mais elles sont incomplètes sur certains aspects.

En synthèse de cette partie, nous présentons dans la Table 1.5 les caractéristiques de cinq méthodes de CpSV, extraites de la Table A.3 de l'Annexe 2. Ces cinq méthodes, dont la

plupart sont encore en développement, présentent des caractéristiques intéressantes et sont parmi les plus abouties.

Table 1.5. Extrait de la grille d'analyse des caractéristiques principales de quelques méthodes d'ECOV.

Nom de la méthode	euroMat'	Méthode Boks	Méthode Huisman	DfE2	SFB392
Type d'approche: (Méthode / Logiciel commercial / Logiciel prototype / Approche industrielle) (année de lancement)	Logiciel commercial (2001)	Méthode	Méthode	Logiciel commercial (2002 ?)	Logiciel prototype (2002)
Catégorie d'ECOV (CpD/CpDV/CpND/CpSV)	CpSV				
Aspects du produit considérés	• Matériaux	• Matériaux	• Matériaux	• Composant • Matériaux • Liens • Architecture	• Composant • Matériaux • Masse • Géométrie
Critère de recyclabilité	• Environnemental • (Economique)	• Massique • Economique	• Economique • Environnemental • (Massique)	• Massique • Economique • Environnemental	• Massique
Approche prospective sur le système de valorisation	(✓)	✓	(✓)	✓	
Applicabilité	Eco-conception : choix de matériaux	• Définition d'une stratégie d'entreprise • (Eco-conception)	• Définition d'une stratégie d'entreprise • (Eco-conception)	Eco-conception	Eco-conception : identification de points faibles
Références	(FLEISCHER 1998; FLEISCHER 2000)	(BOKS 2001a; BOKS 2001b; BOKS 2002)	(HUISMAN 2001; HUISMAN 2002)	(KALISVAART 2000; KORSE-NOORDHOEK 2001)	(ANDERL 1999; WOLF 2000)

Légende :

(✓) : approche partiellement intégrée

(éco-conception) : éco-conception partiellement intégrée

Conclusions : énoncé des lacunes méthodologiques et des opportunités de recherche

L'objectif de ce chapitre était de présenter un état de l'art des technologies de valorisation de produits en fin de vie et des méthodes d'ECOV et de montrer la complémentarité des approches procédé et produit.

Cet état de l'art a établi la nécessité de mieux définir la recyclabilité de produit, notamment par la construction de méthodes d'évaluation. Il a de plus été montré que la prise en compte des caractéristiques et des performances des systèmes de valorisation de produits lors de leur conception était l'une des clés de l'efficacité des méthodes d'ECOV : dans un contexte industriel de valorisation en pleine effervescence, la prise en compte la plus fidèle possible dès la conception des réalités des systèmes de valorisation est une priorité encore trop peu effective.

En résumé, les caractéristiques essentielles que doit présenter une méthode d'ECOV sont présentées ci-dessous:

Afin d'atteindre de façon efficiente ses objectifs, une méthode d'ECOV doit :

- comporter une évaluation quantitative de la recyclabilité,
- comporter une approche multicritères permettant d'intégrer toutes les significations de la recyclabilité de produit qui intéressent les équipes de conception,
- adopter une approche systémique de la valorisation de produits, considérant en particulier des combinaisons de procédés et de filières, et permettant une compréhension du contexte globale de la valorisation,
- permettre la prise en compte des incertitudes temporelles et géographiques des performances du système de valorisation,
- être utilisable en conception de produit, et permettre en particulier d'orienter les choix des équipes de conception,
- être intégrable au processus de conception de produit.

La proposition méthodologique présentée dans le prochain chapitre visera à combler les lacunes méthodologiques identifiées.

CHAPITRE 2

**PROPOSITION D'UNE METHODE VISANT
L'AMELIORATION DE L'APTITUDE D'UN PRODUIT A LA
VALORISATION EN FIN DE VIE**

CHAPITRE 2

PROPOSITION D'UNE METHODE VISANT L'AMELIORATION DE L'APTITUDE D'UN PRODUIT A LA VALORISATION EN FIN DE VIE

Introduction.....	81
Partie 1.Présentation globale de la méthode.....	82
1.1. Une méthode basée sur l'évaluation de la recyclabilité de produit.....	84
1.1.1. Evaluation de la recyclabilité d'un produit en fonction de plusieurs critères distincts .	84
1.1.2. Gestion de trois critères distincts dans la méthode.....	86
1.2. Proposition de gestion des scénarii de valorisation dans la méthode	87
1.2.1. Détermination de scénarii de valorisation prospectifs.....	87
1.2.2. Gestion des scénarii lors de l'évaluation de la recyclabilité de produit	89
1.3. Synoptique global de la méthode.....	91
Partie 2. Présentation des modèles permettant le calcul des indicateurs de recyclabilité	92
2.1. Le modèle « produit ».....	92
2.2. Le modèle « valorisation ».....	92
2.2.1. Définitions et organisation générale du modèle.....	92
2.2.2. Définition d'une étape de valorisation.....	93
2.2.3. Définition d'une opération unitaire de valorisation	94
2.2.4. Définition d'un procédé de valorisation.....	96
2.2.5. Définition d'un scénario de valorisation	98
2.3. Les indicateurs de recyclabilité : une évaluation de l'adéquation entre produit et procédés de valorisation	98
2.3.1. Contribution des procédés de valorisation à la recyclabilité de produit.....	98
2.3.2. Calcul des indicateurs de recyclabilité.....	99
2.3.3. Synthèse : évolutions des indicateurs de recyclabilité lors de la mise en œuvre d'un scénario de valorisation	107
Partie 3. Structuration du modèle valorisation	108
3.1. Objectifs.....	108
3.2. Etape de démontage manuel.....	108
3.2.1. Objectif d'une étape de démontage manuel	109
3.2.2. Conditions d'entrée d'une étape de démontage manuel	109
3.2.3. Modélisation d'une étape de démontage manuel	109

3.3.	Etape de tri	111
3.3.1.	Objectif d'une étape de tri	111
3.3.2.	Conditions d'entrée d'une étape de tri	111
3.3.3.	Modélisation d'une étape de tri	111
3.4.	Etape de recyclage	113
3.4.1.	Objectifs de l'étape	113
3.4.2.	Conditions d'entrée.....	113
3.4.3.	Modélisation d'une étape de recyclage	114
3.5.	Etape d'incinération avec récupération d'énergie	115
3.5.1.	Objectif de l'étape.....	115
3.5.2.	Conditions d'entrée.....	115
3.5.3.	Modélisation d'une étape d'incinération avec récupération d'énergie.....	115
3.6.	Etape de revente de matériaux secondaires	117
3.6.1.	Objectif de l'étape.....	117
3.6.2.	Conditions d'entrée.....	117
3.6.3.	Modélisation d'une étape de revente de matériaux secondaires	117
3.7.	Autres étapes de valorisation	118
3.8.	Résumé des modélisations des cinq étapes de valorisation.....	118
Partie 4.Structuration du modèle produit.....		120
4.1.	Identification des caractéristiques pertinentes d'un produit d'un point de vue de la recyclabilité	120
4.2.	Proposition d'une structure d'organisation des caractéristiques d'un produit influençant sa recyclabilité	122
4.2.1.	Elément générique « substance »	122
4.2.2.	Elément générique « matériau »	122
4.2.3.	Elément générique « liaison »	123
4.2.4.	Elément de produit « pièce »	123
4.2.5.	Elément de produit « fixation ».....	124
4.2.6.	Elément de produit « ensemble ».....	124
4.3.	Présentation graphique de la structure du modèle produit.....	124
Partie 5.Amélioration de l'aptitude d'un produit à la valorisation en fin de vie...126		
5.1.	Présentation générale de la démarche	126
5.2.	Identification de procédés « problématiques » dans un scénario de valorisation	127
5.3.	Détermination de points faibles de conception	128
5.4.	Identification de voies d'amélioration de conception.....	129
5.5.	Elaboration de voies d'amélioration de conception dans un contexte multi-scénarii et multicritères.....	131
5.6.	Amélioration de la conception du produit et des pièces qui le constituent : vers des règles d'additivité	133
Conclusions du Chapitre 2.....		134

Introduction

La revue bibliographique présentée au chapitre précédent a établi la nécessité de développer des méthodes d'évaluation de la recyclabilité de produit selon des critères pertinents. Il a aussi été montré que ces méthodes d'évaluation doivent traduire au mieux les performances réelles des systèmes de valorisation de produits, en particulier considérer toutes les étapes de la valorisation et être suffisamment flexibles pour intégrer des visions prospectives de la valorisation et les disparités entre pays. Elles doivent, en outre, être intégrables au plus tôt lors de la conception de produit, afin de rendre possible l'amélioration du produit.

La méthode exposée dans ce chapitre vise à répondre à ces exigences: c'est une méthode d'évaluation prédictive de la recyclabilité de produit à l'aide d'indicateurs, méthode utilisable en cours de conception. Comme schématisé dans la Figure 2.1, la recyclabilité de produit est définie comme l'évaluation de l'adéquation entre la conception du produit, régie par ses règles propres, et les scénarii de valorisation, marqués par de nombreuses incertitudes.

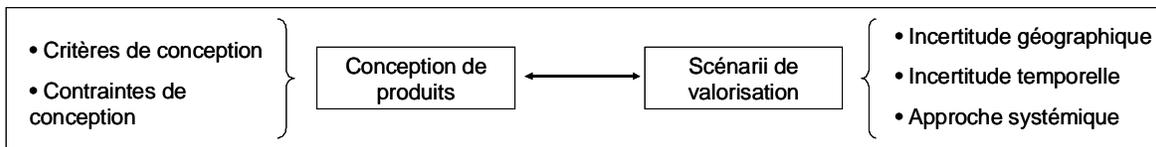


Figure 2.1. La recyclabilité comme évaluation de l'adéquation entre conception de produit et scénarii de valorisation.

Dans la première partie de ce chapitre, la structure globale de la méthode est exposée. Dans la partie suivante, les modèles servant la méthode sont présentés brièvement et les modes de calcul des indicateurs sont définis. Les troisième et quatrième parties consistent en la structuration du modèle valorisation et du modèle produit. Dans la cinquième et dernière partie, l'utilisation des indicateurs de recyclabilité en vue de l'amélioration de conception de produits est explorée.

La Figure 2.1 schématise l'organisation de ce chapitre.

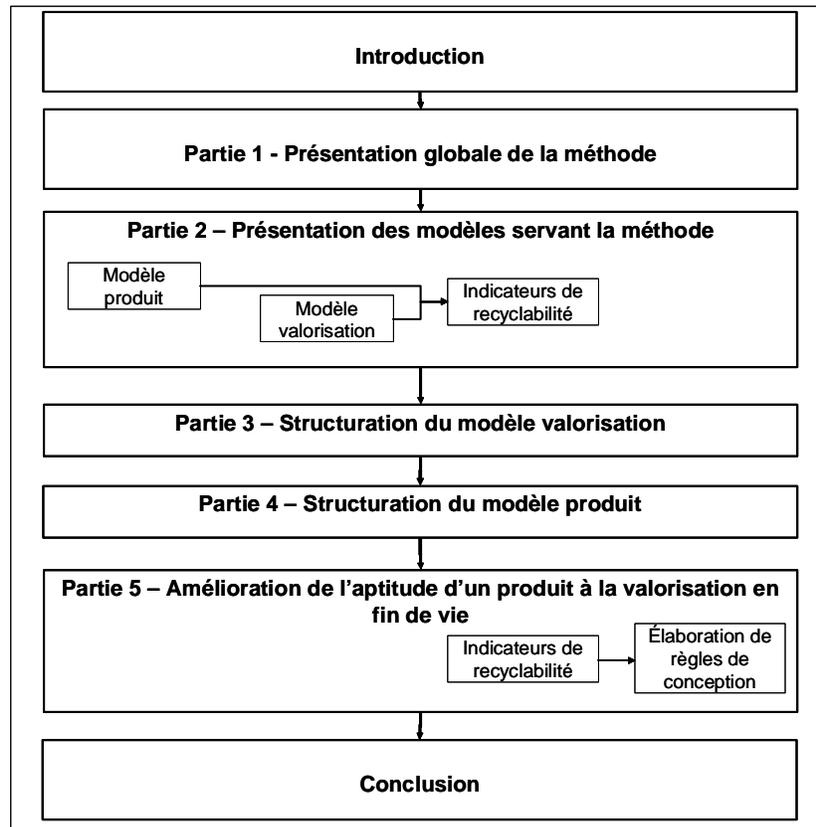


Figure 2.2. Représentation synoptique du Chapitre 2.

Partie 1. Présentation globale de la méthode

La méthode proposée dans ce chapitre vise l'identification de points faibles d'un produit du point de vue de son aptitude à être valorisé en fin de vie, diagnostic permettant de formuler des voies d'amélioration de conception.

L'identification de points faibles repose sur l'évaluation de la recyclabilité du produit en cours de conception par des indicateurs qui jugent l'adéquation du produit avec les scénarii de valorisation envisagés.

Le synoptique de la méthode est représenté dans la Figure 2.3 suivante.

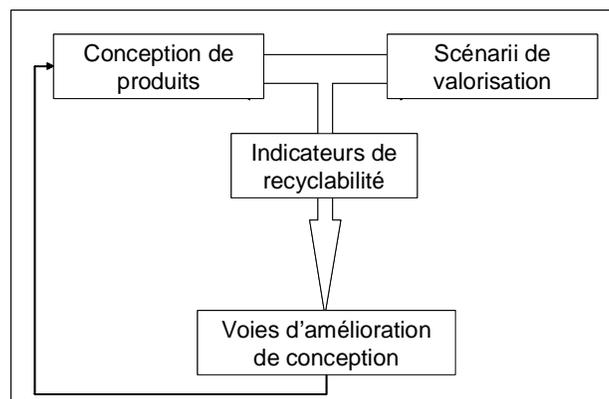


Figure 2.3. Synoptique de la méthode.

Précisons d'ores et déjà que :

- ↪ **nous ne proposons pas une méthode de conception de produit,**
- ↪ **nous ne proposons pas d'outils directement utilisables par les concepteurs,**
- ↪ **nous proposons une méthode destinée à un expert recyclage qui est chargé de traduire les enseignements dans le langage des équipes de conception.**

De plus, la méthode proposée permet :

- ↪ **permet la prise en compte de toutes les caractéristiques d'un produit contrôlées par une équipe de conception et pertinentes d'un point de vue recyclabilité,**
- ↪ **ne se substitue pas aux concepteurs, qui sont en charge de proposer des voies d'amélioration de conception.**

Les indicateurs de recyclabilité développés :

- ↪ **sont quantitatifs,**
- ↪ **sont multicritères, permettant ainsi une compréhension globale du contexte de la valorisation,**
- ↪ **intègrent les performances des procédés et des filières de valorisation.**

Le calcul des indicateurs est alimenté par une multitude de données concernant les performances du système de valorisation de produit. Ces données sont aujourd'hui détenues par les acteurs de la valorisation et il existe des lacunes dans les systèmes d'information permettant de structurer ces données. La méthode développée est donc :

- ↪ **essentiellement destinée à un expert recyclage, capable de comprendre et de structurer les données,**
- ↪ **construite pour être à terme transposable en outil informatique,**
- ↪ **alimentée par une base de données évolutive.**

1.1. Une méthode basée sur l'évaluation de la recyclabilité de produit

1.1.1. Evaluation de la recyclabilité d'un produit en fonction de plusieurs critères distincts

Dans l'introduction générale, la multiplicité des perceptions de la recyclabilité de produit a été mise en évidence. Puisque nos recherches visent à élaborer une méthode destinée aux entreprises productrices de matériels, il n'est pas nécessaire de prendre en compte toutes les facettes de la recyclabilité : il convient d'identifier les critères pertinents à notre problématique.

Parmi les moteurs incitant une entreprise à adopter une démarche d'éco-conception, M. Janin identifie comme facteurs majeurs : la pression de la réglementation, la réduction des coûts et l'image de marque de l'entreprise (JANIN 2000a). Pour l'amélioration des performances des produits d'un point de vue de la valorisation, ces facteurs restent prépondérants : la valorisation des produits en fin de vie devient une obligation législative ; elle induit des coûts supplémentaires sur le cycle de vie des produits ; elle devient un argument concurrentiel et l'image de marque de l'entreprise est en jeu. Ceci nous conduit tout naturellement à identifier les critères de recyclabilité suivants comme pertinents pour un producteur d'équipements électr(on)iques :

- Le critère massique,
- Le critère économique,
- Le critère environnemental.

La Figure 2.4 établit les correspondances entre moteurs de l'amélioration de la recyclabilité de produit et les trois critères de recyclabilité retenus.

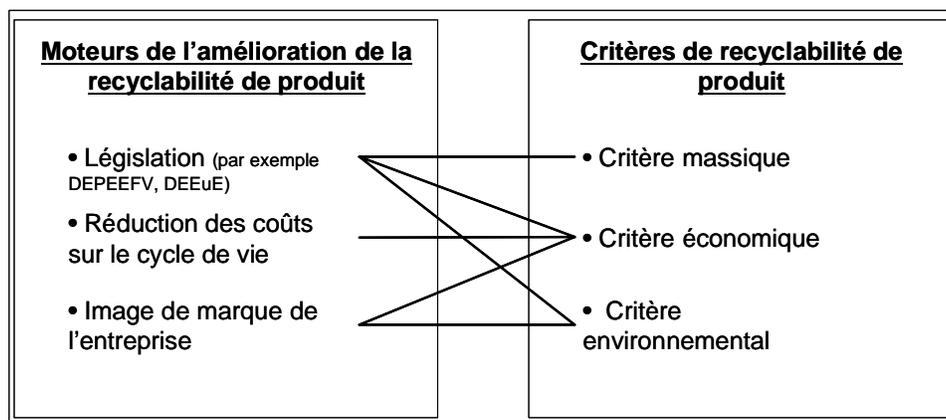


Figure 2.4. Correspondances entre les moteurs de l'amélioration de la recyclabilité de produit et les critères de recyclabilité retenus.

La signification et le contenu de chacun des critères retenus pour l'évaluation de la recyclabilité de produit sont définis comme suit :

↳ Le critère massique

Le critère *massique* correspond à l'évaluation quantitative du taux de valorisation massique atteint lors du traitement du produit en fin de vie. Ce taux de valorisation est notamment envisagé dans les projets de directives européennes tels que la DEPEEFV (UE 2000b) ou la DEVHU (UE 2000a) ; y sont distingués taux de réutilisation, taux de recyclage matière et taux de valorisation énergétique, mais le mode de calcul des taux n'est pas arrêté.

↳ **Le critère économique**

Le critère *économique* correspond à une évaluation quantitative du coût (ou éventuellement du bénéfice) de la valorisation du produit en fin de vie, tel qu'il est supporté (ou éventuellement endossé) par le dernier détenteur du produit. Ce coût (ou bénéfice) intègre les coûts de collecte, de transport, et de traitement des produits, et les bénéfices liés à la revente des composants, matériaux/énergies secondaires qui en sont extraits.

↳ **Le critère environnemental**

Le critère *environnemental* correspond à une évaluation quantitative de l'impact environnemental de la valorisation du produit en fin de vie. Sont ainsi intégrés : les impacts environnementaux de la logistique et des procédés de valorisation et d'élimination mis en œuvre ; les bénéfices environnementaux de l'économie des ressources induite par la valorisation du produit. L'impact environnemental peut alors être :

- Soit bénéfique : J. Mc Laren établit par exemple que la valorisation de téléphones portables peut globalement induire une économie de ressources (MC LAREN 1999),
- Soit défavorable : M. Hundal rappelle que la production de matières recyclées par le recyclage d'une pièce peut utiliser plus d'énergie et causer plus de pollution que la production de matières vierges (HUNDAL 2000).

En évaluation environnementale, l'impact est traditionnellement évalué selon plusieurs critères, correspondant à différentes classes d'impacts environnementaux.

Le critère de performance environnementale, aujourd'hui souvent considéré comme secondaire au sein d'une équipe de conception, pourrait à l'avenir s'avérer prioritaire pour un producteur : dans l'optique de la mise en place de la DEEuE (UE 2002), les bénéfices environnementaux de la valorisation pourraient en effet permettre d'équilibrer les impacts environnementaux d'autres phases du cycle de vie.

Les trois critères retenus pour l'évaluation permettent de positionner l'amélioration des performances d'un produit dans une politique durable de conservation des ressources naturelles et de réduction des pollutions, définie par l'UE dans (UE 2001a; UE 2001b), et qui devrait en particulier mener à :

- la minimisation de la mise en décharge,
- la mise en place d'un système de valorisation économiquement viable,

- la contribution à l'économie des ressources.

1.1.2. Gestion de trois critères distincts dans la méthode

Comme établi dans le paragraphe précédent, la recyclabilité d'un produit est évaluée dans notre méthode selon trois critères distincts. Le propos de ce paragraphe est de discuter si une hiérarchisation de ces critères est souhaitable, et si c'est le cas, de déterminer comment celle-ci peut être établie.

↳ **Des critères distincts**

La valorisation de produits en fin de vie est la source d'implications diverses pour une entreprise ; à ce titre, elle fait partie de ces « *problèmes flous et complexes où sont susceptibles d'intervenir, de manière conflictuelle, les préférences humaines* » sur lesquels, comme l'affirme C. Hugrel, « *la démarche multicritères prétend constituer un guide pour l'action* » (HUGREL 1998). L'approche multicritères paraît ainsi adaptée à notre problématique puisqu'elle permet d'explorer « *simultanément les décisions possibles d'après leurs conséquences et la signification de ces dernières auprès des différents acteurs* » (HUGREL 1998). Il apparaît donc tout à fait important de considérer les critères de façon *indépendante* : dans la suite de l'exposé, l'amélioration de la recyclabilité d'un produit consiste donc à identifier des compromis permettant la maximisation du taux massique et la minimisation des coûts et des impacts environnementaux de la valorisation.

↳ **Une hiérarchie de critères liées aux contraintes subies par l'entreprise**

Chaque entreprise peut adopter sa propre hiérarchie des critères de recyclabilité à partir des contraintes effectivement subies : L. Holloway rappelle en effet qu'en conception, l'importance relative des critères de conception dépend du contexte (HOLLOWAY 1998).

En illustration, pour trois cas de figures d'incitation législative, les contraintes subies par les producteurs de matériels élect(ron)iques sont établies et une hiérarchie probable des critères est précisée :

- Si aucune législation concernant la valorisation des PEEFV n'est en vigueur, le critère économique est le seul critère crucial pour un producteur de matériel : le produit doit être valorisé au meilleur coût ;
- Si une législation concernant la valorisation des produits en fin de vie du type DEPEEFV est adoptée, le critère massique devient prépondérant : les produits doivent atteindre les taux massiques de valorisation fixés par la législation ; la valorisation est bien sûr réalisée au meilleur coût ;
- Si des législations concernant la valorisation des produits en fin de vie, du type DEPEEFV, et concernant l'impact du produit sur l'ensemble du cycle de vie, du type DEEuE, sont adoptées, les critères massique et environnemental deviennent prépondérants : les produits

doivent atteindre les taux massiques de valorisation conformes à la législation et garantir que la phase de fin de vie a un impact environnemental minimum sur le cycle de vie du produit ; la valorisation doit de plus être réalisée au meilleur coût.

Les hiérarchies de critères probables pour ces trois cas sont résumées dans la Table 2.1 ci-dessous :

Table 2.1. Plusieurs hiérarchies envisageables parmi les critères de recyclabilité d'un produit.

Cas de figure législatif	Hierarchie de critères considérée par une entreprise
Pas d'incitation législative	1. Economique
Mise en application de la DEPEEFV	1. Massique 2. Economique
Mise en application de la DEPEEFV et de la DEEuE	1. Massique et environnemental 2. Economique

↳ Vers une combinaison de critères

Plutôt qu'une hiérarchie de critères, la recyclabilité de produit peut être envisagée selon plusieurs combinaisons de critères, en particulier sous forme de quotient de critères. Par exemple, tout gain selon le critère massique obtenu grâce à une amélioration de conception doit être comparé à des pertes éventuelles selon le critère économique et/ou le critère environnemental.

Quelle que soit la hiérarchie retenue, le critère économique reste toujours crucial : si plusieurs options de conception mènent à un respect des objectifs selon les critères massique et/ou environnemental, la solution choisie est celle qui engendre le moindre coût économique.

Sans attendre la mise en place d'incitations législatives, il est souhaitable qu'une entreprise utilisatrice de la méthode établisse de façon transparente sa propre hiérarchie / combinaison des critères de recyclabilité.

Remarque : dans la suite du document, sauf précision contraire, le terme « recyclabilité » caractérise l'évaluation selon les trois critères retenus de l'aptitude d'un produit à être valorisé.

1.2. Proposition de gestion des scénarii de valorisation dans la méthode

1.2.1. Détermination de scénarii de valorisation prospectifs

Comme établi au Chapitre 1, les modes de valorisation de PEEFV sont marqués par deux types essentiels d'incertitudes : une incertitude géographique et une incertitude temporelle. Il apparaît ainsi que les scénarii de valorisation qui seront appliqués aux produits lorsque ceux-ci atteindront leurs fins de vie seront, d'une part, *multiples* et, d'autre part, sensiblement *différents*

de ceux appliqués aujourd'hui. Ces incertitudes doivent être prises en compte dans notre méthode.

↳ Revue bibliographique des méthodologies du futur

Avant d'établir une méthode permettant d'intégrer les incertitudes temporelles, une rapide revue bibliographique des méthodologies du futur est présentée.

Comme établi par J. Glenn dans (GLENN 1999), « *étudier le futur consiste à étudier les changements potentiels : pas simplement les dernières innovations technologiques, mais plutôt ce qui pourrait provoquer une différence systémique ou fondamentale dans les 10 à 25 prochaines années (...). Etudier le futur ne consiste pas simplement à formuler des projections économiques ou des analyses sociologiques ou des prospectives technologiques, mais plutôt à un examen multidisciplinaire du changement dans tous les grands domaines de la vie, pour identifier les forces dynamiques qui créent la prochaine époque* ».

La prise en compte de scénarii prospectifs est largement nécessaire aux méthodes d'évaluation environnementale utilisées lors de prises de décisions, en particulier dans la méthodologie d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) : ce sujet fait l'objet d'un groupe de travail animé au sein de la SETAC-Europe (WEIDEMA 2002). Parmi les nombreuses approches disponibles, B. Weidema identifie six groupes de méthodes potentiellement utilisables en ACV. Celles-ci sont présentées dans la Table 2.2.

Table 2.2. Présentation de six méthodologies du futur potentiellement utilisables en ACV (d'après (WEIDEMA 2002)).

Nom de la méthode	Courte description de la méthode
Méthodes d'extrapolation	Dans cette méthode, le futur représente une extension logique du passé. L'analyse des tendances, la régression, et la simulation sont des outils de mise en œuvre de cette méthode.
Méthodes exploratoires	Ce type de méthode s'attache à structurer des futurs possibles, à partir de descriptions qualitatives.
Modélisation dynamique	Le futur est décrit par l'identification des mécanismes déterminants d'événements passés et leurs modes d'influence sur le futur.
Méthodes des scénarii	Ces méthodes sont basées sur la croyance que le futur est largement imprédictible. En considérant les incertitudes liées au futur, la modélisation dynamique mène, non pas à un seul futur, mais à plusieurs futurs différents, qui doivent tous être décrits sous forme de scénarii.
Méthodes participatives	Ces méthodes définissent le futur à partir des opinions d'experts et d'acteurs du domaine étudié.
Méthodes	Ces méthodes s'intéressent au futur que nous désirons observer et aux

normatives	moyens d'atteindre ce but.
------------	----------------------------

↳ Identification de méthodes adaptées à notre problématique

Parmi ces méthodes, la méthode d'extrapolation et la modélisation dynamique paraissent peu applicables au domaine de la valorisation puisque ce domaine est encore peu établi et devrait être marqué à l'avenir par des ruptures technologiques importantes. Par ailleurs, les producteurs de produits n'ayant que peu d'influences sur le développement de l'industrie de la valorisation, la méthode normative ne semble pas pertinente.

Pour le mode d'établissement des scénarii prospectifs possibles, nous proposons de combiner la méthode des scénarii, la méthode exploratoire et la méthode participative :

- l'avenir de la valorisation des PEEFV étant en partie imprédictible, il apparaît pertinent de considérer *plusieurs* futurs possibles à travers plusieurs scénarii ;
- la méthode exploratoire devrait permettre de proposer plusieurs combinaisons possibles de filières et procédés développés ou en cours de développement ;
- la méthode participative devrait permettre d'identifier les scénarii les plus prometteurs pour les produits de l'entreprise : à défaut d'une démarche complètement structurée, du type par exemple de la méthode Delphi exposée dans (BOKS 1997; BOKS 1998b), un expert recyclage peut identifier des scénarii prospectifs adaptés au produit en analysant les publications du domaine ou en rencontrant les acteurs de la valorisation.

1.2.2. Gestion des scénarii lors de l'évaluation de la recyclabilité de produit

Afin d'intégrer les incertitudes temporelles et géographiques de la valorisation lors de l'évaluation de la recyclabilité de produit, les scénarii de valorisation considérés pour un produit sont tels que :

- Plusieurs scénarii sont considérés successivement lors de l'évaluation de la recyclabilité ;
- Les scénarii sont choisis parmi une typologie de scénarii disponibles ;
- Des technologies dites « prospectives », c'est-à-dire des technologies prometteuses mais pas encore largement disponibles, sont intégrées à quelques uns de ces scénarii.

Cette approche est de type « *what-if* » : elle permet en effet d'établir *quelle* recyclabilité atteint le produit *si* un type de scénario de valorisation est considéré.

Les scénarii de valorisation envisagés lors de l'évaluation sont choisis parmi une typologie de scénarii disponibles. A partir d'enquêtes auprès d'acteurs de la valorisation et d'organismes de recherche développant des technologies prometteuses, il est possible de classer les scénarii selon :

- Leur probabilité d'existence en un lieu et à un horizon temporel donné : comme établi au Chapitre 1 (cf. 1.3), elle dépend non seulement du niveau de développement des

technologies utilisées, mais aussi des évolutions de la législation et du marché des matériaux recyclés ;

- Leur degré de spécificité : un scénario est *spécifique* s'il est parfaitement adapté à un produit donné ; il est *transversal* s'il est capable de valoriser tout type de produit,
- Les aspects techniques : un scénario peut par exemple être qualifié de « *tout broyage* », de « *tout démontage* » ou encore de « *mélange démontage / broyage* ».

De telles typologies de scénarii ont été proposées dans le cadre du programme ENSAM/ADEME (ENSAM/ADEME 2002).

Parmi les typologies existantes, le choix par l'expert recyclage de scénarii de valorisation pertinents doit être effectué en liaison avec le questionnement; ainsi, :

- Si la recyclabilité de produit est envisagée dans l'optique d'une évaluation de la recyclabilité d'un produit sur l'ensemble du continent européen, les scénarii considérés doivent être représentatifs des cas de figures rencontrés sur le continent ;
- Si la recyclabilité de produit est envisagée en cours de conception pour procéder au choix définitif de matières plastiques d'un sous-ensemble, les scénarii considérés doivent regrouper les alternatives de traitement les plus probables pour ces matières plastiques.

Les modes d'établissements de typologies de scénarii de valorisation et de choix de scénarii adaptés au questionnement sont schématisés dans la Figure 2.5 suivante :

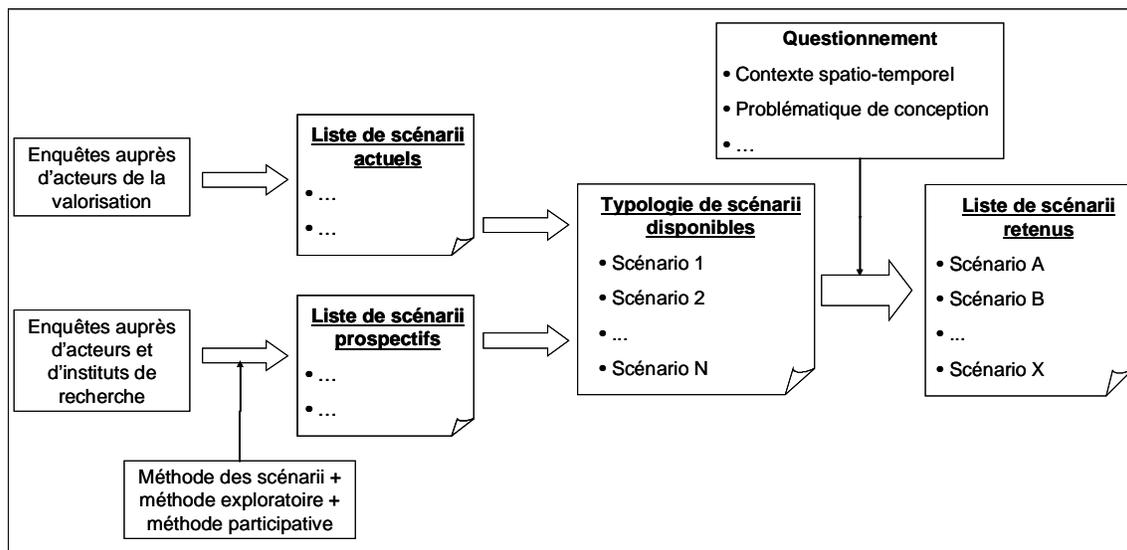


Figure 2.5. Schématisation de la gestion des scénarii de valorisation adoptée dans la méthode.

Le choix des scénarii de valorisation influence les résultats de l'évaluation de recyclabilité et influence ainsi l'amélioration de conception qui en découle.

Etant donnée la diversité des questionnements envisageables, ce choix est laissé à l'appréciation de l'utilisateur de la méthode.

1.3. *Synoptique global de la méthode*

La Figure 2.6 synthétise les relations de la méthode proposée avec les choix effectués par l'entreprise concernant la hiérarchie des critères et la gestion des scénarii de valorisation.

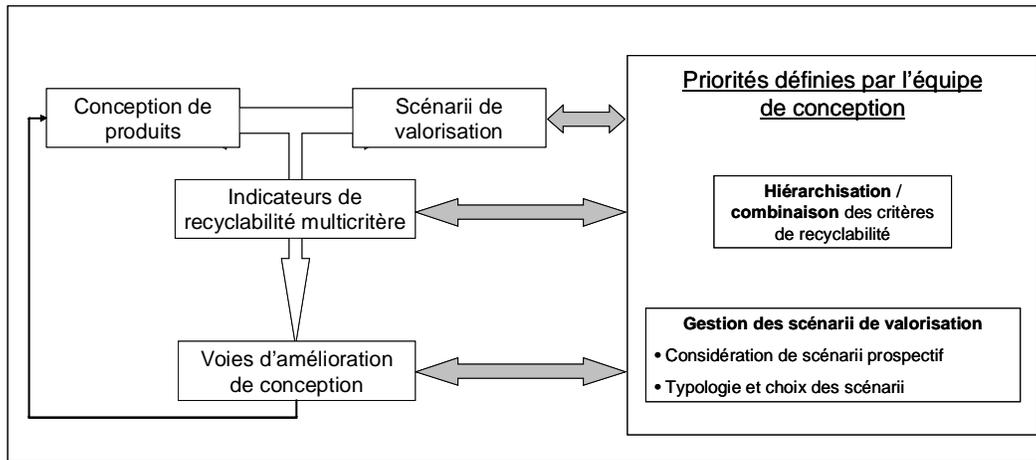


Figure 2.6. Synoptique global de la méthode basée sur l'évaluation de la recyclabilité d'un produit.

Partie 2. Présentation des modèles permettant le calcul des indicateurs de recyclabilité

La méthode proposée s'appuie sur l'évaluation de la recyclabilité de produit à l'aide d'indicateurs. Dans cette partie, les modèles « produit » et « valorisation » qui permettent le calcul des indicateurs sont présentés et définis ; les indicateurs, qui constituent une évaluation de l'adéquation entre ces deux modèles, sont ensuite introduits.

2.1. Le modèle « produit »

Le *modèle produit* vise à identifier et organiser les caractéristiques d'un produit susceptibles d'influencer sa recyclabilité : les caractéristiques pertinentes sont celles qui influencent les performances des procédés appliqués lors de sa valorisation. L'amélioration de l'aptitude à la valorisation d'un produit pourra être améliorée en modifiant ces caractéristiques, comme envisagé dans la Partie 5 de ce chapitre.

Une structuration fine du modèle produit sera proposée dans la Partie 4.

2.2. Le modèle « valorisation »

Le modèle valorisation vise à définir tous les aspects d'un système de valorisation pouvant influencer la recyclabilité d'un produit. Toutes les notions utilisées dans l'élaboration du modèle valorisation sont définies dans les paragraphes suivants.

2.2.1. Définitions et organisation générale du modèle

Un *système de valorisation*^[1] est constitué de tous les scénarii de valorisation applicables à un produit en fin de vie.

Un *scénario de valorisation*^[2] est une association structurée de procédés de valorisation qui mènent au traitement total du produit en fin de vie.

Un *procédé de valorisation*^[3] permet la transformation du produit en fin de vie ou de quelques uns de ses composants. Le démontage manuel du produit, le tri des matières plastiques par gravimétrie, le recyclage de métaux ferreux, le recyclage de matières plastiques sont, par exemple, des procédés de valorisation.

Chaque *procédé* est réalisé par un acteur de valorisation par la mise en œuvre d'une, ou plusieurs, *opération(s) unitaire(s)*^[4]. Par exemple, le procédé de tri automatique de mélange de pièces plastiques par gravimétrie est réalisé par l'association des opérations unitaires broyage de pièces plastiques, tri gravimétrique des particules et séchage des particules.

Dans un scénario de valorisation, il peut exister plusieurs alternatives de mise en œuvre de procédés : par exemple, des pièces plastiques extraites d'un produit peuvent être triées soit par un procédé de tri par identification, soit par un procédé de tri gravimétrique de particules, après

broyage des pièces. La notion d'*étape de valorisation*^[1] est ainsi introduite : elle définit le segment du scénario de valorisation pouvant être réalisé par plusieurs procédés alternatifs. Des étapes types de valorisation sont par exemple : le démontage du produit, le tri de matériaux, le recyclage de matériaux, la valorisation énergétique, l'élimination.

Les niveaux *système*, *scénario*, *étape*, *procédé* et *opération unitaire* du modèle valorisation sont schématisés dans la Figure 2.7 suivante :

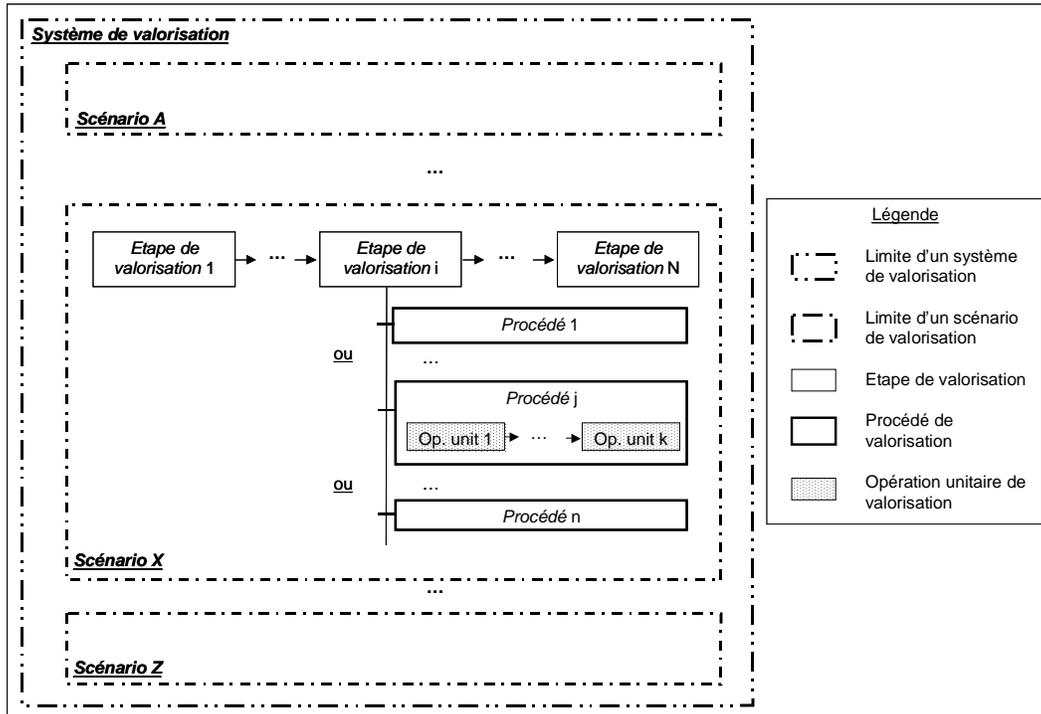


Figure 2.7. Schématisation des niveaux considérés dans le modèle modélisation.

Remarque terminologique : dans la Figure 2.6, les étapes de valorisation 1 à (i-1) sont en amont de l'étape de valorisation i ; les étapes (i+1) à N sont en aval de l'étape i.

Les paragraphes qui suivent consistent en une description des transformations subies par un produit ou ses composantes lors de la valorisation.

2.2.2. Définition d'une étape de valorisation

Une étape de valorisation est un segment de scénario de valorisation, qui conduit à la transformation du produit en fin de vie ou de quelques-uns de ses composants. Chaque étape de valorisation contribue à la réalisation d'une, ou plusieurs, fonction(s) technique(s). Dans la Table 2.3, nous définissons les fonctions des principales étapes de valorisation des PEEFV qui sont considérées dans la suite de la modélisation.

Table 2.3. Fonctions visées par les principales étapes contribuant à la valorisation d'un PEEFV.

Etape de traitement	Fonction(s) de l'étape
Démontage	(1) extraire les éléments dits « <i>polluants</i> ^[1] » qui, selon la législation, doivent être extraits et traités sélectivement (2) préparer les sous-ensembles aux étapes de valorisation en aval
Broyage	(1) libérer des pièces, sous-ensembles et matériaux (2) réduire la taille des éléments
Tri	(1) augmenter la concentration d'un mélange en un matériau / élément cible (2) éliminer d'un mélange un matériau / élément indésirable
Recyclage	produire des matières premières secondaires conformes aux exigences des clients
Valorisation énergétique	(1) produire de l'énergie secondaire (2) réduire la taille et la masse des déchets résiduels
Revente de matériau / énergie secondaire	garantir l'acceptation du matériau / de l'énergie secondaire par le marché au meilleur prix
Elimination de déchets par mise en décharge	éliminer les déchets résiduels de façon sûre
Etape de transport	transporter des éléments d'une unité de traitement à une autre

2.2.3. Définition d'une opération unitaire de valorisation

Dans notre modèle, toute *opération unitaire* de valorisation transforme des *entrants principaux*^[1], respectant les *conditions d'entrée*^[1], en *sortants principaux*^[1], issus du produit à valoriser. La mise en oeuvre de l'opération consomme des *entrants secondaires*^[1] et rejette des *sortants secondaires*^[1]. Le qualificatif « *principal* » s'applique à toutes les quantités de matières ou d'énergies générées à partir du produit en fin de vie. Le qualificatif « *secondaire* » s'applique à toutes les quantités de matières ou d'énergies non issus du produit en fin de vie mais dont la consommation et/ou le rejet sont induits par la mise en oeuvre de l'opération. Ces notions et les notations associées sont schématisées dans la Figure 2.8.

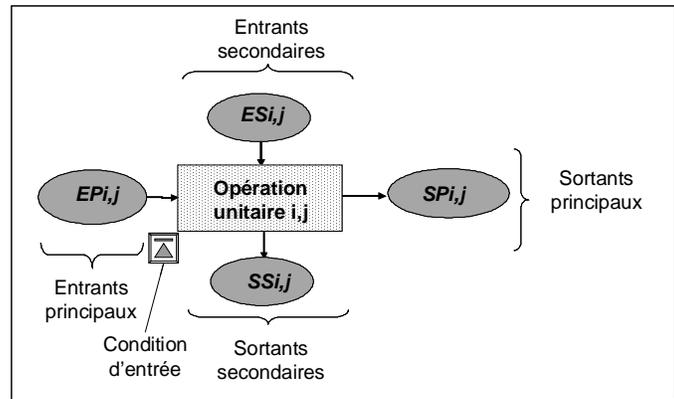


Figure 2.8. Représentation schématique des entrants et sortants principaux et secondaires consommés et rejetés par une opération unitaire de valorisation numérotée (i,j).

Avec :

EPI,j , les entrants principaux, c'est-à-dire les sous-ensembles, pièces, matériaux issus du produit à valoriser entrant dans l'opération unitaire,

SPi,j , les sortants principaux, c'est-à-dire les sous-ensembles, pièces, matériaux issus du produit et générés par l'opération unitaire ; ces sortants sont acheminés vers des opérations unitaires en aval,

ESi,j , les entrants secondaires, c'est-à-dire la matière et/ou l'énergie consommée par l'opération unitaire pour la transformation des entrants principaux,

SSi,j , les sortants secondaires, c'est-à-dire les éléments non issus du produit et rejetés par l'opération unitaire lors de la transformation des entrants principaux.

Pour la suite de l'exposé de la méthode, il est nécessaire de distinguer les différentes natures d'entrants et sortants principaux et secondaires. Cette distinction est établie dans la Table 2.4 suivante, avec l'utilisation des notations g,k,m et n :

Table 2.4. Ecriture mathématique des entrants et sortants principaux et secondaires d'une opération unitaire de valorisation numérotée (i,j).

Groupes	Ecriture mathématique
Entrants principaux	$EP_{(i,j)} = \sum_{g=1,NEi,j} EP_{(i,j)g}$ (2.1)
Sortants principaux	$SP_{(i,j)} = \sum_{k=1,NSi,j} SP_{(i,j)k}$ (2.2)
Entrants secondaires	$ES_{(i,j)} = \sum_{m=1,NESi,j} ES_{(i,j)m}$ (2.3)
Sortants secondaires	$SS_{(i,j)} = \sum_{n=1,NSSI,j} SS_{(i,j)n}$ (2.4)

Avec :

$EPI_{i,j}$, la masse d'entrants principaux de l'opération unitaire i,j ,
 $EPI_{i,j,g}$, la masse d'entrants principaux de type g de l'opération unitaire i,j ,
 $NEI_{i,j}$, le nombre de type d'entrants principaux de l'opération unitaire i,j ,
 $SPI_{i,j}$, la masse de sortants principaux de l'opération unitaire i,j ,
 $SPI_{i,j,k}$, la masse de sortants principaux de type k de l'opération unitaire i,j ,
 $NSI_{i,j}$, le nombre de type de sortants principaux de l'opération unitaire i,j ,
 $ESI_{i,j}$, la masse d'entrants secondaires de l'opération unitaire i,j ,
 $ESI_{i,j,m}$, la masse d'entrants secondaires de type m de l'opération unitaire i,j ,
 $NESI_{i,j}$, le nombre de type d'entrants secondaires de l'opération unitaire i,j ,
 $SSI_{i,j}$, la masse de sortants secondaires de l'opération unitaire i,j ,
 $SSI_{i,j,n}$, la masse de sortants secondaires de type n de l'opération unitaire i,j ,
 $NSSI_{i,j}$, le nombre de type de sortants secondaires de l'opération unitaire i,j ,

Remarque : certaines opérations unitaires de valorisation consomment comme entrants secondaires ou produisent comme sortants principaux et/ou secondaires une certaine quantité d'énergie. Dans ce cas, les entrants et sortants sont également caractérisés par la quantité d'énergie produite (exprimée en MJ par exemple).

Comme présentée sur la Figure 2.8, une opération unitaire de valorisation est de plus caractérisée par des conditions d'entrée : celles-ci représentent les conditions qui font qu'un entrant principal ne peut être accepté par l'opération : par exemple, un élément dit « polluant », tel qu'une batterie ou un tube cathodique, ne peut être éliminé en décharge puisque, selon la directive DEPEEFV, un traitement sélectif doit lui être appliqué.

2.2.4. Définition d'un procédé de valorisation

Un *procédé de valorisation* est une association d'opérations unitaires réalisées chez un acteur de la valorisation qui contribue à la réalisation d'une étape de valorisation. C'est un ensemble d'opérations unitaires associées en série et/ou en parallèle (cf. Figure 2.9).

Comme une opération unitaire, un procédé de valorisation transforme des entrants principaux en sortants principaux tout en consommant des entrants secondaires et en rejetant des sortants secondaires.

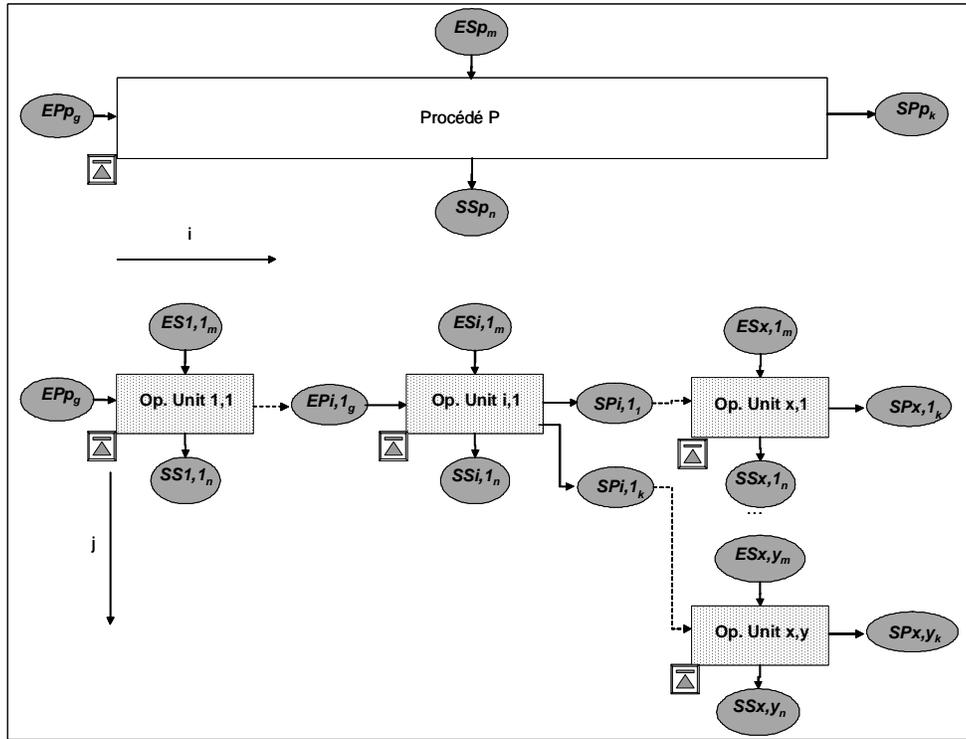


Figure 2.9. Représentation schématique de la construction d'un procédé de valorisation par l'association d'opérations unitaires de valorisation.

Les entrants et sortants principaux et secondaires d'un procédé P, combinaison d'opérations unitaires numérotées (i,j), sont établis par les relations de la Table 2.5.

Table 2.5. Ecriture mathématique des entrants et sortants principaux et secondaires d'un procédé de valorisation.

Groupes	Ecriture mathématique
Entrants principaux	$EP_P = \sum EP_g \quad (2.5)$
Sortants principaux	$SP_P = \sum_{j=1,y} SP_{(x,j)_k} \quad (2.6)$
Entrants secondaires	$ES_P = \sum_{i=1,x} \left(\sum_{j=1,y} ES_{(i,j)_m} \right) \quad (2.7)$
Sortants secondaires	$SS_P = \sum_{i=1,x} \left(\sum_{j=1,y} SS_{(i,j)_n} \right) \quad (2.8)$

Avec :

x, le numéro de la dernière opération unitaire d'une ramification formant le procédé,

y, le nombre de ramifications dans la combinaison d'opérations unitaires,

EP_P , la masse d'entrants principaux du procédé P,

SP_P , la masse de sortants principaux du procédé P,

$SP_{i,j}$, la masse de sortants principaux de l'opération unitaire (i,j),
 ES_P , la masse d'entrants secondaires du procédé P,
 $ES_{i,j}$, la masse d'entrants secondaires de l'opération unitaire (i,j),
 SS_P , la masse de sortants secondaires du procédé P,
 $SS_{i,j}$, la masse de sortants secondaires de l'opération unitaire (i,j),

Un procédé de valorisation présente également des conditions d'entrée.

Comme établi dans le Chapitre 1, de très nombreux procédés différents sont appliqués aujourd'hui lors de la valorisation industrielle des PEEFV ; d'autres procédés prometteurs sont en cours de développement, au stade pilote ou au stade de recherche.

2.2.5. Définition d'un scénario de valorisation

De la même façon que des opérations unitaires sont combinées pour former un procédé de valorisation, les procédés de valorisation sont combinés pour former une chaîne linéaire ou ramifiée appelée scénario de valorisation, qui transforme entièrement un produit en matières premières secondaires et en déchets, en consommant des entrants secondaires et en rejetant des sortants secondaires. Cette construction est détaillée dans l'Annexe 3.

2.3. Les indicateurs de recyclabilité : une évaluation de l'adéquation entre produit et procédés de valorisation

Le modèle produit regroupe toutes les caractéristiques d'un produit influençant sa recyclabilité ; le modèle valorisation permet d'appréhender les performances des procédés de valorisation contribuant à la valorisation d'un produit en fin de vie. Les indicateurs de recyclabilité visent à relier ces deux modèles et permettent d'évaluer l'adéquation du produit avec le scénario de valorisation qui lui est appliqué.

2.3.1. Contribution des procédés de valorisation à la recyclabilité de produit

Les procédés de valorisation ont un impact sur la recyclabilité de produit : cet impact, encore appelé *contribution*^[1], peut être positif ou négatif.

Une contribution négative d'un procédé à la recyclabilité d'un produit se traduit par une diminution de l'aptitude à la valorisation du produit ; elle correspond :

- pour le critère massique, à la masse de matière issue du produit et éliminée à la sortie du procédé,
- pour le critère économique, à une augmentation du coût de la valorisation du produit,
- pour le critère environnemental, à une augmentation de l'impact environnemental de la valorisation.

Une contribution positive d'un procédé à la recyclabilité d'un produit contribue à augmenter l'aptitude du produit à la valorisation en fin de vie ; elle correspond :

- pour le critère massique, à la transformation et à l'utilisation d'un élément issu du produit en énergie ou matériau d'origine secondaire,
- pour le critère économique, à la valeur ajoutée apportée par le procédé à l'entrant principal,
- pour le critère environnemental, à l'économie de ressources réalisée lors de la revente des matériaux / énergies secondaires.

Les contributions positives et négatives des procédés à la recyclabilité de produit sont liées à la fois aux performances des procédés mis en œuvre et aux propriétés du produit. Elles sont présentées précisément pour chaque critère dans le prochain paragraphe.

2.3.2. Calcul des indicateurs de recyclabilité

Le calcul des indicateurs de recyclabilité d'un produit pour un scénario de valorisation donné vise à établir :

- Le pourcentage massique du produit qui est valorisé ; l'indicateur est appelé **Indicateur Massique de Recyclabilité, IMR**, et est exprimé en pourcentage massique (%) ;
- Le coût (éventuellement le bénéfice économique) de la valorisation du produit ; l'indicateur est appelé **Indicateur Economique de Recyclabilité, IER**, et est exprimé en € par produit, ou encore en € par unité de masse de produit ; par convention, l'IER est positif s'il représente un coût pour le dernier détenteur et négatif s'il représente un bénéfice économique ;
- L'impact (éventuellement le bénéfice) environnemental induit par la valorisation du produit ; l'indicateur est appelé **Indicateur d'Impact Environnemental de Recyclabilité, IIER**, et est exprimé dans les unités relatives aux classes d'impacts environnementaux ; par convention, l'IIER est positif s'il représente un impact environnemental et est négatif s'il représente un bénéfice environnemental. Les classes d'impact considérées lors de l'application à des études de cas seront précisées au Chapitre 3.

Les paragraphes suivants définissent pour chacun des critères de recyclabilité le mode de calcul des contributions positives et négatives des procédés sur la recyclabilité de produit.

↳ **Indicateur massique de recyclabilité : hypothèses et calcul**

• Contenu de l'indicateur IMR

Pour l'IMR, comme suggéré dans des textes législatifs de la DEPEEFV et DEVHU, il convient de distinguer l'indicateur massique de recyclage (IMR_R) et l'indicateur massique de valorisation (IMR_V) : le premier établit la part massique du produit destinée à la réutilisation et au recyclage matière ; le deuxième établit la part massique du produit destinée à la réutilisation, au recyclage matière et à la valorisation énergétique.

• Contributions des procédés à la recyclabilité de produit

Pour chaque procédé de valorisation, la masse de déchets principaux générés représente la contribution négative du procédé ; la masse des entrants principaux transformée en matériau / énergie secondaire représente sa contribution positive.

- Mode de calcul de l'indicateur

L'indicateur massique de recyclabilité est calculé en réalisant la somme algébrique des contributions positives et négatives de tous les procédés formant le scénario de valorisation. Un scénario étant une succession de x procédés comptant y ramifications, nos deux sous indicateurs s'écrivent :

$$IMR_V = 1 - \frac{\sum_{i=1,x;j=1;y} SPi, j_{Déchets}}{masse_du_produit} \quad (2.9)$$

$$IMR_R = 1 - \frac{\sum_{i=1,x;j=1;y} SPi, j_{Déchets} + \sum_{i=1,x;j=1;y} SPi, j_{Energie}}{masse_du_produit} \quad (2.10)$$

Avec :

$SPi, j_{Déchets}$, la masse de déchets générée comme sortant principal par le procédé (i,j),

$SPi, j_{Energie}$, la masse de matériau transformée en énergie par le procédé (i,j),

$masse_du_produit$, la masse du produit en fin de vie.

↳ **Indicateur économique de recyclabilité : hypothèses et calcul**

Dans le domaine de la valorisation de produits en fin de vie, quelques-unes des relations économiques existant entre les acteurs ne sont pas classiques puisque certains flux financiers entre acteurs sont dirigés du fournisseur vers l'acquéreur : pour le transfert de certains éléments, notamment ceux considérés comme toxiques et qui nécessitent un traitement adapté, l'acquéreur est payé pour débarrasser le fournisseur. Une telle particularité doit être soigneusement prise en compte lors du calcul de l'IER.

- Contenu de l'indicateur IER

L'IER est le coût (ou le bénéfice économique) supporté par la personne ou l'organisation responsable financièrement de la valorisation du produit ; l'IER est égal, au signe près, à la somme d'argent reçue (ou versée) par le premier acteur de la chaîne de procédés du dernier détenteur. Pour ce premier acteur, cette somme d'argent est fonction de l'agrégation des coûts de mise en œuvre de ses procédés et des coûts / bénéfices du traitement par les filières en aval. Cette agrégation est schématisée sur la Figure 2.10 :

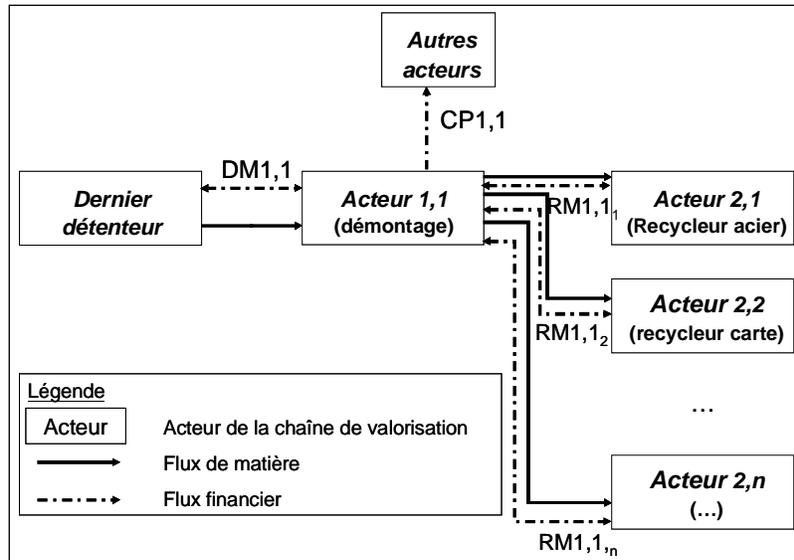


Figure 2.10. Représentation schématique des flux de matières et des flux monétaires partant et arrivant à l'acteur mettant en œuvre le premier procédé de la chaîne de valorisation.

Avec :

$DM_{i,j}$, les dépenses de l'acteur (i,j) pour acquérir les éléments à traiter ; elles sont exprimées en €/kg d'élément acquis ; par convention, elles sont négatives si l'acteur paye pour acquérir les éléments, et positives si l'acteur est payé ;

$CP_{i,j}$, les coûts de mise en œuvre du procédé, incluant coûts fixes et coûts de fonctionnement ; ces coûts sont exprimés en €/kg d'élément traité ; ils sont négatifs,

$RM_{i,j}$, les recettes de l'acteur (i,j) lors du transfert des éléments produits vers des acteurs de la valorisation en aval ; elles sont exprimées en €/kg d'élément transféré ; elles sont positives si l'acteur est payé lors du transfert d'éléments et négatives si l'acteur paye.

Remarque : dans la Figure 2.10, le « dernier détenteur » est la personne ou l'organisation assumant financièrement la valorisation du produit en fin de vie.

- Contributions des procédés à l'indicateur IER

Pour chaque procédé de valorisation, les coûts de mise en œuvre représentent la contribution négative du procédé à la recyclabilité économique du produit ; les bénéfices économiques représentent la contribution positive du procédé à la recyclabilité économique du produit.

- Mode de calcul de l'indicateur IER

En pratique, il n'est pas toujours possibles de calculer les contributions de chaque procédé à l'IER : les coûts de mise en œuvre sont en effet rarement connus pour tous les procédés ; la valeur économique des entrants et sortants principaux, et ainsi la valeur ajoutée apportée par

les procédés, ne sont généralement pas connus non plus. Il est donc nécessaire de réaliser une simplification du calcul.

Cette simplification est réalisée en observant que certaines contributions positives et négatives de procédés consécutifs s'annulent mutuellement : les revenus liés à la revente de sortants principaux par un acteur (i,j) sont égaux, au signe près, aux dépenses d'acquisition d'entrants principaux des acteurs (i+1,j). En conclusion, la contribution négative d'une chaîne de procédés de valorisation est donc constituée des coûts de mise en œuvre des procédés et des coûts d'élimination des déchets ; sa contribution positive est composée des bénéfices réalisés lors de la revente de matériaux / énergie secondaires, comme schématisé sur la Figure 2.11

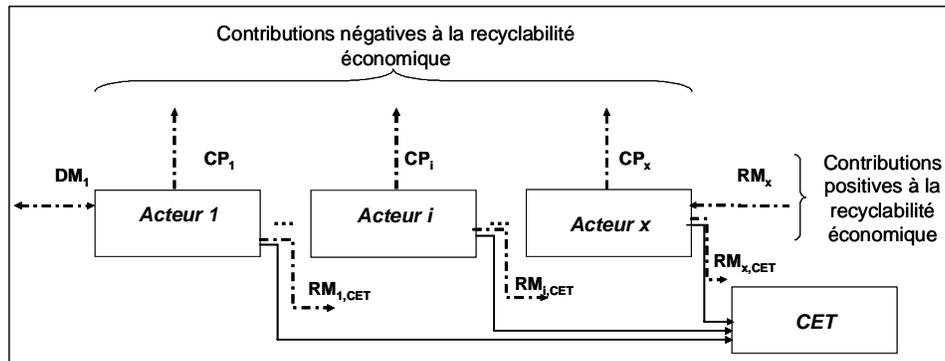


Figure 2.11. Schématisation des flux financiers contribuant à l'IER dans une chaîne de procédés.

En reprenant les notations des Figures 2.9 et 2.10, l'IER peut donc s'écrire :

$$IER = -DM_{1,1} = \sum_{i=1,x} \left(\sum_{j=1,y} (EP(i,j) \times CP_{i,j} + SP_{i,j_{déchét}} \times \gamma_{déchét}) \right) - \sum_{j=1,y} SP_{x,j_k} \times \gamma_k \quad (2.11)$$

Avec :

$EP(i,j)$, la masse d'entrant principal du procédé (i,j),

$CP_{i,j}$, les coûts de mise en œuvre du procédé (i,j) pour traiter les entrants principaux,

$SP_{i,j_{déchét}}$, la masse de déchets principaux générés par le procédé (i,j),

SP_{i,j_k} , la masse de sortants principaux (autres que les déchets) de type k,

SP_{x,j_k} , la masse de sortants recyclés de type k,

$\gamma_{déchét}$, le coût d'élimination d'une unité de masse de déchet,

γ_k , le cours économique d'une unité de masse de matière recyclée de type k.

Dans l'équation (2.11), le premier membre représente les contributions négatives ; le second représente les contributions positives du scénario de valorisation.

De nouveau, les valeurs numériques des grandeurs de cette équation ne sont pas toutes connues pour tout scénario de valorisation. Il convient donc de définir une méthode permettant une simplification du mode de calcul de l'indicateur. La méthode que nous proposons consiste à

baser le calcul sur un scénario de référence pour lequel toutes les caractéristiques économiques du premier acteur sont connues et pour lequel l' $IER_{référence}$ peut donc être calculé. Pour un scénario alternatif, peu différent du scénario de référence, il est possible de calculer l' $IER_{alternatif}$ en retranchant à l' $IER_{référence}$ les différences de revenus des filières alternatives. Le mode opératoire complet de cette méthode est exposé dans l'Annexe 4.

↳ **Indicateur environnemental de recyclabilité : hypothèses et calcul**

• Contenu de l'indicateur IIER

L'IIER est une évaluation des impacts environnementaux de la valorisation d'un produit en fin de vie : ils sont constitués des impacts des procédés mis en œuvre, auxquels sont retranchés les bénéfices environnementaux liés à la production et à la réutilisation de matériaux et d'énergies secondaires.

• Contributions des procédés à l'indicateur IIER

Pour chaque procédé, les impacts environnementaux liés à sa mise en œuvre représentent la contribution négative du procédé à la recyclabilité environnementale du produit. Les impacts environnementaux évités au moment de la réutilisation de matériaux / énergies secondaires représentent la contribution positive de la chaîne de valorisation à la recyclabilité environnementale du produit.

• Mode de calcul de l'indicateur IIER

L'IIER est calculé en réalisant la somme algébrique des contributions négatives des procédés mis en œuvre et des contributions positives des procédés revendeurs de matériau/énergie secondaires. Conformément aux conventions établies dans les Figures 2.9 et 2.10, l'IIER selon la classe d'impact environnemental l s'écrit:

$$IIER_l = \sum_{i=1,x} \left(\sum_{j=1,y} (ESi,j_m \times \eta IP_m + SSi,j_n \times \eta IR_n + SPi,j_{déchet} \times \eta ID_{déchet}) \right) - \sum_{j=1,y} SPx,j_k \times \eta IP_k \quad (2.12)$$

Avec :

x , le numéro des derniers procédés de la chaîne de procédés, revendeurs de matières premières ou d'énergie secondaire,

y , le nombre de ramifications de la chaîne de procédés de valorisation,

SPi,j_k , la quantité de sortant principal (autre que déchet) de type k généré par le procédé (i,j) ,

$SPi,j_{déchet}$, la masse de déchet principal générée par le procédé (i,j) ,

ESi,j_m , la quantité d'entrant secondaire de type m consommé par le procédé (i,j) ,

SSi,j_n , la masse de sortant secondaire de type n rejeté par le procédé (i,j) ,

ηIP_k , l'impact environnemental selon la classe d'impact l lié à la production d'une unité de quantité de sortant principal de type k ,

ηIR_n , l'impact environnemental selon la classe d'impact I lié au rejet dans l'environnement d'une unité de masse de rejet de type n,

$\eta ID_{déchét}$, l'impact environnemental selon la classe d'impact I lié à l'élimination d'une unité de masse de déchet.

Le premier membre de l'équation (2.12) regroupe les contributions environnementales négatives du scénario ; le deuxième regroupe les contributions environnementales positives du scénario.

Les contributions environnementales négatives d'un scénario incluent donc les impacts environnementaux associés aux consommations d'entrants principaux et ceux associés aux rejets de sortants secondaires et de déchets principaux. Les valeurs numériques des impacts environnementaux associés à ces consommations et rejets sont disponibles dans les bases de données d'Analyse de Cycle de Vie.

Les contributions environnementales positives d'un scénario sont détaillées. Puisque la génération d'un sortant principal par un scénario de valorisation permet d'éviter sa production à partir de matières vierges, ce sortant principal représente un bénéfice environnemental alloué au scénario de valorisation. Cette contribution positive est proportionnelle aux quantités des sortants principaux du scénario pondérées par le contenu environnemental des sortants.

Si un sortant principal est de l'énergie, sous forme thermique ou électrique, la contribution environnementale positive est la quantité d'énergie produite pondérée par l'impact environnemental de la production d'une unité de cette même énergie pour le modèle énergétique en vigueur dans la région considérée (cas de figure 1 de la Figure 2.12 suivante).

Si le sortant principal est un matériau recyclé, ou matière première secondaire, deux cas de figures se présentent :

- soit le contenu environnemental ηIP des sortants secondaires est parfaitement connu et disponible dans les bases de données ACV : l'IIER est alors directement calculable ; c'est le cas par exemple des métaux précieux d'origine secondaire, dont la qualité et donc le contenu environnemental sont équivalents aux métaux précieux d'origine vierge ;
- soit le contenu environnemental ηIP des sortants secondaires n'est pas connu : c'est notamment le cas des matières plastiques recyclées dont les propriétés mécaniques sont dégradées par rapport aux propriétés des matières plastiques d'origine vierge. Le contenu environnemental de la matière recyclée est fonction de la nature et de la quantité de matériau d'origine primaire dont la production est évitée ; ainsi :
 - si le matériau recyclé remplace une matière dont le contenu environnemental est connu, c'est ce contenu qui est considéré (cas de figure 2 de la Figure 2.12),

- o si le matériau recyclé remplace le même matériau d'origine vierge, puisque ses propriétés sont en général inférieures à celles du matériau vierge, une quantité de matière recyclée supérieure à la quantité de matière vierge est consommée pour réaliser une pièce : un coefficient de substitution lui est alors appliqué (cas de figure 3 de la Figure 2.12). Comme proposé par (FLEISCHER 2000) pour l'outil logiciel euroMat' pour la résistance à la traction, le *coefficient de substitution*[□] KS est le rapport entre la masse de matériau vierge et la masse de matériau recyclé nécessaires à la réalisation d'une même pièce. Ainsi :

$$KS = \frac{\text{masse_matériau_vierge}}{\text{masse_matériau_recyclé}} ; \text{ en général } 0 < KS < 1 \quad (2.13)$$

Il convient d'établir selon quel critère doit être calculé KS . Jusqu'ici, les scénarii de valorisation ont été définis jusqu'à la revente, et donc la réutilisation, des matériaux d'origine secondaire : pourtant, les spécifications que doit respecter le matériau d'origine secondaire dans un cycle de vie en aval ne sont pas disponibles ; il est ainsi considéré que le matériau est destiné à la même application et KS est calculé en considérant les spécifications mécaniques de la pièce en cours de conception. Ainsi, aux N spécifications d'ordre mécanique devant être respectées par la pièce, correspondent N valeurs du coefficient de substitution, KS_1 à KS_N . Puisque le matériau secondaire n'est employé que s'il respecte l'ensemble des spécifications de la pièce, le facteur de substitution choisi pour le calcul des indicateurs de recyclabilité est le minimum des coefficients de substitution :

$$KS = \underset{i=1,N}{\text{minimum}}(KS_i) \quad (2.14)$$

Le contenu environnemental du matériau recyclé revendu est ainsi le contenu environnemental de la matière vierge multiplié par le coefficient KS . La contribution positive d'un scénario à la recyclabilité environnementale d'un produit s'écrit alors :

$$\sum_{j=1,y} SP_{x,jk} \times \eta IP_{k_secondaire} = \sum_{j=1,y} SP_{x,jk} \times KS_k \times \eta IP_{k_vierge} \quad (2.15)$$

Avec :

x , le numéro des derniers procédés de la chaîne, revendeurs de matières premières ou énergie secondaire

$SP_{i,jk}$, la masse de sortants principaux de type k produits par du procédé (i,j) ,

$\eta IP_{k_secondaire}$, le bénéfice environnemental selon la classe d'impact I lié à la production d'une unité de masse de matériau de type k et d'origine secondaire,

ηIP_{k_vierge} , l'impact environnemental selon la classe d'impact I lié à la production d'une unité de masse de matériau de type k et d'origine primaire,

KS_k , le coefficient de substitution du matériau de type k

Tous les cas de figures décrits dans ce paragraphe sont schématisés dans la Figure 2.12.

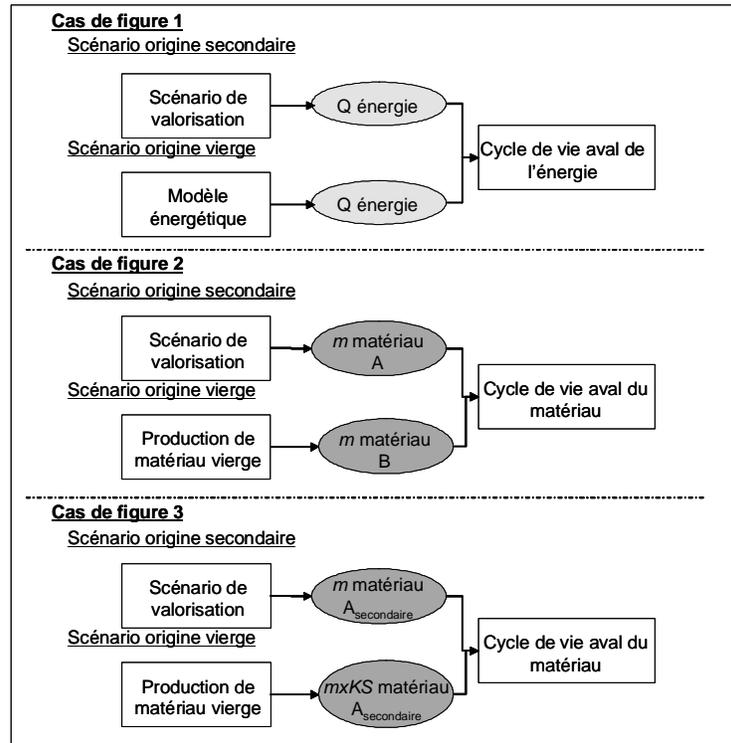


Figure 2.12. Les différents cas de figures du calcul de l'IIER.

↳ Synthèse des périmètres des trois indicateurs de recyclabilité

En synthèse de la définition du mode de calcul des indicateurs de recyclabilité, les périmètres considérés pour chaque critère sont représentés sur la Figure 2.13 suivante.

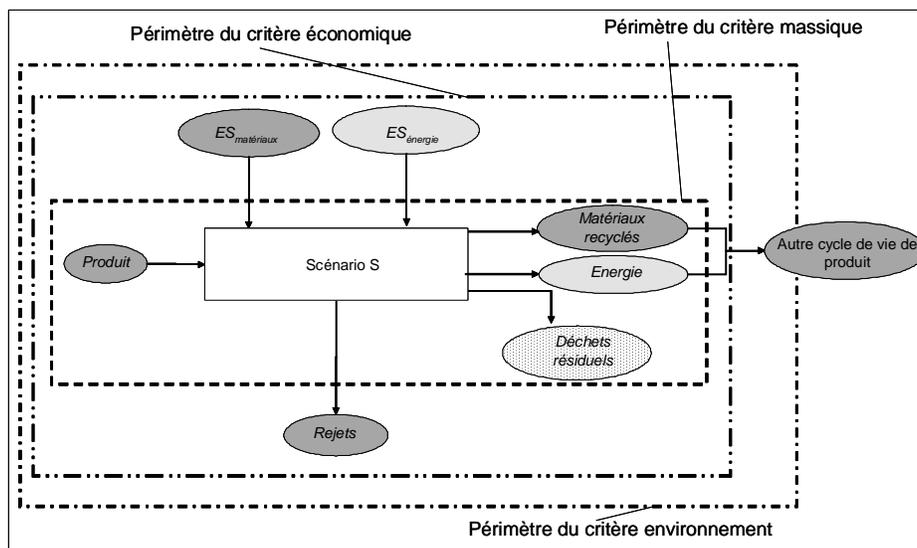


Figure 2.13. Périmètres considérés pour les critères de recyclabilité considérés.

2.3.3. Synthèse : évolutions des indicateurs de recyclabilité lors de la mise en œuvre d'un scénario de valorisation

Afin de mieux comprendre les notions de contributions positives et négatives de procédés à la recyclabilité d'un produit, la Figure 2.14 représente graphiquement et qualitativement les évolutions des trois indicateurs lors de l'enchaînement de procédés de valorisation.

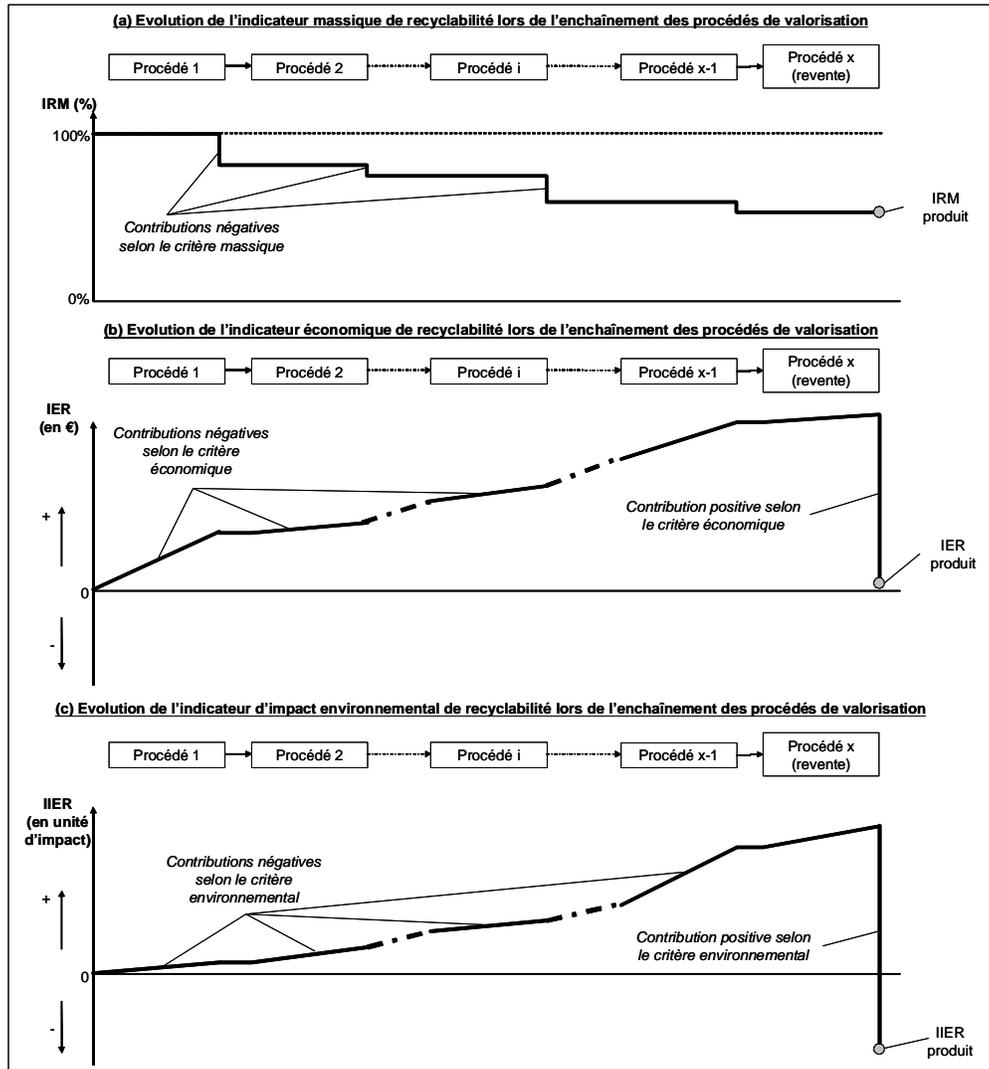


Figure 2.14. Evolutions des indicateurs de recyclabilité au cours de l'enchaînement des procédés de valorisation : (a) indicateur massique de recyclabilité (b) indicateur de recyclabilité économique (c) indicateur d'impact environnemental de recyclabilité.

Partie 3. Structuration du modèle valorisation

3.1. Objectifs

Dans la partie précédente, l'organisation générale du modèle valorisation a été définie. Il s'agit maintenant de déterminer comment les composantes du modèle sont modélisées.

La modélisation d'un scénario de valorisation découle de la modélisation des procédés qui le constituent. Dans ce paragraphe, un format commun aux procédés contribuant à la réalisation d'une étape de valorisation est proposé. La modélisation des étapes et procédés de valorisation présentée ici vise à déterminer dans quelles mesures les procédés influencent la recyclabilité d'un produit. Il s'agit ainsi de définir les performances des étapes/procédés, c'est-à-dire :

- D'évaluer dans quelle mesure la fonction visée, telle que définie dans la Table 2.3, est réalisée, et de connaître les transformations subies par les entrants principaux,
- De déterminer la quantité et la nature des déchets générés au cours de l'étape,
- D'établir le bilan économique du procédé,
- D'établir un bilan environnemental du procédé.

Dans les paragraphes qui suivent, cinq étapes de valorisation qui seront utilisées lors de l'application à des études de cas, sont modélisées : le démontage de produit, le tri de matériaux ou de pièces, le recyclage de matériau, l'incinération avec récupération d'énergie, la revente de matériaux secondaires. Pour chaque étape, la fonction est rappelée et précisée, les conditions d'entrée et les hypothèses sont établies et un format générique de modélisation est proposé. Le format générique identifie notamment les performances des procédés, permettant d'établir les transformations subies par les entrants principaux, et les contributions aux indicateurs multicritères de recyclabilité.

Chaque étape de valorisation est illustrée par la modélisation d'un ou plusieurs procédé(s) spécifique(s), utilisé(s) lors de l'application à des études de cas. Les données chiffrées utilisées dans ces modélisations sont des valeurs empiriques obtenues auprès des acteurs de la valorisation.

3.2. Etape de démontage manuel

Plus que toute autre étape de valorisation, le démontage manuel d'un produit complexe en fin de vie est extrêmement difficile à modéliser pour les raisons suivantes :

- Le démontage d'un produit est une succession d'opérations unitaires (dévissage, déclipage, manipulation de pièces, etc...) réalisées selon des gammes diverses,
- Le démontage est hautement fluctuant avec le temps : les gammes de démontage sont pleinement dépendantes des cours économiques des sortants principaux.

3.2.1. Objectif d'une étape de démontage manuel

Une étape de démontage vise la séparation des éléments d'un sous-ensemble, de sorte que certains éléments dits « polluants », soient traités conformément aux prescriptions de la directive DEPEEFV, et que les autres sortants respectent les conditions d'entrée des filières de valorisation en aval.

3.2.2. Conditions d'entrée d'une étape de démontage manuel

Afin d'être démonté manuellement, un produit ou un sous-ensemble ne doit pas présenter un caractère dangereux^[1] pour l'opérateur. Toute étape de démontage devant mener à la manipulation d'un élément dangereux ne peut pas être réalisée par un démontage manuel.

3.2.3. Modélisation d'une étape de démontage manuel

Soit EP un produit ou un sous-ensemble composé de N éléments destinés à des étapes de valorisation en aval distinctes. L'étape de démontage transforme EP en $(N+1)$ mélanges SP_j qui sont orientés vers $(N+1)$ destinations différentes, dont une est l'élimination. La structure de chacune des composantes des mélanges est conservée. La gamme du démontage est déterminée par les conditions d'entrée et les performances des filières de valorisation en aval. La transformation est représentée sur la Figure 2.15 suivante:

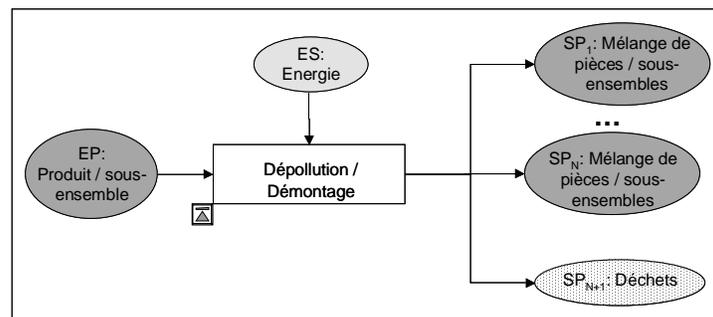


Figure 2.15. Transformation d'un produit ou d'un sous-ensemble au cours d'un procédé de démontage manuel.

Les sortants principaux orientés vers l'élimination sont ceux pour lesquels aucun procédé de valorisation en aval n'est applicable à un coût supportable par le dernier détenteur.

Lors d'une étape de démontage, le critère de recyclabilité économique est prépondérant : les performances du procédé vis-à-vis de ce critère sont, en particulier, liées aux coûts de mise en œuvre, fonctions du temps de démontage et du coût de main d'œuvre. A chaque opération unitaire de démontage est alloué un temps de démontage générique, propre au type de *liaison*^[1] et au nombre de *fixations*^[1] constituant la liaison. La Table 2.6 résume les temps de démontage alloués à plusieurs opérations unitaires de démontage. Ces temps ont été établis lors d'expériences de démontage de produits menés à l'ENSAM Chambéry et sont cohérents avec les données d'autres sources, notamment avec celles de C. Boks (BOKS 2002)

Table 2.6. Temps de démontage alloués à quelques opérations unitaires de démontage.

Opérations unitaires	Manipulation d'un élément	Dévisage	Déclipsage	Destruction d'une liaison collée
Temps pour chaque opération	3s par élément manipulé	3s par vis	1.5 s par clips	Variable

Souvent, une opération de démontage est effectuée pour extraire un élément problématique, qui est donc entièrement responsable de l'opération et il convient d'établir des règles d'allocation du temps (donc du coût) du démontage aux sortants générés. La règle suivante d'allocation est adoptée dans notre modèle :

- si le démontage du sous-ensemble génère un sortant présentant un caractère « polluant », alors le temps de démontage est alloué à ce seul sous-ensemble ; si le procédé de démontage génère plusieurs sortants présentant ce caractère, alors le temps de démontage est alloué à chacun de ces sortants au prorata de la masse,
- si un sous-ensemble à démonter ne contient pas d'élément présentant ce caractère, alors le temps de démontage est alloué à chacun des sortants au prorata de la masse.

Une règle similaire d'allocation de l'impact environnemental du procédé aux sortants principaux est adoptée.

Les grandeurs nécessaires à la modélisation complète d'un démontage manuel sont répertoriées dans la Table 2.7. Elles sont en particulier renseignées pour le procédé d'extraction du tube cathodique d'un téléviseur, procédé intégré au scénarii 1, 2 et 3 de l'étude de cas n°4 du Chapitre 3.

Table 2.7. Grandeurs nécessaires à la modélisation d'une étape de démontage manuel ; contributions aux indicateurs IMR, IER et IIER.

Type de démontage	Transformation	IMR Contribution négative	IER		IIER	
			Contribution négative	Contribution positive	Contribution négative	Contribution positive
Générique	Masse et type des SP_j pour $1 < j < N$ – Masse et classe de SP_{N+1}	Masse de SP_{N+1}	Temps de démontage – Coût de traitement des éléments dits « polluants » - Masse et nature des SP_{N+1}	Revenu de revente des SP	Type et quantité des ES – Masse et classe de SP_{N+1}	0

Extraction du tube d'un téléviseur	SP_1 = tube du téléviseur SP_2 = reste du téléviseur	0	Coût démontage = 0.5€ / tube	0	Consommation électrique : négligeable	0
------------------------------------	---	---	------------------------------	---	---------------------------------------	---

Remarque : La modélisation du démontage est ici largement simplifiée et les enseignements concernant la *démontabilité* lors de l'application de la méthode à des études de cas seront limités. Pressentant l'importance et la complexité du démontage de produits complexes en fin de vie, l'ENSAM Chambéry a initié en 2001, dans le cadre du programme régional « Concevoir Propre », des recherches doctorales visant à explorer les critères de démontabilité de produits et de pièces. Ces travaux devraient définir une méthodologie d'évaluation de désassemblage de produit, s'appuyant notamment sur une modélisation plus fine du démontage de produit, sur l'appréciation de l'aptitude d'un composant à être démonté, et sur la détermination de gammes optimales de démontage. Cette méthodologie devrait permettre d'améliorer la conception du produit du point de vue de sa démontabilité. Elle devrait être complémentaire de la recherche présentée dans ce mémoire.

3.3. Etape de tri

3.3.1. Objectif d'une étape de tri

Le tri a pour objectif de préparer un mélange de pièces ou de matériaux à des étapes de valorisation en aval, en particulier le recyclage et la valorisation énergétique, en conférant au mélange des caractéristiques conformes aux conditions d'entrée des étapes en aval. Les caractéristiques du mélange affectées par le tri sont liées à sa composition : l'objectif est soit d'augmenter la concentration du mélange en un matériau ciblé, soit d'extraire un matériau non désiré.

3.3.2. Conditions d'entrée d'une étape de tri

La composition de l'entrant principal et son état physique (par exemple la taille des pièces ou des particules) peuvent être concernés.

3.3.3. Modélisation d'une étape de tri

Soit EP un mélange composé de n composés distincts de concentration en matériau i : $X_{EP,i}$. Une étape de tri transforme le mélange EP en N_{SP} mélanges SP_j constitués de n matériaux distincts et de concentration en matériau i : $X_{SP_j,i}$. Elle peut aussi produire une fraction SP_{N+1} de déchets. Le tri des matériaux est réalisé en fonction d'un critère de séparabilité propre à chaque procédé de tri. Des quantités de matières et d'énergies sont consommées et des matières sont rejetées. Cette transformation est représentée sur la Figure 2.16 suivante:

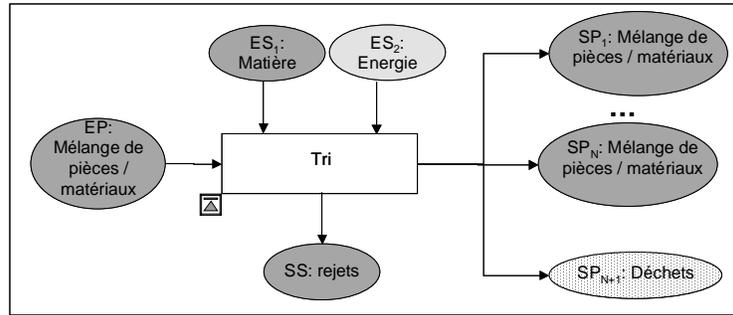


Figure 2.16. Transformation d'un mélange de matériaux ou de pièces au cours d'un procédé de tri.

Les grandeurs *taux de récupération*^[1] et *taux de purification*^[1] sont souvent considérés comme performances d'une étape de tri (cf. par exemple (SHEN 1999)).

Le taux de récupération d'un matériau *i* dans un sortant principal *j* est défini par la fraction de la masse du matériau *i* de l'entrant principal qui est récupérée dans le sortant principal *j* :

$$Récup_{Tri,i,j} = \frac{SP_j \times X_{SP_j,i}}{EP \times X_{EP_i}} \quad (2.16)$$

Le taux de purification d'un matériau *i* dans un sortant principal *j* est le taux d'accroissement de la pureté de *i* lors de son passage de l'entrant principal vers le sortant principal *j*, soit :

$$Purif_{Tri,i,j} = \frac{X_{SP_j,i}}{X_{EP_i}} \quad (2.17)$$

Les grandeurs nécessaires à la modélisation complète d'un tri sont répertoriées dans la Table 2.8. Elles sont en particulier renseignées pour les procédés de tri de plastiques par gravimétrie, par « froth-flotation » et par identification spectrométrique, procédés respectivement intégrés au scénario 2 de l'étude de cas n°4 et aux scénarii A et B de l'étude de cas n°5 présentées au Chapitre 3.

Table 2.8. Grandeurs nécessaires à la modélisation d'une étape de tri ; contributions aux indicateurs IMR, IER et IIER.

Type de tri	Transformation	IMR Contribution négative	IER		IIER	
			Contribution négative	Contribution positive	Contribution négative	Contribution positive
Générique	Masse et composition en matériau des SP_j pour $1 < j < N$ – masse et classe de SP_{N+1}	Masse de SP_{N+1}	Coût du procédé	0	Type et quantité des ES – masse et classe de SP_{N+1}	0

Chaîne de procédés d'un tri gravimétrique	<ul style="list-style-type: none"> Taux de récupération du PP = 90% Pureté du PP trié = 98% Taux de récupération des autres matériaux = 0% 	<ul style="list-style-type: none"> Perte de 10% du PP Perte de 100% des autres matériaux 	0.2€/kg de EP	0	Consommation d'eau et électricité – Rejet de $SP_{Déchets}$ de classe 2	0
Tri par « Froth flotation »	<ul style="list-style-type: none"> Taux de récupération du PP= 80%, de l'HIPS=83%, de l'ABS=78% Pureté du PP, de l'HIPS, de l'ABS triés = 98% Taux de récupération des autres matériaux = 0% 	<ul style="list-style-type: none"> Perte de 20% du PP, de 17% de l'HIPS, de 22% de l'ABS Perte de 100% des autres matériaux 	0.016€/kg de EP	0	Consommation d'électricité (0.015MJ/kg EP), d'eau et de produits chimiques ; Rejets de $SP_{Déchets}$ de classe 2	0
Identification spectrométrique	<ul style="list-style-type: none"> Taux de récupération de l'ABS, ABS-FR, HIPS, HIPS-FR = 99.9% Pureté des ABS et des HIPS sortants = 99.9% Taux de récupération des autres matériaux = 0% 	<ul style="list-style-type: none"> Pertes de 0.1% des ABS et des HIPS ; Perte de 100% des autres matériaux 	0.025€/kg de EP	0	Consommation d'électricité : 0.014MJ/ pièce – Rejet de $SP_{Déchets}$ de classe 2	0

Remarque : dans les procédés de tri recensés, la pureté sortante, et non le taux de purification, a pu être établie.

3.4. Etape de recyclage

3.4.1. Objectifs de l'étape

Une étape de recyclage a pour objectif de produire des matières premières secondaires conformes aux exigences du client.

3.4.2. Conditions d'entrée

Ces conditions d'entrée concernent généralement la composition de l'entrant principal, en particulier sa concentration en quelques matériaux.

3.4.3. Modélisation d'une étape de recyclage

Soit EP une quantité de matériaux satisfaisant les conditions d'entrée. Un procédé de recyclage transforme EP en $(N+1)$ sortants, SP_1 à SP_N représentant les N types de matières recyclées générées et SP_{N+1} , les déchets générés. Le procédé consomme une certaine quantité de matière et d'énergie et induit des rejets. Cette transformation est représentée sur la Figure 2.17 :

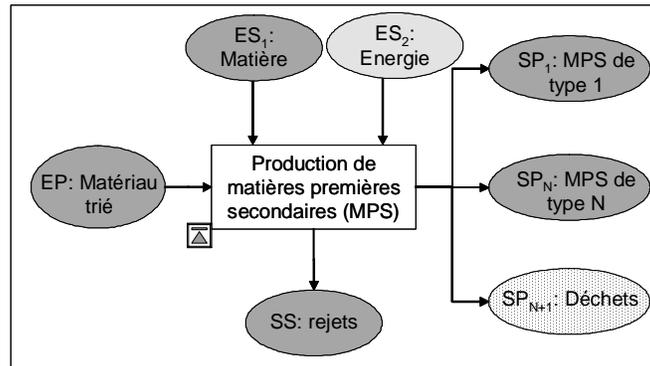


Figure 2.17. Transformation d'un mélange concentré de matériau au cours d'un procédé de recyclage.

Les grandeurs nécessaires à la modélisation complète d'un recyclage sont répertoriées dans la Table 2.9. Elles sont en particulier renseignées pour le procédé de recyclage de cartes électroniques, considéré dans les études de cas n°1, 2 et 3, et le procédé de compoundage de particules plastiques triées, procédé intégré aux scénarii A et B de l'étude de cas n°5.

Table 2.9. Grandeurs nécessaires à la modélisation d'une étape de recyclage ; contributions aux indicateurs IMR, IER et IIER.

Type de recyclage	Transformation	IMR Contribution négative	IER		IIER	
			Contribution négative	Contribution positive	Contribution négative	Contribution positive
Générique	Masse, nature et propriétés des SP_j pour $1 < j < N$ – Masse et classe de SP_{N+1}	Masse de SP_{N+1}	Coût du procédé	0	Type et quantité des ES , SS et SP_{N+1} – Masse et classe de SP_{N+1}	0
Recyclage de carte électronique	<ul style="list-style-type: none"> Recyclage de 95% des métaux visés (Au, Ag, Pd, Cu, Pb) Valorisation énergétique des matières plastiques 	<ul style="list-style-type: none"> 5% de perte des métaux visés et des plastiques 100% de perte des autres métaux 	0	0	Rejets gazeux – Rejets de $SP_{Déchets}$ de classe 1	0

Compoundage de particules plastique triées	<ul style="list-style-type: none"> Production de 98% de EP en matériau recyclé 	<ul style="list-style-type: none"> Perte de 2% 	0.031€/kg EP	0	Consommation d'électricité : (0.9MJ/kg EP), de vapeur (1kg/kg EP) ; rejets de $SP_{Déchets}$ de classe 2	0
--	---	---	--------------	---	--	---

3.5. Etape d'incinération avec récupération d'énergie

3.5.1. Objectif de l'étape

L'incinération avec récupération d'énergie vise à la destruction de déchets toxiques, la réduction du volume des déchets et la production d'énergie.

3.5.2. Conditions d'entrée

Seuls des entrants principaux ayant subis une *dépollution*^[1] préalable des éléments dits « polluants » peuvent être acceptés.

Sont aussi concernées la nature et la composition des entrants principaux : même si aujourd'hui, peu de substances sont interdites en entrée d'incinération, les développements scientifiques pressentis dans (UE 2000e) pourraient conduire à l'établissement de seuils pour l'acceptation dans les incinérateurs de substances tels que le plomb, le cadmium ou encore les retardateurs de flamme bromés. Comme établi par la directive européenne concernant l'incinération des déchets (UE 2000d), le traitement de certaines substances (notamment halogénées ou bromées) nécessite des conditions d'exploitation spécifiques.

Il est aussi observé sur le terrain que les matériaux plastiques issus des PEEFV ne sont aujourd'hui généralement pas acceptés en incinération puisqu'ils présentent un pouvoir calorifique inférieure (PCI) trop important.

3.5.3. Modélisation d'une étape d'incinération avec récupération d'énergie

Soit *EP* l'entrant principal d'une étape d'incinération. Une étape d'incinération avec récupération d'énergie produit cinq sortants principaux : les rejets gazeux, l'énergie produite, les métaux ferreux et non ferreux¹ et les déchets. La transformation de la matière organique est ici chimique et thermodynamique : la structure moléculaire n'est pas conservée et la réaction est exothermique. L'incinération de déchets au pouvoir calorifique faible nécessite parfois l'ajout de combustibles supplémentaires. De plus, le procédé consomme de l'eau et rejette de l'eau contaminée. Cette transformation est représentée dans la Figure 2.18 :

¹ La plupart des installations sont équipées de procédés de tri de métaux.

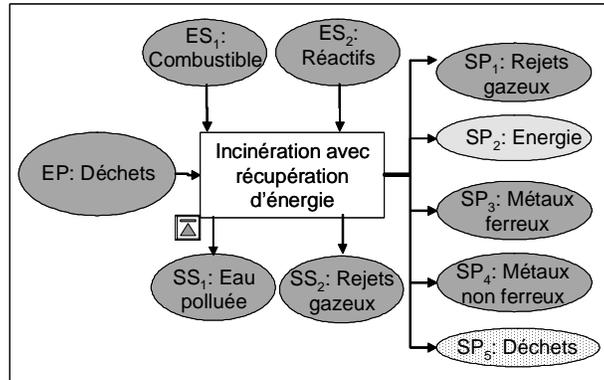


Figure 2.18. Transformation des déchets au cours d'une étape d'incinération avec récupération d'énergie.

Les grandeurs nécessaires à la modélisation complète d'une valorisation énergétique sont répertoriées dans la Table 2.10. Elles sont en particulier renseignées pour le procédé de valorisation énergétique en usine d'incinération d'ordures ménagères (UIOM). Pour les études de cas n°1, 2 et 3 du Chapitre 3, ces performances de la valorisation énergétique des matières organiques sont attribuées au procédé de recyclage des cartes électroniques.

Table 2.10. Grandeurs nécessaires à la modélisation d'une étape d'incinération avec valorisation énergétique ; contributions aux indicateurs IMR, IER et IIER.

Type de val. En.	Transformation	IMR Contribution négative	IER		IIER	
			Contribution négative	Contribution positive	Contribution négative	Contribution positive
Générique	Quantité et type de SP_2 – Masse et propriétés de SP_3 et SP_4	Portion de $EP_{ferreux}$, $EP_{non-ferreux}$ et $EP_{plast.}$	Coût du procédé	0	Type et quantité des ES – Masse et classe de SP_{N+1} – Masse et composition des SP_1	0
Valorisation en UIOM	<ul style="list-style-type: none"> Valorisation énergétique des matériaux plastiques Recyclage de 63% des ferreux, 29% des non ferreux 	<ul style="list-style-type: none"> Perte de 5% des plastiques Perte de 37% des ferreux Perte de 71% des non ferreux Perte de 100% des autres 	0.1€/kg EP	0	Rejets gazeux et liquides variés ; Rejets de $SP_{Déchets}$ de classe 1	0

3.6. Etape de revente de matériaux secondaires

3.6.1. Objectif de l'étape

L'étape vise à réintroduire les matières secondaires générées par un scénario de valorisation dans le système de production de matériaux et de produits. Comme toute activité commerciale, elle doit être effectuée avec un maximum de bénéfice pour le vendeur et de satisfaction pour l'acheteur. D'un point de vue plus global, cette étape contribue au remplacement progressif des matériaux primaires par des matériaux d'origines secondaires.

3.6.2. Conditions d'entrée

Les matériaux d'origines secondaires doivent, comme tout matériau d'origine primaire, respecter des critères de qualité afin d'être mis sur le marché, tel que l'absence de substances non autorisées. Si ces conditions ne sont pas respectées, les matériaux sont dirigés vers un autre procédé de traitement ou vers un Centre d'Enfouissement Technique (CET).

3.6.3. Modélisation d'une étape de revente de matériaux secondaires

Soit EP l'entrant principal d'une étape de revente de matériaux secondaires. Ce matériau est employé dans un nouveau cycle de vie de produit s'il existe un marché qui peut les absorber. On définit la constante $K_{marché}$ comme le *taux d'acceptation*^[1] du matériau par le marché.

Comme l'étape d'enfouissement en CET, l'étape de revente est la dernière étape du système de valorisation et du cycle de vie du produit : elle concentre les bénéfices environnementaux du remplacement de matières vierges par des matières recyclées. Cette étape constitue aussi la première étape du cycle de vie de tout produit ou procédé utilisant les matériaux générés. Ce transfert de matériau vers un autre cycle de vie est schématisé sur la Figure 2.19 suivante :

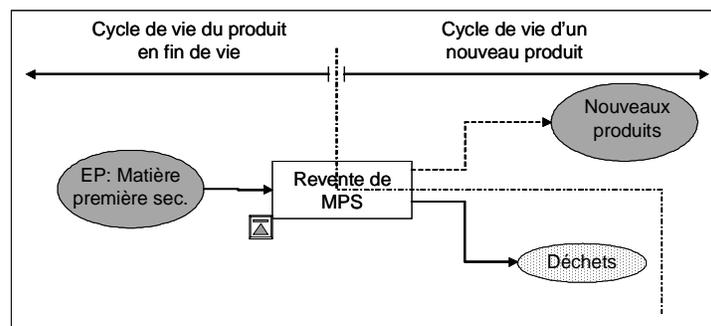


Figure 2.19. Représentation du transfert d'un cycle de vie d'un produit à un autre cycle de vie lors de la revente de matériaux secondaires.

Les grandeurs nécessaires à la modélisation complète de la revente de matériaux secondaires sont répertoriées dans la Table 2.11. Elles sont en particulier renseignées pour la revente de matériaux plastiques, procédés intégrés aux scénarii A et B de l'étude de cas n°5 présentée au chapitre suivant.

Table 2.11. Grandeurs nécessaires à la modélisation d'une étape de revente de matériaux secondaires : contributions aux indicateurs IMR, IER et IIER.

Type de revente	Transformation	IMR Contribution négative	IER		IIER	
			Contribution négative	Contribution positive	Contribution négative	Contribution positive
Revente de matériau secondaire - Générique	Production de matériaux recyclés	Masse et taux d'acceptation par le marché des SP : $SP_{Déchets} = (1 - K_{marché}) \times EP$	0	Masse et cours économiques des SP au moment de la revente	0	Masse et contenu environnemental des matériaux revendus
HIPS après tri « froth flotation »	Matériau recyclé – Propriétés dégradées	0 (car $K_{marché}=1$)	0	0.30€/kg EP	0	$EP \times K_S \times Contenu_{HIPSvierge}$
HIPS –FR après tri par identification	Matériau recyclé – Propriétés équivalentes au matériau vierge	0 (car $K_{marché}=1$)	0	1.5€/kg EP	0	$EP \times Contenu_{HIPS-FRvierge}$ (car $K_S = 1$)

3.7. Autres étapes de valorisation

Un format identique de modélisation est présenté en Annexe 5 pour les étapes de broyage de pièce, de stockage en centre d'enfouissement technique (CET) et de logistique.

3.8. Résumé des modélisations des cinq étapes de valorisation

Les conditions d'entrée, les grandeurs nécessaires à la modélisation et les contributions aux indicateurs IMR, IER et IIER des cinq étapes de valorisation considérées dans cette partie sont résumées dans la Table 2.12 suivante.

Table 2.12. Conditions d'entrée et informations nécessaires à la détermination des transformations des entrants principaux et aux calculs des indicateurs IMR, IER et IIER de quelques étapes de valorisation applicables aux PEEFV.

Procédés	Conditions d'entrée	Transformation	IMR Contribution négative	IER		IIER	
				Contribution négative	Contribution positive	Contribution négative	Contribution positive
Démontage	<i>EP</i> non dangereux ; <i>SP</i> non dangereux	Masse et type des SP_j pour $1 < j < N$ – masse et classe de SP_{N+1}	Masse de SP_{N+1}	Temps de démontage ; masse et nature des SP_{N+1}	Revenu de revente des <i>SP</i>	Type et quantité des <i>ES</i> – masse et classe de SP_{N+1}	-
Tri	Conditions spécifiques	Masse et composition en matériau des SP_j pour $1 < j < N$ – masse et classe de SP_{N+1}	Masse de SP_{N+1}	Coût du procédé	-	Type et quantité des <i>ES</i> – masse et classe de SP_{N+1}	-
Recyclage	Variés : concentration maximale et/ou minimale en matériaux et/ou molécules	Masse, nature et propriétés des SP_j pour $1 < j < N$ – masse et classe de SP_{N+1}	Masse de SP_{N+1}	Coût du procédé	-	Type et quantité des <i>ES</i> – masse et classe de SP_{N+1}	-
Incinération avec valorisation énergétique	-	Quantité et type de SP_2 – masse et propriétés de SP_3 et SP_4	Masse des <i>EP</i> de sous-famille ferreux, non-ferreux, plastiques - masse de SP_3 et SP_4	Coût du procédé	-	Type et quantité des <i>ES</i> – masse et classe de SP_{N+1} – masse et composition des SP_1	
Revente de matériau d'origine secondaire	<i>EP</i> conforme à la législation sur les substances dangereuses	Production de matériaux recyclés	Masse et taux d'acceptation par le marché des <i>SP</i>	-	Masse et cours économiques des <i>SP</i> au moment de la revente	-	Masse et contenu environnemental des matériaux revendus

Partie 4. Structuration du modèle produit

Après la structuration du modèle de valorisation et l'identification de ses caractéristiques pertinentes, il est désormais possible de structurer le modèle produit afin de rendre les deux modèles compatibles et combinables, en particulier pour permettre le calcul des indicateurs de recyclabilité.

Précisons immédiatement que nous entendons par « produit » un certain nombre d'ensemble unis entre eux par des fixations ; un ensemble est constitué par un certain nombre de pièces unies entre elles par des fixations ; une pièce est une certaine quantité de matériau dotée d'une forme particulière.

Dans cette partie, les caractéristiques d'un produit influençant sa recyclabilité pour un certain nombre de procédés de valorisation sont identifiées. Ces caractéristiques sont ensuite groupées pour proposer une structure du modèle produit ; cette structure est enfin présentée à l'aide d'un graphique.

4.1. Identification des caractéristiques pertinentes d'un produit d'un point de vue de la recyclabilité

Dans ce paragraphe, nous proposons la grille d'analyse de la pertinence des caractéristiques d'un produit vis-à-vis de sa recyclabilité, présentée dans la Table 2.13.

La grille est remplie comme suit :

- Les procédés de valorisation qui seront envisagés dans les études de cas du Chapitre 3 sont envisagés successivement,
- Pour chacun d'eux, les propriétés de l'entrant principal influençant les performances du procédé sont identifiées,
- Ces propriétés sont alors reliées aux caractéristiques d'un produit pertinentes d'un point de vue de sa recyclabilité.

Table 2.13. Grille d'analyse de la pertinence des caractéristiques d'un produit pour certains procédés de valorisation.

Procédés		Démontage	Broyage de pièces plastiques	Tri gravimétrique partic. plastiques	Tri par identification pièces plastiques	Tri par froth-flotation part. plastiques	Recyclage carte électronique	Recyclage polymères	Incinération avec valorisation énergétique	Revente énergie	Revente matériau	Elimination en CET
Caractéristiques d'un produit	Masse	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Famille du matériau								✓			
	Densité du matériau			✓		✓					✓	
	Mouillabilité du matériau					✓						
	Contrainte à la rupture du matériau										✓	
	PCI du matériau						✓		✓			
	Couleur			✓	✓						✓	
	Caractère « dangereux »	✓										✓
	Caractère « polluant »	✓	✓									✓
	Dimension plus grande taille		✓	✓								
	Type liaison	✓										
	Nombre fixations	✓										
	Liaison avec autre pièce	✓			✓							
	Composition en matériau			✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓
	Composition en substances	✓						✓	✓			✓
	Cours économique du matériau										✓	
	Taux d'acceptation par le marché									✓	✓	
	Type revêtement			✓	✓							
Surface revêtement				✓								

4.2. Proposition d'une structure d'organisation des caractéristiques d'un produit influençant sa recyclabilité

Toutes les caractéristiques d'un produit pertinentes d'un point de vue de sa recyclabilité ayant été identifiées, il est maintenant possible de les organiser afin de proposer une structure du modèle produit. Nous proposons pour ce modèle deux catégories de caractéristiques :

- les éléments dits génériques, qui regroupent les éléments « substance », « matériau » et « liaison » ; ils représentent les éléments les plus simples de la modélisation ;
- les éléments dits de produit, qui regroupent les éléments « pièce », « fixation », et « ensemble » ; ils représentent les composantes réelles du produit, et sont construits à partir des éléments génériques.

4.2.1. Elément générique « substance »

Il s'agit des substances qui entrent dans la composition des matériaux et dont la présence peut être problématique d'un point de vue hygiène et sécurité, par exemple au moment de la manipulation du produit. Les caractéristiques propres d'un élément générique « substance » sont répertoriées dans la Table 2.14.

Table 2.14. Caractéristiques propres d'une substance, élément générique du modèle produit.

<ul style="list-style-type: none"> • Caractère dangereux (dangereux / non dangereux) 	<ul style="list-style-type: none"> • Contenu environnemental (en unité de classe d'impact I / kg consommé ou émis)
--	--

Le caractère dangereux d'une substance peut en particulier être défini en utilisant des fiches toxicologiques établies par l'INRS (INRS 2002) ou encore à partir de les listes des substances et préparations dangereuses établies dans (EDITIONS LEGISLATIVES 2002).

4.2.2. Elément générique « matériau »

Les caractéristiques d'un élément générique « matériau » pertinentes pour la recyclabilité d'un produit sont résumées dans la Table 2.15 suivante :

Table 2.15. Caractéristiques propres d'un matériau, élément générique du modèle produit.

<ul style="list-style-type: none"> • Famille d'appartenance : métaux ferreux / métaux non ferreux ; polymères thermoplastiques / polymères thermodurcissables ; verre ; bois-papier-textile • Densité (en g/cm³) • Pouvoir Calorifique Inférieur (en 	<ul style="list-style-type: none"> • Mouillabilité du matériau : exprimé en angle de contact dynamique (°) • Taux d'acceptation par le marché (en %) • Valeur économique (en €/kg) • Contenu environnemental (en unité de classe d'impact I / kg)
---	---

MJ/kg) • Résistance à la rupture (en MPa)	• Composition massique en substances ^[1] : lien avec l'élément générique « molécule »
---	---

Le caractère « dangereux » peut être dérivé du niveau de complexité inférieur du modèle : si l'une des substances constitutive du matériau présente ce caractère, alors le matériau le présente aussi.

4.2.3. Elément générique « liaison »

Dans le modèle, l'unique caractéristique d'un élément générique « liaison » pertinente pour la recyclabilité d'un produit est le temps nécessaire à son démontage manuel ; ce temps est propre au type de liaison employé. Pour l'instant, seules les liaisons vissage, clipsage et collage sont envisagées et les temps associés à leur démontage sont répertoriés dans la Table 2.6.

4.2.4. Elément de produit « pièce »

Les caractéristiques pertinentes d'un élément de produit « pièce » retenues dans le modèle sont répertoriées dans la Table 2.16 suivante :

Table 2.16. Caractéristiques propres d'une pièce, élément de produit du modèle produit.

<ul style="list-style-type: none"> • Masse (en kg) • Matériau constitutif : lien avec l'élément générique « matériau » • Caractère « polluant » : « polluant » / non « polluant » • Couleur : foncé / clair 	<ul style="list-style-type: none"> • Plus grande dimension (en m) • Type de revêtement : Ø / peinture / métallique • Taille surfacique du revêtement : Ø / partiel (<50%) / total (>50%)
---	--

Les caractéristiques suivantes, nécessaires au modèle produit, sont dérivées des niveaux de complexité inférieurs :

- Le caractère « dangereux » : si le matériau constitutif présente ce caractère, alors la pièce le présente aussi,
- La composition massique moléculaire : elle est dérivée de la composition moléculaire du matériau constitutif.

Remarque : le caractère « polluant » d'une pièce est entendu ici au sens de la directive DEPEEFV : selon l'Annexe 2 de ce texte, les cartes de circuits imprimés, les tubes cathodiques et les matières synthétiques contenant des retardateurs de flamme bromés, entre autres, doivent subir un traitement spécifique (UE 2000b).

4.2.5. Elément de produit « fixation »

Un élément de produit « fixation » est entièrement défini dans le modèle produit si toutes les caractéristiques établies dans la Table 2.17 sont arrêtées :

Table 2.17. Caractéristiques propres d'une fixation entre pièces et/ou ensembles, élément de produit du modèle produit.

<ul style="list-style-type: none"> • Pièces et/ou ensembles liés par la fixation • Type de liaison : lien avec l'élément générique « liaison » 	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre de fixations
--	--

4.2.6. Elément de produit « ensemble »

Les caractéristiques pertinentes d'un élément de produit « ensemble » sont répertoriées dans la Table 2.18.

Table 2.18. Caractéristiques propres d'un ensemble, élément de produit du modèle produit.

<ul style="list-style-type: none"> • Pièces et/ou ensembles constitutifs de l'ensemble : lien avec l'élément de produit « pièce » 	<ul style="list-style-type: none"> • Fixation entre pièces et/ou ensembles constitutifs : lien avec l'élément de produit « fixation »
---	---

Les caractéristiques suivantes d'un élément « ensemble » sont dérivées des niveaux de complexité inférieurs :

- La masse : c'est la somme des masses des éléments constitutifs,
- La plus grande dimension : sauf précision contraire, c'est la valeur maximale de la plus grande dimension des éléments constitutifs,
- Le caractère « polluant » : si l'un des éléments constitutifs présente ce caractère, alors l'ensemble le présente aussi,
- La composition massique en matériau : elle est dérivée des masses et des matériaux des éléments constitutifs,
- La composition moléculaire : elle est dérivée de la composition moléculaire des matériaux des éléments constitutifs.

Remarque : un produit appartient à cette catégorie « ensemble » puisqu'il est l'union de pièces par des fixations.

4.3. Présentation graphique de la structure du modèle produit

Les niveaux des composantes du modèle produit, ainsi que leurs modes de combinaisons, sont schématisés dans la Figure 2.20 suivante. En illustration, des caractéristiques du produit propres à chaque niveau sont citées.

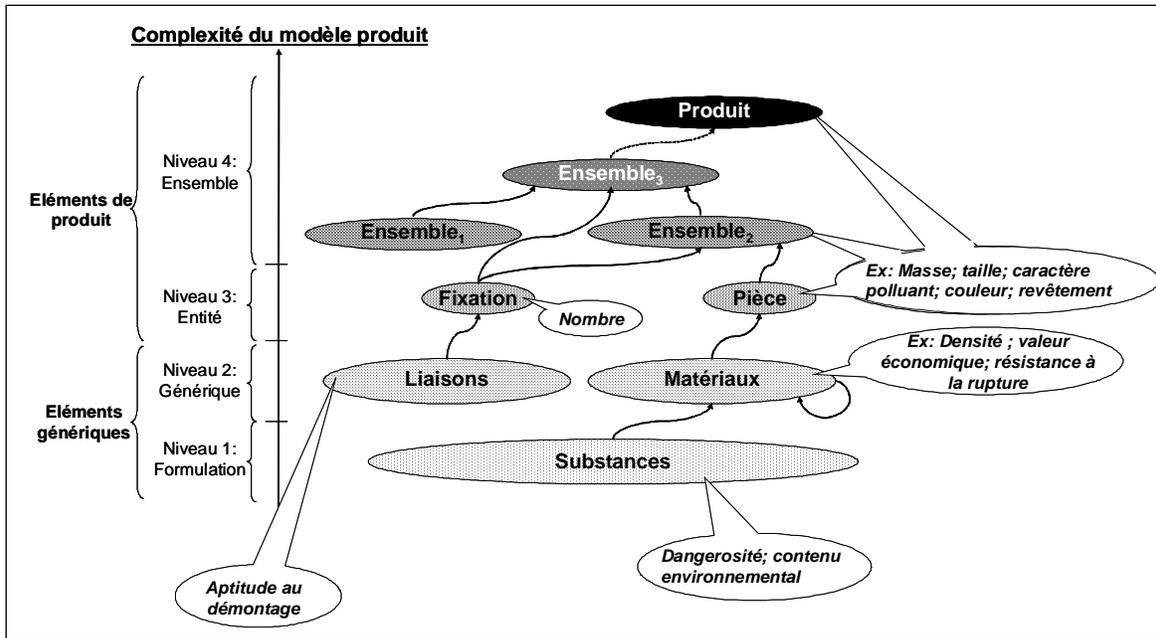


Figure 2.20. Schématisation des relations existantes entre les niveaux structurant le modèle produit.

Partie 5. Amélioration de l'aptitude d'un produit à la valorisation en fin de vie

L'étude et la modélisation des procédés de valorisation ont montré que la diminution de la recyclabilité d'un produit au cours d'un scénario de valorisation est liée :

- soit aux procédés : elle est par exemple liée aux pertes, aux coûts de mise en œuvre, et aux impacts environnementaux des procédés ;
- soit au produit : elle est par exemple liée à la présence de combinaisons de matériaux non séparables, d'assemblages complexes de composants, ou encore de matériaux ou de composants ne possédant pas de filières de valorisation.

La diminution de la recyclabilité d'un produit au cours d'un scénario est en fait liée à *la fois* aux caractéristiques du produit et aux performances des procédés de valorisation. La démarche d'amélioration de conception proposée dans cette partie vise à aider une équipe de conception à adapter au mieux le produit aux scénarii de valorisation.

5.1. Présentation générale de la démarche

Notre démarche d'amélioration de conception vise à établir des règles d'amélioration à partir du diagnostic établi par l'évaluation de recyclabilité ; elle se construit comme suit :

- Suite à l'évaluation multicritère de la recyclabilité du produit, les procédés de valorisation à l'origine de contributions négatives majeures de recyclabilité ou de contributions positives mineures de recyclabilité sont identifiés,
- Pour chacun des procédés identifiés, les *inadéquations*^[1] éventuelles entre produit et procédés, c'est-à-dire les caractéristiques du produit en raison desquelles le produit n'est pas adapté au scénario, sont identifiées,
- L'équipe de conception est alors en mesure de formuler des recommandations visant l'amélioration de la recyclabilité du produit.

La succession de ces étapes est schématisée dans la Figure 2.21.

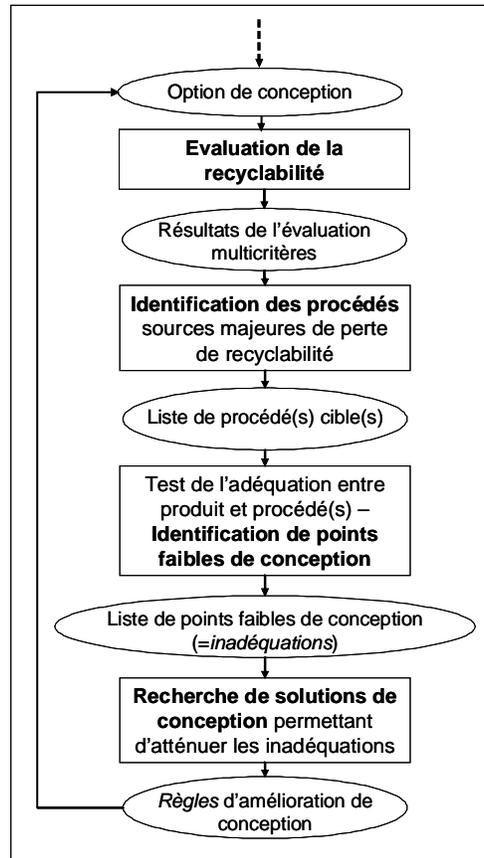


Figure 2.21. Etapes de la démarche d'amélioration de conception d'un produit.

5.2. Identification de procédés « problématiques » dans un scénario de valorisation

Puisque la recyclabilité d'un produit est l'agrégation de contributions positives et négatives, une démarche vise soit à limiter les contributions négatives soit à augmenter les contributions positives. La recherche d'inadéquation entre produit et procédés de valorisation passe donc par l'identification de procédés dits « problématiques », en particulier :

- Pour le critère massique : par une recherche des procédés sources majeures de contributions négatives à la recyclabilité,
- Pour le critère économique : par une recherche des procédés sources majeures de contributions négatives à la recyclabilité, contribuant principalement à une augmentation du coût de valorisation ; par une recherche des procédés sources mineures de contributions positives à la recyclabilité, ne contribuant que trop peu à une baisse du coût,
- Pour le critère environnement : par une recherche des procédés sources majeures de contributions négatives à la recyclabilité, contribuant principalement à l'augmentation de l'impact environnemental de la valorisation ; par une recherche des procédés sources mineures de contributions positives à la recyclabilité, ne contribuant que trop peu à une baisse de l'impact.

La recherche de procédés problématiques passe donc par la maximisation et la minimisation des expressions mathématiques répertoriées dans la Table 2.19 pour chaque critère de recyclabilité.

Table 2.19. Expressions mathématiques devant être minimisées ou maximisées lors de la recherche de procédés de valorisation problématiques.

Critères de recyclabilité	Contributions	Expressions à maximiser / minimiser au cours de la recherche de procédés problématiques
Critère massique	Négatives	$\max_{i=1,x;j=1,y} \left(\Delta^- (IMR)(i, j) \right) \quad (2.18)$
Critère économique	Négatives	$\max_{i=1,x;j=1,y} \left(\frac{\Delta^- (IER)(i, j)}{\sum_{i=1,x} \left(\sum_{j=1,y} \Delta^- (IER)(i, j) \right)} \right) \quad (2.19)$
	Positives	$\min_{j=1,y} \left(\frac{\Delta^+ (IER)(x, j)}{\sum_{j=1,y} \Delta^+ (IER)(x, j)} \right) \quad (2.20)$
Critère environnemental	Négatives	$\max_{i=1,x;j=1,y} \left(\frac{\Delta^- (IIER)(i, j)}{\sum_{i=1,x} \left(\sum_{j=1,y} \Delta^- (IIER)(i, j) \right)} \right) \quad (2.21)$
	Positives	$\min_{j=1,y} \left(\frac{\Delta^+ (IIER)(x, j)}{\sum_{j=1,y} \Delta^+ (IIER)(x, j)} \right) \quad (2.22)$
Avec $\Delta^- (IcR)(i, j)$, la contribution négative du procédé (i,j) à la recyclabilité selon le critère c, $\Delta^+ (IcR)(i, j)$, la contribution positive du procédé (i,j) à la recyclabilité selon le critère c.		

5.3. Détermination de points faibles de conception

La détermination de contributions négatives majeures et de contributions positives mineures de recyclabilité permet l'identification d'inadéquations entre le produit et les procédés de valorisation. Lorsqu'un procédé est identifié comme problématique, l'identification de points faibles de conception se construit comme suit :

- La contribution du procédé problématique est allouée, en général au prorata de la masse, aux éléments constituant ses entrants principaux ; ceux-ci deviennent des « éléments problématiques »,

- A chaque élément problématique, les caractéristiques du produit responsables des contributions à la recyclabilité sont identifiées : ceci est en particulier rendu possible par l'utilisation de la Table 2.12, qui devient une table de correspondance entre les performances d'un procédé et les caractéristiques d'un entrant principal ; les caractéristiques « problématiques » du produit, encore appelées « points faibles », sont ainsi identifiées. Ces points faibles sont identifiés parmi les éléments génériques « molécule », « matériau », « liaison », et les éléments de produit « pièce », « fixation » et « ensemble » du modèle produit.

La Figure 2.22 résume les étapes conduisant à l'identification de points faibles de conception à partir de procédés problématiques.

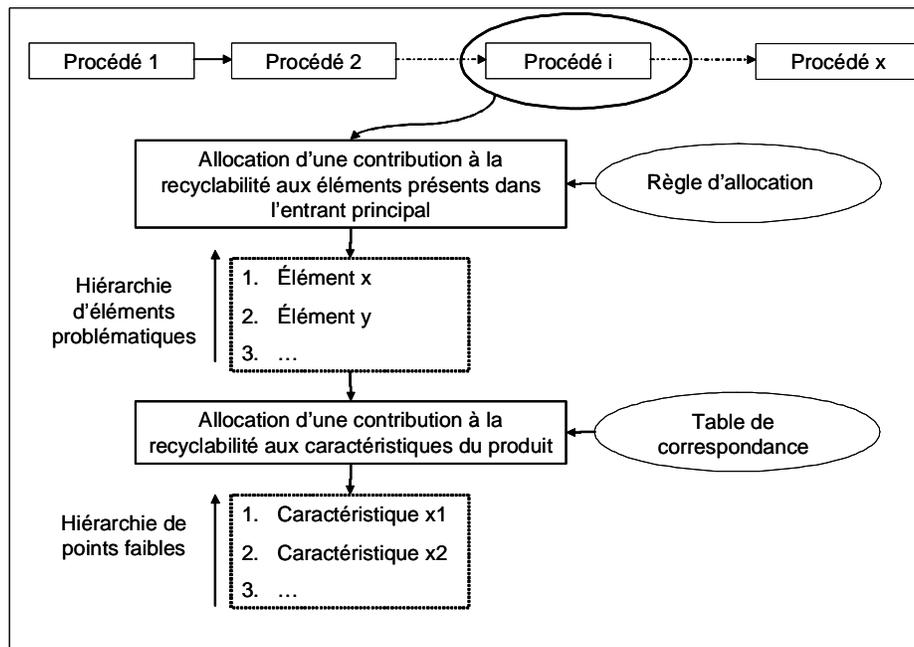


Figure 2.22. Enchaînement des étapes menant à l'identification de points faibles du produit.

5.4. Identification de voies d'amélioration de conception

A partir de l'identification de points faibles de conception, des règles d'amélioration de conception sont établies.

Les objectifs initiaux de la méthode comportaient la définition d'un ensemble de règles concrètes de conception permettant l'amélioration de la recyclabilité de produit. Cependant, au cours de réunions avec des partenaires industriels, il est apparu que cet objectif s'avérait trop ambitieux pour les raisons suivantes :

- Un produit est défini par de nombreuses caractéristiques et il pourrait s'avérer réducteur de tenter d'établir un ensemble de règles de conception qui ne concernent qu'un nombre limité de ces caractéristiques ;

- La recyclabilité de produit n'est que l'un des critères en fonction desquels sont réalisés des compromis de conception : il apparaît ainsi difficile d'établir des règles qui n'intègrent que la recyclabilité ;
- Il apparaît délicat d'orienter l'équipe de conception vers des règles de conception pré-établies alors que la créativité et le sens de l'innovation de l'équipe de conception concentrent probablement les plus grandes sources d'amélioration ;
- L'établissement de règles ne peut être déconnecté des contraintes subies par l'équipe de conception qui diffèrent selon le degré d'avancement du projet et selon les organisations ;
- Enfin et pour résumer, la phase de conception de produit est l'un des domaines d'expertise tout à fait propres à une entreprise : il n'apparaît alors pas judicieux d'étendre la méthode sur ce domaine : chaque entreprise utilisatrice de la méthode devra ainsi adapter la méthode à sa propre organisation et à ses propres pratiques.

L'application de la méthode à des projet spécifiques, et l'élaboration de règles d'amélioration de conception qui en découlent, devrait permettre aux entreprises de construire des bases de règles de conception qui leur sont propres ; les équipes de conception seraient alors en mesure d'y puiser des idées de re-conception.

La démarche d'éco-conception basée sur l'évaluation de la recyclabilité se contente donc d'établir un diagnostic pertinent concernant les points faibles de conception. A ce titre, elle contribue à « *éclairer les concepteurs sur les conséquences de leurs choix* », comme le souhaite M. Tollenaere (TOLLENAERE 1998). Sur la Figure 2.23, les limites du domaine d'application de la méthode et les limites du domaine d'expertise de l'équipe de conception sont clairement identifiées.

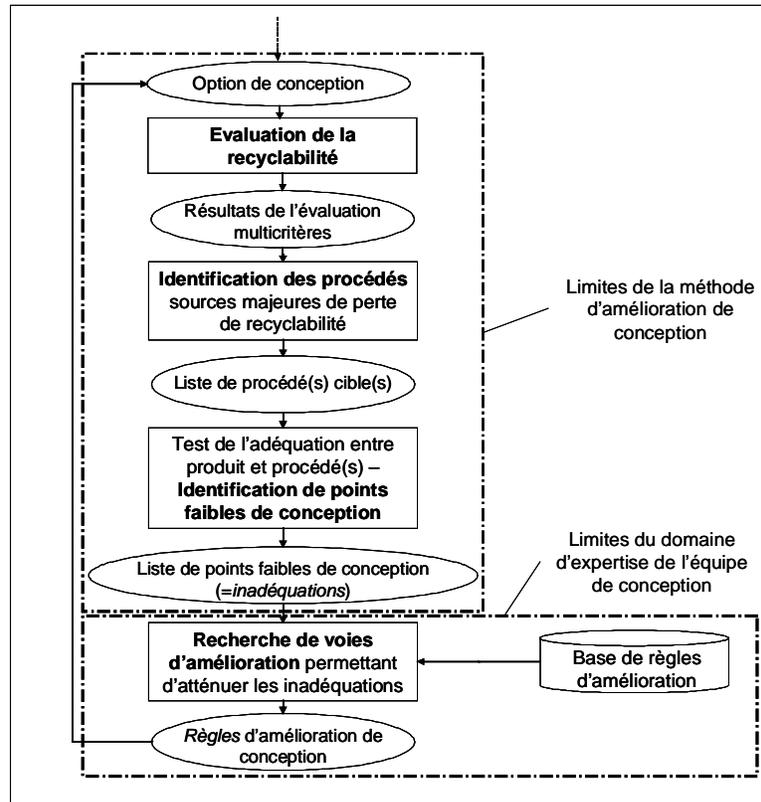


Figure 2.23. Limites de la sphère d'application de la méthode et du domaine d'expertise de l'équipe de conception.

5.5. Elaboration de voies d'amélioration de conception dans un contexte multi-scénarii et multicritères

Bien que l'élaboration de voies d'amélioration de conception soit laissée à l'initiative des équipes utilisatrices de la méthode, il convient de s'interroger sur les implications de la multiplicité des critères de recyclabilité et de scénarii de valorisation sur cette élaboration.

Pour l'aspect multicritères, un mode de hiérarchisation des critères a été discuté dans la Partie 1 ; un mode de choix parmi des scénarii possibles a également été envisagé dans cette même Partie 1. Puisqu'il n'existe pas de différences fondamentales entre ces deux multiplicités, le mode de gestion des voies est proposé dans ce paragraphe pour l'une ou l'autre de ces multiplicités.

Soient les groupes 1 et 2 de règles élaborées par une équipe de conception à la suite de l'évaluation de la recyclabilité d'un produit, comme représenté dans la Figure 2.24(a). Les règles contenues dans ces deux groupes sont soit *communes*, soit *antagonistes*, soit *non antagonistes*, comme représentées dans la Figure 2.24(b) et illustrées pour le choix des matériaux de pièces dans la Table 2.20 :

Table 2.20. Exemple de règles communes, antagonistes et non antagonistes dans deux groupes de voies.

	Groupe 1	Groupe 2
Règles communes	« Utiliser le matériau A pour la pièce n »	« Utiliser le matériau A pour la pièce n »
Règles antagonistes	« Utiliser le matériau A pour la pièce n »	« Utiliser le matériau B pour la pièce n »
Règles non antagonistes	« Utiliser le matériau A pour la pièce n »	« Utiliser le matériau B pour la pièce m »

Dans une telle configuration, deux modes de combinaison des règles se présentent :

- le mode de gestion « *élitiste* » qui consiste à préférer un groupe, par exemple le groupe 1 ; les règles retenues sont les règles du groupe 1, auxquelles sont associées les règles du groupe 2 non antagonistes avec celles du groupe 1, comme schématisé sur la Figure 2.24(c) ;
- mode de gestion « *what-if* » qui consiste à considérer pertinents tous les groupes de règles ; les règles retenues sont les règles communes et les règles non antagonistes des groupes 1 et 2, comme schématisé sur la Figure 2.24(d).

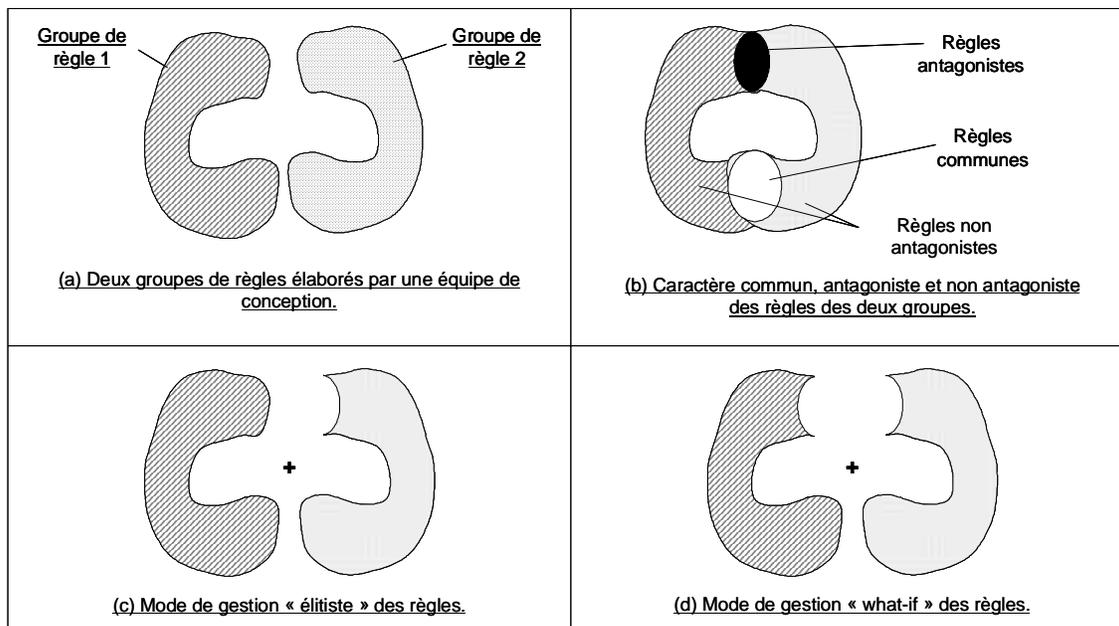


Figure 2.24. Mode de combinaison de règles de conception ; (a) Deux groupes de règles élaborées par une équipe de conception ; (b) Caractère commun, antagoniste et non antagoniste des règles des deux groupes ; (c) Mode de gestion « élitiste » des règles ; (d) Mode de gestion « what-if » des règles.

Les implications du contexte multicritères et multi-scénarii sur les combinaisons de règles seront explorées dans l'application de la méthode à des études de cas.

5.6. Amélioration de la conception du produit et des pièces qui le constituent : vers des règles d'additivité

Dans le contexte actuel de développement des produits, des équipes distinctes sont généralement en charge de la conception des différentes fonctions du produit. Ce paragraphe vise à discuter de l'applicabilité de la méthode dans un tel contexte.

Soit un produit P, constitué de n pièces. Il est possible d'appliquer la méthode à chacune des pièces qui constituent ce produit, à condition que le produit subisse un démontage préalable menant à la séparation des pièces. Cette application conduit à l'élaboration de voies d'amélioration de la conception de chacune des pièces, comme schématisée sur la Figure 2.25.

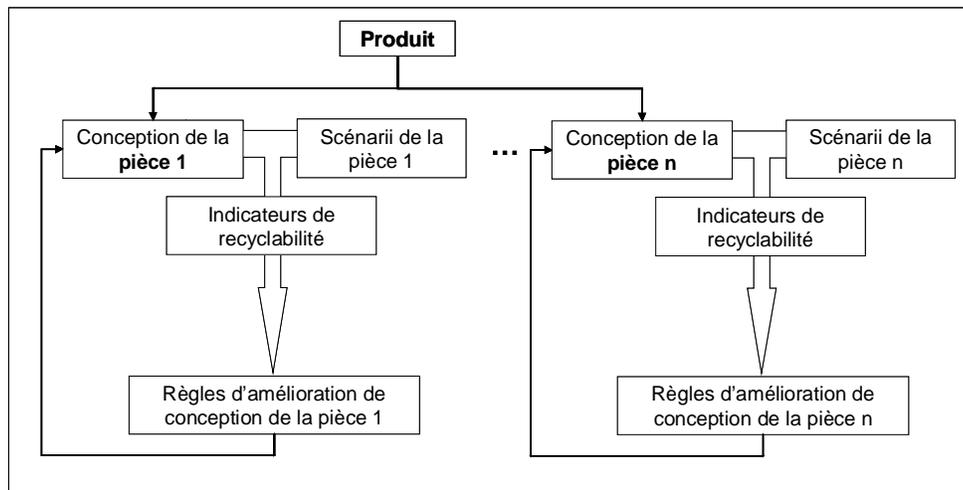


Figure 2.25. Schématisation de l'application de la méthode aux pièces qui constituent un produit.

Le calcul des indicateurs de recyclabilité des n pièces conduit au calcul des indicateurs du produit, par la relation suivante :

$$IcR_{produit} = \sum_{i=1,n} IcR_i + IcR_{démontage_des_n_pièces} \quad (2.23)$$

Avec :

IcR , l'indicateur de recyclabilité selon le critère de recyclabilité c,

$IcR_{démontage_des_n_pièces}$, l'impact sur la recyclabilité du démontage des n pièces,

n, le nombre de pièces constituant le produit.

De la même façon, les règles d'amélioration du produit sont ainsi constituées de l'ensemble des règles des pièces, auxquelles sont associées les règles concernant la démontabilité des pièces.

Ces règles d'additivité des indicateurs et des règles rendent possible l'utilisation de la méthode en ingénierie concurrente.

Conclusions du Chapitre 2

Ce chapitre a consisté en l'élaboration d'une méthode globale d'amélioration de la recyclabilité d'un produit à partir de son évaluation.

Les principales caractéristiques originales contenues dans cette méthode sont présentées en gras dans la Figure 2.26 suivante. La plupart d'entre elles seront discutées lors de l'application de la méthode à des études de cas, dans le chapitre suivant.

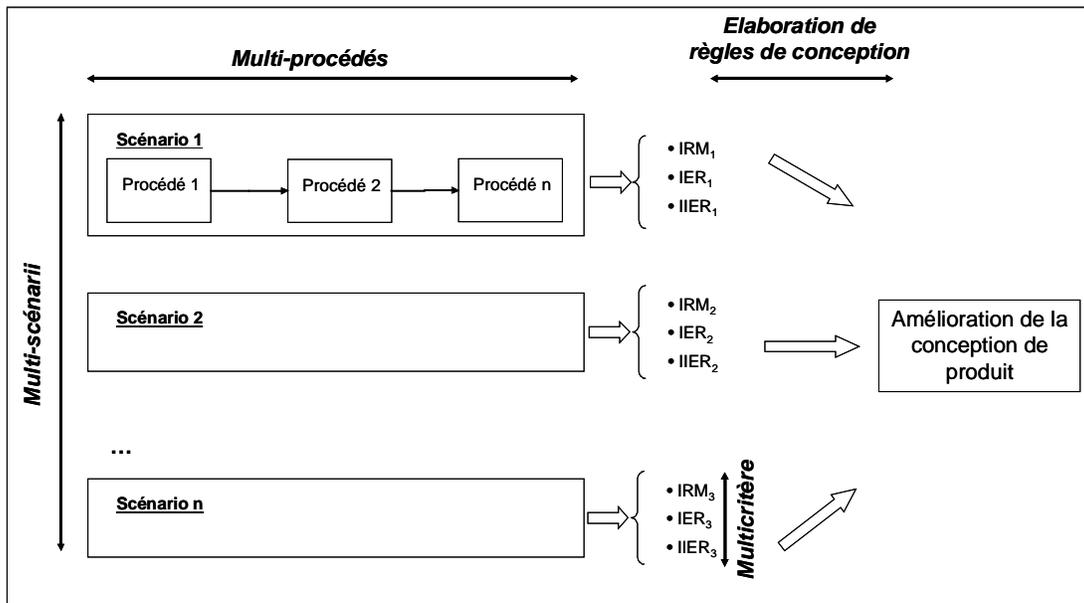


Figure 2.26. Schématisation des principales caractéristiques originales de la méthode.

CHAPITRE 3 :
APPLICATION DE LA METHODE A DES ETUDES DE CAS
EVALUATION DE LA RECYCLABILITE DE CARTES ELECTRONIQUES ET D'UN
TELEVISEUR - ENSEIGNEMENTS DE CONCEPTION

CHAPITRE 3 :
APPLICATION DE LA METHODE A DES ETUDES DE CAS
EVALUATION DE LA RECYCLABILITE DE CARTES ELECTRONIQUES ET D'UN
TELEVISEUR - ENSEIGNEMENTS DE CONCEPTION

Introduction – Objectifs de la validation.....	139
Partie 1. Produits, données, et hypothèses considérés	140
1.1. Produits considérés.....	140
1.2. Scénarii de valorisation considérés.....	140
1.3. Les modes d'acquisition des données	140
1.3.1. Les données techniques.....	140
1.3.2. Données économiques	141
1.3.3. Données environnementales	141
1.4. Hypothèses liées aux choix des critères de recyclabilité	142
1.4.1. Hiérarchisation des critères de recyclabilité.....	142
1.4.2. Le cas particulier du critère de recyclabilité environnementale	142
1.5. Mise en œuvre d'une démarche d'amélioration de conception	143
Partie 2. Application de la méthode à l'étude de la recyclabilité de cartes électroniques	144
2.1. Introduction	144
2.2. Etude de cas n°1 : évaluation de la recyclabilité de la carte électronique d'un téléviseur	144
2.2.1. Objectifs et hypothèses.....	144
2.2.2. Choix d'un référentiel de bénéfice environnemental maximum	145
2.2.3. Conclusions de l'étude de cas n°1	147
2.3. Etude de cas n°2 : évaluation de la recyclabilité de plusieurs générations de cartes électroniques de téléphones portables.....	148
2.3.1. Objectifs et hypothèses.....	148
2.3.2. Indicateur massique de recyclabilité.....	148
2.3.3. Indicateur économique de recyclabilité.....	149
2.3.4. Indicateur d'impact environnemental de recyclabilité.....	149
2.3.5. Conclusions de l'étude de cas n°2	150
2.4. Etude de cas n°3 : évaluation de la recyclabilité du mélange de plusieurs générations de cartes électroniques.....	151
2.5. Conclusions concernant la recyclabilité des cartes électroniques.....	151
Partie 3. Application de la méthode en vue de l'amélioration de la conception d'un téléviseur	153
3.1. Etude de cas n°4 : évaluation globale de la recyclabilité d'un téléviseur - Voies d'amélioration de sa conception.....	153
3.1.1. Objectifs et hypothèses.....	153
3.1.2. Résultats de l'évaluation multicritères et multiscénarii de la recyclabilité d'un téléviseur	154
3.1.3. Démarche d'amélioration de la conception du produit à partir de l'évaluation de sa recyclabilité	156
3.1.4. Conclusions de l'étude de cas n°4	167
3.2. Etude de cas n°5 : évaluation de la recyclabilité des pièces plastiques d'un téléviseur dans un schéma prospectif - Voies d'amélioration de leur conception	167
3.2.1. Introduction : importance de la recyclabilité des pièces plastiques dans la recyclabilité d'un produit	167
3.2.2. Objectifs et hypothèses.....	168
3.2.3. Evaluation multicritères de la recyclabilité des pièces plastiques d'un téléviseur	169
3.2.4. Démarche d'amélioration de la conception des pièces plastiques.....	170

3.2.5. Influence des procédés mis en œuvre dans les filières sur la recyclabilité de pièce et sur leur conception.....	176
3.2.6. Conclusions de l'étude de cas n°5	177
3.3. Conclusions sur les études de cas n°4 et n°5	178
Conclusions du Chapitre 3.....	179

Introduction – Objectifs de la validation

L'application de la méthode à des études de cas vise à illustrer et souligner l'originalité de toutes les caractéristiques de la méthode, notamment les aspects multicritères et multiscénarii des évaluations de recyclabilité. La procédure menant de l'évaluation de la recyclabilité à des voies d'amélioration de conception est également largement présentée.

Les premières études de cas présentées concernent l'évaluation de la recyclabilité de cartes électroniques et permettent d'établir un certain nombre de règles d'utilisation de la méthode.

L'étude d'un téléviseur et de quelques unes de ses composantes permet de simuler l'application de la méthode en milieu industriel, d'établir des voies concrètes d'amélioration et de discuter les bénéfices de leur mise en œuvre et leur applicabilité en projet.

La structure adoptée pour ce chapitre est présentée dans la Figure 3.1 suivante.

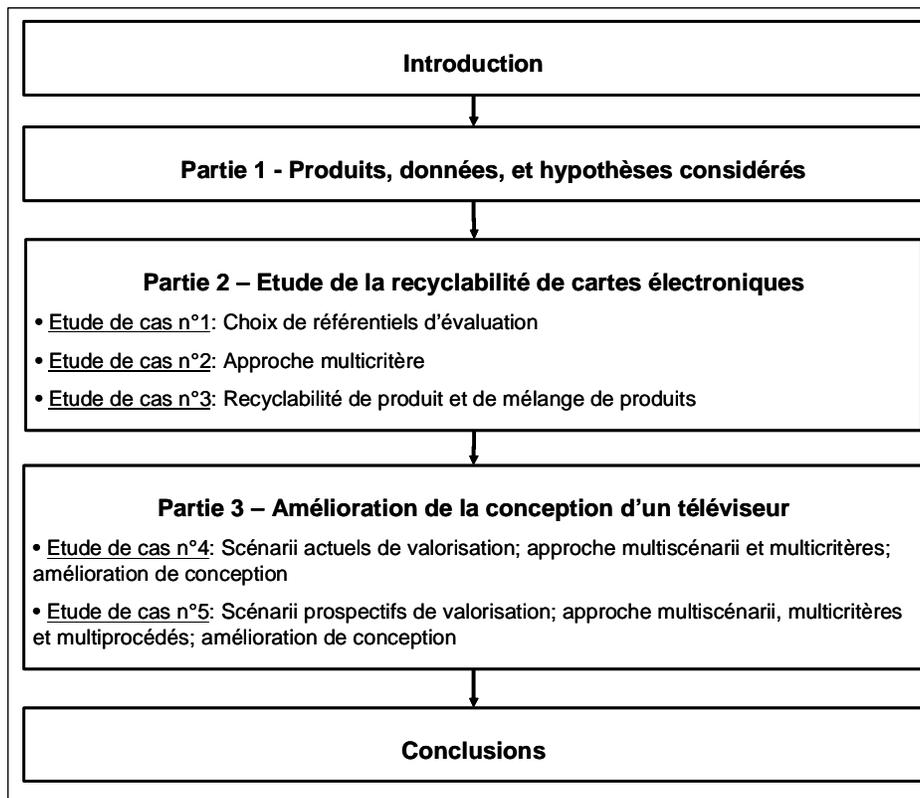


Figure 3.1. Représentation synoptique du Chapitre 3.

Partie 1. Produits, données, et hypothèses considérés

1.1. Produits considérés

La méthode exposée au chapitre précédent est ici appliquée à des produits de l'industrie élect(ron)ique. Les produits choisis sont ceux étudiés par l'ENSAM Chambéry dans le cadre du programme ENSAM/ADEME mené en coopération avec les industriels Alcatel, Schneider Electric et Thomson. Les produits envisagés plus particulièrement dans ce chapitre sont un téléphone portable et un téléviseur : les recyclabilités des cartes électroniques du téléviseur et de téléphones portables sont d'abord étudiées ; les recyclabilités du téléviseur et de quelques unes de ses pièces plastiques sont ensuite analysées, et des voies d'amélioration de leurs conceptions sont formulées. Des photographies des cartes électroniques étudiées sont présentées dans les Annexes 9 et 10. La photographie et l'arbre de démontage du téléviseur sont présentés dans l'Annexe 13. En vertu des règles d'additivité des résultats de la méthode énoncées au Chapitre 2, l'analyse de la recyclabilité de pièces sorties du contexte du produit est envisageable d'un point de vue méthodologique.

1.2. Scénarii de valorisation considérés

Les scénarii de valorisation considérés varient selon les pièces et produits étudiés. Ces scénarii sont en particulier :

- soit constitués d'un seul procédé, par exemple pour la valorisation des cartes électroniques,
- soit constitués d'une filière de plusieurs procédés, par exemple pour la valorisation des pièces plastiques du téléviseur,
- soit constitués d'une chaîne de procédés menant à la valorisation totale du produit, par exemple pour la valorisation du téléviseur.

Tous les scénarii envisagés intègrent un démontage manuel préalable des produits.

1.3. Les modes d'acquisition des données

Les données utilisées dans les études de cas sont de trois types : technique, économique et environnemental. Les détails des modes d'acquisition de ces données sont présentés dans les paragraphes qui suivent.

1.3.1. Les données techniques

La plupart des données concernant les performances techniques des procédés mis en œuvre lors de la valorisation de PEEFV sont puisées dans la base de données établie dans le cadre du programme ENSAM/ADEME (ENSAM/ADEME 2002), base construite lors de visites de sites de valorisation et de renseignements de questionnaires.

Les données spécifiques aux filières de valorisation des pièces plastiques proviennent d'échanges répétés avec les entreprises RPI (Etats-Unis) et Technopolymer (Japon). Les données liées au démontage de produits sont dérivées des échanges avec Valdelec, démonteur de PEEFV à Chambéry.

1.3.2. Données économiques

Les informations concernant les performances économiques des filières de valorisation sont par nature difficiles à obtenir. Pour nos applications, nous profitons d'une collaboration de longue date avec l'entreprise Valdelec Chambéry, qui nous permet d'avoir accès aux prix de traitement et de reprise des filières en aval du démontage. Lorsque c'est possible, ces données économiques sont complétées ou ajustées par des données collectées dans le cadre du programme ENSAM/ADEME.

Pour les informations concernant les filières de valorisation des pièces plastiques, les cours économiques sont puisés dans des bourses d'échange de matériaux recyclés, en particulier sur Internet. Pour ces mêmes filières nous profitons des échanges avec les acteurs RPI et Technopolymer qui livrent des informations sur les performances économiques de leurs procédés.

1.3.3. Données environnementales

Deux types de données environnementales sont nécessaires au calcul des indicateurs d'impacts environnementaux de recyclabilité (IIER) : d'une part, les données propres au produit, c'est-à-dire les contenus environnementaux des matériaux et composants ; d'autre part les impacts environnementaux liés à la mise en œuvre des procédés de valorisation.

Les données liées au produit sont puisées dans la base de données de l'outil logiciel EIME™, base regroupant les contenus environnementaux des matériaux et composants principalement utilisés dans les produits élect(ron)iques.

Les données relatives aux procédés de valorisation ont été puisées dans la base de données élaborée au cours du programme ENSAM/ADEME. Pour les filières de valorisation des pièces plastiques, les données proviennent des échanges avec RPI et Technopolymer. Précisons que les impacts environnementaux liés à la fabrication des installations de valorisation sont considérés négligeables en comparaison des impacts de la mise en œuvre des procédés.

1.4. Hypothèses liées aux choix des critères de recyclabilité

1.4.1. Hiérarchisation des critères de recyclabilité

Dans les études de cas, aucune hiérarchisation des critères n'est a priori considérée. Néanmoins, l'élaboration de règles de conception est généralement examinée dans l'optique de l'application de la DEPEEFV : la valorisation du produit doit permettre d'atteindre les taux de valorisation massique imposés, au meilleur coût pour le dernier détenteur.

Précisons également que lors de la formulation de voies d'amélioration de la conception des produits, seul le critère recyclabilité est considéré dans un premier temps. Les implications liées à la prise en compte d'autres critères de conception sont envisagées dans un deuxième temps.

1.4.2. Le cas particulier du critère de recyclabilité environnementale

Il convient de discuter des classes d'impact environnemental choisies. Dans quelques unes des approches présentées au premier chapitre, notamment les approches de S. Lee, S. Gerner ou encore J. Huisman, il est affirmé qu'une note unique est plus facilement compréhensible et interprétable par un concepteur qu'une évaluation multicritères. La pondération des classes d'impact utilisée dans ces méthodes est cependant largement discutable et il est aujourd'hui recommandé dans les textes de normalisation de l'ACV d'adopter une évaluation environnementale multicritères (AFNOR 1997) : c'est l'approche adoptée pour les études de cas. Les classes d'impacts retenues dans la suite sont celles d'EIMETM, dont les indicateurs et les unités associées sont répertoriés dans la Table A.9 de l'Annexe 8.

D. Hunkeler établit qu'il est difficile de considérer toutes les classes d'impacts lors d'une évaluation environnementale en cours de conception (HUNKELER 2000) et un choix parmi les classes d'impacts s'impose afin de permettre la prise de décision. A condition d'être réalisé dans la transparence comme requis dans (AFNOR 1997), ce choix peut par exemple être orienté par la stratégie de l'entreprise, ou par des mesures réglementaires imminentes, comme par exemple celles concernant la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ce choix peut également être effectué en fonction de la problématique d'éco-conception : puisque la démarche présentée dans ce mémoire vise la réduction des impacts environnementaux de la fin de vie des produits, les classes d'impacts « Réduction des ressources naturelles » et « Réduction des ressources énergétiques » semblent particulièrement pertinentes. Lors d'interview de responsables environnement des entreprises du secteur électr(on)ique partenaires du projet, les trois classes d'impacts « Effet de serre », « Ressources naturelles » et « Ressources énergétiques » sont d'ailleurs

systématiquement citées comme prioritaires. Puisque ces trois classes d'impacts sont étroitement liées aux ressources minérales et aux consommations énergétiques, il semble nécessaire de retenir également une classe d'impact liée aux matières plastiques : la classe d'impact « Eutrophisation de l'eau » est ainsi retenue. Ce dernier choix est également cohérent avec le fait que les concepteurs de produits sont généralement sensibles aux impacts sur la qualité de l'eau (HUNKELER 2000).

Dans les études de cas présentées dans la suite, les quatre classes d'impacts seront appelées « RMD »¹ pour la contribution à la diminution des ressources naturelles, « ED »² pour la contribution à la diminution des ressources énergétiques, « GW »³ pour la contribution à l'effet de serre, et « WE »⁴ pour la contribution à l'eutrophisation de l'eau.

1.5. *Mise en œuvre d'une démarche d'amélioration de conception*

Lors de l'élaboration des voies d'amélioration de conception, aucun des deux modes de combinaison « what-if » et « élitiste » n'est considéré prioritaire à priori.

La recherche de voies d'amélioration de conception est positionnée dans ce chapitre dans un schéma itératif intervenant en phase de conception détaillée. Les études de cas présentées sont menées sur des produits existants et sont donc déconnectées des projets réels de conception : l'identification de voies d'amélioration de conception n'est que simulée et les bénéfices de leur mise en œuvre doivent être considérée comme *potentiels*. Ces règles sont néanmoins discutées et validées avec nos partenaires industriels.

¹ Pour « Raw Material Depletion » en anglais

² Pour « Energy Depletion » en anglais

³ Pour « Global Warming » en anglais

⁴ Pour « Water Eutrophication » en anglais

Partie 2. Application de la méthode à l'étude de la recyclabilité de cartes électroniques

2.1. Introduction

D'un point de vue environnemental, une carte électronique constitue un élément tout à fait important du produit qui la contient : une carte contient en effet des quantités importantes de métaux précieux permettant d'assurer la qualité et la fiabilité des transmissions, et sa fabrication consomme de grandes quantités d'eau et d'énergie (GOOSEY 1999). La valorisation d'une carte électronique en fin de vie apparaît particulièrement difficile en raison de la complexité du mélange des matériaux et des substances (MOYER 1997) ; la carte constitue néanmoins pour de nombreux PEEFV l'un des rares éléments présentant une valeur économique positive, et elle est donc très recherchée par les démonteurs de produits.

Bien que la stratégie de réutilisation de la carte et/ou de ses composants soit a priori séduisante, elle est encore peu mise en œuvre dans l'industrie. Aujourd'hui, comme établi au Chapitre 2, les cartes électroniques sont généralement traitées dans un four métallurgique qui permet de récupérer certains métaux non ferreux et de valoriser énergétiquement les matières plastiques. Trois unités de traitement des cartes sont aujourd'hui disponibles en Europe. La schématisation du procédé de recyclage de cartes électroniques est présentée dans l'Annexe 7.

Dans cette partie, la recyclabilité d'une carte est étudiée seule et est découplée de la recyclabilité du produit qui la contient. Le procédé de valorisation de la carte est considéré seul et est « déconnecté » du scénario de valorisation du produit. Aucune étape de logistique n'est considérée.

L'application de la méthode à plusieurs types et générations de cartes électroniques mène à l'établissement de règles d'utilisation et à une première mise en évidence de l'intérêt de la méthode.

2.2. Etude de cas n°1 : évaluation de la recyclabilité de la carte électronique d'un téléviseur

2.2.1. Objectifs et hypothèses

Traditionnellement, l'évaluation environnementale de produit ou de procédé, en particulier par la méthodologie ACV, est envisagée de manière comparative : des indicateurs d'impacts environnementaux absolus, indiquant par exemple la masse rejetée d'un gaz ou d'une substance, présentent en effet une signification limitée dans un processus de prise de

décision comme la conception de produit. Une approche comparative, plus facile à manier, permet de présenter les résultats sur une échelle adimensionnelle, de 0 à 100%, et de comparer ainsi les impacts selon plusieurs classes.

La méthodologie exposée dans ce mémoire s'insère dans ce cadre comparatif puisqu'elle vise la comparaison des performances d'une option de conception selon plusieurs scénarii de valorisation.

Pour toute approche relative, il convient d'établir un référentiel : dans la méthode, il s'agit de déterminer à quel scénario de référence doit être comparé un bénéfice environnemental de la valorisation d'une pièce ou d'un produit. Cette discussion concerne avant tout la présentation des résultats de l'évaluation et influence donc la perception de la recyclabilité de produit ; elle permet de plus de préparer la suite des études de cas. La réflexion s'appuie sur l'étude de la recyclabilité d'une carte électronique extraite d'un téléviseur conçu et fabriqué par Thomson. La carte, dont la photographie et les caractéristiques physiques sont présentées dans l'Annexe 9, est entièrement modélisée avec le logiciel EIME™ en coopération avec le producteur (cf. copie d'écran sur la Figure A.9 de l'Annexe 9), ce qui permet d'établir les contenus environnementaux propres aux matériaux et aux composants.

Pour cette étude de cas, les données techniques et économiques du procédé de valorisation sont celles collectées dans le cadre du programme ENSAM/ADEME. Pour les données environnementales, les informations concernant les entrants et sortants secondaires du procédé de valorisation de cartes électroniques ne sont pas disponibles. Précisons néanmoins que les émissions gazeuses des fours de fonderie de métaux non ferreux respectent les normes d'émissions en vigueur (MARK 2000). Les IIER envisagés ici concernent donc uniquement des contributions positives du procédé qui produit des matériaux recyclés de qualité équivalente à la matière vierge.

2.2.2. Choix d'un référentiel de bénéfice environnemental maximum

Ce paragraphe vise à établir à quel scénario de référence doit être comparé un scénario réel de traitement. Il est proposé de choisir comme référentiel le scénario permettant d'obtenir les performances de valorisation maximales : celui-ci consiste :

- soit en un scénario de *réutilisation totale* de l'élément,
- soit en un scénario de *recyclage total* de tous les matériaux présents dans l'élément.

L'IIER calculé pour le traitement de la carte est ainsi d'abord comparé à un scénario référentiel de réutilisation totale de la carte, puis à un scénario référentiel de recyclage total de tous les matériaux présents. Pour ce faire, le calcul des indicateurs d'impact de la carte à l'aide d'EIME™ permet d'établir le contenu environnemental de la carte, correspondant au scénario « réutilisation totale » ; la fonction « Bill of Materials » d'EIME™ permet de

connaître la composition en matériau de la carte, et rend ainsi possible la construction du scénario « recyclage total ».

Les résultats de cette application pour les deux scénarii de référence sont présentés dans la Figure 3.2. Dans cette figure, la contribution environnementale des scénarii de référence est fixée à 100% et la valeur 0% correspond à un bénéfice environnemental nul.

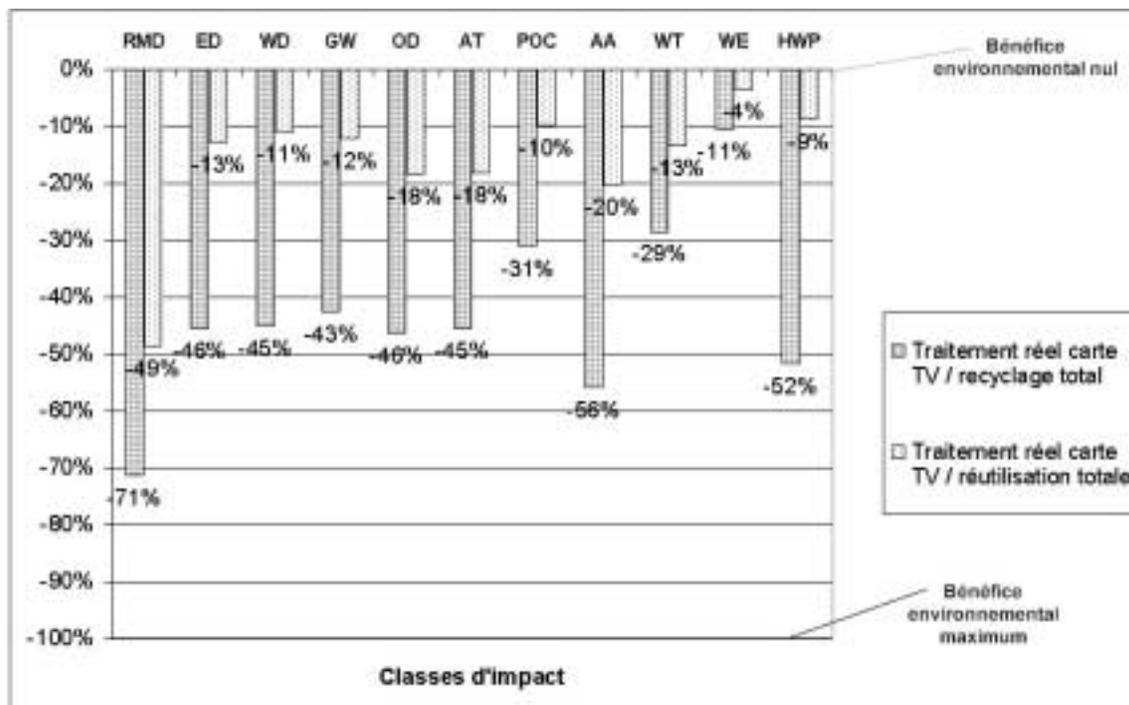


Figure 3.2. Evaluation de l'IIER de la carte électronique d'un téléviseur selon 11 classes d'impact environnemental – Evaluation comparée à l'IIER d'un scénario de réutilisation totale et l'IIER d'un scénario de recyclage total.

Ces résultats montrent logiquement que la marge de progression de la valorisation réelle d'une carte est plus importante lorsque celle-ci est comparée à une réutilisation totale plutôt qu'à un recyclage total. Ceci semble particulièrement vérifié pour certaines classes d'impacts, comme les classes ED, WD, GW, AA : la raison de ce phénomène réside probablement dans l'importance de ces classes lors de la fabrication des composants, réalisée par des procédés très consommateurs en eau et énergie.

Le choix d'un scénario de référence doit cependant être positionné dans une approche cycle de vie : il n'est en effet pas sûr que la réutilisation de cartes ou de composants soit toujours pertinente d'un point de vue environnemental : les bénéfices environnementaux de leur réutilisation pourraient en effet être compensés par de probables gains énergétiques associés à l'utilisation de cartes et composants récents. Pour illustrer cet aspect, les gains environnementaux réalisés lors de la valorisation de la carte sont comparés aux impacts environnementaux associés à la consommation du téléviseur lors des dix ans de son utilisation ; les résultats de cette comparaison, présentés dans la Figure A.11 de l'Annexe

11, rappellent la prédominance environnementale de la phase utilisation sur le cycle de vie de ce type de produit.

Cette réflexion mène à la formulation des recommandations suivantes pour le choix d'un scénario de référence maximum :

- Le référentiel « réutilisation totale » doit être utilisé :
 - si le développement d'une filière de réutilisation de composants ou de sous-ensemble du produit est encouragé,
 - si le degré de liberté de la conception porte sur le choix parmi plusieurs options de composants ou d'associations de composants.

Le choix d'un tel référentiel nécessite une quantité importante de données environnementales concernant la production des pièces et de composants. Une approche cycle de vie doit également être adoptée.
- Le référentiel « recyclage total » peut cependant être utilisé :
 - si la stratégie de recyclage est encouragée pour tous les éléments du PEEFV,
 - si le degré de liberté de la conception se limite au choix des matériaux.

Un tel choix de référentiel permet de s'affranchir de la collecte de données environnementales relatives à la production des pièces et composants.
- Quel qu'il soit, le choix du référentiel doit être le même pour tous les éléments du produit, pour permettre leur comparaison.

Dans la suite de l'application de la méthode à des études de cas, le scénario « recyclage total » est choisi arbitrairement comme scénario de référence maximum.

2.2.3. Conclusions de l'étude de cas n°1

L'application de la méthode à une carte électronique de téléviseur permet de discuter du choix d'un scénario de référence pour l'indicateur de recyclabilité environnementale. Cette discussion ne modifie pas les règles de calcul, mais elle permet d'adopter une présentation cohérente des résultats de l'évaluation multicritères : cette présentation permet en particulier de positionner un scénario de valorisation par rapport à un scénario optimal, rendant possible le positionnement de l'approche dans une démarche d'amélioration continue. L'adoption de ce référentiel permet de plus à l'IIER d'être homogène avec l'IMR, dont la valeur 100% correspond à un recyclage / une valorisation totale du produit.

2.3. Etude de cas n°2 : évaluation de la recyclabilité de plusieurs générations de cartes électroniques de téléphones portables

2.3.1. Objectifs et hypothèses

La miniaturisation des composants électroniques réalisée dans la dernière décennie pour des raisons fonctionnelles et économiques présente des implications environnementales bénéfiques, grâce à des consommations moindres de ressources. La miniaturisation implique des évolutions spectaculaires de la conception. Les effets de cette tendance sur la recyclabilité des cartes électroniques de trois générations de téléphones portables sont ici analysés : pour ce faire, les compositions de plusieurs générations de cartes commercialisées entre 1992 et 1996 sont établies à partir des données obtenues lors d'une opération pilote de collecte et de valorisation de téléphones portables menée en 1997 par l'association de producteurs ECTEL (ECTEL 1997). Les compositions des cartes étudiées et les hypothèses adoptées sont précisées dans l'Annexe 10.

2.3.2. Indicateur massique de recyclabilité

A partir de la composition des cartes et les taux de récupération des matériaux lors de la mise en œuvre du procédé, l'IMR est calculé pour chacune des générations de cartes. Les résultats sont présentés sur la Figure 3.3.

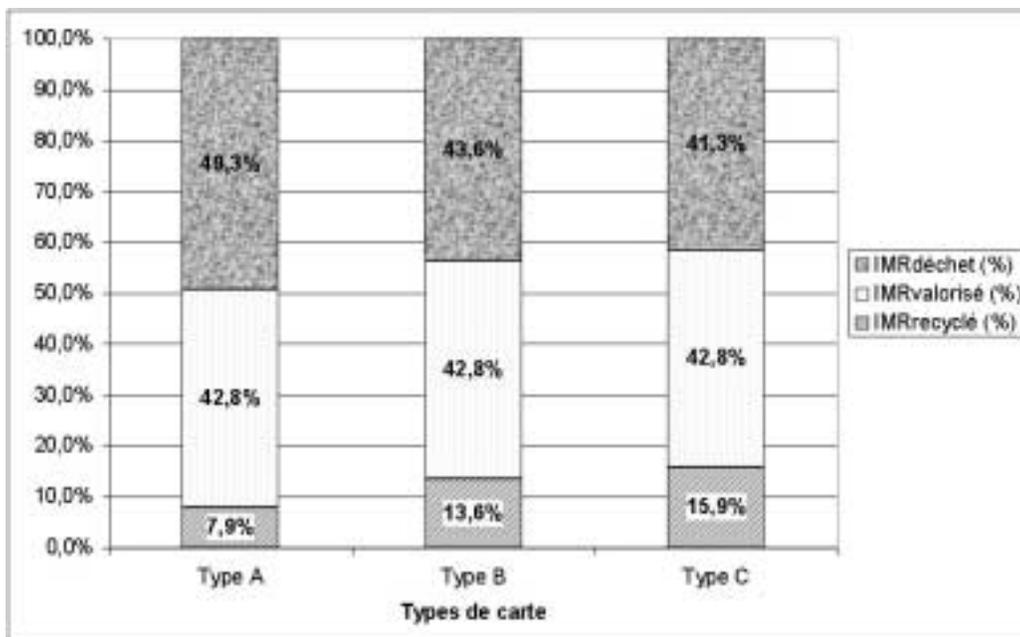


Figure 3.3. Résultats des IMR de trois générations de cartes de téléphones portables.

Ces résultats montrent que plus le type de carte est récent, plus la part massique de matériau recyclable est importante : ceci peut s'expliquer par une augmentation de la part massique des métaux ciblés par le procédé de recyclage (argent, cuivre, palladium, plomb et

or) au cours des évolutions des cartes. La miniaturisation des cartes de téléphones portables de 1992 à 1996 semble donc contribuer à une *amélioration* de la recyclabilité des cartes selon le critère massique.

2.3.3. Indicateur économique de recyclabilité

Le coût de reprise d'une carte électronique par un producteur de métaux non ferreux est fonction des coûts de réception, de traitement et d'échantillonnage d'un lot de carte, et de la concentration du lot en matériaux cibles. Les rencontres avec des démonteurs de produits et des recycleurs de cartes nous ont permis d'établir une relation liant composition d'une carte, cours économique de certains métaux et valeur de reprise de la carte. Pour des raisons de confidentialité, cette relation n'est pas explicitée dans ce document.

Les résultats de l'évaluation des IER des trois générations de cartes sont présentés dans la Table 3.1. Pour le calcul, deux approches de recyclabilité successives sont adoptées : une approche dite *massique*, pour laquelle l'IER est exprimé en € par kilogramme de carte : c'est l'approche typique d'un recycleur de produit ; une approche dite *fonctionnelle*, pour laquelle l'IER est exprimé en € par carte : c'est l'approche typique d'un producteur de produit.

Table 3.1. Résultats des IER de trois générations de cartes de téléphones portables.

	Carte type A	Carte Type B	Carte Type C
IER (€/kg de carte)	31.5	16.2	9.2
IER (€/carte)	16.5	0.8	0.4

La miniaturisation conduit à une réduction de la valeur des cartes : pour l'approche massique, cette baisse de l'IER d'un rapport de 2 et 3 est associée à la baisse de concentration des matériaux de valeur, tel que l'or, l'argent, le palladium et le cuivre ; pour l'approche fonctionnelle, la baisse de l'IER d'un rapport de 20 et 40 est liée à la fois à l'appauvrissement des cartes en métaux de valeur et à l'allègement des cartes.

La miniaturisation et l'appauvrissement des cartes électroniques de 1992 à 1996 semblent donc conduire à une *baisse substantielle* de leur recyclabilité économique.

2.3.4. Indicateur d'impact environnemental de recyclabilité

Les IIER sont calculés pour les trois générations de cartes et sont présentés sur le graphe de la Figure 3.4. Dans cette figure, 0% correspond à une contribution nulle et 100% correspond à un scénario de recyclage total de tous les métaux présents dans chaque type de téléphone portable. Afin de simplifier l'analyse et conformément aux choix réalisés précédemment, les résultats de l'IIER sont présentés pour les classes d'impacts RMD, ED, GW et WE. Comme pour la carte du téléviseur, seules les contributions positives du procédé de valorisation sont intégrées au calcul de l'IIER.

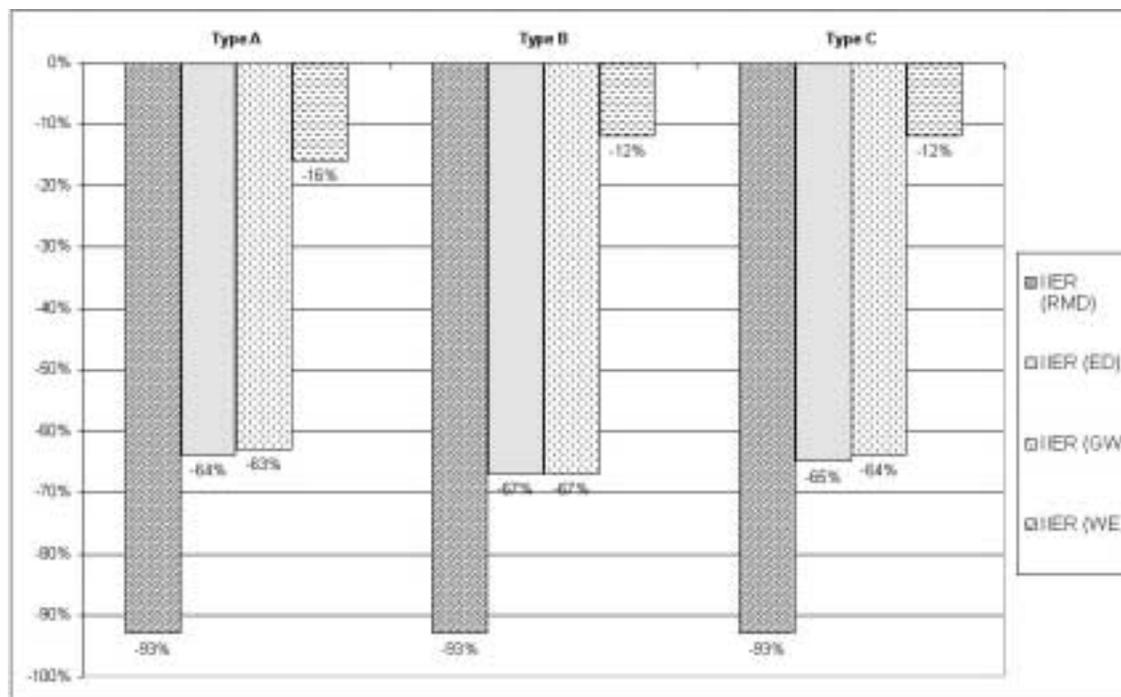


Figure 3.4. Résultats des IER de trois générations de cartes de téléphones portables pour quatre classes d'impact.

L'analyse des résultats montre que pour la classe d'impact RMD, le procédé de recyclage présente une contribution environnementale proche du maximum : cet indicateur est en effet largement influencé par les matériaux visés par le procédé, notamment l'or, l'argent et le palladium. Pour les classes ED et GW, cette contribution est moins proche de l'optimal mais encore importante : les principaux contributeurs à ces classes d'impacts sont en effet d'abord les métaux visés par le procédé (notamment or, argent et cuivre), et ensuite les matières plastiques. La contribution du procédé selon l'impact WE, auquel contribue plus largement les matières plastiques, apparaît beaucoup plus faible. Ces résultats montrent surtout que les contributions positives du procédé sont assez stables selon les générations de téléphones portables : ceci est dû à une légère augmentation de la part massique recyclée pour les types A à C (cf. 2.3.2), et à une compensation de cette augmentation par un appauvrissement des cartes en matériaux à fort contenu environnemental.

La miniaturisation semble donc avoir *peu d'influence* sur la recyclabilité environnementale des cartes électroniques de téléphones portables de 1992 à 1996.

2.3.5. Conclusions de l'étude de cas n°2

Il semblerait donc que la miniaturisation des cartes électroniques destinées aux téléphones portables de 1992 à 1996 ait un impact positif sur leur recyclabilité massique, un impact négatif sur leur recyclabilité économique, et peu d'impact sur leur recyclabilité environnementale : cette application montre que les trois types de recyclabilité présentent

une corrélation très faible pour les cartes. Elle met ainsi en évidence l'intérêt d'adopter une évaluation multicritère de la recyclabilité de produit.

Puisque la tendance de la conception des cartes est marquée par une intégration et une miniaturisation de plus en plus forte afin de limiter les coûts de fabrication tout en améliorant les performances, il est probable qu'à l'avenir l'IER continue de décroître. L'influence de cette tendance sur les deux autres critères de recyclabilité nécessiterait une étude particulière.

2.4. Etude de cas n°3 : évaluation de la recyclabilité du mélange de plusieurs générations de cartes électroniques

Alors que les producteurs reprochent souvent à la proposition de directive DEPEFV de ne contenir que peu d'incitation à l'amélioration de la conception des produits, il peut être instructif de discuter de l'influence de la recyclabilité d'un produit sur la recyclabilité d'un gisement de produits. Les recyclabilités des trois générations de cartes électroniques explorées au paragraphe précédent sont comparées à la recyclabilité du mélange des trois cartes : cette étude correspond aux cas de figures où les produits en fin de vie sont mélangés, soit à des produits fabriqués par la concurrence, soit à des produits plus anciens. Les résultats sont présentés dans l'Annexe 12 pour les trois critères de recyclabilité. Pour ces calculs, les approches massiques et fonctionnelles sont à nouveau adoptées. Pour l'indicateur environnemental IIER, le référentiel maximum choisi est le bénéfice environnemental associé au recyclage total des métaux présents dans le mélange.

L'analyse des résultats montre que, pour l'approche fonctionnelle, la recyclabilité du mélange est largement influencée par la recyclabilité de la carte de masse la plus importante ; pour l'approche massique, la recyclabilité du mélange est une moyenne de la recyclabilité des éléments qui le composent. Ainsi, dans les deux cas, les bénéfices de recyclabilité associés aux efforts de conception d'un producteur devraient logiquement être réduits lors du mélange de produits éco-conçus avec des produits moins performants. La méthode permet ainsi d'évaluer dans quelles mesures les bénéfices d'une modification de conception sont affectés par le mélange du produit considéré avec d'autres produits.

De tels calculs pourraient s'avérer particulièrement utiles dans la perspective du développement de systèmes de collecte de produits non spécifiques aux marques.

2.5. Conclusions concernant la recyclabilité des cartes électroniques

Cette partie a consisté en l'application des indicateurs de recyclabilité à des cartes électroniques, élément tout à fait particulier d'un PEEFV. Les cartes électroniques contenant des quantités importantes de matériaux de grandes valeurs économiques et environnementales, l'application de la méthode a permis de montrer la richesse et l'utilité

d'une évaluation multicritère de recyclabilité. De plus, l'application de la méthode a permis de mener une réflexion concernant le choix de référentiels pour l'IIER et d'établir des règles de calcul pour cet indicateur. Enfin, l'influence du mélange des produits lors de la collecte sur la recyclabilité d'un produit a été discutée.

Les discussions présentées dans cette partie sont donc essentiellement qualitatives et permettent d'illustrer la complexité de la notion de « recyclabilité de produit ». Elles ne permettent cependant pas d'approcher l'amélioration de la conception des cartes : celle-ci aurait en particulier consisté à évaluer l'influence sur la recyclabilité de différentes alternatives de conception, afin d'orienter les choix des concepteurs. Comme ébauché par G. Rebitzer dans (REBITZER 2002), ces alternatives concernent les composants et les associations de composants, les types de substrats, les types de soudure, les surfaces de carte ou encore le nombre de couches internes. Une telle démarche n'a pu être mise en œuvre par manque de contacts avec les équipes en charge de la conception des cartes. Néanmoins, les rencontres et échanges avec des démonteurs de produits et des recycleurs de cartes ont permis d'établir un certain nombre de règles applicables à la conception des cartes : ces règles, établies essentiellement à partir des conditions d'entrée du procédé de valorisation des cartes, sont qualitatives et concernent notamment le choix de quelques matériaux et additifs et la facilité d'extraction de quelques composants (ENSAM/ADEME 2002).

Partie 3. Application de la méthode en vue de l'amélioration de la conception d'un téléviseur

3.1. Etude de cas n°4 : évaluation globale de la recyclabilité d'un téléviseur - Voies d'amélioration de sa conception

3.1.1. Objectifs et hypothèses

Cette étude de cas consiste en l'application de la méthode d'évaluation de la recyclabilité à un produit, un téléviseur, et à en l'identification de voies d'amélioration de sa conception. Elle permet de mieux comprendre l'influence de la recyclabilité des composants et des procédés de valorisation sur la recyclabilité du produit, dans un contexte multiscénarii. A travers cette étude de cas, la procédure menant de l'évaluation de la recyclabilité à l'identification de voies d'amélioration est pour la première fois illustrée ; les bénéfices de leur mise en œuvre sont également évalués. Enfin, une discussion sur l'applicabilité de l'une des voies d'amélioration identifiées met en évidence les limites liées à la prise en compte des seuls scénarii actuels de valorisation.

Dans ce paragraphe, la recyclabilité du téléviseur est évaluée successivement pour trois scénarii dont les caractéristiques sont les suivantes :

- le produit est initialement démonté manuellement selon un mode opératoire observé chez un démonteur ; les fractions verre, métaux ferreux et métaux non ferreux extraites sont recyclées par des filières disponibles aujourd'hui en Europe ;
- seul le traitement de certaines pièces plastiques diffère entre les scénarii :
 - dans le scénario 1, toutes les pièces en matériaux plastiques sont enfouies en CET ; ce scénario est dominant aujourd'hui en Europe pour les PEEFV ;
 - dans le scénario 2, toutes les pièces plastiques extraites sont orientées vers un broyage suivi d'un procédé de tri gravimétrique puis d'un recyclage ; cette filière, aujourd'hui prioritairement alimentée de résidus de broyage automobiles, est disponible en quelques exemplaires en France ;
 - dans le scénario 3, quelques pièces plastiques sont orientées vers un procédé de tri par identification spectrométrique infrarouge proche (NIR) puis vers un recyclage : cette filière est aujourd'hui disponible en quelques exemplaires en Europe ;
- les procédés de tri des scénarii 2 et 3 ont des performances diverses : le tri gravimétrique ne permet de séparer que le matériau à la densité la plus faible, le polypropylène (PP),

- tandis que le tri par identification permet de séparer tout type de matériau plastique; la pureté, le taux de récupération, les coûts de mise en œuvre des deux procédés diffèrent ;
- les trois scénarii considérés sont aujourd'hui disponibles à l'échelle industrielle en Europe et sont parmi les plus innovants ;
 - il est considéré que les disponibilités géographiques des trois filières de traitement des pièces plastiques sont les mêmes, et aucune étape de logistique n'est prise en compte.

Les trois scénarii de valorisation du téléviseur sont partiellement schématisés sur la Figure 3.5 :

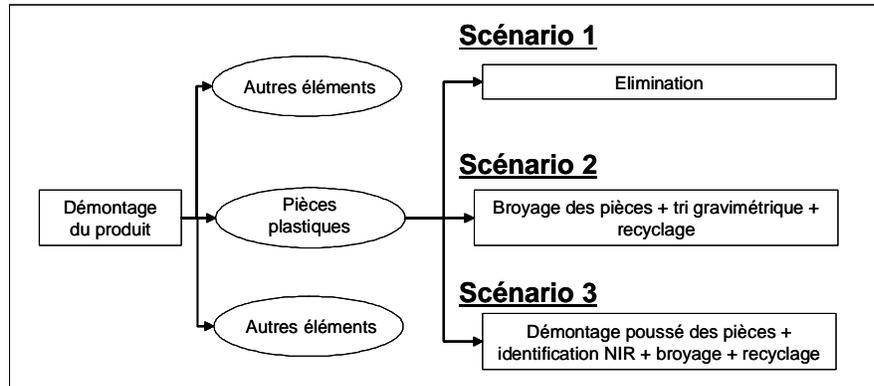


Figure 3.5. Schématisation partielle des trois scénarii de valorisation du téléviseur.

Remarque : on entend ici par « pièces plastiques » des pièces mécaniques du produit fabriquées en polymères dits « d'engineering ». Ne sont ainsi pas considérés les pièces plastiques réalisées en élastomère, comme par exemple les gaines de câbles.

Les schématisations complètes des trois scénarii ainsi que les données concernant leurs performances techniques et économiques sont présentées dans l'Annexe 13. Par manque d'information concernant les performances environnementales de tous les procédés mis en œuvre, seuls les bénéfices environnementaux liés à la valorisation des matériaux contenus dans le produit sont intégrés au calcul : l'IIER est donc l'évaluation d'un bénéfice environnemental et est de valeur négative. Les valeurs des IIER des scénarii sont comparées aux bénéfices d'un scénario optimal, correspondant au scénario de recyclage total de tous les matériaux.

3.1.2. Résultats de l'évaluation multicritères et multiscénarii de la recyclabilité d'un téléviseur

La synthèse des résultats de l'évaluation de la recyclabilité multicritères du téléviseur pour les trois scénarii de valorisation est présentée graphiquement dans la Figure 3.6. Pour une meilleure lisibilité, les résultats sont présentés critère par critère dans les Figures A.22, A.23, A.24 de l'Annexe 13.

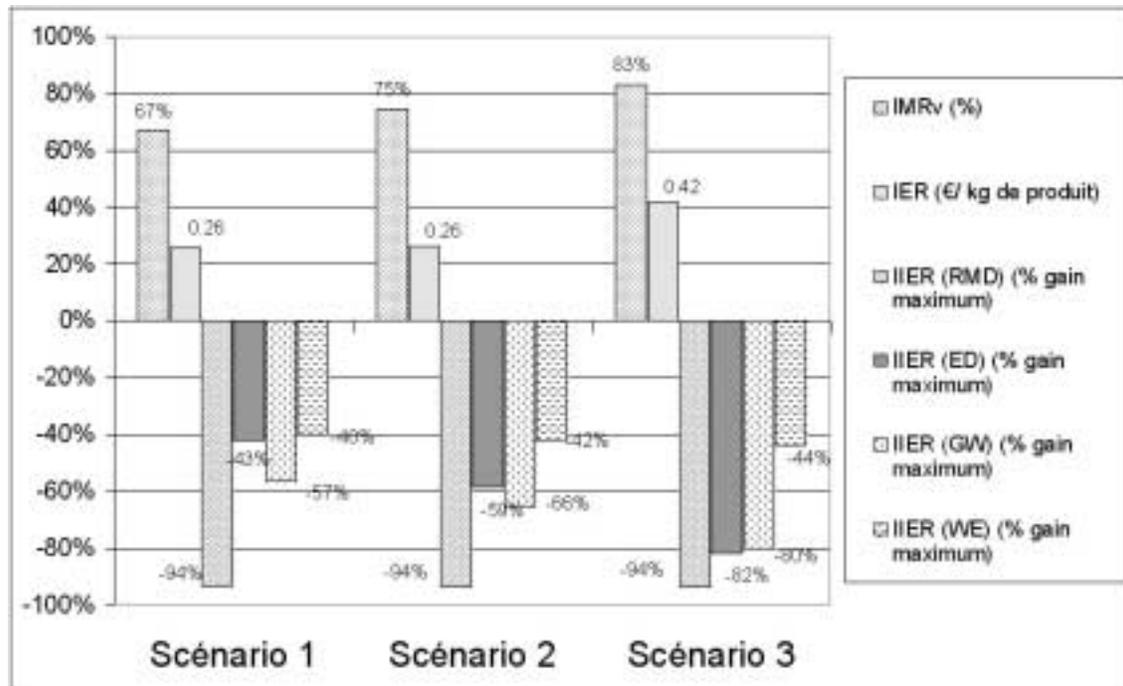


Figure 3.6. Evaluation multicritères de la recyclabilité d'un téléviseur pour plusieurs scénarii de valorisation.

Aux vues de ces résultats, deux conclusions essentielles peuvent être dressées :

- La discussion concernant les performances de recyclabilité d'un produit n'a de sens que si le scénario de valorisation envisagé est soigneusement défini : la recyclabilité massive du téléviseur apparaît en effet conforme aux prescriptions réglementaires pour les scénarii 2 et 3 mais apparaît trop faible pour le scénario 1,
- Ensuite, comme établi dans la Table 3.2, aucun scénario n'est le plus performant selon les trois critères, et le choix du « meilleur scénario », par exemple en vue de l'optimisation de la conception, nécessite une hiérarchisation de critère.

Table 3.2. Classement des scénarii de valorisation pour chaque critère de valorisation.

Critères de recyclabilité		Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Massique		③	②	①
Economique		①	①	③
Environnemental	ED,GW, WE	③	②	①
	RMD	①	①	①

3.1.3. Démarche d'amélioration de la conception du produit à partir de l'évaluation de sa recyclabilité

Comme défini précédemment, la démarche d'amélioration de conception de produit est constituée des trois étapes suivantes : l'identification des procédés problématiques, l'identification de points faibles de conception et la recherche de solutions de conception.

Remarque : il est important de noter que les voies d'amélioration de conception proposées dans cette partie sont typiques du produit et des scénarii de valorisation considérés. A ce titre, elles ne revêtent pas un caractère universel.

Parmi les trois scénarii, le scénario 2 est celui qui permet de respecter les exigences de la réglementation au meilleur coût. Le mode « élitiste » est maintenant choisi et la conception du produit est améliorée pour s'adapter au mieux au scénario 2.

↳ Identification de procédés problématiques du scénario 2

Pour les trois critères de recyclabilité, les procédés sources majeures de contributions négatives et sources mineures de contributions positives à la recyclabilité sont identifiés. Sont ainsi répertoriés sur la Figure 3.7 les procédés du scénario 2 contribuant principalement à la génération de déchets.

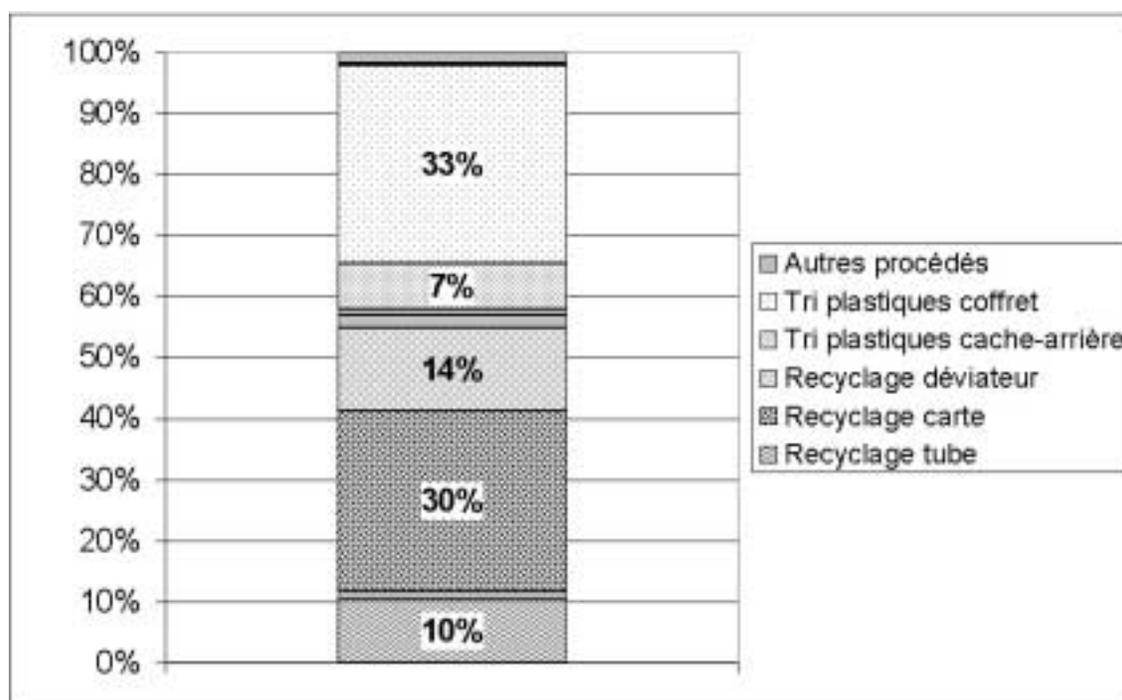


Figure 3.7. Evaluation des contributions négatives de plusieurs procédés de valorisation à la recyclabilité massique d'un téléviseur.

Sur la Figure 3.8, sont identifiés en ordonnées positives les procédés du scénario 2 contribuant à une augmentation du coût de la valorisation du produit, et en ordonnées négatives ceux contribuant à une réduction du coût.

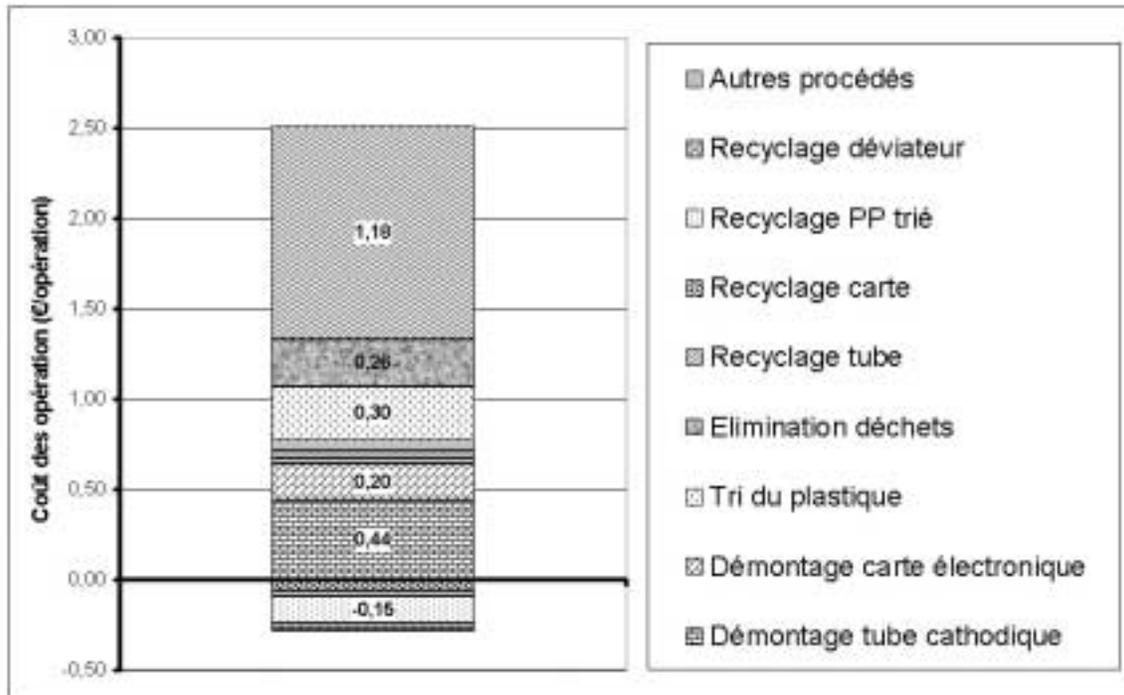


Figure 3.8. Evaluation des contributions négatives de plusieurs procédés de valorisation à la recyclabilité économique d'un téléviseur.

Sur la Figure 3.9, sont identifiés les procédés du scénario 2 contribuant principalement à un impact environnemental positif. Afin d'identifier des voies d'amélioration, ces bénéfices environnementaux sont comparés à ceux du scénario de valorisation optimal, présentés sur la Figure A.25 de l'Annexe 13.

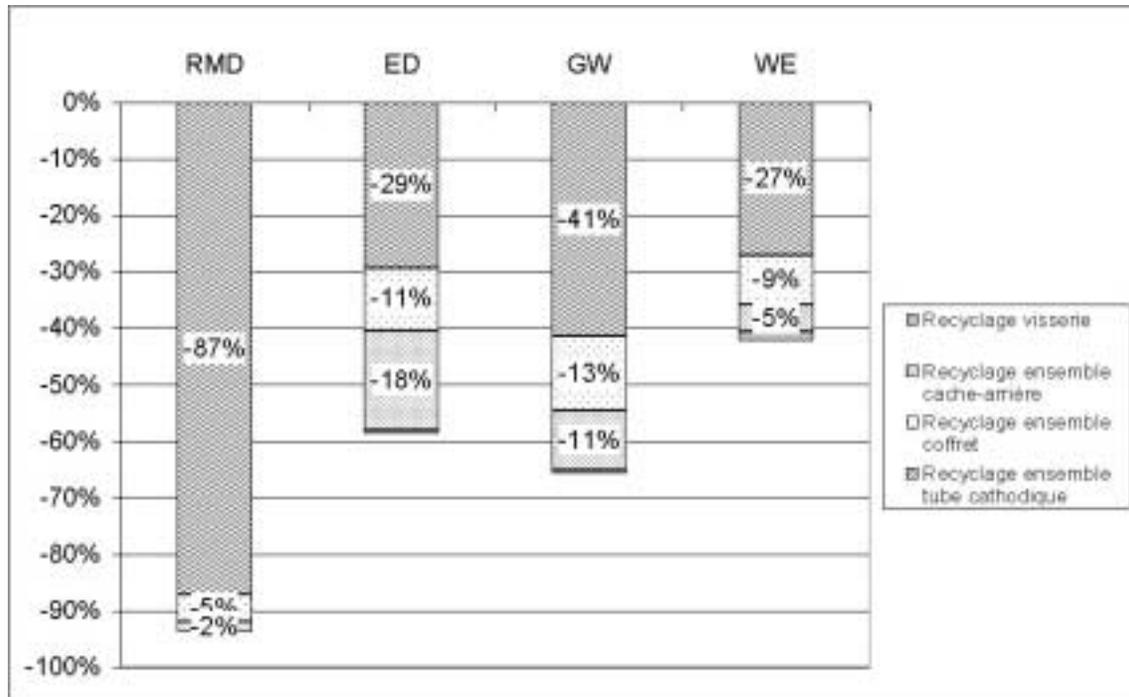


Figure 3.9. Evaluation des contributions négatives de plusieurs procédés de valorisation à la recyclabilité environnementale d'un téléviseur pour quatre classes d'impact.

Pour chacun des critères de recyclabilité, les procédés problématiques peuvent être hiérarchisés, comme réalisé dans la Table 3.3. Dans cette table, plus le classement du procédé est proche de 1, plus le procédé est problématique pour le critère considéré.

Table 3.3. Hiérarchisation des procédés problématiques de la valorisation du téléviseur selon le scénario 2.

Indicateurs de recyclabilité		Classement des procédés problématiques
IMR		1. Tri des plastiques du coffret 2. Recyclage de la carte 3. Recyclage du déviateur 4. Recyclage du tube 5. Tri du plastique du cache-arrière
IER	Négatives	1. Recyclage du tube 2. Démontage du tube 3. Elimination des déchets 4. Démontage carte 5. Tri des plastiques
	Positives	1. Recyclage du déviateur 2. Recyclage du câblage 3. Recyclage de la carte 4. Recyclage du PP trié
IIER	RMD	1. Recyclage du tube 2. Recyclage du déviateur 3. Recyclage de la carte
	ED	1. Tri des plastiques du coffret 2. Recyclage de la carte 3. Tri des plastiques du cache-arrière
	GW	1. Tri des plastiques du coffret 2. Recyclage de la carte 3. Tri des plastiques du cache-arrière
	WE	1. Recyclage de la carte 2. Démontage du tube 3. Tri des plastiques du coffret

Identification de points faibles de conception du téléviseur

A partir de cette hiérarchisation de procédés problématiques, il est possible de rechercher les caractéristiques problématiques du produit, encore appelées « points faibles de conception ». Cette recherche est réalisée en utilisant la table de correspondance représentée dans la Table 3.4, qui permet, pour chaque critère de recyclabilité, de relier un procédé aux sources possibles de contributions.

Table 3.4. Table de correspondance entre impacts des « procédés problématiques » et « points faibles de conception » pour le scénario 2.

Procédés	Conditions d'entrée	Transformation	IMR contribution négative	IER		IIER	
				Contribution négative	Contribution positive	Contribution négative	Contribution positive
Démontage des éléments polluants (tube et carte)	Pas de contact avec des substances toxiques	Extraction des éléments polluants du produit	0	(Temps de démontage) X (Coût horaire de la main d'œuvre)	0	Non pris en compte	0
Tri gravimétrique des matériaux plastiques	Plastiques broyés seulement	<ul style="list-style-type: none"> Taux de récupération du PP = 90% Pureté du PP trié = 98% Taux de récupération des autres matériaux = 0% 	<ul style="list-style-type: none"> Perte de 10 % du PP Perte de 100% des autres matériaux 	(Masse) X (Coût du procédé)	0	Non pris en compte	0
Recyclage du tube	Tube nu seulement	Séparation des matériaux et recyclage des verres et de l'acier avec 95% d'efficacité	<ul style="list-style-type: none"> 5% de perte pour tous les matériaux 	(Masse) X (Coût du procédé)	0	Non pris en compte	(Masse recyclée) X (Contenu environnemental) (avec Ks=1)
Recyclage de la carte	Carte seulement	<ul style="list-style-type: none"> Recyclage de 95% des métaux visés Valorisation énergétique des matières plastiques 	<ul style="list-style-type: none"> 5% de perte des métaux visés 5% de perte des plastiques 100% de perte des autres métaux 	0	<ul style="list-style-type: none"> Quantité de métaux de valeur Masse de la carte Cours économique des matériaux recyclés 	Non pris en compte	(Masse recyclée) X (Contenu environnemental) (avec Ks=1)
Recyclage du déviateur	Pièces concentrées en cuivre seulement	<ul style="list-style-type: none"> Recyclage de 95% du cuivre 	<ul style="list-style-type: none"> 5% de perte du cuivre 100% de perte des autres matériaux 	0	(Masse) X (Cours de reprise)	Non pris en compte	(Masse recyclée) X (Contenu environnemental) (avec Ks=1)
Revente du PP trié	Pureté en PP > 98%	Matière triée revendue pour le recyclage	0 (car $K_{marché} = 1$)	0	(Masse) X (Cours de reprise)	Non pris en compte	(Masse recyclée) X (Contenu environnemental) (avec Ks=1)
Elimination de déchet	Absence de filière	Stockage	0	(Masse) X (Coût procédé)	0	Non pris en compte	0

Après analyse des procédés problématiques et des points faibles de conception associés, une classification de quelques types de contributions à la recyclabilité de produit est réalisée. Sont ainsi recensées les contributions liées :

- pour le critère massique :
 - aux pertes des procédés de valorisation : c'est par exemple le cas du recyclage du tube ;
 - aux pertes dues à un mélange important de matériaux dans certaines pièces et composants traités dans une filière spécifique : c'est par exemple le cas du recyclage du déviateur et du recyclage de la carte électronique ;
 - aux pertes dues à l'absence de filière de valorisation pour une pièce ou un matériau : c'est par exemple le cas du « non tri » suivi de l'élimination des plastiques du coffret ;
- Pour le critère économique :
 - aux coûts engendrés par les filières de valorisation : c'est par exemple le cas du recyclage du tube, ou encore du tri des plastiques ;
 - aux coûts associés au démontage, par exemple de l'extraction du tube et de la carte ;
 - aux coûts associés à l'élimination des déchets générés en raison de l'absence de filière de valorisation de pièce ou de matériau : c'est par exemple le cas des plastiques du coffret ;
 - aux bénéfices trop faibles de la revente de matériaux : c'est par exemple le cas du manque à gagner lié aux pertes lors du tri des plastiques ;
- Pour le critère environnemental :
 - aux contributions dues aux pertes des filières : c'est par exemple le cas des pertes du recyclage du tube pour l'indicateur RMD ;
 - aux contributions dues à un trop grand mélange de matériaux dans certaines pièces et composants : c'est par exemple le cas des matériaux présents dans la carte et non valorisés, pour les indicateurs GW et ED ;
 - aux contributions dues à l'absence de filière de valorisation pour une pièce ou un matériau : c'est le cas de l'élimination du coffret.

Pour chaque type de contribution à la recyclabilité de produit, il est désormais possible d'établir un certain nombre de voies d'amélioration de la conception du produit ou de ses sous-ensembles, comme présenté dans la Table 3.5.

Table 3.5. Voies possibles d'amélioration de la conception du téléviseur pour les différents types de contributions à la recyclabilité de produit.

Types de contributions à la recyclabilité de produit	Implications possibles en conception
Perte et coûts des procédés / filières de valorisation	Peu
Mélange de matériaux dans une pièce / un composant	<ul style="list-style-type: none"> • Limiter le mélange de matériaux • Faciliter la séparation des matériaux par démontage
Matériau / composant ne possédant pas de filière de valorisation	<ul style="list-style-type: none"> • Limiter la masse de la pièce • Choisir un autre matériau
Démontage de pièce	<ul style="list-style-type: none"> • Améliorer la démontabilité de la pièce

Remarque : peu de mesures de conception peuvent permettre de compenser les pertes des procédés de valorisation, un coût de mise en œuvre trop élevé ou encore l'absence de filière : ces contributions négatives peuvent néanmoins être compensées à moyen ou long terme si la conception contribue à favoriser le développement et l'optimisation des filières.

↳ Formulation et analyse de règles de conception

Comme précisé précédemment, cette étape est typiquement de la compétence de l'équipe de conception, puisque ceux-ci disposent des informations concernant l'ensemble des critères de conception ; néanmoins, afin de montrer l'intérêt de la méthode, nous nous substituons ici à l'équipe de conception en établissant quelques règles de conception et en évaluant les bénéfices potentiels de leurs mises en œuvre.

Puisque le scénario 2 permet de respecter les objectifs législatifs de valorisation du téléviseur, l'amélioration de la conception du téléviseur selon ce scénario doit permettre d'améliorer les performances du téléviseur selon les critères économique et environnemental ; c'est cette démarche qui est envisagée :

- **Selon le critère économique :**

Parmi les cinq procédés problématiques identifiés dans la Table 3.3, seuls ceux concernant le démontage du tube, le démontage de la carte et l'élimination des déchets peuvent être influencés par les choix du concepteur à ce moment de la conception. Afin de réduire les coûts associés aux démontages, la règle suivante peut être formulée :

R1 : « Faciliter l'extraction des éléments polluants, en particulier du tube cathodique et de la carte électronique ».

Afin de réduire le coût associé à l'élimination des déchets, l'équipe a la possibilité de préférer pour les pièces plastiques un matériau possédant une filière de valorisation et la règle suivante peut être formulée :

R2 : « Chaque fois que c'est possible préférer le matériau polypropylène (PP) pour les pièces plastiques ».

L'équipe peut viser une limitation de la quantité de matériaux éliminés en raison d'un trop grand mélange de matériaux dans certaines pièces et composants ; la règle suivante peut ainsi être établie :

R3 : « Faciliter la libération des matériaux par démontage dans les composants constitués d'un mélange de matériaux, notamment le déviateur et la carte électronique ».

• **Selon le critère environnemental :**

Parmi les procédés problématiques identifiés pour le critère environnemental, le recyclage de l'ensemble coffret, contenant le coffret, la carte et quelques pièces plastiques, apparaît prépondérant. Les règles R1 et R3 peuvent ainsi à nouveau être formulées.

Les règles établies pour ces deux critères sont résumées dans la Table 3.6.

Table 3.6. Règles de conception établies pour l'amélioration de la conception du téléviseur selon le scénario 2.

Indicateurs de recyclabilité		Règles de conception pour le scénario 2
IER		<ul style="list-style-type: none"> • R1 : Faciliter l'extraction des éléments polluants, en particulier du tube cathodique et de la carte électronique • R2 : Préférer le matériau polypropylène pour les pièces plastiques • R3 : Faciliter la libération des matériaux par démontage dans les composants constitués d'un mélange de matériaux, notamment le déviateur et la carte électronique
IIER	Négatives	-
	Positives	<ul style="list-style-type: none"> • R1 : Faciliter l'extraction des éléments polluants, en particulier du tube cathodique et de la carte électronique • R3 : Faciliter la libération des matériaux par démontage dans les composants constitués d'un mélange de matériaux, notamment le déviateur et la carte électronique

Remarque : ne sont envisagées ici que des règles de conception pouvant raisonnablement être appliquées en phase de conception détaillée ; dans une phase plus en amont, des

mesures plus « radicales », comme par exemple le choix d'un tube cathodique de type différent, ou encore la forme et la géométrie de pièces plastiques auraient pu être envisagées.

La procédure menant de la hiérarchisation de procédés problématiques à l'établissement de règles de conception par l'utilisation de la table de correspondance est schématisée sur la Figure 3.10 : la procédure est schématisée pour le seul critère économique.

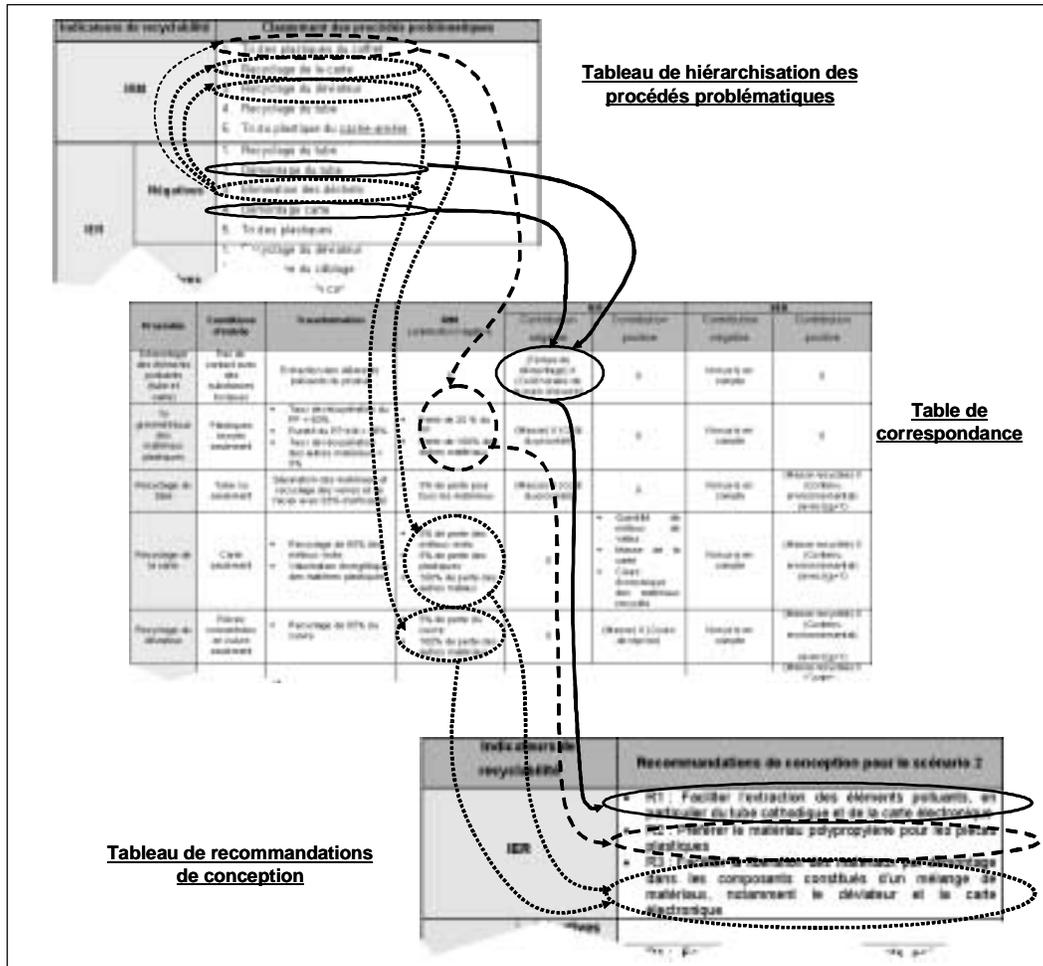


Figure 3.10. Schématisation de la procédure menant de la hiérarchisation de procédés problématiques à l'élaboration de règles de conception pour le téléviseur.

Il convient maintenant d'analyser la pertinence des règles selon leur applicabilité à la conception du produit et leur efficacité.

Après consultation d'un membre de l'équipe de conception du produit, il apparaît que les aspects liés au démontage peuvent difficilement être optimisés puisque l'architecture et les liaisons du produit sont déjà optimisées pour faciliter l'assemblage : la règle R1 est donc difficilement applicable de façon plus approfondie.

La règle R3 apparaît difficilement applicable en projet de conception de produit : les éléments visés sont par nature des mélanges complexes de matériaux ; de plus, leur conception est réalisée soit lors d'une phase très en amont du projet, soit par des fournisseurs.

La règle R2 apparaît elle tout à fait pertinente puisque le choix des matériaux des pièces du coffret est de la compétence de l'équipe de conception ; le polypropylène (PP) pourrait par ailleurs répondre au cahier des charges de certaines pièces. Cette règle est par ailleurs commune aux deux critères de recyclabilité.

↳ Suivi des performances de recyclabilité du produit lors de la mise en œuvre d'une règle

Il est maintenant proposé d'évaluer les bénéfices potentiels de la mise en œuvre de la règle R2 : dans un téléviseur re-conçu, le coffret du téléviseur, pièce de masse importante, est ainsi fabriquée en matériau PP.

Remarque : ne disposant pas des outils de calculs de structure adéquats, la nouvelle masse du coffret en PP ne peut être calculée ; elle est choisie égale à la masse du coffret initial, soit 583g.

Les évaluations de la recyclabilité du téléviseur re-conçu sont présentées dans la Table 3.7 suivante :

Table 3.7. Comparaison des évaluations de recyclabilité du téléviseur original et du téléviseur re-conçu pour le scénario 2 de valorisation.

Conception	Indicateurs de recyclabilité					
	IMR _(R+V) (% masse du produit)	IER (€/produit)	IIER			
			RMD (% du gain environnemental optimal)	ED (% du gain environnemental optimal)	GW (% du gain environnemental optimal)	WE (% du gain environnemental optimal)
Conception originale	75%	2.23	-94%	-59%	-66%	-42%
Re- conception	80%	2.06	-94%	-72%	-75%	-43%
Variation (%)	+6.5%	-7.6%	+/-0%	-22%	-13%	-2%

Après re-conception, les performances de recyclabilité du produit re-conçu sont donc améliorées ou conservées selon tous les critères de recyclabilité.

Dans une démarche de vérification des bienfaits de la re-conception, il convient maintenant de s'interroger sur ses effets sur la recyclabilité du produit selon les trois scénarii possibles de valorisation. Dans la Table 3.8, les variations de recyclabilité obtenues lors de la re-conception du téléviseur sont établies. Des données plus complètes sur ces variations sont présentées dans la Table A.20 de l'annexe 13.

Table 3.8. Variations des indicateurs de recyclabilité du téléviseur re-conçu pour les trois scénarii de valorisation.

Scénarii	Indicateurs de recyclabilité					
	IMR (% masse du produit)	IER (€/produit)	IIER			
			RMD (% du gain environnemental optimal)	ED (% du gain environnemental optimal)	GW (% du gain environnemental optimal)	WE (% du gain environnemental optimal)
Scénario 1	+/-0%	+/-0%	+/-0%	-2%	-3%	+/-0%
Scénario 2	+6.5%	-7.6%	+/-0%	-22%	-13%	-2%
Scénario 3	0%	+1.1%	+/-0%	-5%	-2%	+/-0%
Scénarii 1, 2 & 3	+2.2%	-1.6%	+/-0%	-5%	-4%	-1%

L'analyse des résultats montre que la re-conception du produit permet presque toujours au produit de présenter des performances de recyclabilité équivalentes ou meilleures que celle du produit original pour les trois scénarii et pour les trois critères ; seule la recyclabilité économique du produit pour le scénario 3 apparaît moins bonne : cette baisse est liée au cours économique du PP recyclé qui est inférieur à celui de l'HIPS recyclé. Puisque tous les scénarii sont susceptibles d'être appliqués au produit, les performances de recyclabilité moyennées pour les trois scénarii, sont considérées : ces valeurs moyennes sont meilleures que les performances de la conception originale et la règle R2 semble donc bénéfique.

↳ **Applicabilité de la règle en projet**

Lors de la présentation des résultats au partenaire industriel, il s'est cependant avéré que la règle R2, bien que possible techniquement, ne serait pas applicable aux nouvelles gammes de produit de l'entreprise : pour des raisons autres, notamment relatives à

l'innovation sur les futures produits et à la baisse des coûts d'approvisionnement et de production, le choix d'un matériau pour les pièces plastiques principales s'est en effet récemment porté sur un autre type de matériau que les polyoléfinés : les équipes de conception n'ont désormais plus la possibilité de mettre en œuvre la règle R2, empêchant l'amélioration de la recyclabilité du produit selon les scénarii considérés.

3.1.4. Conclusions de l'étude de cas n°4

L'application de la méthode à un téléviseur a permis de mieux percevoir les rôles des procédés de valorisation et des pièces et sous-ensembles d'un produit sur la recyclabilité de produit. Elle a aussi permis de démontrer l'efficacité de la méthodologie d'élaboration de règles de conception, et de discuter de leur pertinence dans un projet. Les progrès réalisés grâce à la mise en œuvre d'une règle ont ainsi pu être mesurés. Bien que la démarche d'élaboration de règles à partir de l'évaluation de recyclabilité présentée ici semble a priori longue, il est vraisemblable que cette démarche devienne plus naturelle après une phase d'apprentissage

Cette application permet par ailleurs de démontrer que la prise en compte des seuls scénarii disponibles aujourd'hui pourrait contribuer à une limitation de l'innovation en conception et pourrait aller à l'encontre de tendances de conception selon d'autres critères : cette approche semble donc trop limitative et il apparaît nécessaire de considérer des scénarii prospectifs. Cette possibilité est explorée au paragraphe suivant.

3.2. *Etude de cas n°5 : évaluation de la recyclabilité des pièces plastiques d'un téléviseur dans un schéma prospectif - Voies d'amélioration de leur conception*

3.2.1. Introduction : importance de la recyclabilité des pièces plastiques dans la recyclabilité d'un produit

Les plastiques extraits des PEEFV sont aujourd'hui largement orientés vers l'élimination et la valorisation de ces plastiques fait l'objet d'une grande effervescence technologique : comme constaté au paragraphe précédent, le mode de traitement de ces pièces conditionne pour de nombreux produits le respect ou non des taux de valorisation massiques fixés par le législateur. En plus du critère massique, le recyclage des pièces plastiques devrait trouver des justifications selon les critères économique et environnemental. La recyclabilité des pièces plastiques devrait à l'avenir revêtir un caractère de plus en plus crucial pour les PEEFV puisque, comme le souligne l'APME, les matériaux plastiques représentent une part croissante des matériaux utilisés dans les produits élect(ron)iques, en particulier dans les produits des technologies de l'information (APME 2001).

3.2.2. Objectifs et hypothèses

Cette étude de cas est centrée sur l'évaluation de la recyclabilité de pièces et sur l'amélioration de leurs conceptions. Elle permet de prendre en compte l'ensemble des dimensions de la recyclabilité de produits pertinentes pour un producteur de matériels : la dimension prospective des scénarii de valorisation, le mode de combinaison de règles de conception élaborées dans un contexte multiscénarii et les caractères « conditionnel » et « exclusif » des règles de conception sont ainsi successivement explorés.

Le produit considéré est le même téléviseur que précédemment. La recyclabilité des pièces plastiques principales est étudiée seule et est déconnectée du contexte du produit : seules les filières de valorisation des pièces plastiques sont considérées.

Les scénarii de valorisation des pièces plastiques considérées dans cette partie présentent un caractère prospectif : ils sont aujourd'hui en cours de développement par des entreprises et ils apparaissent prometteurs dans l'éventualité d'un déploiement à venir à l'échelle industrielle en Europe. Ces scénarii s'appuient sur des concepts de valorisation proches de ceux mis en œuvre dans les scénarii 2 et 3 du paragraphe précédent. Ils diffèrent cependant par le fait que des innovations sur des procédés permettent d'atteindre des performances plus intéressantes. Les principales caractéristiques de ces filières sont les suivantes :

- le scénario A, développée par l'entreprise RPI à Salt Lake City (Etats-Unis), vise la production de matériaux recyclés présentant des propriétés mécaniques propres et vendus à un prix moindre que celui de la matière vierge. Ce scénario repose essentiellement sur la mise en œuvre d'un tri par « froth flotation » de particules plastiques provenant de pièces préalablement broyées. Les procédés mis en œuvre permettent la production de plusieurs types de matériaux recyclés : PP, ABS et HIPS. Seuls les mélanges de pièces à dominante plastique sont acceptés dans ce scénario.
- le scénario B, développé par l'entreprise Technopolymer à Nagoya (Japon), vise la production de matériaux recyclés (ABS et HIPS) présentant des propriétés mécaniques équivalentes à celles de matériaux vierges et vendus au prix de la matière vierge. Ce scénario repose sur la mise en œuvre d'un tri de pièces plastiques par spectroscopie Raman, selon le type de matériau et le type d'additif présent. Seules les pièces plastiques mono matériau de masse importante ($m > 20g$), ne contenant aucun insert métallique, broyées et emballées dans un sac plastique sont acceptées par le scénario ; un procédé d'abrasion et de lavage permet de plus de s'affranchir d'un démontage préalable des étiquettes.
- afin d'assurer l'économie d'échelle de l'installation de traitement, les deux scénarii de valorisation traitent les flux provenant de plusieurs unités de démontage de produit et les

pièces plastiques sont transportées par camion du démonteur de produits jusqu'à l'unité de tri de matériaux ; les distances parcourues lors de l'étape de logistique des deux scénarii sont explicitées dans la Table A.21 l'Annexe 14.

Ces deux scénarii correspondent à deux approches différentes du recyclage des matériaux plastiques : la première, représentée par le scénario A, considère que la pureté des matériaux en sortie de tri est d'une importance moindre que les propriétés mécaniques garanties du matériau recyclé ; la seconde, représenté par le scénario B, considère que la pureté des matériaux en sortie de tri est primordiale afin d'obtenir des propriétés équivalentes à celles des matériaux vierges. Les schématisations des chaînes de procédés mises en œuvre dans chacun des scénarii sont représentées dans l'Annexe 14. Les performances des procédés de tri et des scénarii sont représentées dans les Tables A.22 et A.23 de l'Annexe 14 ; les hypothèses adoptées, notamment pour le calcul des IER sont également présentées dans l'Annexe 14.

3.2.3. Evaluation multicritères de la recyclabilité des pièces plastiques d'un téléviseur

Les évaluations multicritères de la recyclabilité des pièces plastiques sont représentées sur la Figure 3.11. Pour les critères massique et économique, elles sont comparées aux évaluations de recyclabilité des pièces selon le scénario 2 envisagé dans l'étude de cas précédente.

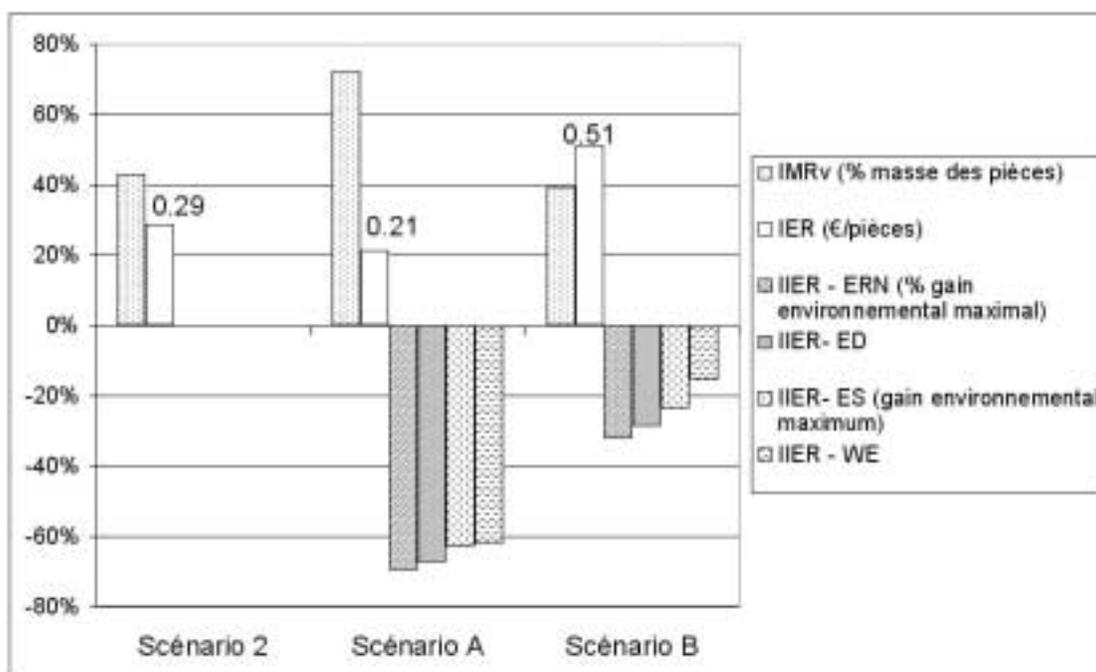


Figure 3.11. Evaluation multicritères de la recyclabilité de pièces plastiques extraites d'un téléviseur pour trois scénarii de valorisation.

Ces résultats montrent que le scénario A est plus performant que le scénario B pour tous les critères de recyclabilité. Ceci s'explique par le fait que le téléviseur ne contient que très peu de matériaux visés par le scénario B et que sa conception actuelle n'est donc pas suffisamment adaptée à ce scénario.

3.2.4. Démarche d'amélioration de la conception des pièces plastiques

Les scénarii A et B présentent des performances propres et différentes ; leurs caractéristiques sont telles que le déploiement à l'échelle industrielle de l'une, de l'autre, voire des deux filières pourrait être la source d'opportunités différentes et intéressantes pour la valorisation des PEEFV : c'est pourquoi, dans la démarche d'amélioration de conception des pièces plastiques, il est considéré qu'elles sont toutes les deux susceptibles d'exister à l'avenir.

↳ **Identification de procédés problématiques des scénarii A et B**

Par une démarche similaire à celle exposée en 3.1.3, il est possible d'établir une hiérarchisation des procédés problématiques, comme présentée dans la Table A.26 de l'Annexe 14.

↳ **Identification de points faibles de conception et élaboration de règles de conception**

A partir de la hiérarchisation, l'utilisation de la table de correspondance de la Table A.27 de l'Annexe 14, table répertoriant deux procédés problématiques des scénarii A et B, permet d'établir une liste de points faibles de conception des pièces plastiques et de proposer un certain nombre de voies d'amélioration de conception pour les critères massique et économique. Ces voies sont présentées dans la Table 3.9.

Table 3.9. Voies d'amélioration de conception applicables à des pièces plastiques pour deux scénarii de valorisation

Indicateurs de recyclabilité		Voies d'amélioration de conception	
		Scénario A	Scénario B
IMR		<ul style="list-style-type: none"> Pour toutes les pièces plastiques, préférer un matériau subissant moins de pertes lors du tri : 1. HIPS ; 2. PP ; 3. ABS 	<ul style="list-style-type: none"> Pour les pièces plastiques de masse importante (>20g), préférer des matériaux séparables : ABS ou HIPS Pour les autres pièces : aucune règle Réduire la quantité de pièces de masse inférieure à 20g
IER	Négatives	<ul style="list-style-type: none"> Faciliter l'extraction de l'ensemble cache-arrière 	<ul style="list-style-type: none"> Pour les pièces plastiques de masse importante (masse>20g), préférer des matériaux : ABS ou HIPS Faciliter l'extraction et la préparation du coffret Faciliter l'extraction des chassis-holders Faciliter l'extraction du cache-arrière
	Positives	-	<ul style="list-style-type: none"> Pour les pièces de masse importante : préférer les matériaux de valeurs économiques élevées : 1. HIPS-PPO-FR ; 2. ABS-FR ; 3. HIPS-FR / ABS ; 4. HIPS

La procédure menant de la hiérarchisation de procédés problématiques à l'établissement de règles de conception par l'utilisation de la table de correspondance est schématisée sur la Figure 3.12 : sur cette figure, l'amélioration de la conception pour le scénario A concerne le critère massique ; pour le scénario B, elle concerne le critère économique.

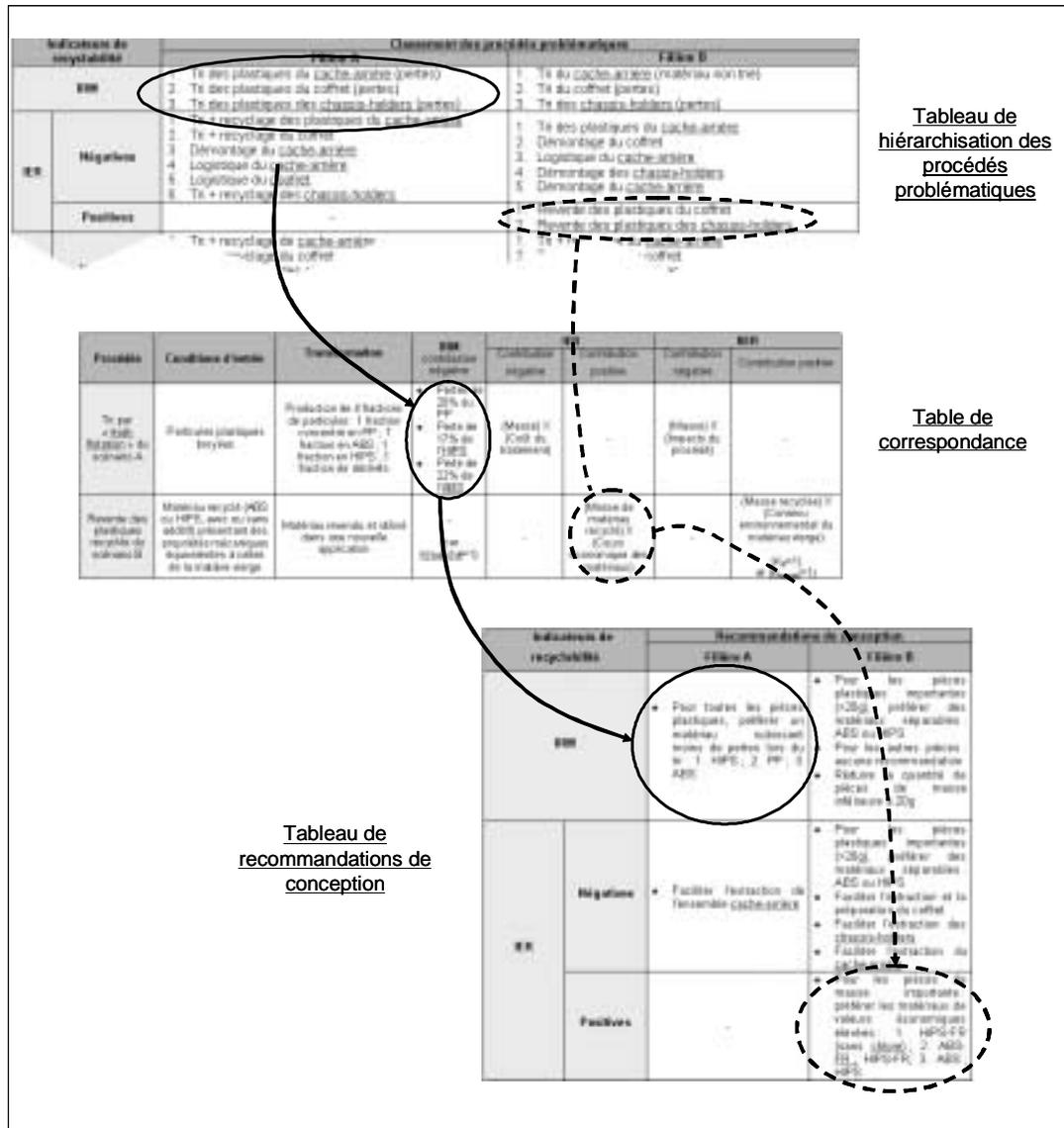


Figure 3.12. Schématisation de la procédure de passage de la hiérarchisation de procédés problématiques à la proposition de voies d'amélioration de conception pour les pièces plastiques du téléviseur.

↳ **Combinaison des règles de conception propres aux scénarii A et B**

Parmi les règles de conception établies dans la Table 3.9, certaines sont communes aux deux scénarii, d'autres sont antagonistes, et les dernières sont non antagonistes. Il convient maintenant de procéder à une combinaison de ces règles par les combinaisons « élitiste » et « what-if » définies au Chapitre 2.

Tout d'abord, les règles d'amélioration de conception en vue de l'amélioration de la recyclabilité sont combinées pour le critère massique : les règles résultantes sont présentées dans la Table 3.10. Pour le mode élitiste, chaque scénario est successivement préféré.

Table 3.10. Combinaison de règles de conception visant l'amélioration de recyclabilité massique selon les modes « élitiste » et « what-if ».

Mode de combinaison des règles	Voies d'amélioration de conception	
Mode « what-if »	<ul style="list-style-type: none"> • Pour les pièces plastiques de masse importante (masse>20g), préférer : 1. HIPS ; 2. ABS • Pour les autres pièces plastiques (masse < 20g), préférer : 1. HIPS ; 2. PP ; 3. ABS • Réduire la quantité de pièces de masse inférieure à 20g 	
Mode « élitiste »	Scénario A préféré	Scénario B préféré
	<ul style="list-style-type: none"> • Pour toutes les pièces plastiques, préférer : 1. HIPS ; 2. PP ; 3. ABS • Réduire la quantité de pièces de masse inférieure à 20g 	<ul style="list-style-type: none"> • Pour les pièces plastiques importantes (masse>20g), préférer: 1. HIPS ; 2. ABS • Pour les autres, préférer : 1. HIPS ; 2. PP ; 3. ABS • Réduire la quantité de pièces de masse inférieure à 20g

Les voies d'amélioration de conception visant l'amélioration de la recyclabilité économique sont ensuite combinées : les règles résultantes sont présentées dans la Table 3.11. Puisque aucune des règles d'amélioration n'est antagoniste à une autre selon le critère économique, les règles résultantes sont les mêmes pour les deux modes de combinaison.

Table 3.11. Règles de conception visant l'amélioration de recyclabilité économique résultant d'une combinaison de règles selon les modes « élitiste » et « what-if ».

Mode de combinaison des règles	Règles de conception
Mode « what-if » et « élitiste »	<ul style="list-style-type: none"> • Faciliter l'extraction et la préparation du coffret • Faciliter l'extraction des châssis-holders • Faciliter l'extraction du cache-arrière • Pour les pièces de masse importante : préférer les matériaux de valeurs économiques élevées : 1. HIPS-PPO-FR ; 2. ABS-FR ; 3. HIPS-FR / ABS; 4. ABS ; 5. HIPS

Le mode de combinaison de règles peut donc revêtir un caractère particulièrement important dans la démarche d'amélioration de conception : ainsi, pour le critère massique et pour les pièces de masses importantes, le matériau PP est soit recommandé comme

deuxième choix (mode « élitiste », avec le scénario A préféré) soit non recommandé (mode « what-if »).

↳ **Evaluation des bénéfices de la mise en œuvre d'une règle de conception**

Puisque aucun élément ne nous permet d'affirmer que la probabilité d'existence à l'avenir de l'une des deux filières est supérieure à l'autre, le mode de gestion « what-if » est choisi. Pour ce mode, l'utilisation du matériau HIPS pour les pièces de masse importante est préférable à l'utilisation du matériau PP : il est ainsi proposé d'explorer ici les implications sur la recyclabilité des pièces plastiques de la mise en œuvre de la règle suivante :

R4 : « Préférer le matériau HIPS pour les pièces plastiques de masse supérieure à 20g ».

Pour une version re-conçue des pièces plastiques du téléviseur, le matériau choisi pour le cache-arrière passe donc du polypropylène (PP) au polystyrène choc (HIPS). Ce changement de matériau implique des modifications de la géométrie de la pièce afin de respecter des contraintes de sécurité et de fabrication : après modélisation structurelle de la nouvelle pièce réalisée par le partenaire industriel, la masse de la pièce du cache-arrière passe de 806g à 1030g. Les variations évaluées sur la recyclabilité massique et économique des pièces plastiques lors du changement de matériau du coffret sont présentées pour les deux scénarii dans la Table 3.12 suivante :

Table 3.12. Variations constatées sur la recyclabilité massique et économique des pièces plastiques lors du changement de matériaux du coffret du téléviseur.

Scénarii	Conception	Indicateurs de recyclabilité	
		IMR (% masse des pièces)	IER (€/pièces)
Scénario A	Conception originale	72%	0.21
	Re-conception	74%	0.23
	Variation	+3%	+10%
Scénario B	Conception originale	40%	0.51
	Re-conception	84%	-0.24
	Variation	+110%	+147%
Scénarii A + B	Variation	+41%	+98%

Il apparaît donc que la modification de conception envisagée est bénéfique pour les critères massique et économique selon les cas de figures suivant : toutes les pièces extraites des produits sont traités par le scénario A ; toutes les pièces extraites des produits sont

traités par le scénario B ; 50% des pièces extraites des produits sont traités par le scénario A, et les 50% autres sont traités par le scénario B. Ce gain de recyclabilité apparaît d'autant plus intéressant pour le partenaire que ce changement de matériau est à l'étude et pourrait prochainement faire l'objet de développement industriel.

↳ **Evaluation des bénéfices de la mise en œuvre d'une autre règle de conception**

Pour la conception des pièces « châssis-holder », le matériau HIPS est généralement choisi et est associé à un retardateur de flamme. Le partenaire industriel a cependant récemment modifié ce choix afin de pouvoir utiliser un retardateur de flamme non chloré : le matériau HIPS-PPO associé à un retardateur de flamme au phosphate équipe désormais les téléviseurs ; le changement de matériau n'induit pas de changement de masse. Cette règle peut être énoncée de la façon suivante :

R5 : « Pour les pièces nécessitant un retardateur de flamme, préférer le matériau HIPS-PPO associé à un retardateur de flamme non chloré ».

La règle R5 est par ailleurs cohérente avec la règle établie dans la Table 3.11 qui stipule de préférer les matériaux de valeur économique importante. L'objet de cet alinéa est d'évaluer les implications sur la recyclabilité de la pièce de ce changement de matériau. Les variations de recyclabilité selon les deux scénarii ainsi évaluées sont présentées dans la Table 3.13.

Table 3.13. Variations subies par les indicateurs de recyclabilité massique et économique lors du changement de matériau des châssis-holders.

Scénarii	Conception	Indicateurs de recyclabilité	
		IMR _(R+V) (% masse de la pièce)	IER (€/pièce)
Scénario A	Conception originale	74%	-0.01
	Re-conception	74%	-0.01
	Variation	0%	0%
Scénario B	Conception originale	84%	-0.07
	Re-conception	84%	-0.20
	Variation	0%	-185%
Scénario A + Scénario B	Variation	0%	-162%

Cette règle conduit donc à une amélioration des performances de la pièce selon le critère économique, et ce pour toutes les alternatives intégrant le scénario B. Cette règle présente donc un caractère *spécifique* à une filière, c'est-à-dire que sa mise en œuvre n'améliore la recyclabilité que pour cette seule filière.

Cette application montre que la mise en œuvre de règles difficilement justifiables pour le seul critère recyclabilité peut cependant permettre de réaliser des bénéfices d'un point de vue recyclabilité.

3.2.5. Influence des procédés mis en œuvre dans les filières sur la recyclabilité de pièce et sur leur conception

Jusqu'ici, les règles de conception ont été établies en fonction des contraintes des scénarii et leur mise en œuvre potentielle pourrait permettre de réaliser des gains substantiels de recyclabilité. Dans l'optique d'améliorer encore la recyclabilité des pièces plastiques, et puisque la modélisation des filières de valorisation le permet, il est envisagé dans ce paragraphe d'établir des règles de conception à partir des contraintes des procédés.

Ainsi, en considérant le scénario B, présentant les performances économiques les plus favorables si la conception lui est adaptée, une optimisation de conception selon le critère massique peut encore être recherchée : alors que la perte en masse de la filière est évaluée à 14% pour des matériaux de type styrénique, il est possible d'évaluer les contributions des procédés mis en œuvre : ces contributions négatives à la recyclabilité massique sont résumées sur la Figure 3.13 suivante.

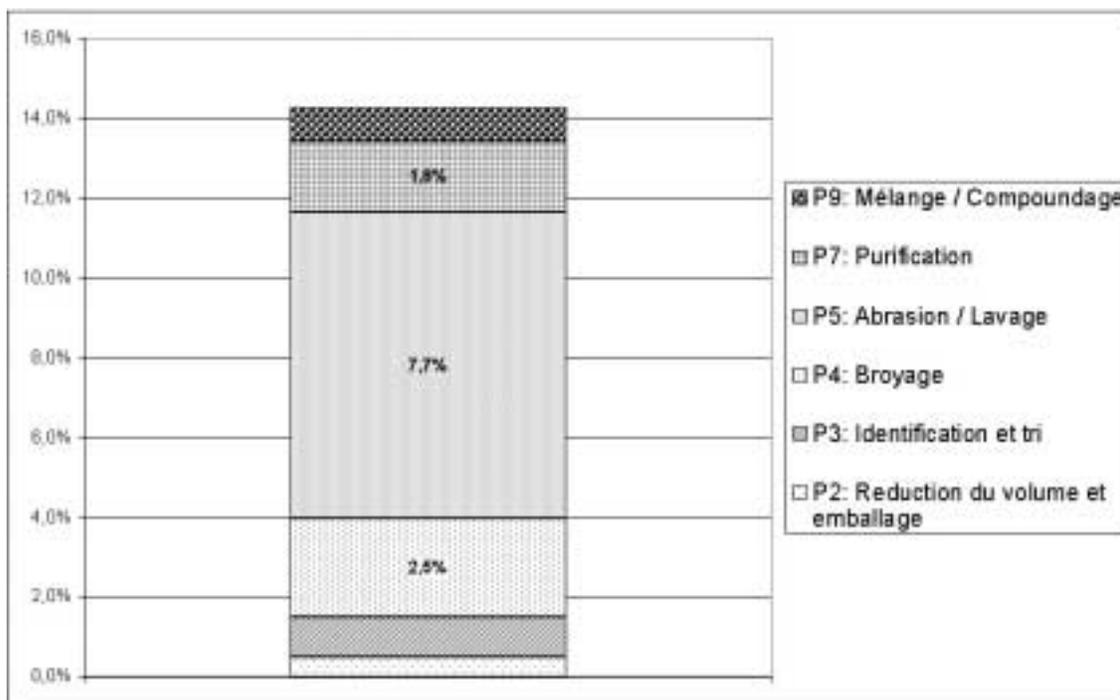


Figure 3.13. Evaluation des contributions négatives des procédés du scénario B à la recyclabilité massique de pièces plastiques.

Cette analyse permet d'établir que la contribution négative majeure à la recyclabilité massique est celle du procédé « abrasion / lavage » des particules plastiques ; ce procédé, présenté comme une innovation de la filière, permet de purifier les particules plastiques et

ainsi de s'affranchir du retrait manuel d'étiquettes ou de revêtement (par exemple la peinture) lors de la préparation des pièces.

Une équipe de conception pourrait alors envisager de limiter ces pertes par des modifications de conception : en particulier, il pourrait mettre en œuvre la règle suivante :

R6 : « Éviter l'utilisation d'autocollants et de revêtements sur toutes les pièces plastiques de masse supérieure à 20g ».

Cette règle pourrait inciter à terme le trieur à ne pas mettre en œuvre le procédé « abrasion/lavage ». Une telle règle n'est cependant envisageable que si elle est appliquée pour *toutes* les pièces de *tous* les produits susceptibles d'être traitées par la filière : elle pourrait en particulier être envisagée comme règle systématiquement appliquée par une entreprise à un type de produit. Cette règle ne devrait permettre d'atteindre les bénéfices escomptés que si le trieur ne traite que des produits de la marque, et si la règle est respectée dans la durée : le trieur ne pouvant se permettre d'éliminer le procédé qu'à condition d'avoir la certitude de l'absence d'étiquette et de revêtement, cette règle doit être respectée pour toutes les générations de produits. La règle présente un caractère *exclusif* : la non application de la règle sur une seule pièce d'un gisement remet en cause tous ses bénéfices.

La mise en œuvre de la règle pourrait permettre une augmentation de l'IMR des pièces plastiques d'environ 8%, conduisant à l'augmentation de l'IMR du produit d'environ 2%. Les recyclabilités économique et environnementale bénéficient également d'une telle modification, puisque le procédé en question est très consommateur d'énergie.

Remarque : les travaux actuels visant à développer des étiquettes compatibles avec les matériaux ne sont ici pas pris en compte : la contrainte considérée est celle du trieur/producteur de matériau recyclé qui stipule qu'aucun corps étranger, en particulier étiquette ou revêtement, ne doit être présent au moment du « compoundage ».

La mise en œuvre d'une telle règle se heurte cependant à d'autres critères de conception : il apparaît ainsi que les téléviseurs haut de gamme ne peuvent se passer de finition à l'aide de revêtement peinture pour les pièces visibles ; les produits de gammes moyenne et basse, peuvent eux s'affranchir dans certaines conditions de telles finitions. A condition que le traitement des pièces plastiques par le scénario B ne soit envisagé que pour ces seules catégories de produits, la règle R6 pourrait donc être appliquée à toutes les pièces de masse importante de tous les produits des gammes moyennes et basses.

3.2.6. Conclusions de l'étude de cas n°5

Cette étude de cas permet avant tout de montrer l'intérêt de l'adoption d'une démarche prospective pour les scénarii de valorisation : les progrès technologiques de la valorisation,

même s'ils ne sont pas certains, devraient en effet permettre l'élaboration de règles *moins contraignantes pour l'équipe de conception*. Cette étude de cas permet aussi de montrer le degré d'élaboration des règles formulées par la méthode, qui peuvent concerner non seulement le matériau employé, mais également ses additifs et des techniques de finition. Enfin, il a été possible de discuter des différents niveaux de mise en œuvre des règles de conception.

3.3. Conclusions sur les études de cas n°4 et n°5

Nous avons montré dans ces études de cas que la méthode proposée conduit à des voies d'amélioration *concrètes et spécifiques* aux scénarii et produits. Ainsi, comme schématisé sur la Figure 3.14 suivante, la méthode permet à une équipe de conception :

- soit d'identifier des règles pertinentes parmi un ensemble de règles disponibles,
- soit de proposer des voies d'amélioration originales.

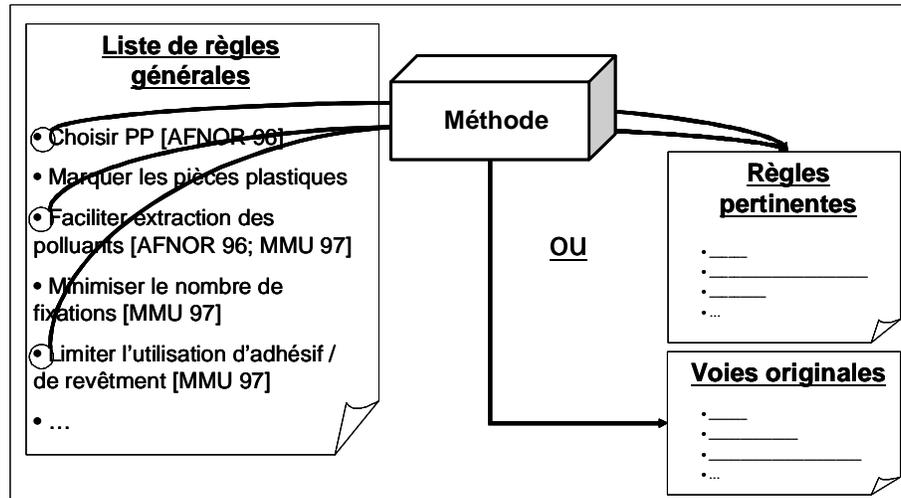


Figure 3.14. Deux modes d'utilisation de la méthode pour proposer des voies d'amélioration de conception.

Les résultats obtenus semblent *précis*, puisque les indicateurs massique et économique sont proches des évaluations communiquées par certains recycleurs et certains producteurs ; puisque l'indicateur environnemental est un développement original, il ne peut être comparé à aucune autre grandeur obtenue sur le terrain et sa précision ne peut être évaluée. La *robustesse* des indicateurs est également montrée dans la mesure où les évaluations de recyclabilité varient avec les changements de conception du produit.

La prise en compte de scénarii prospectifs (étude de cas n°5) permet aux équipes de conception de disposer de plus de degré de liberté : les performances des procédés prospectifs sont en général meilleures que celles des procédés actuels et les contraintes des filières sur le produit sont donc moins fortes. Ceci est illustré sur la Figure 3.15 en positionnant le nombre de polymères possibles pour la conception de l'enveloppe (coffret et

cache-arrière) du téléviseur, représentant le degré de liberté, pour trois époques différentes :
 Epoque 1 : pas d'intégration des aspects valorisation en fin de vie ; Epoque 2 : intégration des aspects valorisation en fin de vie en considérant les scénarii de valorisation actuels (étude de cas n°4) ; Epoque 3 : intégration des aspects valorisation en fin de vie en considérant les scénarii de valorisation prospectifs (étude de cas n°4).

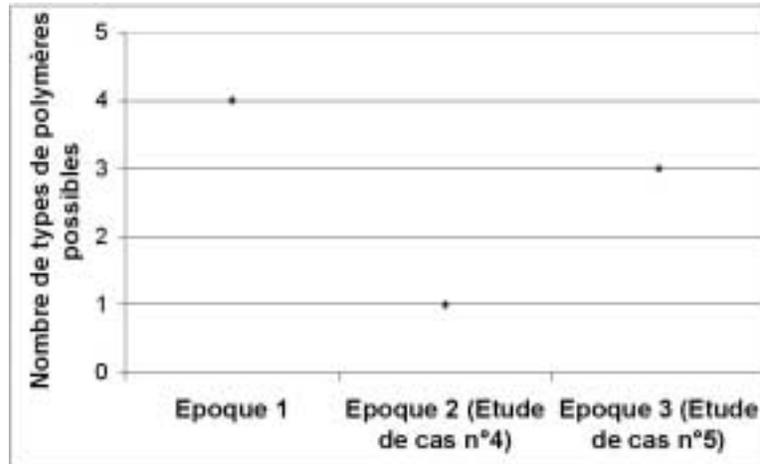


Figure 3.15. Nombre de types de polymères possibles pour l'enveloppe du téléviseur, pour trois époques différentes.

La prise en considération de scénarii prospectifs, même si elle facilite la tâche des équipes, doit néanmoins être envisagée sous certaines conditions, comme discuté dans le Chapitre 4.

Conclusions du Chapitre 3

L'application de la méthode aux cinq études de cas a permis d'illustrer et de discuter de la pertinence de toutes les composantes originales de la méthode, en particulier :

- l'évaluation de la recyclabilité de produit et de pièces par le calcul des indicateurs,
- le cheminement suivi de l'évaluation de recyclabilité jusqu'à l'élaboration de règles de conception,
- le caractère multicritères de la recyclabilité de produit,
- la construction de filières et de scénarii de valorisation à partir de procédé de valorisation,
- la prise en compte de scénarii de valorisation actuels et prospectifs,
- le mode de combinaison de règles de conception.

Ces applications ont, de plus, permis de discuter de l'influence d'un certain nombre d'aspects sur le calcul des indicateurs et sur l'amélioration de conception de produit qui pourrait lui être associé ; les aspects discutés en particulier sont:

- le choix de référentiels pour le calcul de l'IIER,
- le mélange du produit avec d'autres produits lors de la collecte,

- la coopération des producteurs avec les acteurs de la valorisation,
- la spécificité et l'exclusivité des règles de conception.

La Table 3.14 tente de répertorier les composantes de la méthode discutées lors de l'application de la méthode et les enseignements obtenus.

Table 3.14. Résumé des illustrations et des enseignements lors de l'application de la méthode à des études de cas.

Etudes de cas	Multicritère	Multiprocédé (= filière)	Multiscénarii	Produit / sous-ensemble	Présent / prospectif	Eco-conception	Illustration et enseignements de l'application
① Carte téléviseur	-	-	-	Sous-ensemble	Présent	-	<ul style="list-style-type: none"> • Discussion d'un règle de choix de référentiel pour l'IIER • Mise en perspective de la valorisation en fin de vie dans le contexte cycle de vie
② Cartes de téléphones portables	✓	-	-	Sous-ensemble	Présent	-	<ul style="list-style-type: none"> • Importance du caractère multicritères de la recyclabilité • Pertinence relative de certains composants sur la recyclabilité de produit
③ Mélange de cartes	✓	-	-	Sous-ensemble	Présent	-	<ul style="list-style-type: none"> • Implication du mélange de produits en fin de vie sur leurs recyclabilités
④ Téléviseur	✓	✓	✓	Produit	Présent	✓	<ul style="list-style-type: none"> • Elaboration de règles de conception à partir de l'évaluation • Implications de modifications de conception sur tous les scénarii • Choix d'une hiérarchisation des critères de recyclabilité • Limitations engendrées par la considération des seuls scénarii actuels • Spécificité des règles à une filière
⑤ Pièces plastiques du téléviseur	✓	✓	✓	Sous-ensemble	Prospectif	✓	<ul style="list-style-type: none"> • Implications des mode de combinaison des règles de conception • Intérêt du schéma prospectif • Sources de données multiples • Combinaison de règles de conception liées à la recyclabilité avec d'autres critères de conception • Influence de la conception sur les performances futures d'une filière • Importance de la coopération des producteurs avec les acteurs de la valorisation • Exclusivité des règles de conception

CHAPITRE 4

VERS L'UTILISATION DE LA METHODE EN ENTREPRISE

CHAPITRE 4

VERS L'UTILISATION DE LA METHODE EN ENTREPRISE

Introduction	186
Partie 1. Les développements à réaliser avant l'utilisation de la méthode en entreprise	187
1.1. Vers des sources de données variées pour le calcul des indicateurs	187
1.2. Incertitudes concernant les évaluations de la recyclabilité.....	188
1.3. Vers la transposition de la méthode en langage informatique.....	189
Partie 2. Recommandations en vue d'une utilisation optimale de la méthode en entreprise	191
2.1. Recommandations concernant les choix effectués par l'entreprise	191
2.2. Recommandations en vue de la structuration et la gestion des règles de conception	192
2.2.1. Proposition d'une structuration de base de règles	192
2.2.2. La base de règle : un outil de capitalisation du savoir de l'entreprise	194
2.3. Recommandations en vue de la structuration et la gestion de la base de données de procédés	194
Partie 3. Intégration de la méthode dans le processus de conception de produit	196
3.1. La recyclabilité : un critère parmi d'autres en conception	196
3.1.1. La recyclabilité : un critère pouvant devenir plus prioritaire.....	196
3.1.2. Implications du contexte multicritère sur la gestion des règles de conception ...	198
3.2. Deux utilisations possibles de la méthode en phase de conception de produit	199
3.3. Positionnement plus large de la méthode dans un processus de conception.....	200
Conclusions du Chapitre 4	202

Introduction

Le développement de la méthode, son application à des études de cas et les échanges effectués avec les producteurs de produits et les acteurs de la valorisation nous ont amené à envisager l'intégration de la méthode dans l'organisation d'une entreprise. Cette partie vise à exposer nos propositions. Précisons que ces propositions restent qualitatives et que leur robustesse est limitée puisqu'elles n'ont pas été mises à l'épreuve de la réalité.

L'étude de ces recommandations est également un moyen de positionner la méthode par rapport aux caractéristiques que doit présenter une méthode d'ECOV, caractéristiques ayant été établies dans le premier chapitre.

L'organisation du chapitre est exposée dans la Figure 4.1 suivante :

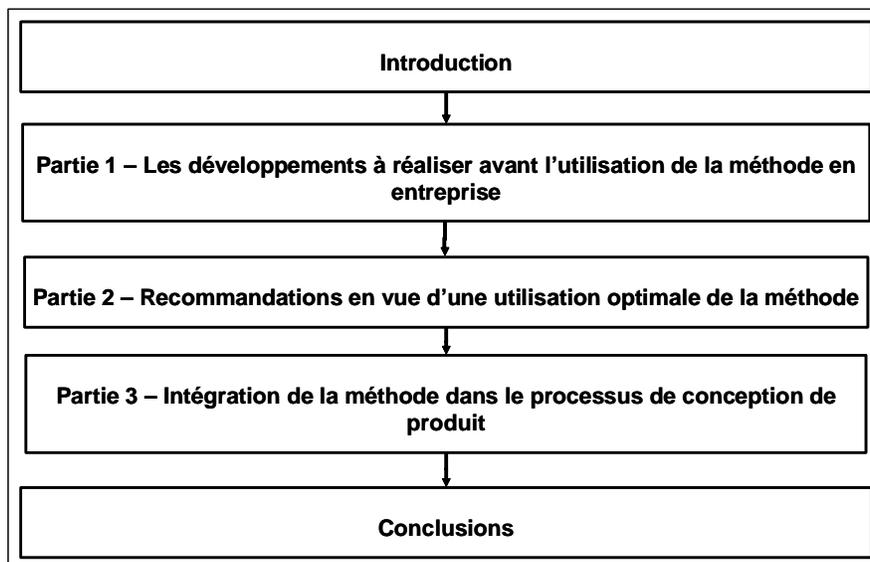


Figure 4.1. Représentation synoptique du Chapitre 4.

Partie 1. Les développements à réaliser avant l'utilisation de la méthode en entreprise

L'objectif de nos recherches était de définir une méthode d'ECOV qui soit adaptable au milieu industriel. Avant que la méthode ne soit complètement utilisable par les entreprises, un certain nombre d'aspects doivent être explorés. Dans les paragraphes qui suivent, les problématiques de la collecte des données alimentant le modèle et des incertitudes associées aux évaluations de recyclabilité sont étudiées. Afin que la méthode soit plus facilement intégrable dans les pratiques modernes de conception, la traduction de la méthode en langage logiciel est ensuite envisagée.

1.1. Vers des sources de données variées pour le calcul des indicateurs

La méthode élaborée au cours de nos recherches apparaît largement dépendante des données disponibles concernant les procédés et des filières de valorisation. Comme souvent en évaluation environnementale, la collecte des données est une étape très importante dans l'optique du déploiement industriel de la méthode.

Nous avons identifié au Chapitre 1 trois sources essentielles d'informations concernant les performances des filières : les données de la littérature, les données collectées auprès des acteurs de la valorisation, les données obtenues à l'aide de modèles de procédés.

Les deux premières sources ont été largement employées pour l'application de la méthode aux études de cas. La troisième source, partiellement envisagée au Chapitre 3, nous semble prometteuse et son utilisation est examinée dans ce paragraphe.

Le degré de développement des modèles de procédés de valorisation est aujourd'hui trop faible pour envisager leur utilisation systématique dans la méthode. Néanmoins, nous nous attachons ici à expliquer comment de tels modèles pourraient être combinés et intégrés à la méthode. Pour ce faire, l'association de modèles de procédés de broyage et de tri est étudiée pour le scénario A de valorisation de pièces plastiques définie pour l'étude de cas n°5 du Chapitre 3.

Le modèle de broyage envisagé est celui qui devrait être obtenu si les recherches de L. Aboussouan (ABOUSSOUAN 1999a) ou celles de S. Zhang (ZHANG 1997; ZHANG 1999) étaient poursuivies et appliquées spécifiquement aux pièces plastiques : le modèle devrait permettre, à partir de la nature des matériaux présents, des caractéristiques géométriques des pièces et des paramètres de fonctionnement du broyeur, de livrer la distribution granulométrique des particules pour chaque matériau présent. Le modèle de tri par « froth flotation » envisagé est celui développé par J. Wei et M.J. Realff, qui permet, à partir de la composition massique des matériaux dans le mélange entrant, de la distribution

granulométrique des particules pour chaque matériau et des paramètres de fonctionnement du tri, de livrer les taux de récupération et les puretés des matériaux dans les fractions sortantes (WEI 2002). A partir de ces informations, il est possible de calculer les indicateurs multicritères de recyclabilité.

La Figure 4.2 présente schématiquement comment les deux modèles pourraient être combinés en vue du calcul des indicateurs.

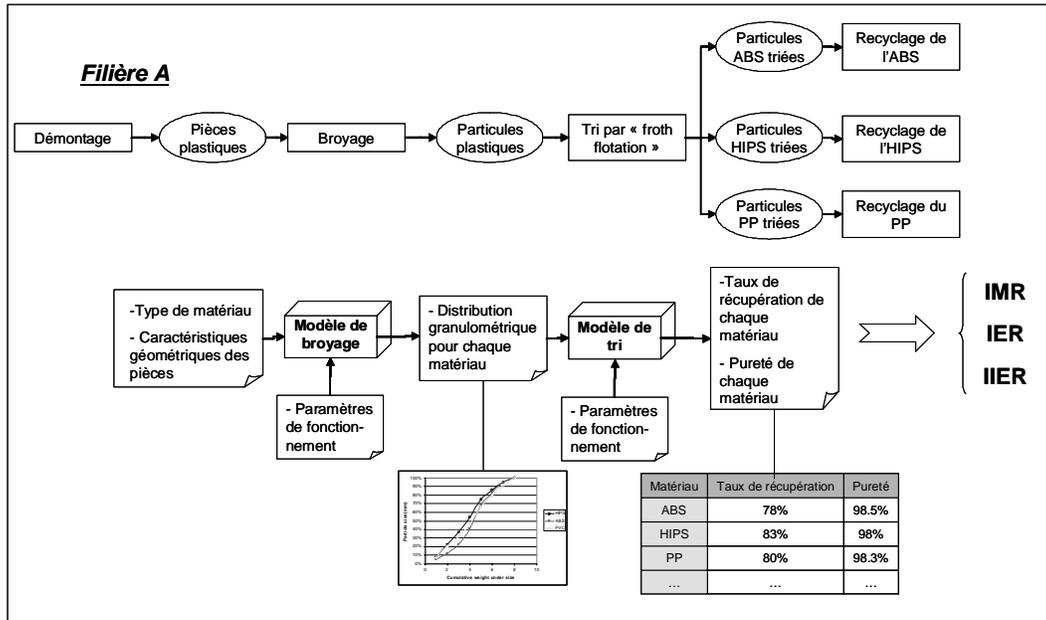


Figure 4.2. Proposition de combinaison des modèles de broyage et de tri par flottation pour le calcul des indicateurs de recyclabilité de pièces plastiques.

A terme, l'utilisation de modèles de procédés devrait permettre de disposer de données complètes sur les performances techniques, économiques et environnementales des procédés et des scénarii. Cette source de données pourrait faire l'objet de recherches futures.

1.2. Incertitudes concernant les évaluations de la recyclabilité

Les données qui alimentent le modèle sont caractérisées par un grand nombre de sources d'incertitudes, et la fiabilité des résultats de l'évaluation de recyclabilité et des règles qui en découlent en est dépendante. Les sources d'incertitudes sont encore plus nombreuses si un schéma prospectif est adopté : les évolutions des performances des procédés ou des cours économiques des matériaux sont alors concernées. Comme toute méthode d'évaluation environnementale, notre méthode devrait comporter un volet d'évaluation des incertitudes associées : les résultats devraient en particulier être analysés en fonction de la précision, de la cohérence, de la reproductibilité ou de la représentativité des données, comme établi par l'AFNOR pour les ACV (AFNOR 1997).

Nos travaux ont conduit au développement et à la consolidation d'une méthode globale et aucun modèle d'évaluation des incertitudes associées n'a été proposé. Dans l'éventualité d'un déploiement de la méthode dans l'industrie, ce vide devra être cependant comblé, afin de permettre aux équipes de conception de prendre des décisions de conception pertinentes. Le modèle d'évaluation des incertitudes pourra par exemple être basé sur une méthode d'analyse floue, permettant de combiner modèles mathématiques et expertise du praticien, comme proposé par E. Benetto pour les ACV (BENETTO 2002).

1.3. Vers la transposition de la méthode en langage informatique

Les évaluations de recyclabilité de produit sont jusqu'ici réalisés à l'aide d'un outil de type « Tableur », ce qui les rend longs. La démarche de recherche de points faibles, réalisée à partir de l'analyse de ces résultats, est également laborieuse. La transposition de la méthode en outil logiciel, consistant en une automatisation des calculs et des recherches de points faibles de conception, serait maintenant nécessaire afin de diminuer les temps de mise en œuvre. Elle permettrait ainsi l'application de la méthode à un panel large de produits et son utilisation en cours de conception. Nous présentons ici quelques suggestions de traduction.

Les informations nécessaires à la définition d'un produit au sens de sa recyclabilité concernent à la fois le type et les propriétés des matériaux, le type et les propriétés des liaisons employées, et les propriétés géométriques (taille, masse) des pièces et ensembles. Il semblerait possible de puiser ces informations dans les outils logiciels existants suivants : une base de données de matériaux ; une base de données environnementale / recyclage ; un outil de CAO. La Table 4.1 suivante établit dans quel outil logiciel pourraient être puisées les informations concernant chacun des niveaux du modèle produit.

Table 4.1. Sources possibles des informations de chacun des niveaux du modèle produit.

Outils logiciels existants	Niveaux du modèle produit					
	Molécule	Matériau	Liaison	Pièce	Fixation	Ensemble
BDD matériaux		✓				
BDD environnement / recyclage	✓		✓			
CAO				✓	✓	✓

La traduction de la méthode en outil logiciel impliquerait le calcul automatique des transformations subies par le produit et ses composantes au cours de la mise en œuvre des procédés. Un format cohérent pourrait par exemple consister en :

- un format vectoriel pour les entrants principaux,
- un format matriciel pour les transformations d'un procédé,

- un format vectoriel pour les sortants principaux, résultant de la multiplication du vecteur entrant par la matrice de transformation du procédé.

Un tel format de calcul est envisagé pour une étape de tri dans l'Annexe 15.

Le calcul des indicateurs et l'identification des points faibles de conception seraient également rendus possibles par un tel format.

Partie 2. Recommandations en vue d'une utilisation optimale de la méthode en entreprise

La mise en œuvre de la méthode d'amélioration de conception dépend des connaissances générales et des pratiques de l'entreprise liées à la recyclabilité de produit. Dans la suite de ce chapitre, nous nommons « Choix et savoir » de l'entreprise :

- les aspects concernant les choix effectués par l'entreprise pour la mise en œuvre de la méthode,
- la base de données des filières,
- la base de règles de conception.

La Figure 4.3 établit schématiquement dans quelles mesures ces « Choix et savoir » de l'entreprise influencent la mise en œuvre de la méthode.

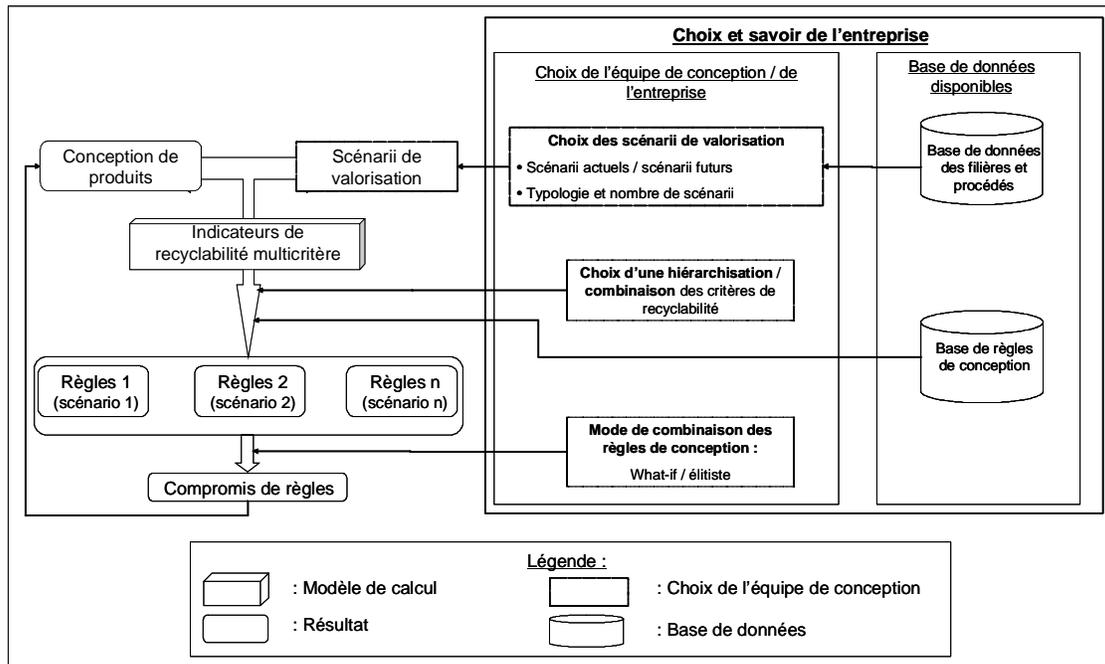


Figure 4.3. Modes d'influence des « choix et savoir » de l'entreprise sur le déroulement de la méthode.

Dans les paragraphes suivants, chacune des composantes des « Choix et savoir de l'entreprise » est successivement étudiée afin d'établir des recommandations d'utilisation.

2.1. Recommandations concernant les choix effectués par l'entreprise

Comme montré au Chapitre 3, la prise en compte des seuls scénarii actuels de valorisation mène à de grandes contraintes sur la conception, pouvant même conduire dans

certain cas à une limitation de l'innovation. La prise en compte de scénarii prospectifs, pratique pariant sur la maturation industrielle des technologies en cours de développement, laisse en revanche plus de libertés aux équipes de conception. Le principal désavantage de cette pratique réside cependant dans la faible certitude concernant la disponibilité des scénarii au moment du traitement du produit en fin de vie.

Il nous semble donc que la prise en compte de scénarii prospectifs ne devrait être réalisée que sous certaines conditions. Deux conditions possibles sont exposées ci-dessous :

- un scénario prospectif pourrait être envisagé à condition de montrer que son existence est probable au moment de la valorisation du produit : une méthode de cotation des filières selon des critères technologiques et sociétaux (économie, environnement, emplois) comme celle proposée par F. Mark (MARK 2001), pourrait en particulier être envisagée ;
- la prise en compte de scénarii de valorisation prospectifs pourrait être conditionnée par l'adoption par le producteur de pratiques favorisant l'émergence et le développement de filières de valorisation; ces conditions pourraient par exemple concerner la présence de matériaux recyclés dans le produit en conception, ou encore la coopération étroite du producteur avec des acteurs de la valorisation.

Comme établi dans le Chapitre 2, la typologie et le nombre de scénarii de valorisation doivent être choisis par l'expert recyclage en fonction du questionnement de conception.

La hiérarchisation et/ou la combinaison des critères de recyclabilité et le choix d'un mode de combinaison des règles de conception sont aujourd'hui laissés à l'appréciation et au choix de l'entreprise.

2.2. Recommandations en vue de la structuration et la gestion des règles de conception

Ce paragraphe vise à proposer un mode de structuration d'une base de règles propre à chaque entreprise et à étudier comment cette base pourrait évoluer dans le temps.

2.2.1. Proposition d'une structuration de base de règles

Après l'application de la méthode à des études de cas, il apparaît que les règles de conception formulées sont de plusieurs types, selon qu'elles sont applicables :

- aux produits d'une marque,
- à un type de produit,
- à une gamme de produit,
- à un produit,

- à un type de pièce,
- à une pièce spécifique.

Cette typologie de règles est retenue pour la structuration d'une base de règles de conception, comme proposé dans la Figure 4.4. Dans cette figure, chaque type de règle est illustré par l'énoncé de règles spécifiques, dont certaines ont été énoncées dans les études de cas n°4 et 5 du Chapitre 3.

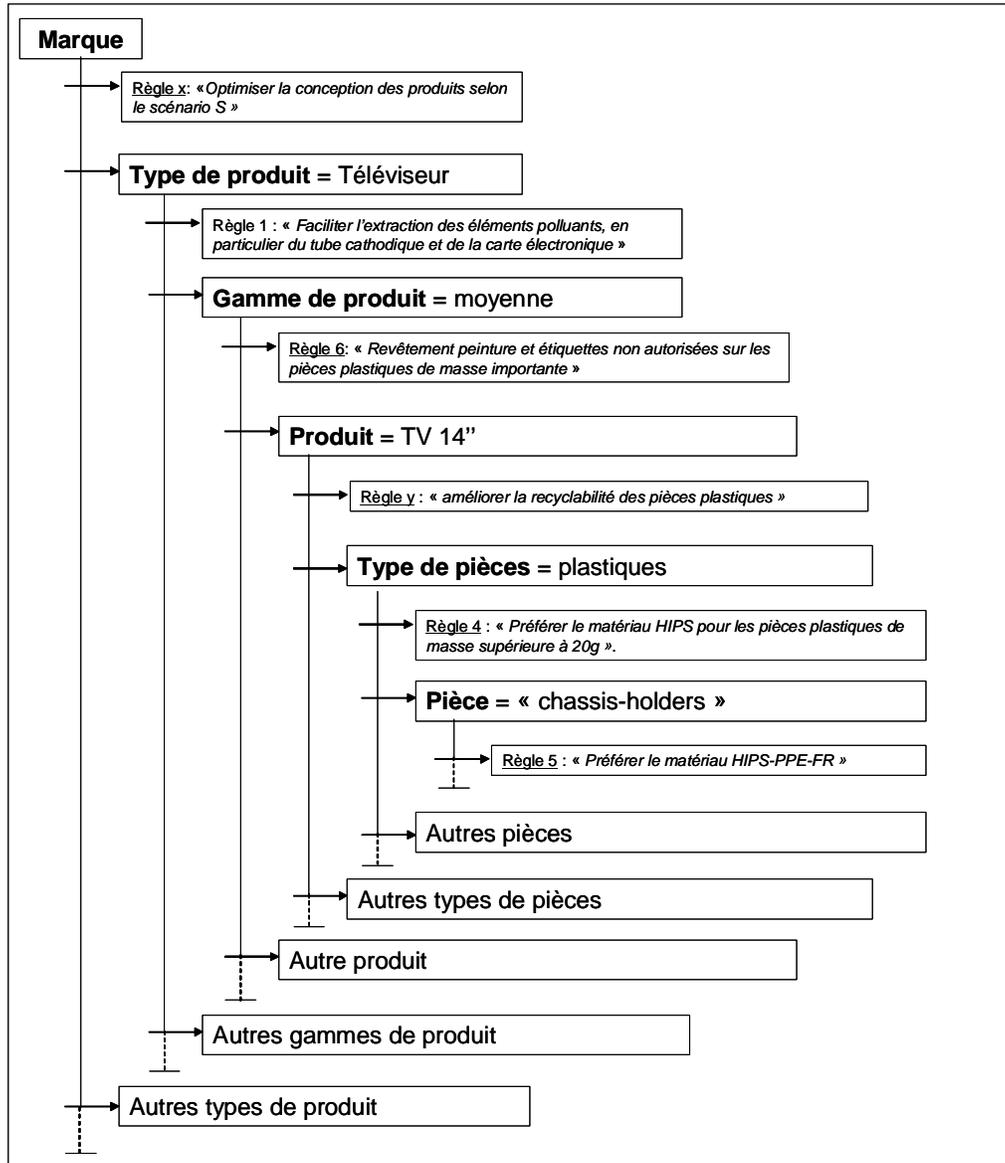


Figure 4.4. Proposition d'une structuration d'une base de règles de conception.

Cette proposition de structuration de règles est proposée pour le contexte spécifique du téléviseur et devrait être adapté au contexte d'autres produits et entreprises.

2.2.2. La base de règle : un outil de capitalisation du savoir de l'entreprise

Comme établi au Chapitre 3, la méthode d'évaluation de la recyclabilité peut conduire soit à l'élaboration de règles originales de conception soit au choix de règles pertinentes parmi des règles existantes. La base de règles propre à l'entreprise doit ainsi être conçue de telle façon :

- qu'elle puisse alimenter la réflexion de l'équipe de conception dans la recherche de solutions pertinentes,
- qu'elle puisse être alimentée par des solutions originales de conception élaborées par les équipes.

Cette ambivalence est schématisée sur la Figure 4.5 suivante.

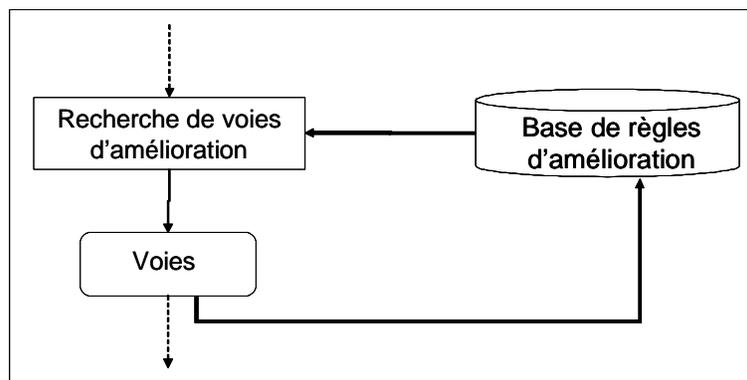


Figure 4.5. Relations ambivalentes entre base de règles et recherche de voies d'amélioration.

Avec de telles caractéristiques, la base de règle pourrait alors devenir un outil de capitalisation des pratiques de l'entreprise permettant la mise en œuvre du principe d'amélioration continue, dont l'importance en éco-conception est par exemple rappelée dans (MATHIEUX 2002) ou encore (@ FERRENDIER 2002).

2.3. *Recommandations en vue de la structuration et la gestion de la base de données de procédés*

L'activité de valorisation des produits est aujourd'hui marquée par de grandes innovations technologiques ; la tendance actuelle est par ailleurs à la combinaison des procédés et filières en vue d'atteindre des performances optimales. La base de données des procédés, des filières et des scénarii de valorisation doit être structurée afin de respecter ces caractéristiques. Nous proposons ainsi de la structurer de sorte que :

- elle contienne les performances des procédés élémentaires,
- les procédés élémentaires puissent être associés afin de créer une base de données de filières de valorisation,

- les filières et procédés puissent être associés afin de créer une base de données de scénarii de valorisation,
- elle soit évolutive, c'est-à-dire qu'elle permette d'intégrer de nouveaux procédés, filières et scénarii actuels ou prospectifs.

Ces aspects sont schématisés dans la Figure 4.6 suivante :

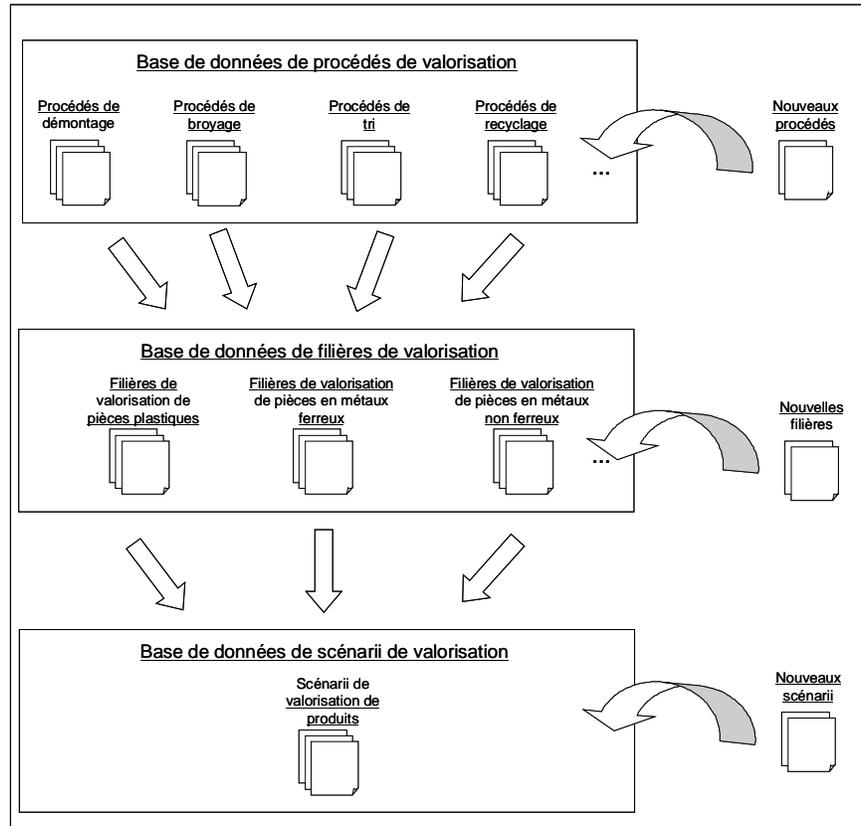


Figure 4.6. Proposition d'un mode de structuration et d'évolution de la base de données de procédés, filières et scénarii de valorisation.

Partie 3. Intégration de la méthode dans le processus de conception de produit

3.1. *La recyclabilité : un critère parmi d'autres en conception*

Les équipes de conception font face à de nombreuses contraintes en cours de développement de produit et la recyclabilité n'est que l'un des critères pris en compte. Dans ce contexte, l'amélioration de conception s'apparente plus à la définition d'un *compromis* de conception qu'à une *optimisation* de conception.

Dans la suite, on s'attache à montrer que, grâce à la méthode proposée, la recyclabilité d'un produit peut devenir un critère plus prioritaire en conception. Le mode de combinaison des règles d'amélioration selon tous les critères de conception est ensuite discuté.

3.1.1. La recyclabilité : un critère pouvant devenir plus prioritaire

Des échanges avec des entreprises de l'industrie élect(ron)ique nous ont permis d'établir qu'en conception, des aspects tels que la sécurité, le coût et la qualité sont en général prioritaires sur les aspects environnementaux : dans certaines organisations, les critères environnementaux sont des « sous critères » de la qualité et la recyclabilité est un « sous critère » de la performance environnementale¹. La Figure 4.7 représente l'échelle de priorités des critères de conception en vigueur dans ces entreprises. Dans cette figure, plus le niveau est faible, plus le critère est prioritaire. Le cheminement observé jusqu'au critère recyclabilité, représenté par nos trois critères, est représenté en gras.

¹ Etablis à partir d'interviews de responsables « Environnement – produit » d'entreprises du secteur élect(ron)ique.

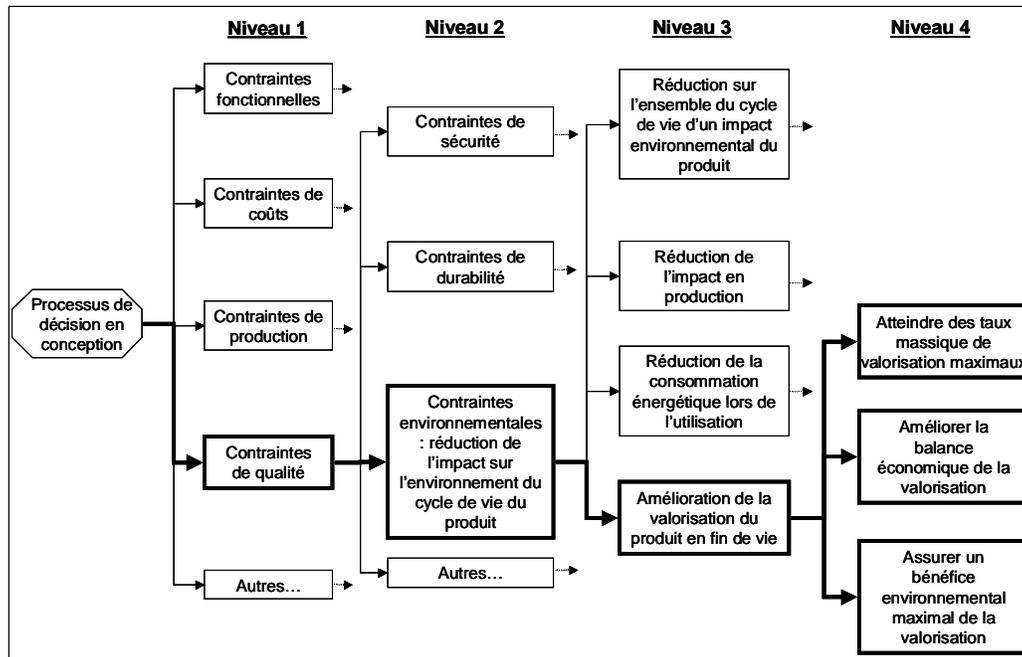


Figure 4.7. Notre perception de l'échelle de priorité de critères de conception en vigueur dans quelques entreprises du secteur élect(ron)ique.

Alors que la révision bibliographique a montré que la recyclabilité de produit était trop peu intégrée en conception, notamment en raison de son caractère flou, la méthode d'évaluation proposée permet de la quantifier selon plusieurs critères. Cette évaluation permet de rendre la recyclabilité de produit plus tangible et surtout plus proche des préoccupations des équipes de conception : par exemple, l'évaluation du coût de la valorisation peut être comparée aux autres coûts du cycle de vie du produit. L'évaluation multicritères pourrait alors permettre de positionner le critère recyclabilité plus en amont dans l'échelle de priorité des entreprises. Ainsi, en considérant l'échelle de priorité représentée dans la Figure 4.8 :

- le critère recyclabilité massique pourrait être considéré comme un « sous critère » de qualité, puisqu'il témoigne du respect de la législation ; il deviendrait alors un critère de niveau 2,
- le critère économique pourrait être comparé aux contraintes traditionnelles de coût ; il deviendrait alors un critère de niveau 2,
- le critère environnemental pourrait être directement considéré comme un sous critère des contraintes environnementales ; il deviendrait alors un critère de niveau 3.

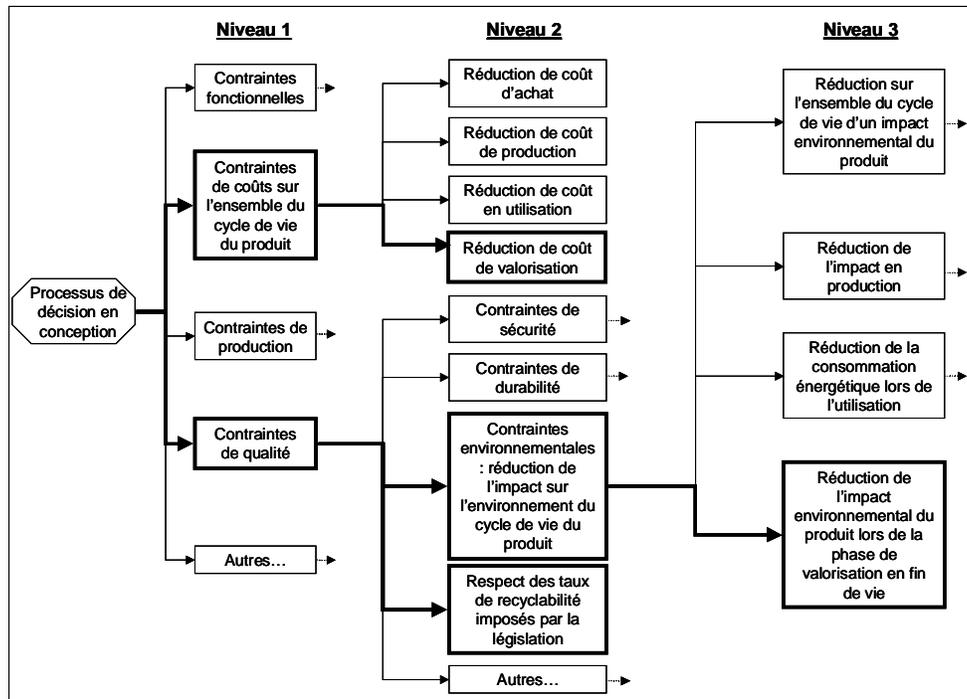


Figure 4.8. Proposition d'une nouvelle échelle de priorité des critères de conception en considérant trois sous critères de recyclabilité.

3.1.2. Implications du contexte multicritère sur la gestion des règles de conception

Jusqu'ici, en particulier dans le Chapitre 3, les compromis de conception ont été réalisés en ne considérant que le seul critère recyclabilité. Il convient maintenant d'établir comment les règles d'amélioration propres à la recyclabilité peuvent être combinées à des règles d'amélioration selon les autres critères.

Si le mode « élitiste » est choisi pour la combinaison des règles de recyclabilité, alors les compromis de conception avec les autres critères peuvent être effectués à partir de cette première combinaison.

Si le mode « what-if » est adopté, la combinaison des règles peut être retardée et effectuée en considérant l'ensemble des critères.

Ces implications des modes de combinaison des règles « élitiste » et « what-if » dans le contexte multicritères de la conception sont schématisés sur la Figure 4.9 suivante.

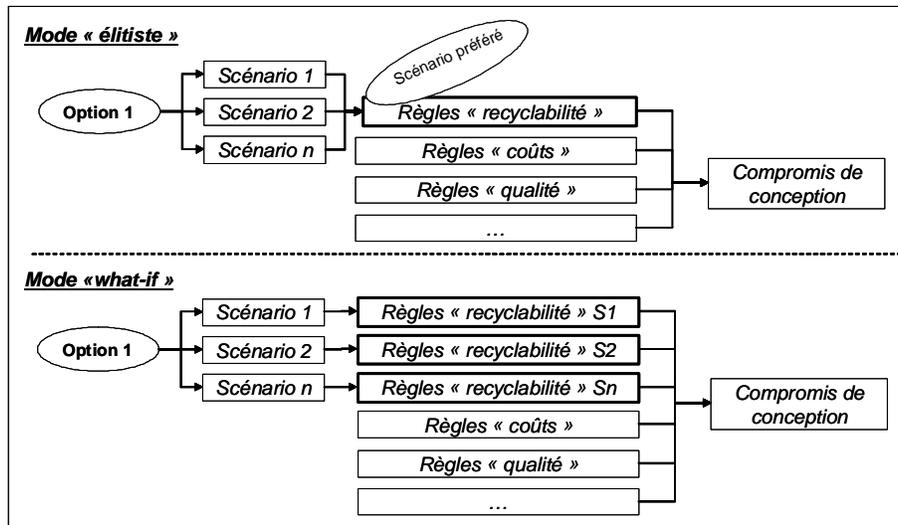


Figure 4.9. Schématisation des modes de gestion « élitiste » et « what-if » lors de l'établissement de compromis selon plusieurs critères de conception.

3.2. Deux utilisations possibles de la méthode en phase de conception de produit

L'objet de ce paragraphe est d'établir comment la méthode peut être utilisée en phase de conception de produit, conception conceptuelle ou détaillée. Elle peut être utilisée de deux manières :

- soit en fin de phase de conception, comme outil d'aide au choix parmi plusieurs options de conception, nommées dans la Figure 4.10 : C_1 , C_2 , C_x ,
- soit en cours de phase de conception, comme outil d'identification de points faibles des options C_1^1 , ... C_1^i , ... en vue de la définition d'un compromis de conception C_1^n .

La Figure 4.10 schématise ces deux modes d'utilisation.

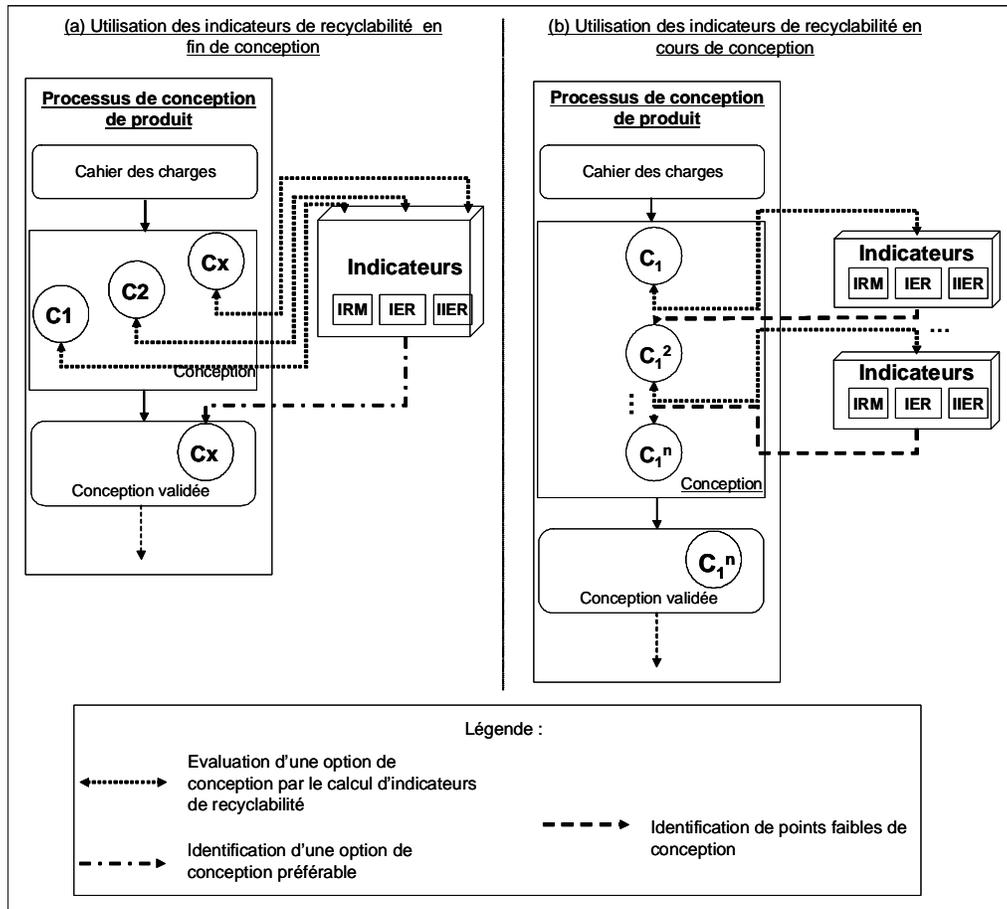


Figure 4.10. Schématisation de l'utilisation de l'évaluation de la recyclabilité (a) en fin du processus de conception, (b) en cours de processus de conception.

C'est le deuxième mode d'utilisation qui est en particulier exploré au Chapitre 3.

3.3. Positionnement plus large de la méthode dans un processus de conception

De nombreuses publications insistent sur la nécessité d'intégrer les aspects de valorisation en fin de vie à toutes les étapes du processus de conception de produit. Or, l'application de la méthode n'a été jusqu'ici envisagée qu'en phase de conception conceptuelle ou détaillée. Il nous semble que la méthode proposée pourrait à terme être intégrée de façon plus large dans le processus de conception. La Figure 4.11 suivante vise à établir les interactions existant entre la mise en œuvre de la méthode et le déroulement du processus de conception. Sont en particulier établies :

- les phases du processus au cours desquelles la méthode pourrait être bénéfique,
- les informations collectées au cours du processus qui pourraient influencer les « Choix et le savoir » de l'entreprise.

Dans la figure, le processus de conception séquentiel envisagé est extrait du texte de l'ISO 14062 (ISO 2002).

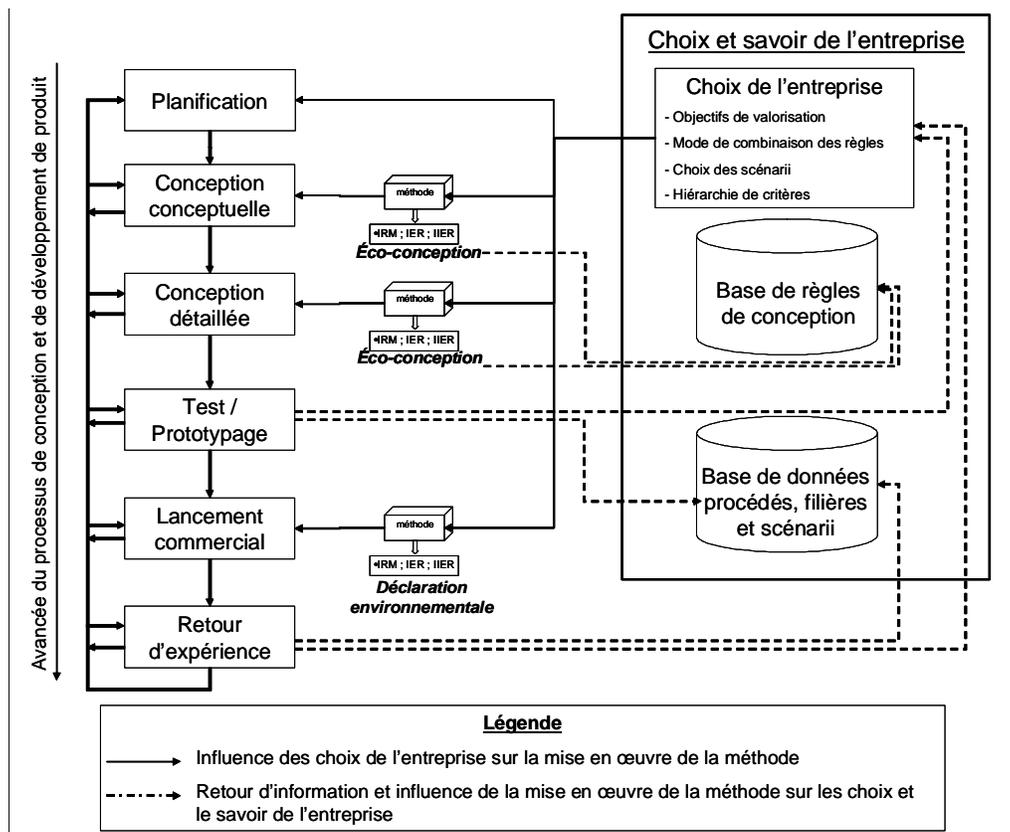


Figure 4.11. Positionnement de la méthode dans un processus de conception séquentiel.

A partir des « Choix et savoir » de l'entreprise, la méthode pourrait être utilisée en phases de :

- conception conceptuelle : l'application de la méthode pourrait permettre de valider un certain nombre de concepts, voire d'orienter les décisions ;
- conception détaillée : l'application de la méthode pourrait permettre, comme exploré au Chapitre 3, de valider un certain nombre de choix, ou de les orienter ;
- lancement commercial : les performances de recyclabilité du produit évaluées à l'aide des indicateurs pourraient être présentées au client comme argument commercial, intégrées par exemple à une déclaration environnementale de produit.

Les enseignements élaborés lors de l'application de la méthode pourraient de plus être utilisés en phases de :

- planification de projet : le suivi des performances des produits d'un point de vue recyclabilité pourrait permettre d'orienter les choix de l'entreprise, en particulier en ce qui concerne les scénarii de valorisation considérés, la hiérarchie des critères ou les modes de combinaison de règles de conception ;

- test / prototypage : des prototypes pourraient être fournis à des acteurs de la valorisation et les évaluations prédictives de recyclabilité pourraient être ainsi vérifiées ; ces tests pourraient de plus permettre une remise à jour de la base de données concernant les filières, et un ajustement des choix de l'entreprise pour les générations de produits suivantes ;
- retour d'expérience : le suivi des performances du traitement des produits en fin de vie pourrait permettre à l'entreprise d'alimenter la base de données des filières et procédés et d'ajuster ses choix aux pratiques réelles de la valorisation.

Ceci n'est qu'une proposition qui devrait bien entendu être adaptée aux pratiques de chaque entreprise.

M. Janin a mis en évidence l'importance de coordonner méthode et outils, processus de conception et organisation pour assurer le succès d'une démarche d'éco-conception (JANIN 2000a). L'intégration systématique de la recyclabilité dans le processus de conception de produit ne devrait pas échapper à cette règle et un mode d'organisation des acteurs propre à chaque entreprise devrait être associé à la mise en œuvre de la méthode : cette organisation viserait à la fois à optimiser la coopération entre acteurs internes de l'entreprise, tels que les concepteurs, les experts environnement / recyclage, les marketeurs ou encore les acheteurs, et la coopération avec les acteurs externes à l'entreprise, en particulier les fournisseurs et les acteurs de la valorisation. Ce volet organisationnel du processus de conception devra être soigneusement exploré en vue d'un déploiement industriel de la méthode.

Conclusions du Chapitre 4

La méthode proposée, bien que permettant déjà d'élaborer des règles d'amélioration de conception pertinentes, devra connaître quelques évolutions afin de pouvoir être utilisée de façon « routinière » par des entreprises : la problématique de la collecte des données, un modèle d'évaluation des incertitudes et la transposition de la méthode en langage logiciel devront en particulier être explorés.

Pour qu'elle soit au mieux intégrée en entreprise, un certain nombre de choix devront être réalisés par les utilisateurs et la méthode devra être adaptée aux pratiques propres des entreprises.

La méthode proposée devrait permettre une intégration plus systématique du critère recyclabilité en conception de produit.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans le contexte législatif et concurrentiel actuel, l'amélioration de la conception des produits en vue de leur valorisation en fin de vie constitue un domaine de plus en plus important pour les producteurs de matériels. C'est pourquoi, les entreprises sont aujourd'hui à la recherche de méthodes intégrables en cours de conception de produit qui permettent d'identifier les opportunités d'amélioration de leurs produits. Nos travaux de recherche ont contribué à formuler quelques voies de réponse à ce questionnement.

Nous avons d'abord basé notre réflexion sur le recensement et l'analyse des méthodes et outils disponibles dans la littérature visant une amélioration de la recyclabilité de produit. L'analyse nous a en particulier amené à classifier ces méthodes selon les caractéristiques des scénarii de valorisation considérées, selon la possibilité d'intégrer ou non des technologies prospectives et selon les critères de recyclabilité envisagés. Elle nous a aussi permis de mieux comprendre les bénéfices tirés de leur utilisation en conception.

Conscients de la nécessité d'intégrer au mieux les performances réelles des filières de valorisation, nous avons également mené une étude de terrain sur l'activité de la valorisation des produits en fin de vie. Nous avons ainsi pu mieux connaître les types de procédés mis en œuvre et leurs performances, et identifier les technologies et les pratiques prometteuses. L'étude de terrain nous a permis de mieux comprendre les mécanismes et interactions existant entre les filières, d'identifier les opportunités de développement de ces filières, et de comprendre le rôle des évolutions technologiques dans ce développement. Cette étude a été complétée par une revue bibliographique des modélisations émergentes des procédés de valorisation.

Ces analyses nous ont permis d'établir la nécessité de développer des méthodes d'amélioration de conception basées sur l'évaluation quantifiée de la recyclabilité et permettant d'intégrer les disparités géographiques et temporelles des filières de valorisation. Il est aussi apparu que l'amélioration de la recyclabilité des produits devrait passer par l'élaboration d'une méthode intégrable en processus de conception de produit et alimentant les équipes de conception en informations pertinentes.

Notre proposition

Une méthode originale d'évaluation de la recyclabilité...

Forts de ces enseignements, nous nous sommes attachés à la structuration d'une méthode originale permettant à une équipe de conception d'améliorer les performances de recyclabilité d'un produit à partir de l'évaluation de son aptitude à la valorisation en fin de vie.

La recyclabilité de produit est évaluée à l'aide d'indicateurs quantifiés selon trois critères : le critère massique, témoin du respect des obligations réglementaires ; le critère économique, traduisant les coûts associés à la valorisation ; le critère environnemental, traduisant ses bénéfices environnementaux. La recyclabilité de produit est évaluée selon plusieurs scénarii de valorisation applicables au produit à la fin de sa vie, permettant d'intégrer la variabilité géographique des filières de valorisation. L'identification de procédés prometteurs conduit à la définition de scénarii de valorisation prospectifs, selon lesquels peut également être évaluée la recyclabilité de produit.

Le calcul des indicateurs repose sur une modélisation originale des procédés et scénarii de valorisation. Au niveau le plus simple, une modélisation de chaque étape de valorisation est proposée : sont ainsi établies les conditions d'entrée et les performances techniques des procédés, mais aussi les coûts et impacts environnementaux qui leur sont associés. Les procédés ainsi modélisés sont combinés pour former des scénarii globaux de valorisation de produit, dont les performances sont alors connues.

Cette évaluation quantifiée multicritères et multiscénarii de la recyclabilité permet de positionner les performances de recyclabilité du produit dans le contexte large de la valorisation.

... menant à la formulation de voies d'amélioration de conception

Les résultats de l'évaluation sont ensuite intégrés à une démarche d'amélioration de la conception du produit. Cette démarche consiste en l'identification de procédés problématiques, qui sont ensuite reliés à des caractéristiques propres du produit, permettant ainsi d'établir une liste hiérarchisée des points faibles de ce même produit. A partir de cette liste, une équipe de conception est en mesure de formuler un certain nombre de voies d'amélioration de la conception du produit.

L'étude et la modélisation d'un certain nombre de procédés de valorisation applicables à des produits élect(ron)iques en fin de vie nous a conduits à identifier les principales caractéristiques d'un produit pouvant influencer sa recyclabilité. Une structuration de ces caractéristiques a ainsi pu être proposée.

Application à des études de cas

L'application de la méthode à des études de cas a mis en évidence la richesse de l'évaluation de la recyclabilité de produit, en particulier de ses caractéristiques multicritères, multiscénarii et multiprocédés. Elle nous a également permis de montrer comment la

démarche d'amélioration de conception pouvait être mise en pratique et quelles règles de conception pouvaient en être extraites. L'application de la méthode à un produit existant a conduit à la formulation de voies concrètes d'amélioration de conception, dont les bénéfices et l'applicabilité en projet ont été discutés. Elle nous a enfin amenés à souligner l'importance de la prise en compte de scénarii prospectifs de valorisation qui permet de diminuer les contraintes de conception associées à la recyclabilité.

Des recommandations en vue de la mise en œuvre de la méthode en entreprise

A la suite des applications à des études de cas et de nos échanges avec des producteurs de matériels élect(ron)iques et avec des acteurs de la valorisation de ces matériels, il nous a été possible de formuler un certain nombre de recommandations en vue d'une utilisation optimale de la méthode en entreprise : ces recommandations concernent notamment les éléments à développer avant un déploiement en entreprise, les choix à réaliser par les équipes de conception et l'intégration de la méthode dans un processus de conception de produit.

La méthode globale développée répond donc aux objectifs de départ qui visaient à définir une méthode utilisable en conception et permettant d'améliorer l'aptitude d'un produit à être valorisé en fin de vie, dans un contexte de non maîtrise des filières de valorisation.

Les contributions de la recherche

Les contributions scientifiques

La méthode proposée constitue avant tout un outil d'évaluation environnementale destiné à l'aide à la décision technologique et permettant l'intégration d'aspects environnementaux lors de la conception des produits.

Nos recherches ont conduit à la proposition d'un modèle global de modélisation des filières de valorisation considérées dans un cadre systémique et permettant d'intégrer les évolutions technologiques à venir et les disparités entre pays.

La méthode a enfin été développée afin d'être intégrable en processus de conception de produit et éventuellement combinables avec des méthodes classiques de conception.

Nos travaux de recherche ont ainsi été alimentés des connaissances de domaines scientifiques aussi divers que le Génie des Procédés, la Mécanique, la Productique ou encore le Génie des Systèmes Industriels. Nos recherches ont de plus intégré des aspects liés au *savoir-faire* des acteurs et à *l'expertise* des entreprises.

En résumé, nos travaux s'inscrivent dans une démarche multidisciplinaire et transversale; ils rentrent pleinement dans la vocation des équipes de recherches dont l'objectif est de développer des méthodes scientifiques d'évaluation et d'amélioration des performances

environnementales du cycle de vie des produits, méthodes devant répondre concrètement aux préoccupations industrielles.

Les contributions industrielles

La recherche a été menée de façon à répondre de façon scientifique à un questionnement concret. Elle a ainsi non seulement été alimentée de publications scientifiques, mais sa construction a également été largement influencée par des échanges avec des industriels : à ce titre, les résultats obtenus devraient pouvoir être prochainement utilisés par ces entreprises.

L'application à des études de cas a de plus montré que le degré actuel d'élaboration de la méthode permettait déjà de fournir des informations pertinentes en conception, pressentant ainsi une intégration rapide en projet.

La méthode a par ailleurs été développée afin d'être facilement traduite en langage informatique qui constitue l'une des clés d'un déploiement réussi des méthodes d'éco-conception dans l'industrie.

Perspectives de recherches

Recherches concernant l'élaboration de la méthode

Etant donnée l'étendue du domaine couvert par cette recherche, les résultats obtenus constituent un cadre méthodologique de l'intégration de la valorisation en fin de vie lors de la conception des produits, et de nombreux aspects restent encore à explorer. Nous identifions ici les voies de recherches qui semblent prioritaires.

Le prolongement naturel de la construction de la méthode consisterait à détailler la modélisation des filières de valorisation : des modélisations plus fines des procédés de démontage et de broyage de produits devraient en particulier être réalisées et pourraient conduire à l'identification de nouvelles caractéristiques pertinentes du produit. De même, la modélisation de procédés émergents de tri des matériaux pourrait être réalisée. Une exploration plus fine des procédés de recyclage de matériaux pourrait permettre de mieux prendre en compte des aspects tels que la recyclabilité intrinsèque des matériaux ou encore la compatibilité des matériaux.

D'un point de vue plus général, il serait nécessaire d'améliorer notre connaissance des filières de réutilisation et de re-fabrication de composants, de pièces et de produits, permettant ainsi une intégration de ces stratégies dans notre modèle.

La combinaison de notre méthode avec des modèles de procédés spécifiques pourrait également être explorée. Ceci pourrait en particulier permettre de diminuer la dépendance de la méthode vis-à-vis de la collecte de données sur le terrain.

Il serait également nécessaire de proposer un modèle d'évaluation des incertitudes associées aux évaluations de la recyclabilité, permettant ainsi de juger de la validité des résultats et de la pertinence des voies d'amélioration de conception qui en découlent.

La méthode permet certes l'intégration de scénarii prospectifs de valorisation mais un module permettant l'évaluation de la probabilité d'existence de ces filières manque encore : il pourrait par exemple consister en l'élaboration de méthodes de cotation des filières. Il serait également utile d'associer à notre approche des méthodes d'évaluation des évolutions que devraient connaître, à un horizon temporel donné, les filières et les procédés : pourraient ainsi être pressenties les évolutions des cours économiques des matériaux, les effets d'économie d'échelle des installations ou encore les améliorations des performances techniques des procédés en cours d'optimisation. Ces méthodes pourraient en particulier s'appuyer sur des modélisations dynamiques ou sur des méthodes d'extrapolation.

Il semblerait également nécessaire de proposer une procédure qui rendrait la méthode robuste à l'intégration de nouveaux composants ou de nouveaux matériaux dans un produit.

Il serait enfin souhaitable d'explorer les modes d'intégration de la méthode dans les différentes phases du processus séquentiel de conception de produit, et dans d'autres types de processus, tels que par exemple l'ingénierie simultanée. La combinaison de notre méthode avec des méthodes de conception récentes et prometteuses, telles que par exemple l'AMDEC ou Triz, pourrait également être étudiée.

Recherches concernant l'utilisation de la méthode

L'utilisation des résultats de la recherche en conception a été seulement simulée et les bénéfices et les règles d'utilisation associée à une utilisation réelle en entreprise devront être explorés. Le déploiement de la méthode dans l'industrie devrait préalablement passer par une traduction de la méthode en langage informatique, permettant un déploiement plus aisé.

L'application de la méthode à un panel large de produits électro(n)iques présentant des caractéristiques variées de taille, de masse, de valeur ou encore de durée de vie pourraient permettre de mieux évaluer les intérêts de la méthode. De plus, les bénéfices de l'utilisation de la méthode très en amont lors de la conception de nouveaux produits et de nouveaux concepts devront être explorés.

Puisque des produits des secteurs automobile et de l'ameublement présentent des caractéristiques similaires aux produits électroniques, notamment des aspects multi-matériaux et des durées de vies longues, l'applicabilité de la méthode à ces domaines industriels devrait être étudiée : ceci pourrait permettre d'établir dans quelle mesure la méthode répond aux préoccupations des équipes de conception de chacun de ces secteurs.

L'influence d'une prise en compte d'un panel plus large de scénarii de valorisation devra également être étudiée, notamment en ce qui concerne les implications de l'augmentation des contraintes pesant sur la conception.

Une application de la méthode ainsi élargie devrait permettre d'établir les conditions optimales de son utilisation, et de tester la robustesse des propositions établies au quatrième chapitre.

Souhaitons en conclusion que les efforts combinés de développement de filières de valorisation et de développement de produits adaptés à ces filières contribuent à l'instauration rapide d'un mode d'utilisation soutenable des ressources naturelles.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABOUSSOUAN (1999a). Etude du broyage et du recyclage de l'acier à l'aide de broyeurs à marteaux. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques, Institut Polytechnique de Lorraine, Nancy, 226p.

ABOUSSOUAN, L., RUSSO, P., PONS, M.N., THOMAS, D., BIRAT, J.P., LECLERC, D., (1999b). "Steel scrap fragmentation by shredders." *Powder Technology*(105): pp.288-294.

AFNOR (1996). Véhicules routiers - Conception des véhicules en vue de l'optimisation de leur valorisation en fin de vie. Paris (France), AFNOR, juillet 1996.

AFNOR (1997). Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadres. Paris, Association Française de Normalisation, ISO 14040:1997.

AFNOR (1998). Prise en compte de l'environnement dans la conception des produits - Principes généraux et application. Paris, Association Française de Normalisation: 16p., mai 1998, FD X30-310.

AFNOR (2002). Véhicules routiers - Recyclabilité et valorisabilité - Méthode de calcul. Association Française de Normalisation, Paris, 8p., Février 2002, ISO 22628:2002.

ALZIARI, M. (2001). Recyclabilité des matériaux et de leurs assemblages dans la construction automobile. Thèse de mastère, ENSAM Chambéry.

AMARATUNGA, L. M. (2001). "The mineral processor and the environment: waste to resources." *Canadian mining and metallurgical bulletin*, 94(N°1056): pp.62-70.

ANDERL, R., WEISSMANTEL, H., DAUM, B., PÜTTER, C., WOLF, B. (1999). Life cycle modelling - A cooperative method supports experts in the entire product life cycle. ICED 99 - International Conference on Engineering Design, Munich (Allemagne), 24-26 août 1999.

AOUSSAT, A., LE COQ, M. (1998). Contraintes d'assemblage. Conception de produits mécaniques - Méthodes, modèles, outils. Paris, Hermès: pp.185-200.

APME (1998). Co-combustion of end of life plastics in MSW combustors. Bruxelles (Belgique), APME: 24p.

APME (2001). Plastics : a material of innovation for the electrical and electronic industry - Insight into plastics consumption and recovery in Western Europe 2000. Association of Plastics Manufacturers in Europe, Bruxelles (Belgique), 12p., Juillet 2001.

AROLA, D., ALLEN, L., BIDDLE, M., FISHER, M. (1999). Plastics recovery from electrical and electronic durable goods: An Applied Technology and Economic Case Study. SPE Annual Recycling Conference 1999, American Plastics Council.

AYRES, R. U. (1997). "Metals recycling: economic and environmental implications." *Resources, Conservation and Recycling*, 21: pp.145-173.

BAYER (2000). Recycling and design. Bayer AG, Leverkusen (Allemagne), 23p., ATI 0305 d.e.

BENETTO, E. (2002). Evaluation de l'incertitude des impacts environnementaux du cycle de vie (EIICV) et conception de l'éco-innovation: application à la filière charbon. Thèse de doctorat, Laboratoire d'Analyse Environnementale des Procédés et des Systèmes Industriels, INSA de Lyon, Lyon.

- BERGENDAHL, C. G., HEDELMALM, P., SEGERBERG, T. (1995). Handbook for design of environmentally compatible electronic products. IVF, Mölndal, 56 p., octobre 1995, ISSN 0349-0653.
- BEZ, J., HEYDE, M., GOLDHAN, G. (1998). "Waste treatment in product specific life cycle inventories - An approach of material-related modelling - Part 2: Sanitary landfill." *International Journal of LCA*, 3(2): pp.100-105.
- BLUE ANGEL (1999). Basic criteria for the award of the environmental label - Television sets. RAL, registered association, Allemagne, RAL UZ 91.
- BOKS, C. B., TEMPELMAN, E. (1997). Delphy study on future disassembly and recycling technology for the electronics and automotive industry. Rapport technique, Delft University of Technology, Delft (Pays-Bas), 38p., Avril 1997.
- BOKS, C., NILSSON, J., MASUI, K., SUZUKI, K., ROSE, C., LEE, B. (1998a). An international comparison of product end-of-life scenarios and legislation for consumer electronics. *International symposium on electronics and the environment*, Chicago (Etats-Unis), IEEE.
- BOKS, C. B., TEMPELMAN, E. (1998b). "Future disassembly and recycling technology." *Futures*, 30(5): pp.425-442.
- BOKS, C., STEVELS, A., RAM, B. (1999). Take-Back and recycling of brown goods - Disassembly or shredding and separation. 6th International seminar on life cycle engineering, Kingston (Canada), CIRP, 21-23 juin 1999.
- BOKS, C., STEVELS, A. (2001a). Maturing markets for recycled plastics from WEEE: an elaboration on the consequences for the evaluation of future end-of-life scenarios. *EcoDesign 2001 - Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, Tokyo (Japon), IEEE, 11-15 décembre 2001, pp.520-526, ISBN 0-7695-1266-6, IEEE.
- BOKS, C., STEVELS, A. (2001b). Ranking ecodesign priorities from quantitative uncertainty assessment for end-of-life scenarios. *International symposium on electronics and the environment*, Denver (USA), IEEE, 7-9 mai 2001, IEEE.
- BOKS, C. (2002). The relative importance of uncertainty factors in product end-of-life scenarios - A quantification of future developments in design, economy, technology and policy. Thèse de doctorat, Engineering Design Department, Delft University of Technology, Delft (Pays-Bas), 323p., ISBN 90-5155-013-8.
- BRISSAUD, D., MARTIN, P., ANSELMETTI, B., VILLENEUVE, F., BERNARD, A., PARIS, H., KIRITSIS, D., DECREUSE, C., JACOBE, P., SERRAFERO, P., SABOURIN, L. (1998). Modélisation des contraintes de fabrication en conception (DfM). *Conception de produits mécaniques - Méthodes, modèles, outils*. Paris, Hermès: pp.163-184.
- BROWN, J. D. (1999). Electrostatic plastics separation. *Identiplast Conference*, Bruxelles, APME.
- BRUNTLAND, G. (1987). *Notre avenir à tous*, Ed. Du Fleuve, 434p.
- BUCHINGER, E., FEGERL, H., FUGGER, E., GREAVES, C. (Ed.), LEONE, F. (Ed) (2000). *Regulation and innovation in the recycling industry*. Institute for Prospective Technological Studies, Séville (Espagne), 122p.
- CHEVRON, D. (1999). Contribution à l'étude de la supervision d'une cellule de démontage de produits techniques en fin de vie. *Laboratoire d'Automatique de Grenoble, INPG*, Grenoble, 145p.
- CHIODO, J. D., BILLET, E., HARRISSON, D. (1998). "Active disassembly." *Journal of Sustainable Product Design*(7): pp.26-36.

- CHiodo, J. D., BOKS, C. (1999). A feasibility study on active disassembly using smart materials - A comparison with conventional end-of-life strategies. 6th International seminar on life cycle engineering, Kingston (Canada), CIRP, 21-23 juin 1999.
- CLARK, T., CHARTER, M. (1999). Eco-design checklists. Farnham (Royaume-Uni), Centre for Sustainable Design, Mai 1999.
- COBRA-FLORES, E., BUSTANI, A., Mackay, P., W., RAMIREZ, S., G., SULLIVAN, J., L., WILLIAMS, R., L., (1998). "An analysis of the vehicle end-of-life in the US." Society of Automotive Engineers.
- COMPERAT, M. (2000). Expérience industrielle française de Valortube. 2ème Conférence Européenne sur les matériels électriques industriels et l'Environnement (MEIE), Paris, 24-25 janvier 2000, pp.37-42, ISBN 2-912328-14-4, SEE.
- COPPENS, C. (1999). Méthode de conception en vue d'optimiser la valorisation des véhicules hors d'usage. Laboratoire Conception de Produits Nouveaux et Innovation, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers, Paris, 251p.
- COPPENS, C., LE COQ, M., MILLET, D., MICHAUD, P. (2001). "Evaluating and improving the recovery aptitude of an automobile function: the PSA approach." Ingénieurs de l'Automobile (janvier-février 2001): pp.66-70.
- DAHLSTRÖM, H. (1999). "Company-specific guidelines." The Journal of Sustainable Product Design(8): pp.18-24.
- DB (1991). Verpackungsverordnung (VerpackV), Deutscher Bundestag.
- DE RON, A., PENEV, K. (1995). "Disassembly and recycling of electronic consumer products: an overview." Technovation, 15(6): pp.363-374.
- DOBBY, G. S., FINCH, J. A. (1986). "Flotation column scale-up and modelling." Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, 79(889): pp.89-96.
- DOWIE, T. A. (1995). A disassembly planning and optimisation methodology for design. Thèse de doctorat, Department of Mechanical Engineering, Design and Manufacture, Manchester Metropolitan University, Manchester (Royaume-Uni), 167p.
- DUBOTS, P. (1998). "Un outil d'aide à la conception des produits." Techniques de l'Ingénieur, Traité Environnement.
- EBACH, H. (1997). Recycling analysis and design software: Demrop. Rapport d'activité du programme Brite-Euram, Siemens AG, Munich (Allemagne), 9p.
- ECKERTH, G. (2001). Beitrag zur Planung flexibel automatisierter Demontagesysteme für komplexe Gebrauchsgüter am Beispiel Bildschirmgerät. Thèse de doctorat, Institut für Handhabungsgeräte und Robotertechnik (IHRT), Technische Universität Wien, Vienne (Autriche), 132p., ISBN 3-932775-84-8.
- ECKERTH, G. (2002). State-of-the-art of collection logistics. Présentation au Public Ecolife workshop, Chambéry, 21 janvier 2002, ENSAM Chambéry.
- ECOBILAN (1999). Base de données du logiciel EIME Expert (version 1.6),
- ECTEL (1997). End-of-life management of cellular phones. An industry perspective and response. Rapport du groupe de travail "Cellular Phones Takeback", European Telecommunications and Professional Electronics Industry, Novembre 1997.
- EDITIONS LEGISLATIVES (2002). Code permanent de la sécurité et des conditions de travail, Consulté le 25/07/02.

- EEA (2000). Waste annual topic update 1999. European Environmental Agency, Copenhagen (Danemark), 37p.
- ENSAM/ADEME (2002). Prise en compte de la fin de vie des produits électriques et électroniques dans leur conception. Rapport technique, ENSAM Chambéry - ADEME, Chambéry, 121p., juin 2002.
- FELDMANN, K., MEEDT, O., TRAUTNER, S., SCHELLER, H., HOFFMAN, W. (1999). "The Green Design Advisor: a tool for design for environment." *Journal of Electronics Manufacturing*, Vol. 9(N°1): pp.17-28.
- FINNVEDEN, F., ALBERTSSON, A.C., BERENDSON, J., ERIKSSON, E., HÖGLUND, L.O., KARLSSON, S., SUNDQVIST, J.O. (1995). "Solid waste treatment within the framework of life cycle assessment." *Journal of Cleaner Production*, 3(4): pp.189-199.
- FINNVEDEN, G. (1996). "Solid waste treatment within the framework of life cycle assessment." *International Journal of LCA*, 1(2): pp.74-78.
- FINNVEDEN, G., NIELSEN, P.H. (1999). "Long-term emissions from landfills should not be disregarded." *International Journal of LCA*, 4(3): pp.125-126.
- FLEISCHER, G., BECKER, J., BRAUNMILLER, U., KLOCKE, F., KLÖPFFER, W., MICHAELI, W. (2000). *Eco-Design - Effiziente Entwicklung nachhaltiger Produkte mit euroMat*. Berlin (Germany), Springer Verlag, ISBN 3-540-65814-9.
- FLEISCHER, G., LICHTENVORT, K., REBITZER, G., SCHILLER, U. (1998). End-of-life strategies from an ecodesign point of view. *Care Innovation '98*, Vienne (Autriche), 16-18 novembre 1998.
- FRAUNHOLZ, N. (1997). *Plastics flotation*. Thèse de doctorat, Department of Raw Materials Technology, Delft University of Technology, Delft, 139p.
- FURUHJELM, J. (2000a). *Incorporating the end-of-life aspect into product development*. Thèse de doctorat, Department of Mechanical Engineering, Université de Linköpings, Linköpings, 292p.
- FURUHJELM, J., YASUDA, Y., TRANKELL, R. (2000b). Recycling of telecommunication products in Europe, Japan and USA. *International symposium on electronics and the environment*, San Francisco (Etats-Unis), IEEE, mai 2000, pp.143-148.
- GAUCHERON, T. (2000). *Intégration du recyclage en conception. Le modèle produit: un outil descriptif et cognitif dans le processus de prise en compte du recyclage*. Thèse de doctorat, Laboratoire Sols, Solides, Structures - Centre de Recherche Innovation Socio-Techniques et Organisations Industrielles, INPG, Grenoble, 244p.
- GERNER, S., BINDER, Z., DESCOTES-GENON, B. (2000a). Generation of a disassembly scenario within a CAD/CAM tool. *2nd International Conference on Management, Control, Production and Logistics (MCPL)*, Grenoble, 5-8 juillet 2000.
- GERNER, S., KOBEISSI, A., BINDER, Z., SIMEU-ABAZI, Z., DESCOTES-GENON, B. (2000b). Economic and ecological product evaluation in disassembly. *2nd International Conference on Management, Control, Production and Logistics (MCPL)*, Grenoble, 5-8 juillet 2000.
- GERNER, S. (2001). *Génération d'un processus de désassemblage et évaluation du recyclage d'un produit*. Thèse de doctorat, Laboratoire d'Automatique de Grenoble, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, 151p.
- GLENN, J. C. (1999). *Introduction to the futures research methodologies series. Futures research methodology*. Washington D.C. (Etats-Unis), American Council for the United Nations University. ISBN 0-9657362-2-9.
- GOOSEY, M., KELLNER, R. (1999). *The printed circuit board industry: an environmental best practice guide*. Londres (Royaume-Uni), PCIF, 108p., ISBN 0-9534824-0-5.

GUNGOR, A., GUPTA, S.M. (1999). "Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey." *Computers and Industrial Engineering*(36): pp. 811-853.

HELLWEG, S., HOFSTETTER, T.B., HUNGERBÜHLER, K. (2001). "Modeling waste incineration for life-cycle inventory analysis in Switzerland." *Environmental Modeling and Assessment*, 6: pp.219-235.

HERRMANN, C., EYERER, P., GEDIGA, J. (2002). Economic and ecological material index for end of life and design of electronic products. *International symposium on electronics and the environment*, San Francisco (Etats-Unis), pp.11-16.

HUGREL, C. (1998). Contribution à l'élaboration d'un outil d'aide à la décision multicritère pour la mise en place de la politique environnementale des collectivités locales. Rapport de thèse de doctorat, LAEPSI, Insa de Lyon, Lyon, 289p.

HOLLOWAY, L. (1998). "Materials selection for optimal environmental impact in mechanical design." *Materials and design*, 19: p.133-143.

HUISMAN, J., ANSEMS, T., FEENSTRA, L., STEVELS, A. (2001). The QWERTY concept, a powerful concept for evaluating the environmental consequences of end-of-life processing of consumer electronics products. *EcoDesign 2001 - Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, Tokyo (Japon), IEEE, 11-15 décembre 2001, pp.929-934, ISBN 0-7695-1266-6, IEEE.

HUISMAN, J., BOKS, C., STEVELS, A. (2002). "Quotes for environmentally weighted recyclability - The concept of describing product recyclability in terms of environmental value." *International Journal of Production Research*, Sous presse.

HUNDAL, M. (2000). Design for recycling and remanufacturing. *International design conference - Design 2000*, Dubrovnik (Croatie), 23-26 mai 2000.

HUNKELER, D., VANAKARI, E. (2000). "Ecodesign and LCA - Survey of current uses of environmental attributes in product and process development." *International Journal of LCA*, 5(3): pp.145-151.

ICER (1997). Design for recycling electronic and electronic equipment. ICER, Industry Council for Electronic equipment Recycling, Londres, 28 p., mars 1997.

IMAI, T. (2001). Sorting of plastics from WEEE - New recycle process for plastics recovered from wasted E&E equipment. *Identiplast 2001*, Bruxelles (Belgique), APME/VKE.

INRS (2002). Fiches toxicologiques de produits, consulté le 25/07/02.

ISHII, K., EUBANKS, C.F., DI MARCO, P. (1994). "Design for product retirement and material life-cycle." *Materials & Design*, 15(4): 225-233.

ISHII, K. (1995). "Life Cycle Engineering." *Transactions of the ASME*, 117.

ISO (2002). Environmental management - Integrating environmental aspects into product design and development. *International Standard Organisation*, ISO 14062.

IUGA, A., MORAR, R., SAMUILA, A., DASCALESCU, L. (2001). "Electrostatic separation of metals and plastics from granular industrial wastes." *IEE proceedings: science measurement and technology*, 148(2): pp.47-54.

JANIN, M. (2000a). Démarche d'éco-conception en entreprise. Un enjeu: construire la cohérence entre outils et processus. Thèse de doctorat, Institut Conception, Mécanique et Environnement, ENSAM, Chambéry, 423p.

JANIN, M., MATHIEUX, F., FROELICH, D., (2000b). L'environnement dans les métiers de la conception: un nouveau paramètre à intégrer dans le processus de développement de produits - Cas

d'une stratégie de valorisation en fin de vie. Journée Primeca: méthodes de conception, outils et systèmes de management pour l'intégration de l'environnement, Chambéry, E. Chambéry, 16 novembre 2000.

JO (1992). LOI 92-646 relative à l'élimination des déchets et aux installations classées pour la protection de l'environnement, Journal Officiel de la République française, 13 juillet 1992,

JOHANSSON, G. (1997). Design for disassembly - A framework. Licentiate thesis, Graduate School of Management and Industrial Engineering, Linköping Universitet, Linköping (Suède), 108p.

KALISVAART, S., HUISMAN, J., VAN SCHAIJK, A., STEVELS, A. (2000). Choices in defining recyclability. Electronics Goes Green 2000, Berlin (Allemagne), pp427-433.

KANAI, S., SASAKI, R., KISHINAMI, T. (1999). Representation of product and processes for planning disassembly, shredding, and material sorting based on graphs. IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP99), Porto (Portugal), 21-24 juillet 1999, pp.123-128.

KANG, H. Y., JUNG, J. W., HERRMANN, C. (2001). Recycling oriented design - A case study on house appliances using the software ATROiD. EcoDesign 2001 - Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokyo (Japon), IEEE, pp.309-314, IEEE.

KERR, W. (2000). Remanufacturing and eco-efficiency: a case study of photocopier remanufacturing at Fuji Xerox Australia. Thèse de mastere, IIIIEE, Lund University, Lund (Suède), 85p.

KHALIFA, K. (1998). Analyse du Cycle de Vie des systèmes en interface économie-écologie. Proposition d'une démarche empirique et itérative. Thèse de doctorat, Université Paris I, Paris, 272p.

KNIGHT, W., CURTIS, M. (1999). "Design for environment software development." Journal of Sustainable Product Design(9): pp.36-44.

KNIGHT, W. A., SODHI, M. (2000). "Design for bulk recycling: analysis of materials separation." CIRP annals, 49: pp.83-86.

KNOTH, R., HOFFMANN, M., KOPACEK, B., KOPACEK, P. (2000). Intelligent disassembly of electronic equipment with a flexible semi-automatic disassembly cell (à confirmer). EGG 2000, Berlin (Allemagne).

KOBLER, R. W., WINSLOW, G., BEDELL, C. J., CHRISTOPHER, P. (2002). A pre-production pilot plant processing of automotive shredder residues. 8th Annual Global Plastics Environmental Conference (GPEC), Detroit (Etats-Unis), S. o. P. Engineers, 13-14/02/2002, pp.333-340.

KOPACEK, B., KOPACEK, P. (1999). "Intelligent disassembly of electronic equipment." Annual reviews in control, 23: pp165-170.

KORSE-NOORDHOEK, M., BOKS, C., STEVELS, A. (2001). Pros and cons of adjusting and extending functionality of first generation end-of-life evaluation tools in relation to user requirements. EcoDesign 2001 - Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokyo (Japon), IEEE, 11-15 décembre 2001, pp.149-154, ISBN 0-7695-1266-6, IEEE.

KOYANAKA, S., ENDOH, S., OHYA, H., IWATA, H. (1997). "Particle size of copper milled by swing-hammer-type impact mill." Powder Technology, 90(2): pp.135-140.

KREMER, M., GOLDHAN, G., HEYDE, M. (1998). "Waste treatment in product specific life cycle inventories - An approach of material-related modelling - Part 1: Incineration." International Journal of LCA, 3(1): pp.47-55.

LEE, B. H., ISHII, K. (1998). "The recyclability map: application of demanufacturing complexity metrics to design for recyclability." The Journal of Sustainable Product Design(5): pp.38-48.

- LEE, S. G., LYE, S.W., KHOO, M.K. (2001). "A multi-objective methodology for evaluating product end-of-life options and disassembly." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 18: pp.148-156.
- MARK, F., LEHNER, T. (2000). *Plastics recovery from waste electrical & electronic equipment in non-ferrous metal processes*. APME, Bruxelles (Belgique), 21p., Juillet 2000.
- MARK, F., PICOT, P. (2001). *Shredder residue treatment and use today and in the future*. International Automobile Recycling Congress, Genève (Suisse), 5-7 mars 2001.
- MATHIEUX, F., REBITZER, G., FERRENDIER, S., SIMON, M., FROELICH, D. (2002). "Ecodesign in the European Electr(on)ics Industry - An analysis of the current practices based on cases studies." *Journal of Sustainable Product Design*, accepté à la publication.
- MATTHEWS, H. S., McMICHAEL, F.C., HENDRICKSON, C.T., HART, D.J. (1997). *Disposition and end-of-life options for personal computers*. Rapport technique, Carnegie Mellon University - Green Design Initiative.
- MC LAREN, J., WRIGHT, L., PARKINSON, S., JACKSON, T. (1999). "A dynamic life-cycle energy model of mobile phone take-back and recycling." *Journal of Industrial Ecology*, 3(1): pp.77-91.
- MC LAREN, J., PARKINSON, S., JACKSON, T. (2000). "Modelling material cascades - Frameworks for the environmental assessment of recycling systems." *Resources, Conservation and Recycling*, 31(1): 83-104.
- MIQUEL, G., POIGNANT, S. (1999). *Les nouvelles techniques de recyclage et de valorisation des déchets ménagers et des déchets industriels banals*. Rapport parlementaire, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, Paris, Juin 1999.
- MMU (1997). *Guidelines*, DfE Research Group - Manchester Metropolitan University.
- MOYER, L. K., GUPTA, S.M. (1997). "Environmental concerns and recycling/disassembly efforts in the electronics industry." *Journal of Electronics Manufacturing*, 7(1): pp.1-22.
- NAGEL, C., MEYER, P. (1999a). "Caught between ecology and economy: end-of-life aspects of environmentally conscious manufacturing." *Computers & Industrial Engineering*, 36: pp.781-792.
- NAGEL, C., NILSSON, J., BOKS, C. (1999b). *European end-of-life systems for electrical and electronic equipment*. 1st International symposium on environmentally conscious design and inverse manufacturing, Tokyo (Japon).
- NAVIN-CHANDRA, D. (1993). *ReStar: a design tool for environmental recovery analysis*. International Conference on Engineering Design, La Haye (Hollande), 17-19 mai 1993.
- PAPAMELETIOU, D. (1999). *Towards a european solution for the management of waste from electric and electronic equipment*. IPTS, Séville (Espagne), 44p.
- PENEV, K. D., de RON, A.J. (1996). "Determination of a disassembly strategy." *International Journal of Production Research*, 34(2): pp.495-506.
- PNUELI, Y., ZUSSMAN, E. (1997). "Evaluating the end-of-life value of a product and improving it by redesign." *International Journal of Production Research*, 35(4): pp.921-942.
- PRE (1994). *Pre4 database*. Amersfoort (Hollande), Pré Consultants, 18 novembre 1994,
- QUADE, J. U. (2002). *To get new picture tubes from old ones*. International Electronics Recycling Congress, Davos (Suisse), 9-11 janvier 2002.
- RAM, B., DECKERS, J.M.H., STEVELS, A.L.N. (1998). *Recyclability of consumer electronics - design for non disassembly*. Care Innovation '98, Vienne (Autriche), 16-18 novembre 1998, pp.137-147.

- RAMLOW, G., CHRISTILL (1999). Recovery of waste electrical and electronic equipment. APME, Bruxelles (Belgique), 15p.
- REBITZER, G., MÜLLER, K., DESAI, N., ZOLLO, J., JOLLIET, O. (2002). Environmental performances of printed wiring board assemblies - Optimizing life cycle impacts and recyclability. Going Green - Care Innovation'2002, Vienne (Autriche).
- RENARD, H. (2001). "Améliorer la recyclabilité des équipements automobiles multimatériaux." Ingénieurs de l'Automobile (Novembre - Décembre 2001): pp.133-136.
- ROSE, C. M., BEITER, K.A., ISHII, K., MASUI, K. (1998). Characterization of product end-of-life strategies to enhance recyclability. ASME Design for Manufacturing Symposium, Atlanta (Etats-Unis), ASME, 13-16 septembre 1998.
- ROSE, C. M., BEITER, K.A., ISHII, K. (1999). Determining end-of-life strategies as part of product definition. International symposium on electronics and the environment, Danvers (Etats-Unis), IEEE.
- ROSE, C. M. (2000). Design for environment: a method for formulating product end-of-life strategies. Thèse de doctorat, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, Stanford (Etats-Unis), 175p.
- SCHMIDT, W. P., BEYER, H.M. (1999). "Environmental considerations on battery-housing recovery." International Journal of LCA, 4(2): pp.107-112.
- SHEN, H., PUGH, R.J., FORSSBERG, E. (1999). "A review of plastics waste recycling and the flotation of plastics." Resources, Conservation and Recycling, 25: pp.85-109.
- SHEN, H., FORSSBERG, E., PUGH, R.J. (2001). "Selective flotation separation of plastics by particle control." Resources, Conservation and Recycling, 33: pp.37-50.
- SHEN, H., PUGH, R.J., FORSSBERG, E. (2002). "Floatability, selectivity and flotation separation of plastics by using a surfactant." Colloids and surfaces - Physicochemical and engineering aspects, 196: pp.63-70.
- SIMON, M., Mc LAREN, J., DOWIE, T. (1996). Feasibility of a common indexing system for recycling of electronic products. Rapport technique, Manchester Metropolitan University, Manchester (Royaume-Uni), 19p., février 1996.
- SODHI, M., KNIGHT, W.A. (1998). "Product design for disassembly and bulk recycling." CIRP annals, 47: 115-118.
- SODHI, M. S., YOUNG, J., KNIGHT, W.A. (1999). "Modeling material separation process in bulk recycling." International Journal of Production Research, 37(10): 2239-2252.
- SUNDIN, E. (2001). An economical and technical analysis of a household appliance remanufacturing process. EcoDesign 2001 - Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokyo (Japon), IEEE, 11-15 décembre 2001, pp.536-541, ISBN 0-7695-1266-6, IEEE.
- TANSKASEN, P., TAKALA, R. (2002). Concept of a mobile terminal with active disassembly mechanism. International Electronics Recycling Congress, Davos (Suisse).
- TOLLENAERE, M. (1998). Conception de produits mécaniques - Méthodes, modèles, outils, Ed. Hermès (Paris), 2-86601-694-7.
- TONNELIER, P., MILLET, D., LE COQ, M., RICHET, S. (2002). "Design for recovery: evaluation of the recovery aptitude and integration in design process." Ingénieurs de l'Automobile (Septembre 2002): pp.68-72.

- UE (2000a). Directive relative aux véhicules hors d'usage. Bruxelles (Belgique), Union Européenne, 7 juillet 2000.
- UE (2000b). Proposition de directive relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques. Bruxelles (Belgique), Union Européenne, 13 juin 2000.
- UE (2000c). Recycling forum - Final report. Commission Européenne, Bruxelles (Belgique), Septembre 2000.
- UE (2000d). Directive 2000/76/CE du parlement européen et du conseil du 4 décembre 2000 sur l'incinération des déchets. Bruxelles (Belgique), 4 décembre 2000.
- UE (2000e). Memorandum sur l'évaluation scientifique - Annexe de la proposition de directive sur la limitation de l'utilisation de substances dangereuses dans les EEE. Bruxelles (Belgique), Union Européenne, 13 juin 2000.
- UE (2001a). 'Environnement 2010: notre avenir, notre choix'. Sixième programme communautaire d'action pour l'environnement. Bruxelles (Belgique).
- UE (2001b). Livre vert sur la politique intégrée des produits. Union Européenne, Bruxelles (Belgique).
- UE (2002). Draft proposal for a directive of the European Parliament and of the Council on establishing a framework for Eco-design of End Use Equipment. Bruxelles (Belgique), Union Européenne.
- USINOR (1995). Classification européenne des ferrailles. USINOR-SACILOR - Direction Centrale des Ferrailles et du Recyclage, 15p., Décembre 1995.
- VDI (1993). VDI 2243 - Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte. V. D. Ingenieure. Berlin (Allemagne), Beuth Verlag GmbH.
- VEHLOW, J., MARK, F.E. (1997). Electrical and electronic plastics waste co-combustion. Rapport technique, APME, 24 p., Février 1997.
- WEIDEMA, B., EKVALL, T., PESONEN, H.L., REBITZER, G., SONNEMANN, G.W., SPIELMANN, M., (2002). Scenarios in LCA, SETAC, sous presse.
- WEI, J., REALFF, M.J. (2002). Design of bulk recycling system under uncertainty. 8th Annual Global Plastics Environmental Conference (GPEC), Detroit (Etats-Unis), S. o. P. Engineers, 13-14/02/2002, pp.439-449.
- WESTERHOUT, R. W. J., WAANDERS, J., VAN DER HAM, A.G.J., KUIPERS, J.A.M. (1997). A technical and economical assessment of high temperature pyrolysis as a recycling method for (mixed) plastic waste. 5th European conference on advanced materials, processes and applications, Maastricht (Hollande), Avril 1997, pp.209-214.
- WOLF, B., HORA, M., WEISSMANTEL, H., JAGER, J. (2000). Modelling of disposal processes and a recycling and disposal mix for the development of sustainable products. Electronics Goes Green 2000, Berlin (Allemagne).
- YUKUMOTO, M., MURAKAMI, M. (2001). LCI Analysis for treatment processes of disposed office appliances. EcoDesign 2001 - Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokyo (Japon), IEEE, pp.542-545, IEEE.
- ZHANG, S., FORSSBERG, E. (1997). "Mechanical separation-oriented characterization of electronic scrap." Resources, Conservation and Recycling, 21: 247-269.
- ZHANG, S., FORSSBERG, E., ARVIDSON, B., MOSS, W. (1998). "Aluminium recovery from electronic scrap by High-Force eddy-current separators." Resources, Conservation and Recycling, 23: pp.225-241.

ZHANG, S., FORSSBERG, E. (1999a). "Intelligent liberation and classification of electronic scrap." *Powder Technology*, 105: 295-301.

ZHANG, S., FORSSBERG, E., ARVIDSON, B., MOSS, W. (1999b). "Separation mechanisms and criteria of a rotating eddy-current separator operation." *Resources, Conservation and Recycling*, 25: pp.215-232.

ZHANG, S., REM, P.C., FORSSBERG, E. (1999c). "Particle trajectory simulation of two-drum eddy current separators." *Resources, Conservation and Recycling*, 26: pp.71-90.

ZUSSMAN, E., KRIWET, A., SELIGER, G. (1994). "Disassembly oriented assessment methodology to support design for recycling." *Annals of the CIRP*, 43(1): 9-14.

RÉFÉRENCES INTERNET

@ ATROID (2002). Page d'accueil du logiciel ATROID, <http://www.lce-consulting.com/atroid-e.asp>
Page consultée le 23/10/02.

@ DFE (2002). Page d'accueil du logiciel DfE, <http://www.dfma.com/software/dfc.html> Page consultée le 23/10/02.

@ EUROMAT (2002). Page d'accueil du logiciel euroMat', <http://www.euromat.de/> Page consultée le 23/10/02.

@ FERRENDIER, S., MATHIEUX,F., REBITZER,G., SIMON,M., FROELICH,D. (2002). Environmentally improved product design - Case studies of the European electric and electronic industry: 134p., Page consultée le 23/10/02, <http://www.iht.tuwien.ac.at/sat/base/ecolife/index.html>.

@ SFB392 (2002). Page d'accueil du projet "Sonderforschungsbereich 392", Page consultée le 23/10/02, <http://venus.muk.maschinenbau.tu-darmstadt.de/sfb/english/index.html>.

ANNEXES

ANNEXES

ANNEXE I. Principaux procédés de valorisation applicables aux PEEFV.....	228
ANNEXE II. Analyse des principales méthodes d'ECOV recensées.....	235
ANNEXE III. Construction d'un scénario de valorisation à partir des procédés de valorisation	241
ANNEXE IV. Mode de calcul de l'IER pour des scénarii alternatifs.....	243
ANNEXE V. Modélisation de quelques étapes de valorisation.....	245
ANNEXE VI. Incinération avec récupération d'énergie	250
ANNEXE VII. Modélisation du procédé de recyclage de carte électronique.....	252
ANNEXE VIII. Classes d'impacts environnementaux utilisées dans le logiciel EIME™	253
ANNEXE IX. Informations sur la carte électronique du téléviseur.....	254
ANNEXE X. Informations sur les cartes électroniques de téléphones portables.....	255
ANNEXE XI. Evaluation de la recyclabilité de la carte électronique d'un téléviseur.....	257
ANNEXE XII. Evaluation de la recyclabilité d'un mélange de cartes électroniques.....	258
ANNEXE XIII. Hypothèses et calculs de la recyclabilité d'un téléviseur.....	261
ANNEXE XIV. Hypothèses et calculs de la recyclabilité de pièces plastiques extraites d'un téléviseur.....	276
ANNEXE XV. Proposition d'écriture vectorielle / matricielle des modèles produit et valorisation – Approche appliquée à une étape de tri de matériaux.....	282

ANNEXE I. Principaux procédés de valorisation applicables aux PEEFV

↳ Les principaux procédés de valorisation applicables aux PEEFV

La Table A.1 regroupe un certain nombre de procédés de valorisation utilisés industriellement, ou en cours de développement, qui sont susceptibles d'être appliqués aux PEEFV. Sont ainsi répertoriés pour chaque étape de valorisation, les procédés identifiés, le nom d'une l'organisation (société ou laboratoire) utilisant ou développant le procédé, le niveau de développement du procédé (industriel / pilote / recherche), ainsi que les références bibliographiques disponibles.

Table A.1. Classification des procédés de valorisation applicables aux produits électriques et électroniques en fin de vie.

Etape de valorisation	Description du procédé	Organisation	Installation industrielle (IND) / Installation pilote (PIL) / Recherches préliminaires (REC)	Références
Démontage / dépollution / Séparation de composants et matériaux - Opération manuelle	Démontage / dépollution manuel de produits	Tous les démonteurs de PEEFV	IND	
	Extraction manuelle de composants de cartes électroniques	Siemens (DE)	IND	Visite en 2000
	Dépollution de pièces plastiques : extraction d'inserts métalliques et d'autocollants	Siemens (DE)	IND	Visite en 2000
Démantèlement / séparation de composant / matériaux – opération semi-automatique ou automatique	Désassemblage actif de produits avec utilisation de matériaux à mémoire de forme	Brunel University (UK) / Motorola / Nokia	REC/PIL	(CHIODO 1998; CHIODO, 1999; TANSKASEN 2002)
	Démontage automatisé de produits	Université de Vienne (AT)	PIL	(ECKERTH 2001)
	Extraction automatique de composants de cartes électroniques	ReUse (AT)	PIL	(KNOTH 2000)
	Séparation des verres de tube cathodique par procédé semi-automatique	Varray-Parisi (Fr)	IND	Visite en 2000

	Séparation des qualités de verre par procédé semi-automatique	SEV (DE)	IND	Visite en 2000
Broyage de produits ou de composants	Pré broyage de produits	R-Plus (DE)	IND	Entretien téléphonique en février 2002
	Broyage de produits pour la séparation des matériaux	IRSID (FR)	IND / PIL	(ABOUSSOUAN 1999)
	Broyage de produits électroniques pour la séparation des matériaux	LULEA University (DE)	PIL	(ZHANG 1997; ZHANG 1998)
	Broyage de produits électroniques pour la séparation des matériaux	Metals und Recycling (DE) GreenCycle (JP)	IND	Visites en 2001 et 2002
	Broyage de cartes électroniques pour la séparation des matériaux	Université japonaise (JP)	PIL	(KOYANAKA 1997)
	Broyage de tubes cathodiques pour la séparation des matériaux	Paté (FR) Mirec (NL)	PIL IND	(COMPERAT 2000) Visite en 2001
Tri métaux / plastiques	Séparation de métaux et de matières plastiques par table vibrante	NECP (UK)	IND	Visite en 2000
Tri des métaux	Séparation des métaux ferreux par tri magnétique	Tous les recycleurs de métaux ferreux	IND	
	Séparation des métaux non ferreux (Cu / Alu) par tri par courant de Eddy	Luleå University (SE)	PIL	(ZHANG 1998; ZHANG 1999c)

	Séparation des métaux ferreux et non ferreux par flottation (lit fluidisé)	Luleå University (SE) Galoo Metals (FR) Metal und Recycling (DE)	PIL	Visites en 2001/2002
Tri des plastiques	Séparation de pièces plastiques par identification spectroscopique infrarouge proche (NIR)	Siemens (DE)	IND	Visites en 2000
	Séparation de pièces plastiques par identification spectroscopique infrarouge moyen (MIR)	GreenCycle (JP) StenaTechnoworld (SE)	IND IND	Visite en 2001
	Séparation de matières plastiques par tri triboélectrique	MBA Polymers (USA)	PIL	(AROLA 1999)
	Séparation de pièces plastiques par tri triboélectrique	Gaiker (ES)	PIL	Visite en 2000
	Séparation de particules plastiques par une succession de procédés de tri	MBA Polymers (USA) RPI (USA)	IND IND	(KOBLER 2002)
	Séparation de matières plastiques par identification spectroscopique Raman	TechnoPolymer (JP)	PIL	(IMAI 2001) Visite en 2001
	Séparation de particules plastiques par gravimétrie	Galoo Plastics (FR) Grannex (DE)	IND	Visites en 2002
	Séparation de matières plastiques par froth flottation	Delft University (NL) Luleå University (SE)	REC	(SHEN 2002)

	Séparation de plastiques indésirables par tri gravimétrique	GreenCycle (JP)	PIL	Visite en 2001
	Séparation de plastiques par sélectivité thermique	Salyp (BE)	PIL	Visite en 2001
Tri du verre	Séparation de deux qualités de verre par procédé optique	Paté (FR)	PIL	(COMPERAT 2000)
Broyage de matériaux	Broyage de pièces plastiques	RPI (USA) Technopolymer (JP)	IND	Visites en 2001
Lavage de particules plastiques	Procédé de lavage de particules plastiques	TechnoPolymer (JP)	PIL	(IMAI 2001)
Remise à niveau de produit	Re-fabrication de produits informatique	RFrayzier (UK) Compaq (NL)	IND IND	Visites en 2000
	Re-fabrication produits ménagers	Electrolux (SE)	PIL	(SUNDIN 2001)
Production de matières premières secondaires	Recyclage de métaux ferreux	Tous les producteurs de métaux ferreux	IND	
	Recyclage de métaux non ferreux	Tous les producteurs de métaux ferreux	IND	
	Recyclage de métaux précieux et non ferreux	Boliden (SE) Union Minière (BE)	IND IND	Visites en 2000
	Recyclage de verre de tubes cathodiques dans la production de nouveaux tubes cathodiques	Schott (DE) Mirec (NL)	IND IND	(QUADE 2002)

	Recyclage de tubes cathodiques en verrerie	SEV (DE) Mirec (NL)	IND IND	Visite en 2000
	Production de matières plastiques secondaires à partir de matières triées	Technpolymer (JP) Galoo Plastics (FR) MBA Polymers (USA) RPI (USA) C2P (FR)	PIL IND IND IND IND	Visites en 2000/2001
Recyclage chimique de matières plastiques	Valorisation chimique des plastiques par pyrolyse / gazéification	Kawasaki Steel (JP) Schwarze Pumpe (DE)	IND PIL	(YUKUMOTO 2001)
Valorisation énergétique	Valorisation énergétique des plastiques dans les procédés non ferreux	Boliden (SE)	PIL	(MARK 2000)
	Valorisation énergétique des plastiques par co-combustion avec les ordures ménagères	Tamara (DE)	PIL	(APME 1998)
	Pyrolyse des plastiques	University of Twente (NL)	PIL	(WESTERHOUT 1997)
Logistique	Optimisation de la logistique	Fraunhofer IML (DE)	IND	(NAGEL 1999a)

↳ Le cas particulier de la valorisation de verre de tube à rayonnement cathodique (TRC)

Les TRC, de par leur masse et les substances qu'ils contiennent, constituent des enjeux importants de la valorisation des PEEFV. Quelques initiatives de valorisation sont en structuration au niveau européen, comme recensé dans la Table A.2 : elles diffèrent par leur niveaux de développement, par la qualité du recyclât produit, et par les procédés préalables que doivent subir les TRCs.

Table A.2. Quelques unes des stratégies de valorisation de tubes cathodiques recensées en Europe.

Entreprise (Pays)	Schott (D)	LMB (NL)	SEV (D)	Paté (F)
Développement (Industriel / Pilote)	Industriel	Industriel	Industriel	Pilote
Procédés préalables à mettre en oeuvre	Séparation manuelle des verres puis broyage	<ul style="list-style-type: none"> • Séparation manuelle des verres puis broyage • <u>ou</u> Broyage 	Séparation semi-automatique des verres puis broyage	Broyage et séparation des verres
Recyclât généré	Nouveaux tubes cathodiques	<ul style="list-style-type: none"> • Nouveaux tubes cathodiques • <u>ou</u> céramiques 	Céramiques	Nouveaux tubes cathodiques
Références	(QUADE 2002) et visite en 2002	Visite et visite en 2000	Visite en 2000	(COMPERAT 2000) et visite en 2001

Parmi toutes ces initiatives, il est aujourd'hui difficile de savoir lesquelles seront les plus performantes à l'avenir, d'un point de vue économique et environnemental.

ANNEXE II. Analyse des principales méthodes d'ECOV recensées

Un certain nombre de méthodes d'ECOV ont été recensées et analysées dans le Chapitre 1.

La grille d'analyse de la Table A.3 présente les principales caractéristiques de ces méthodes. Dans cette table, sont en particulier établis :

- ↳ Le type d'approche : méthode ou logiciel (prototype ou commercial),
- ↳ La catégorie d'ECOV, établie selon les caractéristiques du système de valorisation considéré,
- ↳ Les aspects du produit considérés,
- ↳ Le(s) critère(s) de recyclabilité pris en compte,
- ↳ Si une approche prospective sur les performances du système de valorisation est considérée ; une telle approche peut être partielle et elle est alors répertoriée à l'aide de « (✓) »,
- ↳ L'utilisation peut en être faite en conception : si cette utilisation est possible mais non explorée, elle est répertoriée par « (Eco-Conception) » ; si cette utilisation est bien établie, elle est détaillée dans la table ; si la méthode est utilisable pour d'autres objectifs, notamment en planification de désassemblage, cette utilisation est elle aussi répertoriée,
- ↳ Les références bibliographiques.

Table A.3. Grille d'analyse répertoriant les caractéristiques principales méthodes d'éco-conception orientée valorisation.

Nom approche	ReStar	Guidelines	Recyclability map	Méthode Ishii	DfE
Type d'approche: (Méthode / Logiciel commercial / Logiciel prototype / Approche industrielle) (année de lancement)	Logiciel prototype (1993)	Méthode	Méthode	Méthode	Logiciel commercial (1999)
Catégorie d'ECOV (CpD/CpDV/CpND/CpSV)	CpD		CpDV		
Aspects du produit considérés	<ul style="list-style-type: none"> • Composant • Matériaux • Liens • Architecture 	<ul style="list-style-type: none"> • Matériaux • Liens • Architecture 	<ul style="list-style-type: none"> • Matériaux • Liens • Architecture 	<ul style="list-style-type: none"> • Composant • Matériaux • Liens • Architecture 	<ul style="list-style-type: none"> • Composant • Matériaux • Liens • Architecture
Critère de recyclabilité	Economique	Temps de démontage	Nombre de filières en aval	Economique	<ul style="list-style-type: none"> • Economique • Environnemental
Approche prospective sur le système de valorisation					
Utilisation en conception	<ul style="list-style-type: none"> • (Eco-conception) • Planification de désassemblage 	Eco-conception : recommandations d'amélioration	Eco-conception : par un exemple	Eco-conception : par un exemple	Eco-conception : recommandations d'amélioration
Références	(NAVIN-CHANDRA 1993)	(DOWIE 1995; MMU 1997; SIMON 1996)	(LEE 1998)	(ISHII 1994; ISHII 1995)	(KNIGHT 1999)

Nom approche	Méthode Zussman + Pnueli	Méthode DeRon + Penev	Méthode Gerner	GDA	Méthode Lee
Type d'approche: (Méthode / Logiciel commercial / Logiciel prototype / Approche industrielle) (année de lancement)	Méthode	Méthode	Logiciel prototype	Logiciel commercial	Méthode
Catégorie d'ECOV (CpD/CpDV/CpND/CpSV)	CpDV				
Aspects du produit considérés	<ul style="list-style-type: none"> • Composant • Matériaux • Liens • Architecture 	<ul style="list-style-type: none"> • Composant • Matériaux • Liens • Architecture 	<ul style="list-style-type: none"> • Composant • Matériaux, • Liens • Architecture 	<ul style="list-style-type: none"> • Composant • Matériaux, • Liens • Architecture 	<ul style="list-style-type: none"> • Composant • Matériaux, • Liens • Architecture
Critère de recyclabilité	<ul style="list-style-type: none"> • Economique • <u>ou</u> nombre de composant valorisé • <u>ou</u> masse de déchets résiduels 	Economique	<ul style="list-style-type: none"> • Economique • Environnemental 	<ul style="list-style-type: none"> • Economique • Temps de démontage 	<ul style="list-style-type: none"> • Economique • Environnemental (impact des procédés de démontage)
Approche prospective sur le système de valorisation					
Applicabilité	Eco-conception : identification de points faibles et recommandations de conception	<ul style="list-style-type: none"> • Planification de désassemblage 	<ul style="list-style-type: none"> • Planification de désassemblage • (Eco-conception) 	Eco-conception	<ul style="list-style-type: none"> • Planification de désassemblage • (Eco-conception)
Références	(PNUELI 1997; ZUSSMAN 1994)	(DE RON 1995; PENEV 1996)	(GERNER 2000a; GERNER 2000b; GERNER 2001)	(FELDMANN 1999)	(LEE 2001)

Nom approche	ATROiD	Demrop	Table de séparabilité	Table de compatibilité	Aptitude à la valorisation
Type d'approche: (Méthode / Logiciel commercial / Logiciel prototype / Approche industrielle) (année de lancement)	Logiciel commercial (2001)	Logiciel commercial (1997)	Méthode	Méthode	Méthode
Catégorie d'ECOV (CpD/CpDV/CpND/CpSV)	CPDV		CpND		CpSV
Aspects du produit considérés	<ul style="list-style-type: none"> • Composant • Matériaux • Liens • Architecture 	<ul style="list-style-type: none"> • Composant • Matériaux • Liens • Architecture 	Matériaux	Matériaux	<ul style="list-style-type: none"> • Matériaux • Liens • Architecture
Critère de recyclabilité	<ul style="list-style-type: none"> • Coût de valorisation • Temps de désassemblage 	<ul style="list-style-type: none"> • Economique • Santé et sécurité 	Massique	Massique	<ul style="list-style-type: none"> • Economique • Massique
Approche prospective sur le système de valorisation					✓
Applicabilité	Eco-conception : par comparaison avec les concurrents ou avec génération précédente	Eco-conception : comparaison d'options	Eco-conception : choix de matériaux	Eco-conception : choix de matériaux	Eco-conception : recommandations d'amélioration
Références	(KANG 2001)	(EBACH 1997)	(AFNOR 1996; HUNDAL 2000; RENARD 2001)	(AFNOR 1996; BAYER 2000)	(COPPENS 1999; COPPENS 2001) (TONNELIER 2002)

Nom approche	ELDA	Méthode Boks	Méthode Huisman	DfE2	SFB392
Type d'approche: (Méthode / Logiciel commercial / Logiciel prototype / Approche industrielle) (année de lancement)	Logiciel prototype (2000)	Méthode	Méthode	Logiciel commercial (2002 ?)	Logiciel prototype (2002)
Catégorie d'ECOV (CpD/CpDV/CpND/CpSV)	CpSV				
Aspects du produit considérés	<ul style="list-style-type: none"> •Durée de vie fonctionnelle •Cycle technologique •Niveau d'intégration •Nombre de pièces •Aspects management et marketing 	•Matériaux	•Matériaux	<ul style="list-style-type: none"> •Composant •Matériaux •Liens •Architecture 	<ul style="list-style-type: none"> •Composant •Matériaux •Masse •Géométrie
Critère de recyclabilité	•Environnemental (application de la hiérarchie)	<ul style="list-style-type: none"> •Massique •Economique 	<ul style="list-style-type: none"> •Economique •Environnemental •(Massique) 	<ul style="list-style-type: none"> •Massique •Economique •Environnemental 	•Massique
Approche prospective sur le système de valorisation		✓	(✓)	✓	
Applicabilité	<ul style="list-style-type: none"> • Définition d'une stratégie de produit • (Eco-conception) 	<ul style="list-style-type: none"> • Définition d'une stratégie d'entreprise • (Eco-conception) 	<ul style="list-style-type: none"> • Définition d'une stratégie d'entreprise • (Eco-conception) 	Eco-conception	Eco-conception : identification de points faibles
Références	(ROSE 1998; ROSE, 1999; ROSE 2000)	(BOKS 2001a; 2001b; BOKS 2002)	(HUISMAN 2001; HUISMAN 2002)	(KALISVAART 2000; KORSE-NOORDHOEK 2001)	(ANDERL 1999; WOLF 2000)

Nom approche	euroMat'	Indicateur Chrysler / AAMA	Indicateur VW	Indicateur JAMA	Méthode ISO
Type d'approche: (Méthode / Logiciel commercial / Logiciel prototype / Approche industrielle) (année de lancement)	Logiciel commercial (2001)	Méthode	Méthode	Méthode	Méthode
Catégorie d'ECOV (CpD/CpDV/CpND/CpSV)	CpSV				
Aspects du produit considérés	• Matériaux	• Matériaux • Liens • Architecture	• Matériaux	• Pièce • Matériaux	• Matériaux • Liens • Architecture
Critère de recyclabilité	• Environnemental • (Economique)	• Massique • (Economique)	• Massique • (Viabilité économique des filières)	• Massique • (Economique)	• Massique
Approche prospective sur le système de valorisation	(✓)	(Viabilité économique et technique des filières)		Economique : viabilité des filières ?	(✓) (technologies testées avec succès en laboratoire)
Applicabilité	Eco-conception : choix de matériaux	Eco-conception : définition et suivi des objectifs	Eco-conception : définition et suivi des objectifs	Eco-conception : définition et suivi des objectifs	• Eco-conception : définition et suivi des objectifs • Homologation
Références	(FLEISCHER 1998; FLEISCHER 2000)	D'après (GAUCHERON 2000)	D'après (GAUCHERON 2000)	D'après (GAUCHERON 2000)	(AFNOR 2002)

ANNEXE III. Construction d'un scénario de valorisation à partir des procédés de valorisation

↪ Modélisation d'un scénario de valorisation à partir de la modélisation des procédés qui le constituent

Les notations dans la Figure A.1 sont les mêmes que celles de la Figure 2.9.

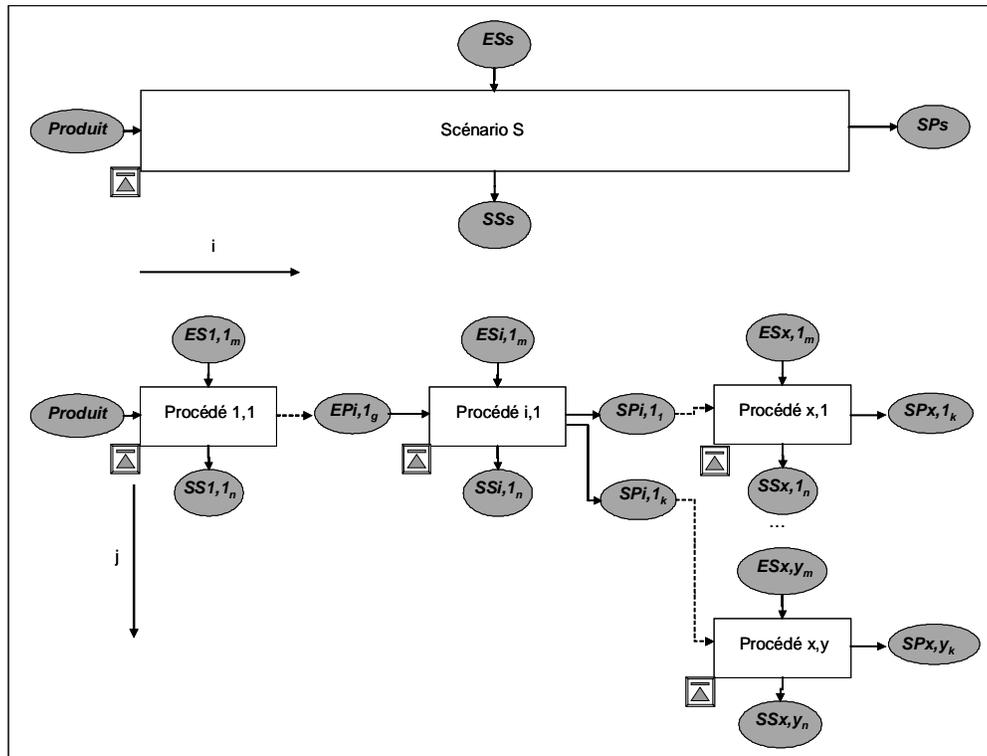


Figure A.1. Union de procédés formant un scénario de valorisation de produit.

Le *scénario de valorisation* S d'un produit est une association de procédés de valorisation numérotés (i,j) : il s'étend des étapes initiales du traitement, en particulier le démontage, jusqu'aux étapes finales, qui sont soit des étapes de revente de matériau recyclé ou d'énergie, soit des étapes d'élimination de déchets résiduels. A toute combinaison de procédés de valorisation correspond un scénario de valorisation de produit.

Les entrants et sortants principaux et secondaires du scénario sont établis à partir des entrants et sortants principaux et secondaires des procédés qui le constituent ; les relations liant entrants et sortants des procédés et du scénario sont équivalentes à celles liant entrants et sortants des opérations unitaires et du procédé, comme explicité dans la Table 2.5 du Chapitre 2.

Une distinction peut-être également être faite entre types différents d'entrants et sortants d'un scénario de valorisation, en utilisant des notations g, k, m et n .

Un scénario de valorisation présente des conditions d'entrée qui sont fonctions des conditions d'entrée des procédés qui le constituent.

ANNEXE IV. Mode de calcul de l'IER pour des scénarii alternatifs

La méthode permettant de calculer l'IER est la suivante :

- pour un scénario de référence, toutes les caractéristiques économiques du premier acteur sont établies : si le premier acteur est un démonteur, les coûts de mise en œuvre du démontage et les revenus de revente des éléments démontés sont en particulier déterminés ; le prix facturé au dernier utilisateur est ainsi calculé ;
- pour tout scénario alternatif, pour lequel une filière de valorisation en aval diffère de celle du scénario de référence, le revenu de revente de ce sortant principal $RM_{\text{alternatif}}$ est établi ; la différence de revenu $\Delta RM_{1,1}$ ($= RM_{1,1}^{\text{alternatif}} - RM_{1,1}^{\text{référence}}$), est retranchée à l'IER du scénario de référence ;
- si les différences de traitement entre scénario de référence et scénario alternatif se situent en aval de la chaîne de valorisation, par exemple en aval de l'acteur (i,j), les différences de revenus des filières en aval de cet acteur par rapport au scénario de référence sont transmises « par rebond » aux acteurs en amont ; la différence de revenu $\Delta RM_{i,j}$ ainsi calculée entre scénario alternatif et scénario de référence est retranché à l'IER de référence ;
- ainsi, toutes les caractéristiques économiques des procédés mis en œuvre dans le scénario alternatif ne sont pas nécessaires : si le revenu apporté à un acteur (i,j) par la filière en aval de procédés numérotés de (i+1,j) à (x,j) est connu, il suffit au calcul de l'IER du scénario alternatif.

Les relations entre acteurs de la chaîne de valorisation sont résumées dans la Figure A.2 suivante puis discutées :

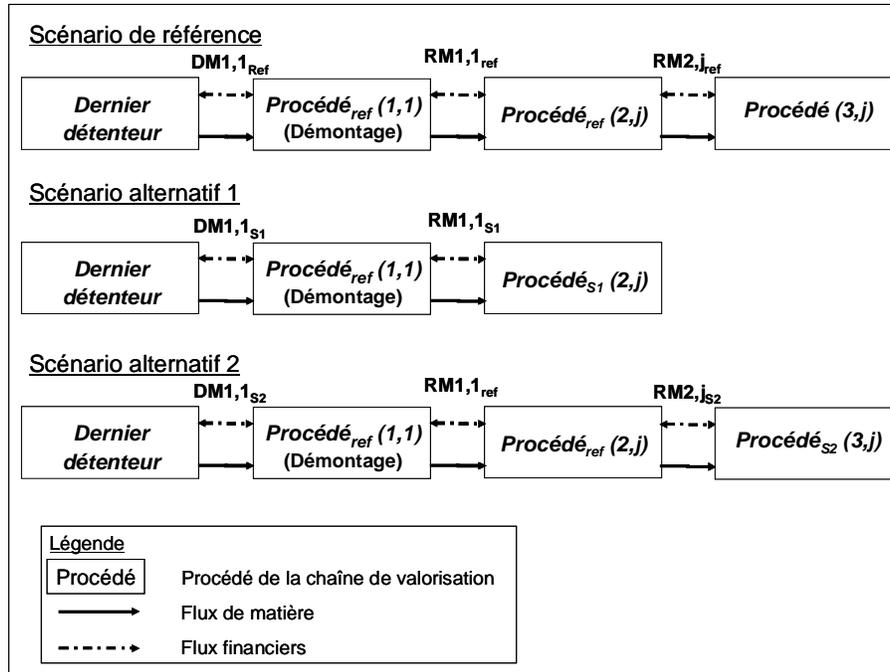


Figure A.2. Schématisation des échanges de matières et des échanges financiers existants entre les acteurs mettant en œuvre les procédés de plusieurs scénarii de valorisation.

Dans la Figure A.2, les grandeurs $DM1,1_{ref}$, $RM1,1_{ref}$ et $RM2,j_{ref}$ sont considérées connues pour le scénario de référence.

Le scénario alternatif 1 diffère du scénario de référence par la destination des sortants principaux $SP1,1_j$. Le revenu $RM1,1_{S1}$ étant connu, l'indicateur économique de recyclabilité du scénario alternatif 1 est calculé par la relation :

$$IER_{S1} = IER_{ref} + RM1,1_{S1} - RM1,1_{ref} \quad (A.1)$$

Le scénario alternatif 2 diffère du scénario de référence par la destination des sortants $SP2,j$. Le revenu $RM2,j_{S2}$ étant connu, l'indicateur économique de recyclabilité du scénario alternatif 2 est calculé par la relation :

$$IER_{S2} = IER_{ref} + RM2,j_{S2} - RM2,j_{ref} \quad (A.2)$$

Cette méthode permet, à partir de données économiques complètes d'un scénario de référence et de données économiques partielles de scénarii alternatifs, de calculer les indicateurs de recyclabilité de ces derniers. Le premier procédé du scénario de référence et des scénarii alternatifs doivent cependant être identiques.

ANNEXE V. Modélisation de quelques étapes de valorisation

↳ **Modélisation d'une étape de broyage**

▪ Objectif d'une étape de broyage

Une étape de broyage a pour objectif de casser les liaisons entre pièces et prépare le broyat à une étape de tri en aval. Le broyage contribue à la diminution de la taille des éléments, donc à la diminution de leur volume. Les caractéristiques affectées par un broyage sont les fixations entre pièces et la distribution granulométrique des particules.

▪ Conditions d'entrée d'une étape de broyage

Les entrants principaux doivent, par leurs tailles et leurs compositions, respecter quelques limitations propres à chaque type de broyeur, notamment liées à la taille des plus grandes pièces, ou à la taille des inserts métalliques.

▪ Hypothèses et modélisation d'une étape de broyage

Soit EP un mélange de pièces ou de produits. Une étape de tri transforme EP en deux sortants principaux, SP_1 étant le broyat orientés vers les étapes de valorisation en aval, et SP_2 étant les fines destinées à l'élimination en CET. Le broyage consomme de l'énergie. La consommation de matières associée au changement régulier des couteaux ou des marteaux du broyeur est négligée. La transformation est schématisée sur la Figure A.3 suivante.

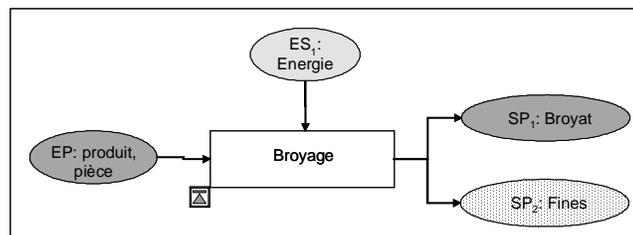


Figure A.3. Transformation de pièce / produit au cours d'une étape de broyage.

Le *taux de libération*^[4] de matériaux ou de pièces, défini par S. Zhang comme la part massique des matériaux/pièces libérées par l'opération (ZHANG 1999a), est l'évaluation de la performance d'un broyage. La distribution granulométrique en sortie du broyage est une autre performance du broyage. Le broyage est en fait une étape très complexe à modéliser et les connaissances actuelles son largement empiriques.

Dans le mémoire, notamment lors de l'application de la méthode à des études de cas, le broyage est essentiellement appliqué à des pièces simples composés d'un seul matériau : les transformations subies par les éléments broyés, notamment les distribution granulométrique et les taux de libération, ne sont pas détaillés : seuls sont adressés les pertes des procédés, le coûts et les impacts environnementaux qui leurs sont associés.

Les grandeurs nécessaires à la modélisation complète d'un broyage sont répertoriées dans la Table A.4. Elles sont en particulier renseignées pour le procédé de réduction de taille de pièces plastiques, procédé intégré aux scénarii A et B de l'étude de cas n°5 du Chapitre 3.

Table A.4. Grandeurs nécessaires à la modélisation d'une étape de broyage ; contributions aux indicateurs IMR, IER et IIER.

Type de broyage	Transformation	IMR Contribution négative	IER		IIER	
			Contribution négative	Contribution positive	Contribution négative	Contribution positive
Générique	Masse, distribution granulométrique, composition en matériau et liaisons résiduelles des pièces et matériaux de SP_1 ; masse de SP_2	Masse de SP_2	Coût du procédé	0	Type et quantité des ES – Masse et classe de SP_2	0
Réduction de la taille de pièces plastiques	Perte de 1% de fines : $SP_2 = 0.01 \times EP$	SP_2	0.05€/kg EP	0	Electricité consommée : 0.036MJ/kg EP	0

↳ **Modélisation de l'élimination de déchets par stockage en centre d'enfouissement technique (CET)**

▪ Objectif de l'étape

L'étape de mise en décharge, ou encore de stockage en Centre d'Enfouissement Technique (CET) a pour but de stocker de façon sûre des *déchets ultimes*^[4]. Selon la définition établie dans le glossaire, la notion de déchet ultime apparaît largement liée aux contextes géographique et socio-économique en vigueur lors du traitement du déchet.

▪ Conditions d'entrée

La dangerosité d'un déchet, c'est-à-dire sa composition, conditionne généralement l'acceptation de ce déchet en centre d'enfouissement technique. La loi du 13 juillet 1992 établit, par ailleurs, qu'à partir du 1^{er} juillet 2002, seuls les déchets ultimes devraient être acceptés en CET (JO 1992).

▪ Modélisation d'une étape de stockage en CET

Soit EP l'entrant principal d'une étape de mise en CET. La mise en CET transforme ces entrants principaux en déchets stockés. La manutention liée à l'étape consomme de l'énergie.

Au cours d'un séjour long en CET, une partie des déchets stockés subissent des transformations physico-chimiques qui contribuent à la production de biogaz et au rejet

d'éléments toxiques dans l'eau par lixiviation. Les transformations subies par les matières placées en CET sont encore très mal connues (FINNVEDEN 1995; FINNVEDEN 1996) et il semble que les impacts à long terme de ce type de stockage soient encore largement sous-estimés (FINNVEDEN 1999). Quelques tentatives d'évaluation des rejets de quelques matériaux stockés en CET existent : par exemple, J. Bez établit les inventaires de cycle de vie de la mise en décharge de 1 kg de bouteilles plastiques (BEZ 1998). Cependant, il semble que ces approches n'aient pas été achevées et les inventaires de cycle de vie ne sont pas disponibles pour tous les matériaux issus de produits complexes pouvant être stockés en CET. En raison de l'absence de modèle scientifique fiable établissant des coefficients de transfert des entrants principaux de différents types et les rejets de leur stockage dans les milieux eau, air et sol, ces transformations ne sont pas considérées dans notre modèle.

Les transformations réalisées au cours du stockage en CET sont représentées sur la Figure A.4 :

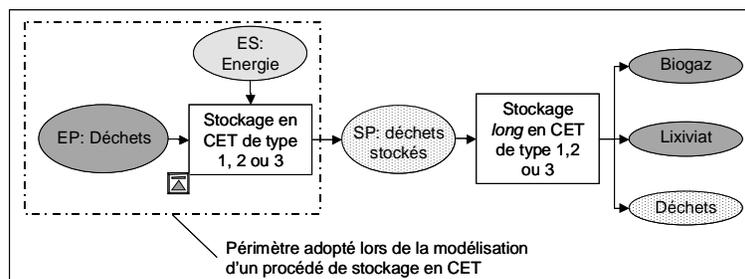


Figure A.4. Transformations des déchets au cours d'un stockage en CET.

Ainsi, comme pour la plupart des études ACV appliqués aux produits, l'impact environnemental de la mise en décharge d'entrants principaux est évalué dans notre modèle comme la masse de déchets enfouie. Une distinction est cependant faite selon la dangerosité des déchets, destinés soit à un CET de classe 1, soit à un CET de classe 2. Le périmètre du système considéré dans la modélisation est représenté sur la Figure A.6 précédente : l'enfouissement en CET constitue un puits de matières et d'énergies.

Les grandeurs nécessaires à la modélisation complète de l'enfouissement en CET sont répertoriées dans la Table A.5. Elles sont en particulier renseignées pour l'enfouissement en CET de classe 2, procédé en particulier mis en œuvre dans les scénarii 1, 2, 3, A et B des études de cas n°4 et 5 du Chapitre 3.

Table A.5. Grandeurs nécessaires à la modélisation d'une étape d'enfouissement en CET ; contributions aux indicateurs IMR, IER et IIER.

Type de stockage	Transformation	IMR Contribution négative	IER		IIER	
			Contribution négative	Contribution positive	Contribution négative	Contribution positive
Générique	Stockage	0	Masse et classe des déchets des <i>EP</i>	0	Masse et classe des déchets des <i>EP</i>	0
Stockage en CET 2	Stockage	0	0.12€ / kg <i>EP</i>	0	<i>EP</i> en Classe 2	0

↪ **Modélisation d'une étape de logistique**

▪ Objectif de l'étape

L'étape a pour but de transférer des éléments issus des PEEFV d'un lieu de traitement à un autre. La distance parcourue dépend de la distribution géographique des acteurs de la valorisation qui, comme représenté sur la Figure A.5, varie grandement selon le type d'activité.

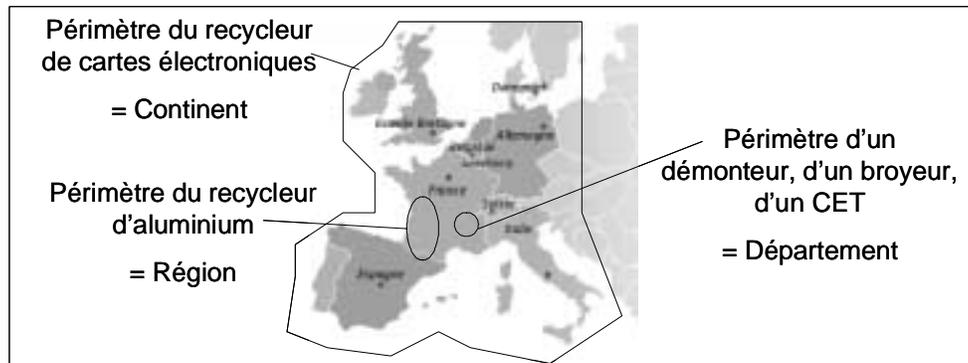


Figure A.5. Les périmètres géographiques de plusieurs acteurs de la valorisation de PEEFV.

▪ Conditions d'entrée

Tous les éléments peuvent être transportés d'un lieu de valorisation à un autre, à condition de respecter quelques restrictions, notamment relatives au transport transfrontalier des déchets dangereux.

▪ Modélisation générique d'une étape de logistique

Soit EP l'entrant principal d'une étape de logistique. Au cours du transport, l'EP n'est pas transformé. Comme représenté sur la Figure A.6, l'opération consomme cependant de l'énergie et induit des rejets gazeux.

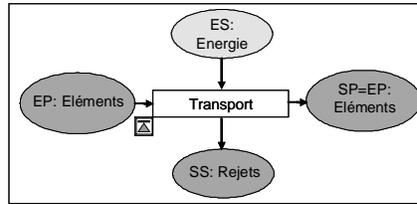


Figure A.6. Consommation d'énergie et rejets au cours d'une étape de transport.

Le coût de l'opération, le type et la quantité de rejets associés à une étape de logistique sont fonctions du type de transport (par camion, par train, par bateau ou par avion), du kilométrage parcouru, de la masse et du volume des éléments transportés.

Les grandeurs nécessaires à la modélisation complète de la logistique sont répertoriées dans la Table A.6. Elles sont en particulier renseignées pour le transport de pièces plastiques d'un démonteur à un trieur, procédé intégré au scénarii B de l'étude de cas n°5.

Table A.6. Grandeurs nécessaires à la modélisation d'une étape de transport ; contributions aux indicateurs IMR, IER et IIER.

Type de logistique	Transformation	IMR Contribution négative	IER		IIER	
			Contribution négative	Contribution positive	Contribution négative	Contribution positive
Générique	Transport	0	Type de transport ; kilométrage ; masse et volume des EP	0	Type de transport ; kilométrage ; masse et volume des EP	0
Transport de pièce plastiques sur 545km	Transport	0	0.06€/kg EP	0	Variés (émissions gazeuses et consommation de ressources)	0

ANNEXE VI. Incinération avec récupération d'énergie

Table A.7. Coefficients de transfert d'un procédé d'incinération avec récupération d'énergie pour divers types d'entrants et selon diverses sources bibliographiques.

Matériau incinéré	Type unité incinération	Part recyclée (%)	Déchets résiduels (%)	Energie produite (MJ/kg)	Rejets	Source bibliographique
Plastiques (sauf PVC)	Incinérateur moderne	0	4.8	7.2 (électricité)	Divers (air et eau)	(PRE 1994)
PVC	Incinérateur moderne	0	4.5	3.25 (électricité)	Divers (air et eau)	(PRE 1994)
ABS	?	0	?	37		(ECOBILAN 1999)
PP	?	0	?	45		(ECOBILAN 1999)
Verre	Incinérateur moderne d'OM	0	100	0	Divers (air et eau)	(PRE 1994)
Métaux ferreux	Incinérateur moderne d'OM	63	37	0	Divers (air et eau)	(PRE 1994)
Métaux non ferreux	Incinérateur moderne d'OM	29	71	0	Divers (air et eau)	(PRE 1994)
Matériaux non plastique, non verre non métallique	Incinérateur moderne d'OM	0	100	0	0	(PRE 1994)
Générique (ordures ménagères)	Plusieurs types d'incinérateurs de déchets	Fixé par unité de masse	Modélisé en fonction de la composition de l'entrant	Fixé par unité de masse (électricité et chaleur)	Modélisé en fonction de la composition de l'entrant (air, sol et eau)	(HELLWEG 2001)
Tout type	Incinérateur moderne d'ordures	Variable en fonction entrant	Variable en fonction entrant	Variable en fonction entrant :	Variable en fonction entrant	(KREMER 1998)

	ménagères			production de chaleur et d'électricité		
Générique (ordures ménagères)	Type moyen d'incinérateur de déchet		10			(MIQUEL 1999)

Table A.8. Coûts de traitement par incinération dans des unités d'incinération d'ordures ménagères de différentes capacités (MIQUEL 1999).

Capacité (T/an)	20.000	40.000	120.000
Coût de traitement (€/T)	114-138	76-106	69-77

ANNEXE VII. Modélisation du procédé de recyclage de carte électronique

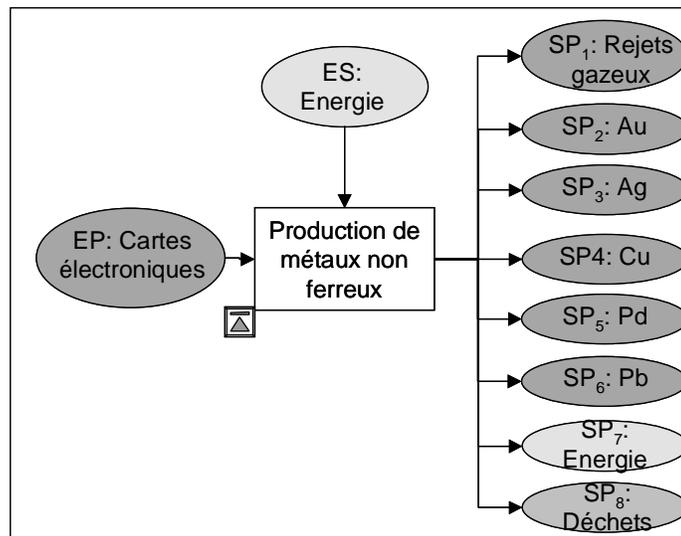


Figure A.7. Schématisation de la production de métaux non ferreux à partir de cartes électroniques en fin de vie.

ANNEXE VIII. Classes d'impacts environnementaux utilisées dans le logiciel EIME™

Table A.9. Indicateurs et unités des principales classes d'impacts utilisées dans l'outil logiciel EIME™ (d'après (DUBOTS 1998)).

Classes d'indicateurs	Epuisement des matières premières	Epuisement des ressources énergétiques	Epuisement des ressources hydriques	Effet de serre	Epuisement de la couche d'ozone	Toxicité de l'air	Création d'ozone photochimique	Acidification de l'air	Toxicité de l'eau	Eutrophisation de l'eau	Production de déchets dangereux
Abréviations anglaises utilisées	RMD	ED	WD	GW	OD	AT	POC	AA	WT	WE	HWP
Unités	An ⁻¹	MJ	m ³	g eq. CO ₂	g eq. CFC-11	m ³	g eq. C ₂ H ₄	g eq. H ⁺	dm ³	g eq. PO ₄	Kg

ANNEXE IX. Informations sur la carte électronique du téléviseur

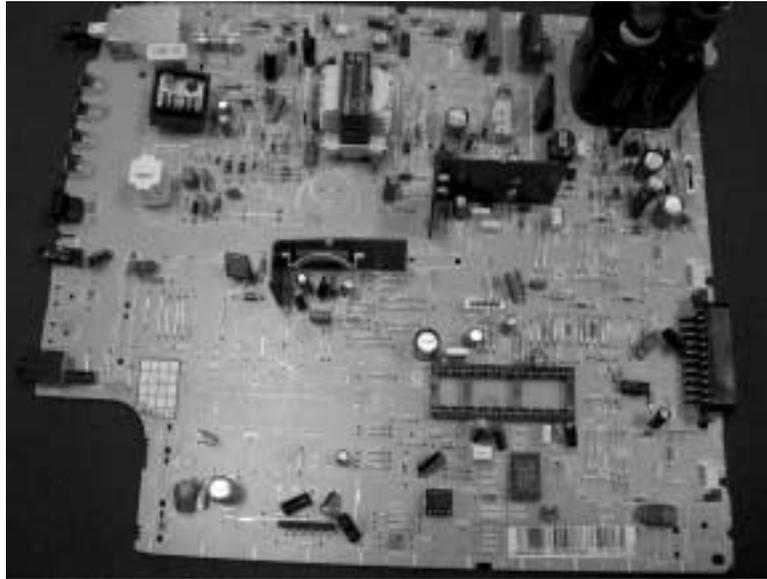


Figure A.8. Photographie de la carte électronique principale du téléviseur SABA.

Table A.10. Caractéristiques physiques de la carte électronique du téléviseur SABA.

Masse (kg)	Dimensions : L X l x h (m)
0.689	0.28 X 0.25 X 0.10

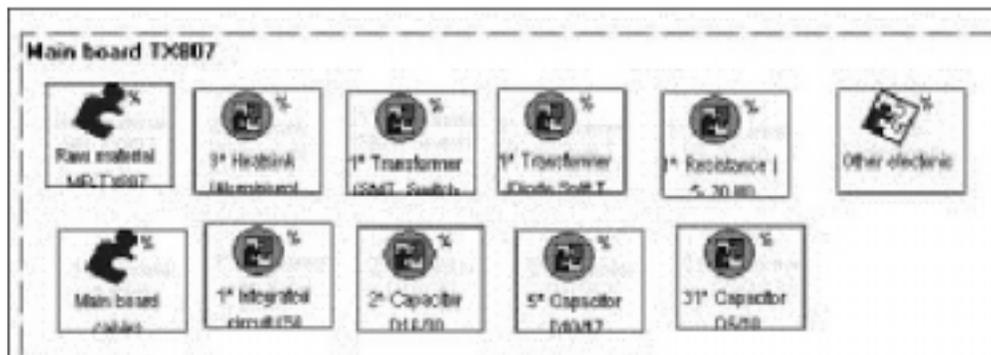


Figure A.9. Copie d'écran de la modélisation de la carte électronique du téléviseur SABA avec le logiciel EIME™.

ANNEXE X. Informations sur les cartes électroniques de téléphones portables

↪ Composition des cartes électroniques de téléphones portables

La Figure A.10 présente des photographies de cartes électroniques d'un téléphone portable Alcatel, produit étudié dans le cadre du programme Ensam/Ademe (ENSAM/ADEME 2002).

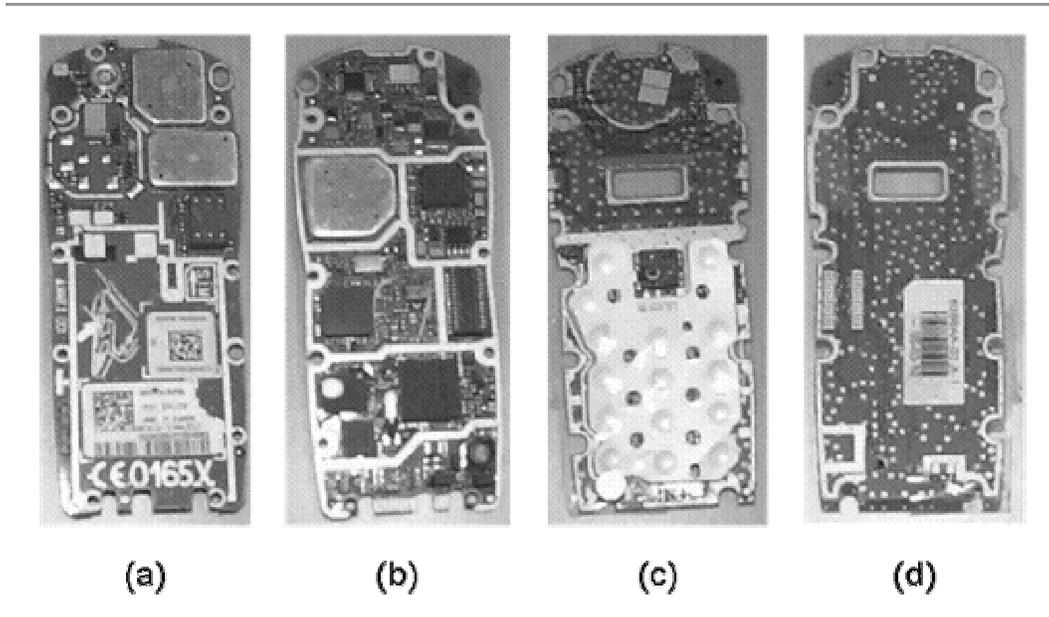


Figure A.10. Photographie de deux cartes électroniques de téléphone portable Alcatel : (a) face 1 de la carte RN ; (b) face 2 de la carte RN ; (c) face 1 de la carte RHM ; (d) face 2 de la carte RHM.

La composition en matériau de plusieurs générations de cartes électroniques est déduite des données obtenues lors de l'opération pilote de collecte et de valorisation de téléphones portables réalisé en 1997 par l'association de producteurs ECTEL (ECTEL 1997). Ces données sont présentées dans la Table A.11 pour trois types de téléphones portables : le type A, mis sur le marché avant 1992, le type B, mis sur le marché entre 1992 et 1994, et le type C, mis sur le marché entre 1995 et 1996. La batterie a été préalablement retirée du produit.

Table A.11. Composition massique des métaux contenus dans plusieurs générations de téléphones portables (d'après ((ECTEL 1997))).

Elément	Masse pour 1000 kg de téléphone portable (en kg)		
	Types de téléphones portables		
	Type A (av 92)	Type B (92-94)	Type C (95-96)
Argent	3,0	6,1	4,8
Cuivre	75,0	128,3	156,3
Palladium	0,45	0,00	0,00
Zinc	9,0	41,0	69,7
Nickel	8,9	17,5	20,7
Métaux ferreux	158,5	44,8	37,0
Plomb	4,8	8,4	6,1
Chrome	3,2	2,4	1,5
Or	0,365	0,424	0,245
Aluminium	226,5	11,2	17,6
Etain	11,0	12,5	5,3
Total	501 kg	272 kg	319 kg
Masse moyenne d'un produit	1.540	0.155	0.132

A partir de la composition des téléphones portables, les hypothèses suivantes sont adoptées pour établir la composition des différentes générations de cartes électroniques :

- tous les métaux proviennent des cartes : cette hypothèse est au moins vérifiée pour les métaux non ferreux visés par le procédé de valorisation,
- la part massique de la carte électronique dans un produit est considérée constante et égale à 34% de la masse du produit, comme pour le téléphone Alcatel – BE4.
- la part massique des matières plastiques présentes dans la carte est constante et est fixée à 45 %, comme établi pour la carte du téléviseur ; en retranchant la masse des déchets produits lors de la valorisation énergétique de ces matières, le taux massique de valorisation énergétique des cartes est constant et égal à 42.8%.

ANNEXE XI. Evaluation de la recyclabilité de la carte électronique d'un téléviseur

↪ Bénéfice environnemental de la valorisation d'une carte et impacts environnemental associé à la consommation électrique d'un téléviseur

Afin de positionner le calcul de l'indicateur d'impact environnemental de recyclabilité dans une perspective cycle de vie, le bénéfice environnemental de la valorisation d'une carte électronique de téléviseur est comparé à l'impact environnemental associé à la consommation électrique du cycle de vie du produit. Les données de consommations énergétiques sont répertoriées dans la Table A.12 ; les résultats sont présentés dans la Figure A.11.

Table A.12. Données de consommations énergétiques d'un téléviseur (d'après (ENSAM/ADEME 2002))

Duré d'utilisation du produit	Phase active		Phase passive	
	Consommation	Part temporelle	Consommation	Part temporelle
10 ans	30 W	17%	4W	83%

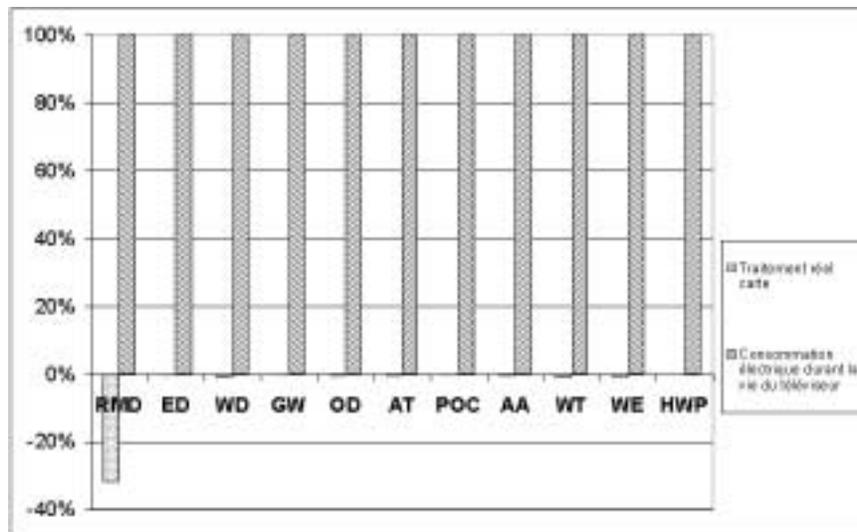


Figure A.11. Comparaison des bénéfices environnementaux de la valorisation d'une carte électronique de téléviseur avec les impacts environnementaux associés à la consommation électrique du produit.

ANNEXE XII. Evaluation de la recyclabilité d'un mélange de cartes électroniques

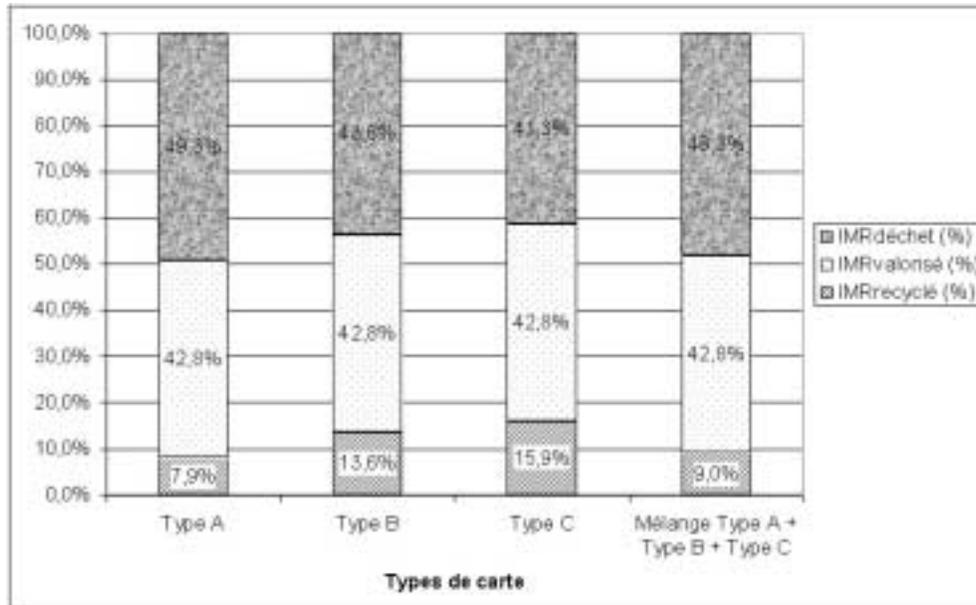


Figure A.13. Résultats du calcul des IMR de trois générations de cartes de téléphones portables et de leur mélange : approche fonctionnelle.

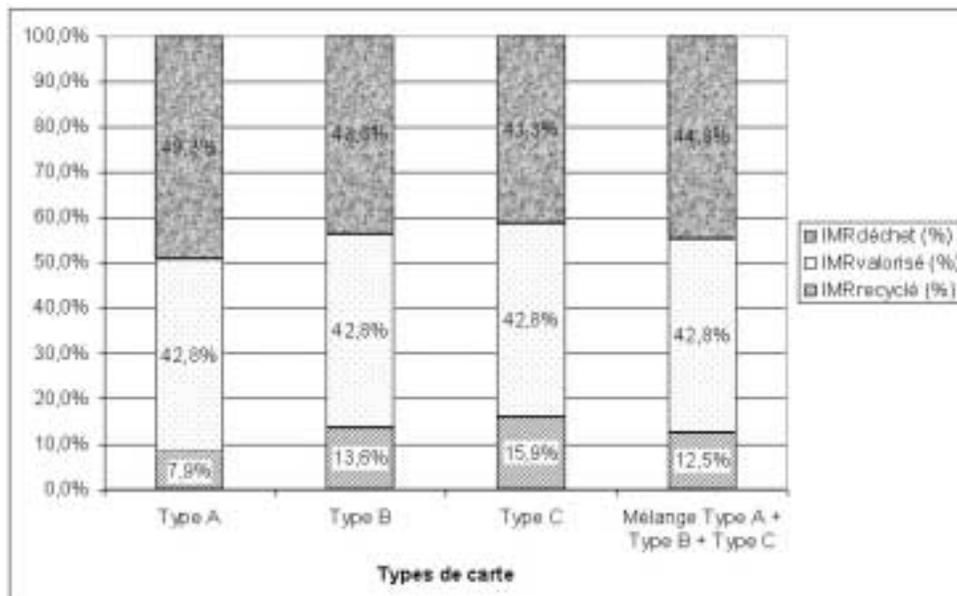


Figure A.14. Résultats du calcul des IMR de trois générations de cartes de téléphones portables et de leur mélange : approche massique.

Table A.13. Résultats du calcul des IER de trois générations de cartes de téléphones portables et de leur mélange.

	Carte type A	Carte Type B	Carte Type C	Carte type A + Carte type B + Carte type C
Approche fonctionnelle - IER (€/carte)	31.5	16.2	9.2	28.6
Approche massive - IER (€/kg de carte)	16.5	0.8	0.4	5.9

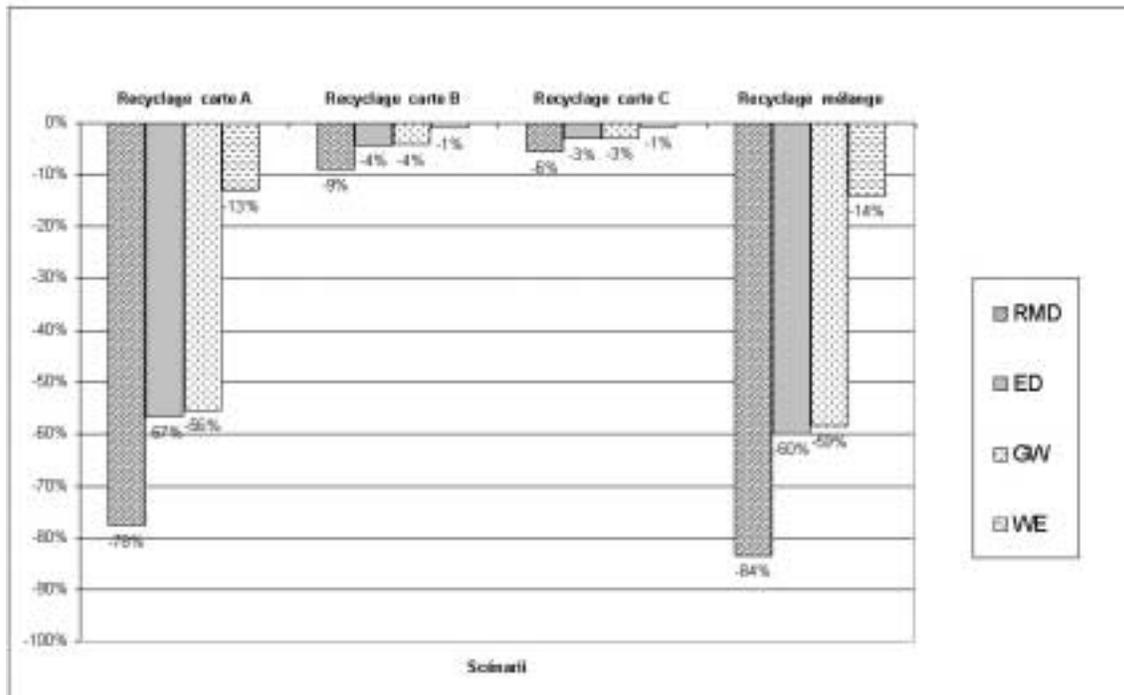


Figure A.15. Résultats du calcul des IER de trois générations de cartes de téléphones portables et de leur mélange : approche fonctionnelle.

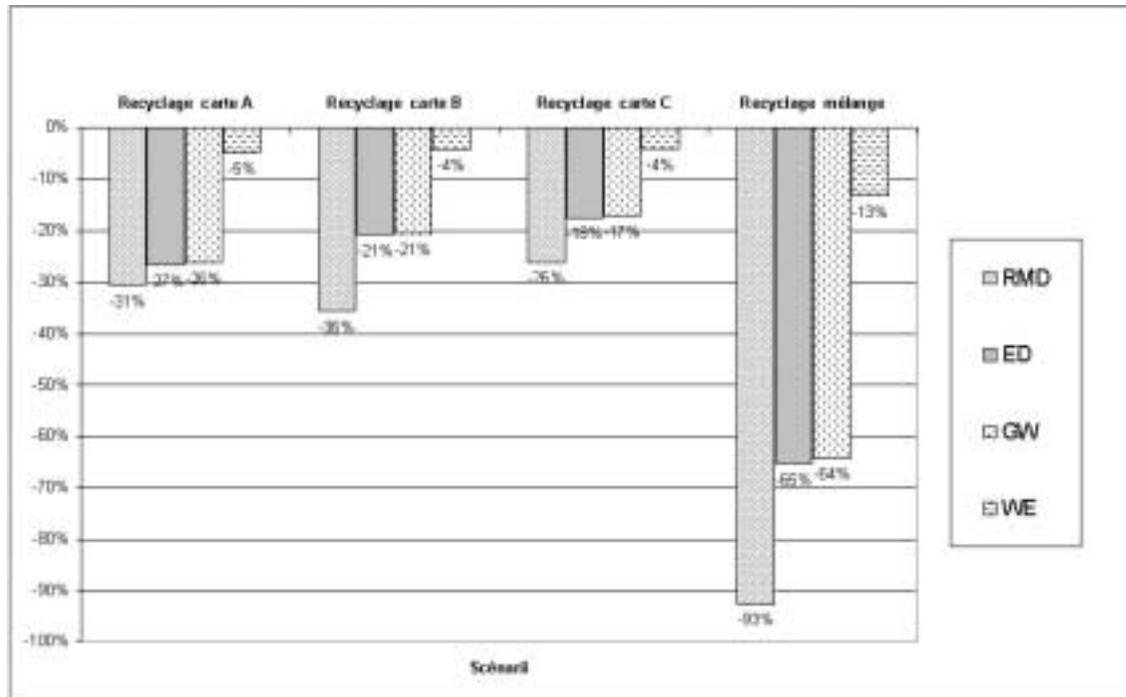


Figure A.16. Résultats du calcul des IIER de trois générations de cartes de téléphones portables et de leur mélange : approche massique.

ANNEXE XIII. Hypothèses et calculs de la recyclabilité d'un téléviseur

↶ Photographie du téléviseur



Figure A.17. Photographie du téléviseur analysé

↶ Arbre de démontage du téléviseur

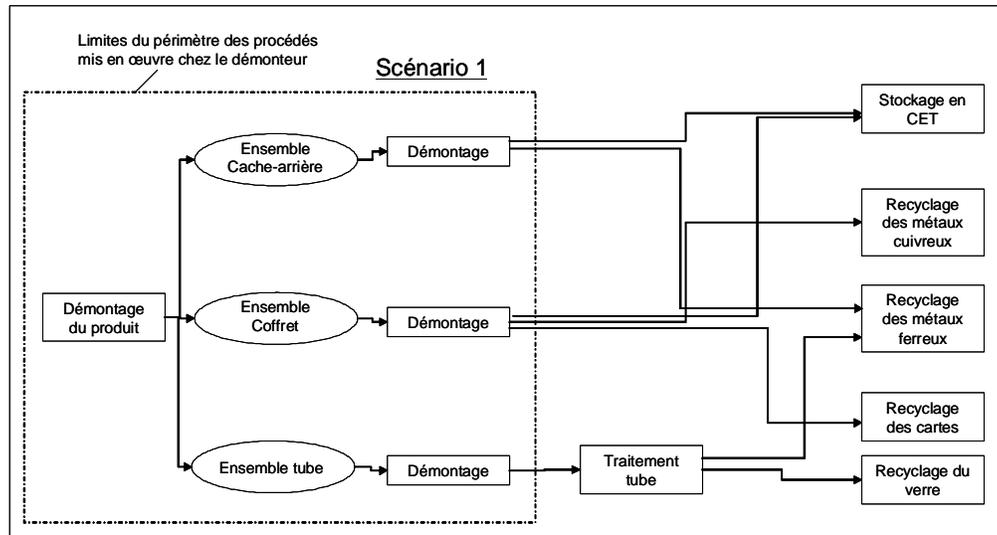


Figure A.19. Schématisation du scénario 1 de valorisation du téléviseur.

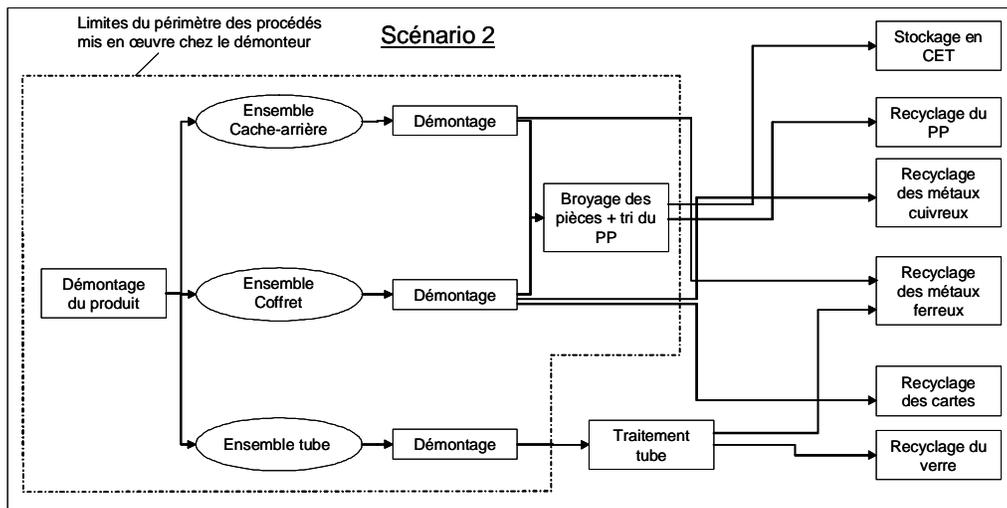


Figure A.20. Schématisation du scénario 2 de valorisation du téléviseur.

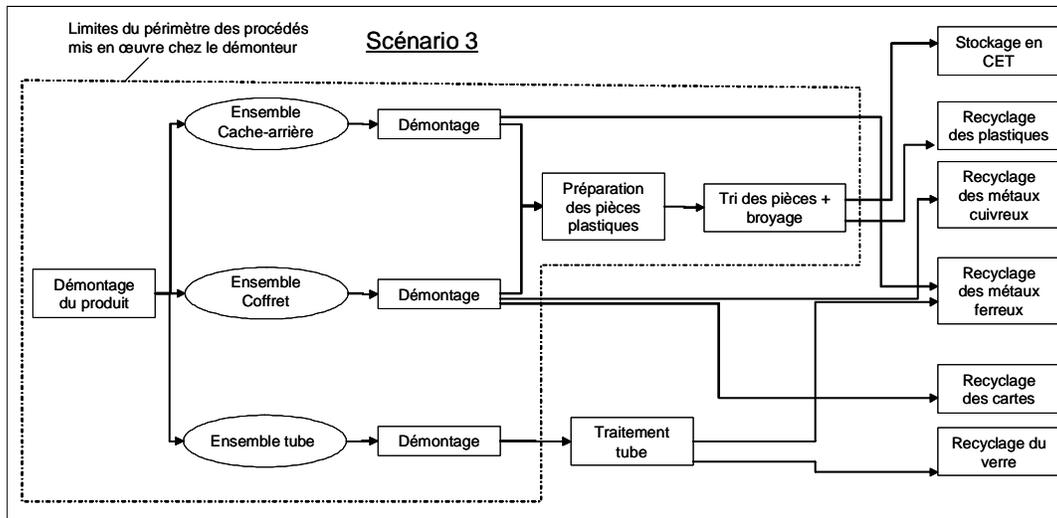


Figure A.21. Schématisation du scénario 3 de valorisation du téléviseur.

↳ Destinations de valorisation des éléments du téléviseur

Table A.14. Destinations de valorisation des principaux éléments du téléviseur.

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Tube cathodique	Séparation manuelle des verres suivi d'un recyclage dans un nouveau tube cathodique		
Carte électronique	Recyclage des métaux non ferreux et valorisation énergétique des plastiques en fonderie		
Mélange à dominante cuivreuse	Broyage, tri et recyclage du cuivre en fonderie		
Mélange à dominante ferreuse	Broyage, tri et recyclage des ferreux en aciérie		
Cache arrière		Broyage, tri	Démontage poussé,
Coffret	Elimination	gravimétrique et recyclage	tri, broyage et recyclage

↳ Hypothèses considérées lors du calcul de l'IMR du téléviseur

Table A.15. Taux de valorisation des matériaux dans les filières de valorisation

Matériaux	Taux de valorisation
Verre du tube cathodique	95% de recyclage
Métaux non ferreux de la carte	95% de recyclage
Plastiques de la carte	95% de valorisation énergétique
Autres métaux non ferreux	95% de recyclage
Métaux ferreux	95% de recyclage

Table A.16. Taux de récupération et de recyclage des matériaux plastiques dans les filières de valorisation.

Matériau plastique	Tri gravimétrique + recyclage	Tri par identification + recyclage
PP	80%	97%
HIPS	0%	97%

↳ Evaluation de la recyclabilité massique d'un téléviseur selon plusieurs scénarii de valorisation

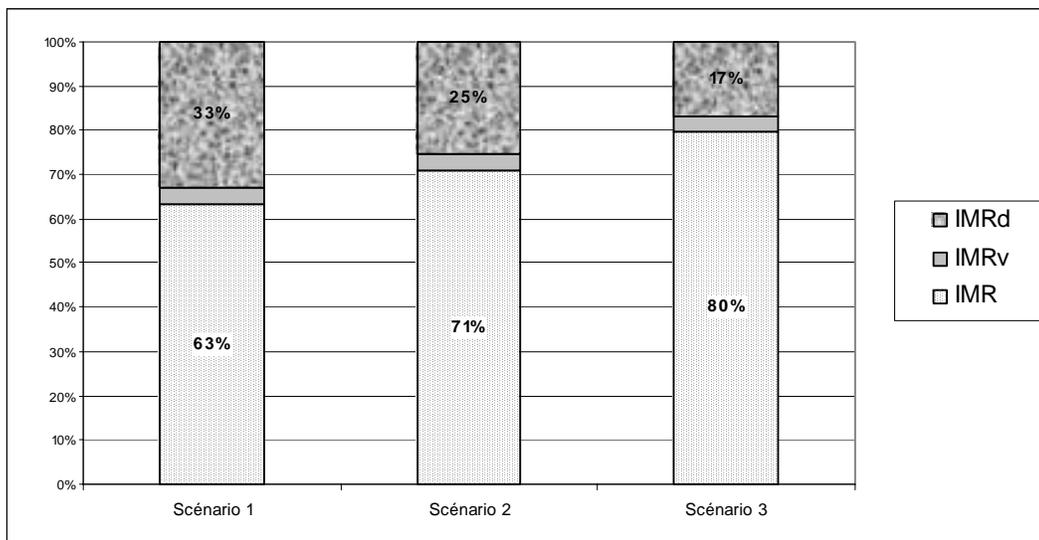


Figure A.22. Evaluation de la recyclabilité massique d'un téléviseur selon plusieurs scénarii.

↪ **Hypothèses considérées lors du calcul de l'IER du téléviseur**

Table A.17. Prix d'achat / revente de quelques entrants principaux de filières de valorisation des scénarii 1, 2 et 3.

Type d'élément ou de matériaux	Prix de revente (€/kg)	Source
Recyclage des métaux ferreux	-0.0045	Obtenu du terrain
Recyclage de carte électronique	-0.076	Obtenu du terrain
Traitement de tube cathodique	0.229	Obtenu du terrain
Recyclage de mélangés concentrés en cuivre	-0.25	Obtenu du terrain
Recyclage de PP trié	-0.23	www.recycle.net
Recyclage de l'HIPS trié	-0.30	www.recycle.net
Elimination en décharge	+0.120	Obtenu du terrain

Table A.18. Performances économiques des procédés de tri des plastiques mis en œuvre.

Procédés	Performance économique	Source
Coût du broyage + tri densimétrique	0.20 € / kg entrant	Obtenu du terrain
Coût tri par identification + broyage	1 € / kg entrant	(AROLA 1999)
Démontage	13€/heure	Obtenu du terrain

↪ **Evaluation de la recyclabilité économique d'un téléviseur selon plusieurs scénarii de valorisation**

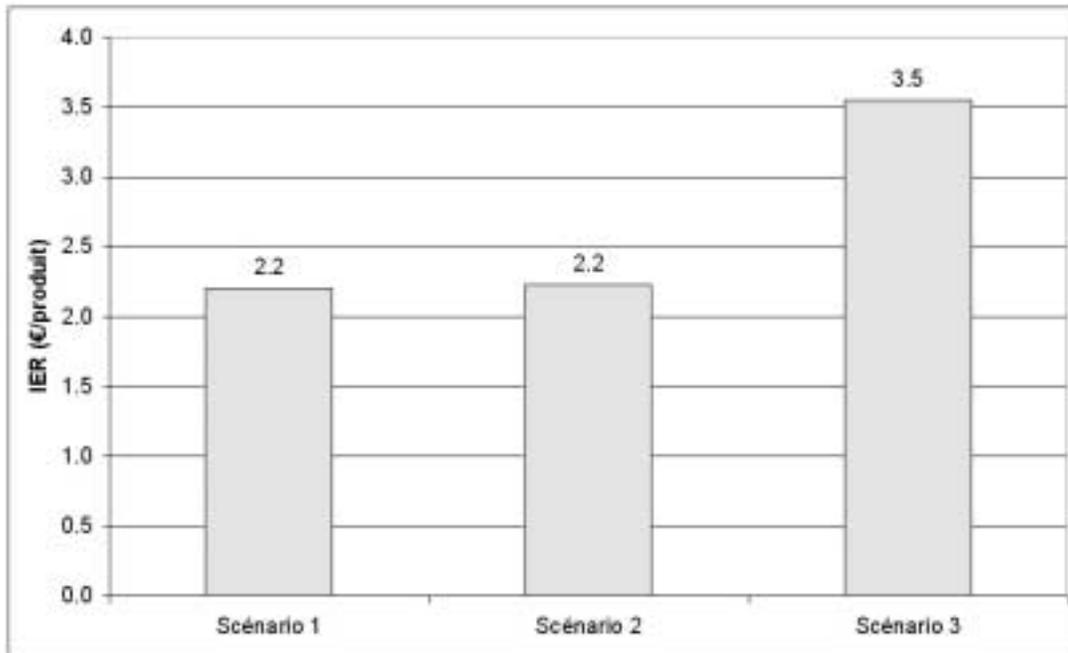


Figure A.23. Evaluation de la recyclabilité économique d'un téléviseur selon plusieurs scénarii.

↪ **Evaluation de la recyclabilité environnementale d'un téléviseur selon plusieurs scénarii de valorisation**

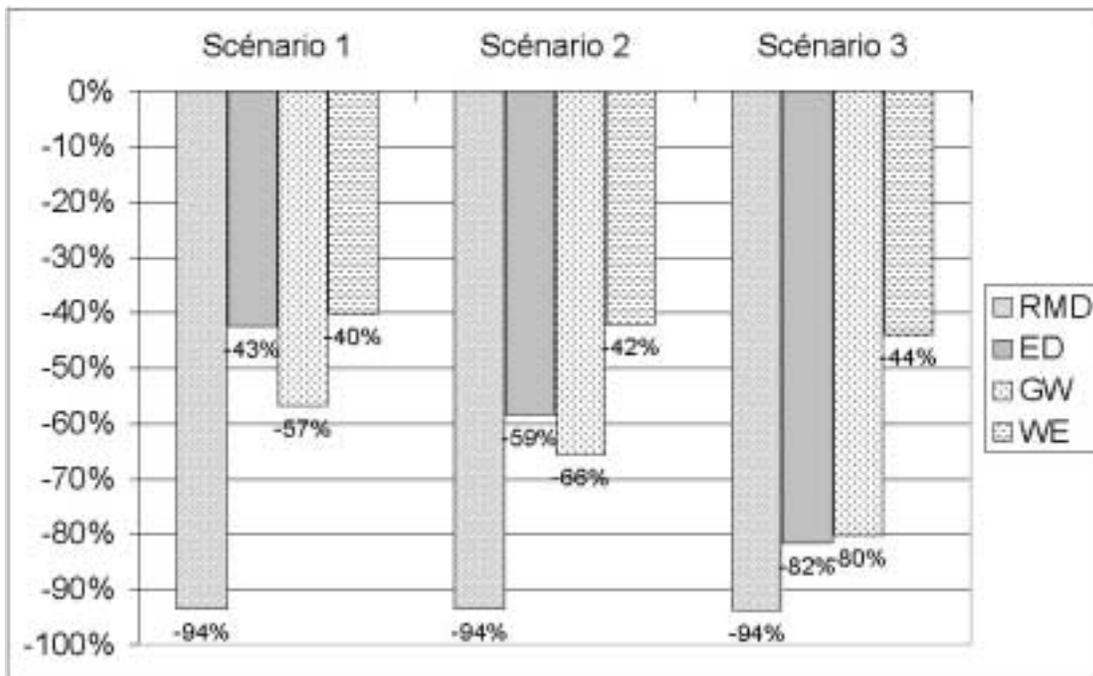


Figure A.24. Evaluation de la recyclabilité environnementale d'un téléviseur selon plusieurs scénarii.

↪ **Evaluation de la recyclabilité environnementale d'un téléviseur selon un scénario optimal de valorisation**

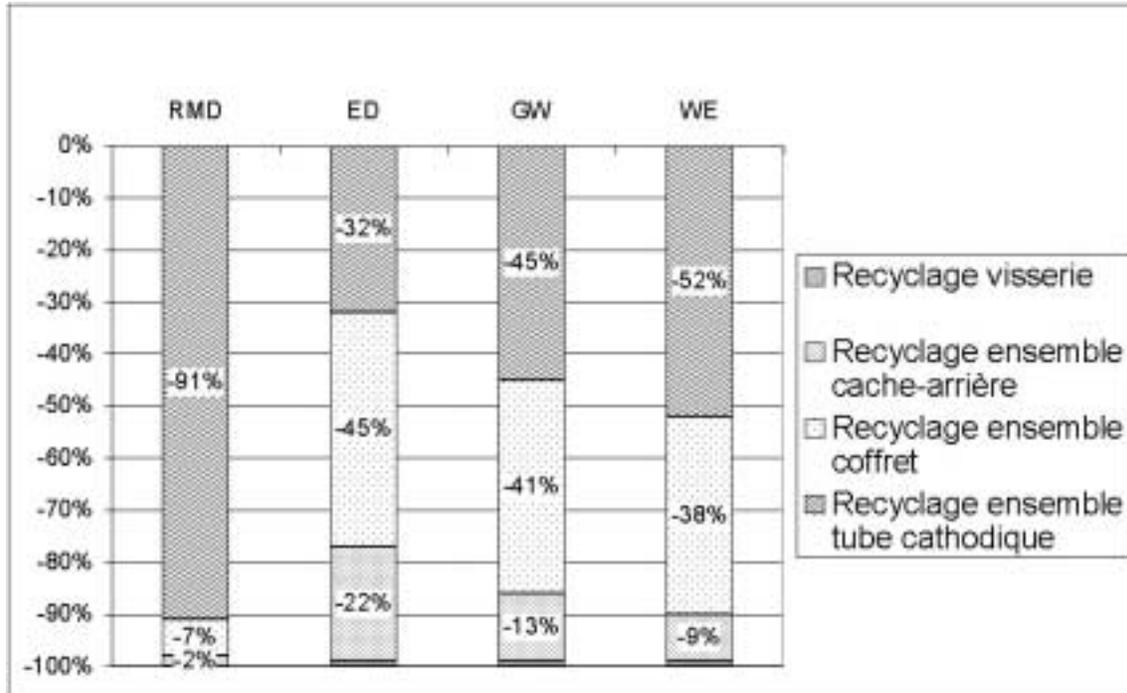


Figure A.25. Part des contributions négatives de plusieurs procédés à la recyclabilité environnementale d'un téléviseur lors de la mise en œuvre du scénario optimal.

↪ **Recherche de procédés problématiques pour le scénario 1**

Critère massique :

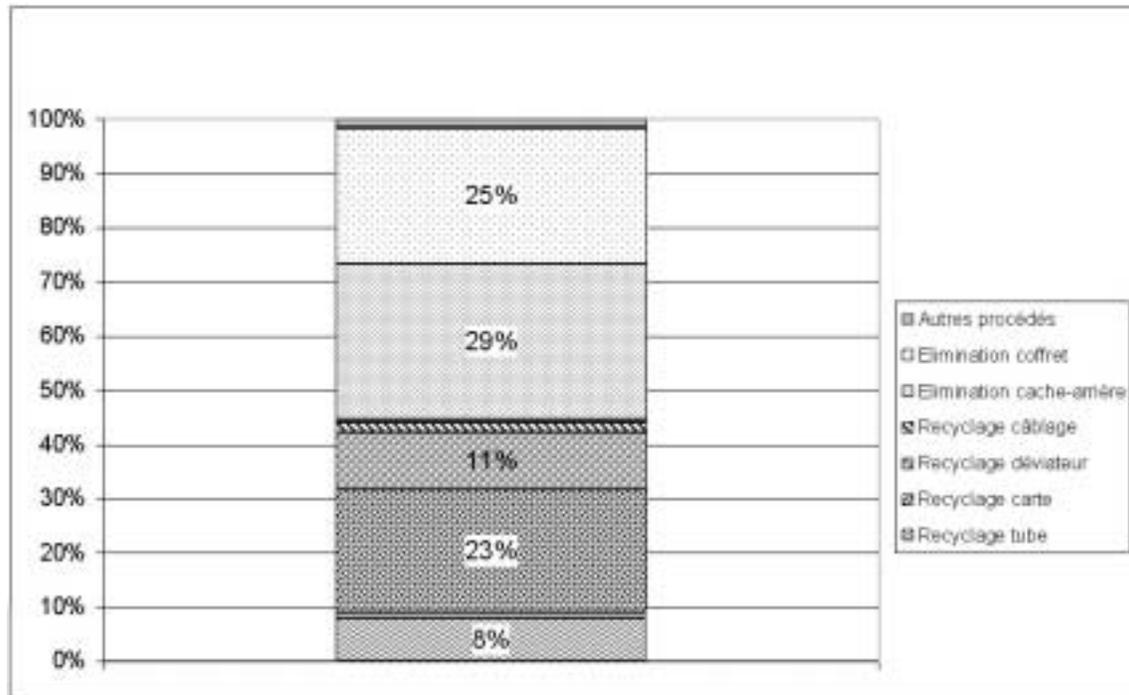


Figure A.26. Contributions négatives à la recyclabilité massique du téléviseur de quelques procédés problématiques du scénario 1.

Critère économique :

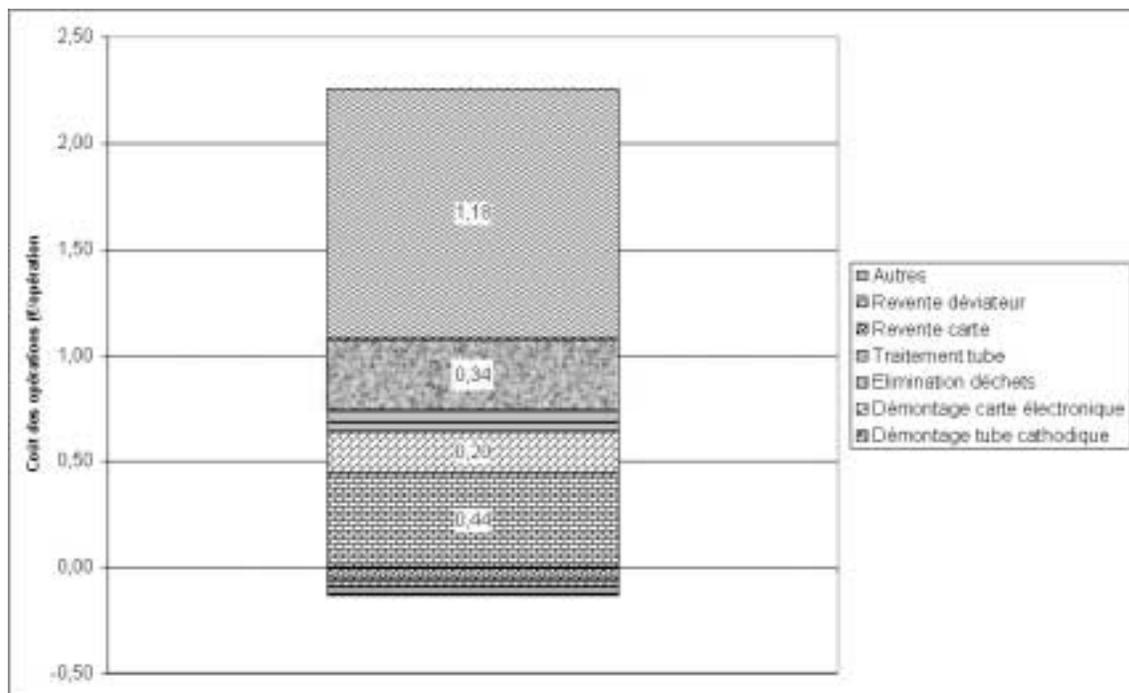


Figure A.27. Contributions négatives à la recyclabilité économique du téléviseur de quelques procédés problématiques du scénario 1.

Critère environnemental :

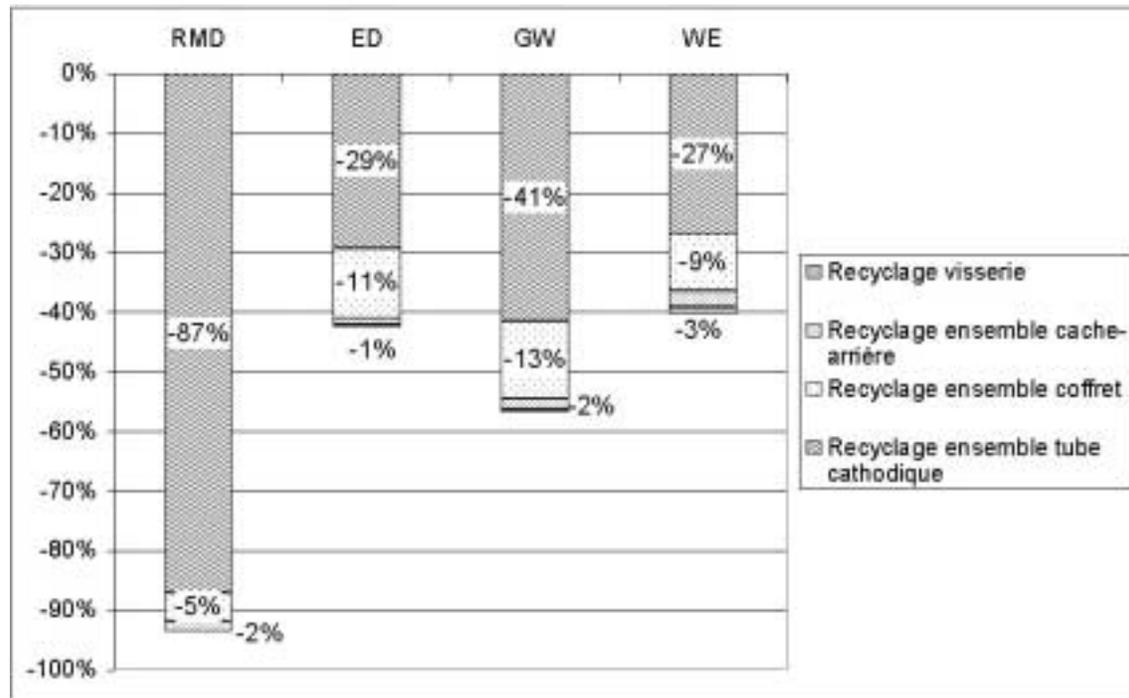


Figure A.28. Contributions négatives à la recyclabilité environnementale du téléviseur de quelques procédés problématiques du scénario 1.

↪ **Recherche de procédés problématiques pour le scénario 3**

Critère massique :

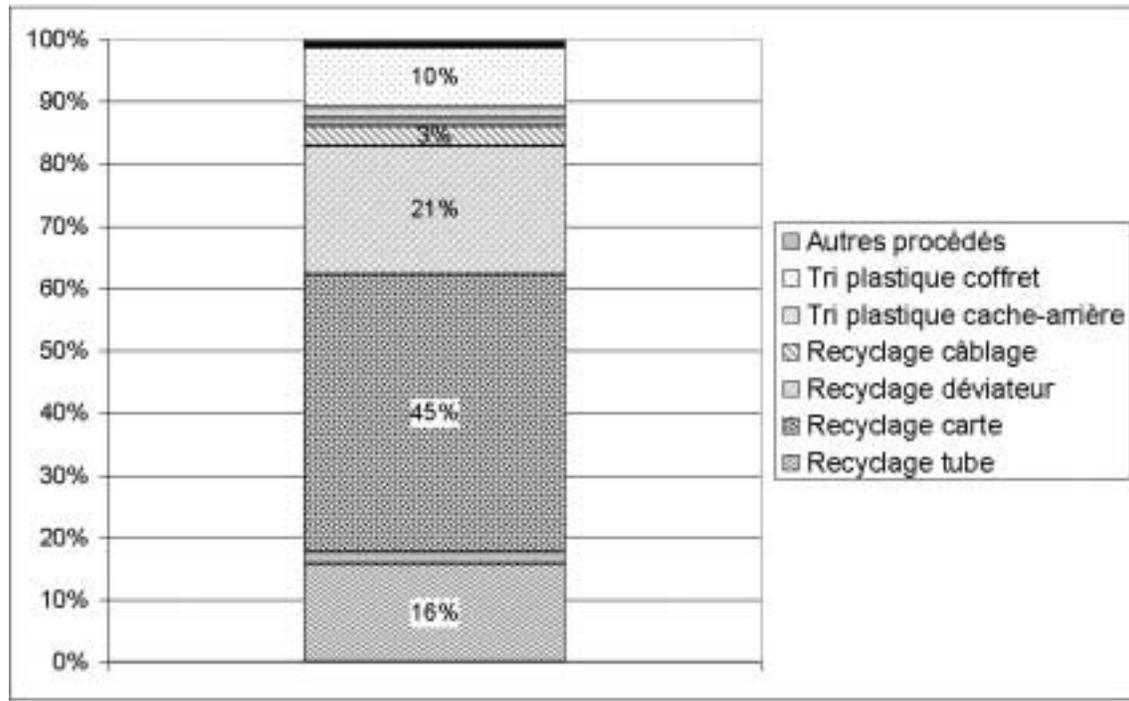


Figure A.29. Contributions négatives à la recyclabilité massique du téléviseur de quelques procédés problématiques du scénario 3.

Critère économique :

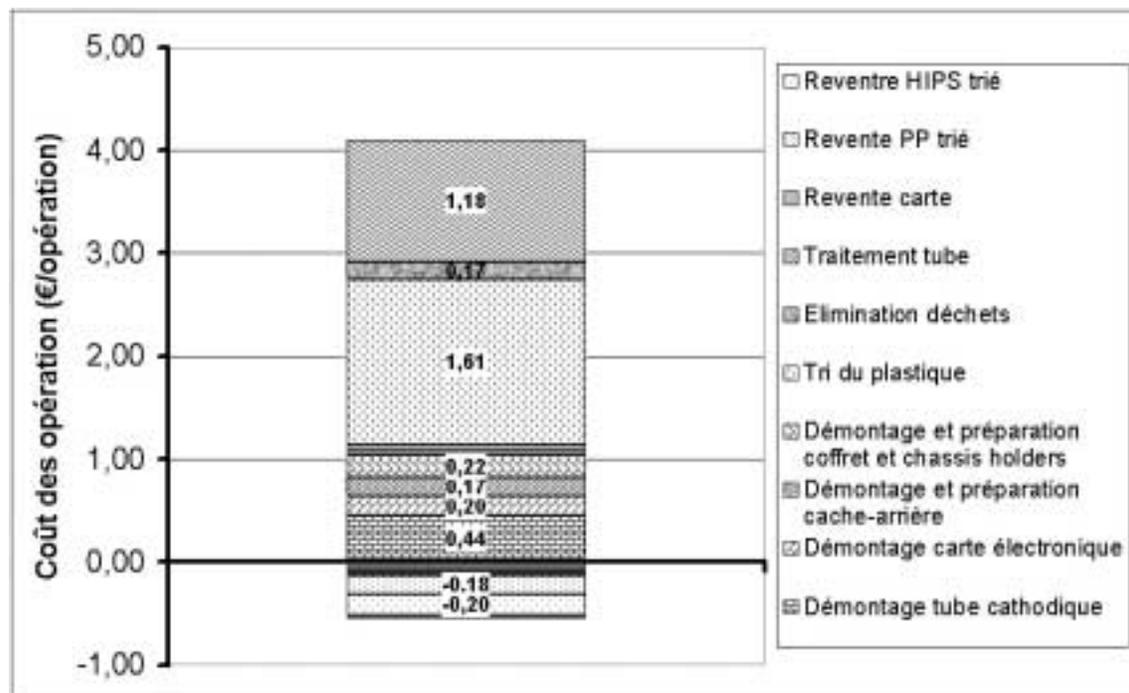


Figure A.30. Contributions négatives à la recyclabilité économique du téléviseur de quelques procédés problématiques du scénario 3.

Critère environnemental :

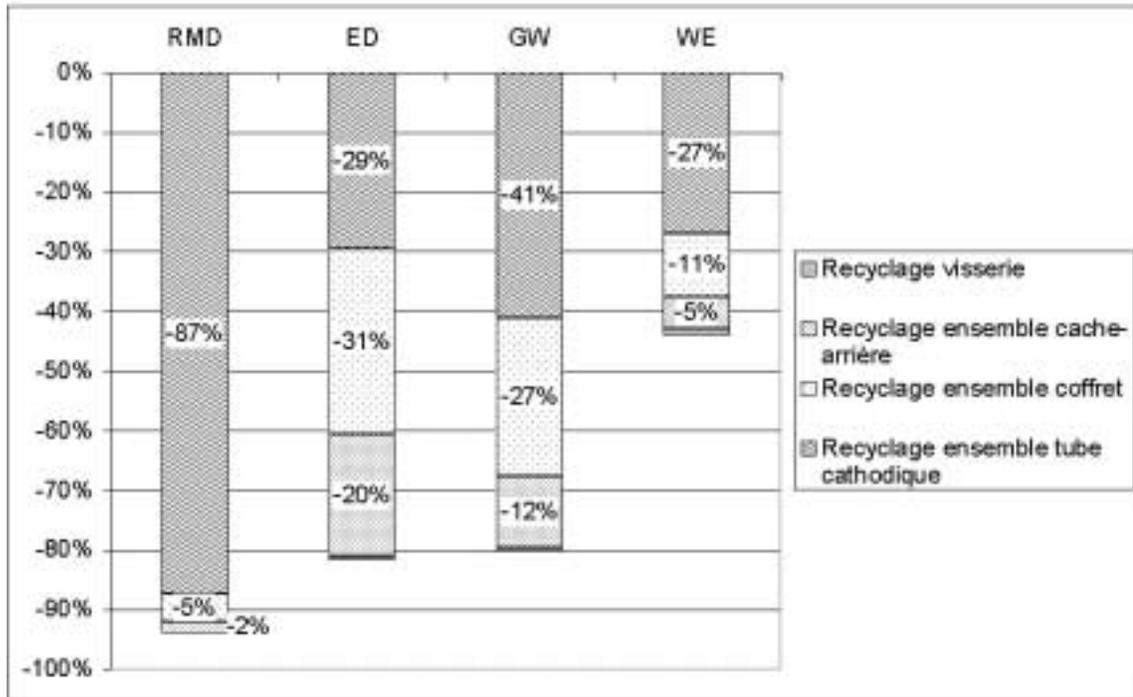


Figure A.31. Contributions négatives à la recyclabilité environnementale du téléviseur de quelques procédés problématiques du scénario 3.

↪ **Hiérarchisation des procédés problématiques pour les trois scénarii de valorisation**

Table A.19. Hiérarchisation des procédés problématiques de la valorisation du téléviseur selon les trois scénarii de valorisation.

Indicateurs de recyclabilité		Classement des procédés problématiques		
		Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
IMR		<ol style="list-style-type: none"> 1. Elimination du cache-arrière 2. Elimination du coffret 3. Recyclage de la carte 4. Recyclage du déviateur 5. Recyclage du tube 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tri des plastiques du coffret 2. Recyclage de la carte 3. Recyclage du déviateur 4. Recyclage du tube 5. Tri du plastique du cache-arrière 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Recyclage de la carte 2. Recyclage du déviateur 3. Recyclage du tube 4. Recyclage de l'ensemble coffret
IER	Négatives	<ol style="list-style-type: none"> 1. Recyclage du tube 2. Démontage du tube 3. Elimination des déchets 4. Démontage carte 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Recyclage du tube 2. Démontage du tube 3. Elimination des déchets 4. Démontage de la carte 5. Tri du plastique 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tri du plastique 2. Recyclage du tube 3. Démontage du tube 4. Démontage et préparation du coffret et des chassis-holders 5. Démontage carte 6. Démontage cache-arrière
	Positives	<ol style="list-style-type: none"> 1. Revente du déviateur 2. Revente du câblage 3. Revente de la carte 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Revente du déviateur 2. Revente du câblage 3. Revente de la carte 4. Revente du PP trié 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Revente du déviateur 2. Revente du câblage 3. Revente du PP trié 4. Revente de l'HIPS trié
IIER	RMD	<ol style="list-style-type: none"> 1. Recyclage du tube 2. Recyclage du déviateur 3. Recyclage de la carte 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Recyclage du tube 2. Recyclage du déviateur 3. Recyclage de la carte 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Recyclage du tube 2. Recyclage du déviateur 3. Recyclage de la carte
	ED	<ol style="list-style-type: none"> 1. Elimination du cache arrière 2. Elimination du coffret 3. Recyclage de la carte 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tri des plastiques du coffret 2. Recyclage de la carte 3. Tri des plastiques du cache-arrière 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Recyclage de la carte 2. Tri des plastiques du cache-arrière 3. Tri du plastique du coffret
	GW	<ol style="list-style-type: none"> 1. Elimination du cache arrière 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tri des plastiques du coffret 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Recyclage de la carte

		<ul style="list-style-type: none"> 2. Elimination du coffret 3. Recyclage de la carte 	<ul style="list-style-type: none"> 2. Recyclage de la carte 3. Tri des plastiques du cache-arrière 	<ul style="list-style-type: none"> 2. Tri des plastiques du cache-arrière 3. Tri du plastique du coffret
	WE	<ul style="list-style-type: none"> 1. Recyclage de la carte 2. Elimination du coffret 3. Démontage du tube 	<ul style="list-style-type: none"> 1. Recyclage de la carte 2. Démontage du tube 3. Tri des plastiques du coffret 	<ul style="list-style-type: none"> 1. Recyclage de la carte 2. Démontage du tube 3. Tri des plastiques du coffret

↪ **Impact de la re-conception sur la recyclabilité selon tous les scénarii de valorisation**

Remarque : les bénéfices environnementaux réalisés sont comparés aux bénéfices environnementaux qui seraient réalisés pour un scénario de recyclage total de tous les matériaux présents, égaux à 100% de bénéfices.

Table A.20. Valeurs des indicateurs de recyclabilité du téléviseur original et du téléviseur re-conçus pour trois scénarii de valorisation.

Scénarii	Conception	Indicateurs de recyclabilité					
		IMR (% masse du produit)	IER (€/produit)	IIER			
				RMD (% du gain environneme ntal optimal)	ED (% du gain environnement al optimal)	GW (% du gain environnement al optimal)	WE (% du gain environnement al optimal)
Scénario 1	Conception originale	67%	2.20	-94%	-43%	-57%	-40%
	Re- conception	67%	2.20	-94%	-44%	-59%	-40%
	Variation (%)	0%	0%	0%	-2%	-3%	0%
Scénario 2	Conception originale	75%	2.23	-94%	-59%	-66%	-42%
	Re- conception	80%	2.06	-94%	-72%	-75%	-43%
	Variation (%)	+6.5%	-7.6%	0%	-22%	-13%	-2%
Scénario 3	Conception originale	84%	3.55	-94%	-78%	-78%	-44%
	Re- conception	84%	3.59	-94%	-82%	-80%	-44%
	Variation (%)	0%	+1.1%	0%	-5%	-4%	0%

ANNEXE XIV. Hypothèses et calculs de la recyclabilité de pièces plastiques extraites d'un téléviseur

↳ Présentation des deux scénarii de valorisation des pièces plastiques d'un téléviseur

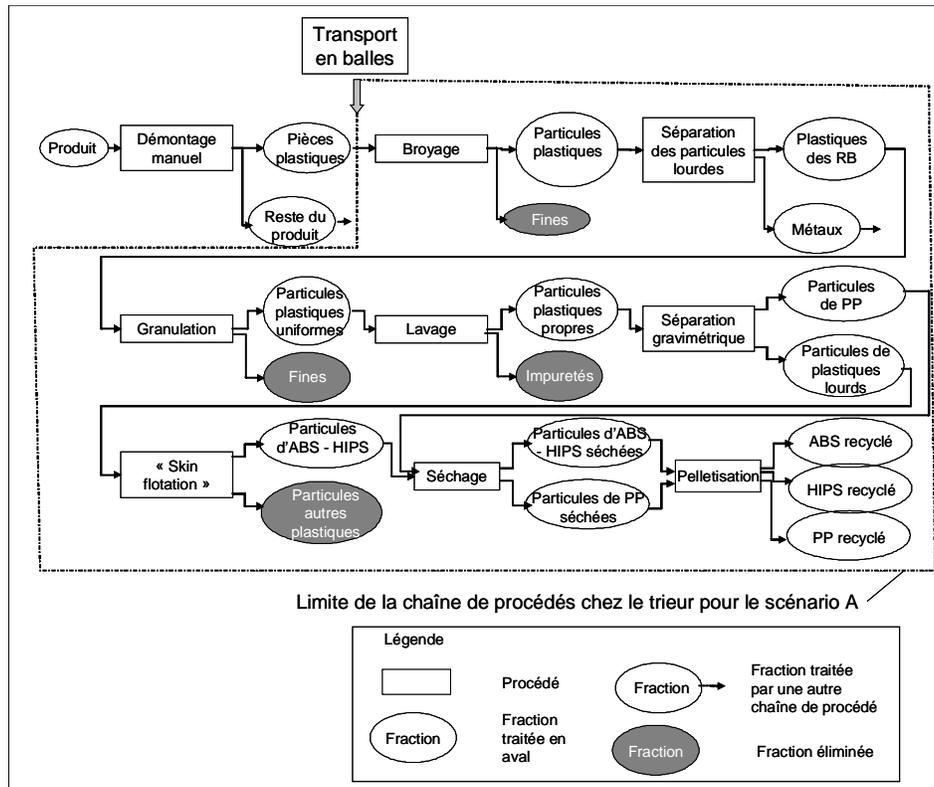


Figure A.32. Schématisation de la chaîne de procédés mise en œuvre dans le scénario A de valorisation des pièces plastiques

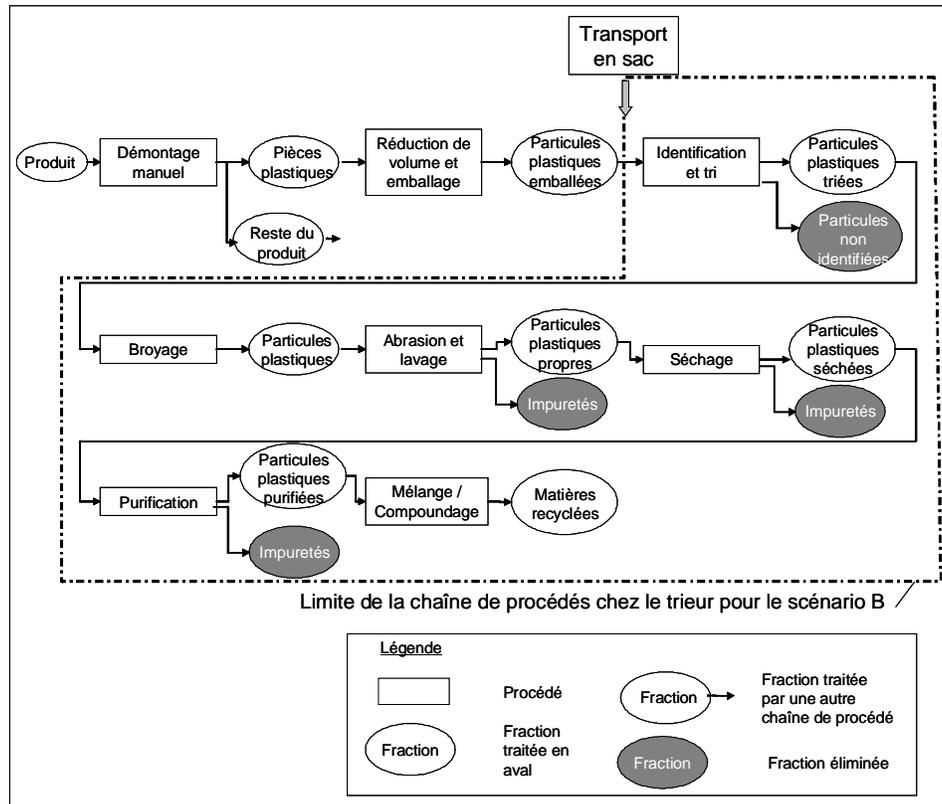


Figure A.33. Schématisation de la chaîne de procédés mise en œuvre dans le scénario B de valorisation des pièces plastiques

↳ Etape de logistique considérées pour les deux scénarii

A terme, si les scénarii de valorisation se déploient sur le territoire, leur distribution géographique devrait être différente : la chaîne de procédés du scénario A devrait traiter un gisement mélangé de PEEFV et devrait traiter des produits collectés au niveau régional ; la chaîne de procédés du scénario B devrait traiter un gisement spécifique de PEEFV et devrait traiter des produits collectés au niveau national. Les kilométrages séparant le démonteur du trieur considérés pour chacune des scénarii sont précisés dans la Table A.21.

Table A.21. Kilométrage séparant démonteur de produit et trieur de matériaux pour les scénarii A et B

Filière	Scénario A	Scénario B
Kilométrage considéré (km)	200	550

Les kilométrages séparant producteur et consommateur du matériau recyclé sont considérés égaux pour les deux scénarii et ne sont donc pas envisagés dans l'évaluation des IIER.

Table A.22. Taux de récupération de plusieurs matériaux plastiques pour plusieurs procédés de tri.

Matériau plastique	Tri par « froth flottation » (Scénario A)	Tri par identification Raman (Scénario B)
PP	80%	0%
HIPS	83%	99%
ABS	78%	99%
Source	(WEI 2002)	Interview de T. Imai

Table A.23. Taux de récupération de plusieurs matériaux plastiques pour plusieurs les scénarii A et B.

Matériau plastique	Scénario A	Scénario B
PP	71%	0 %
HIPS	74%	86%
ABS	69%	86%
Source	(WEI 2002)	Interview de T. Imai



Hypothèses considérées lors du calcul des IER des deux scénarii

Les échanges avec les acteurs de la valorisation ont permis d'évaluer les coûts d'investissement, les coûts de mise en œuvre des procédés et les bénéfices de la revente des matériaux recyclés générés. Conformément à l'équation 2.11 du Chapitre 2, il a ensuite été possible de calculer les IER pour les deux scénarii considérés. Deux hypothèses supplémentaires sont considérées :

- Le scénario A, qui traite un gisement mélangé de PEEFV, a un prix de reprise des pièces plastiques fixé, et évalué à 0.1 €/kg : l'acteur se fait payer pour reprendre les pièces ;
- Le scénario B, qui traite un gisement spécifique de PEEFV, a lui aussi un prix de reprise fixé pour un démonteur ; cependant, il est envisagé que ce prix de reprise soit fonction de la qualité du gisement fourni par le démonteur.

Les coûts de reprise des pièces pour quelques matériaux et pour les deux scénarii sont répertoriés dans la Table A24 suivante :

Table A.24. Prix de reprise de pièces plastiques dans les deux scénarii de valorisation.

Matériau plastique	Prix de reprise des pièces plastiques (en €/kg entrant dans le scénario)	
	Scénario A	Scénario B
PP	-0.1	-0.65
HIPS		0.25
HIPS-FR		0.68
HIPS-PPE-FR (sans chlore)		1.96
ABS		0.7
ABS-FR		1.5
Source	Interview de R. Kobler	Interview de T. Imai

Remarque : dans la Table A.24, une valeur négative correspond à un coût pour le démonteur tandis qu'une valeur positive correspond à un bénéfice économique.

Table A.25. Cours économiques des matières plastiques vierges considérées dans le calcul des IER.

Matériau plastique	PP	HIPS	HIPS-FR	HIPS-PPE-FR (sans chlore)	ABS	ABS-FR
Valeur (€/kg)	0.9	1	1.5	3	1.5	2.5



Hiérarchisation des procédés problématiques

Table A.26. Hiérarchisation des procédés problématiques de la valorisation des pièces plastiques du téléviseur selon les scénari A et B.

Indicateurs de recyclabilité		Classement des procédés problématiques	
		Scénario A	Scénario B
IMR		<ol style="list-style-type: none"> 1. Tri des plastiques du cache-arrière (pertes) 2. Tri des plastiques du coffret (pertes) 3. Tri des plastiques des châssis-holders (pertes) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tri du cache-arrière (matériau non trié) 2. Tri du coffret (pertes) 3. Tri des châssis-holders (pertes)
IER	Négatives	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tri + recyclage des plastiques du cache-arrière 2. Tri + recyclage du coffret 3. Démontage du cache-arrière 4. Logistique du cache-arrière 5. Logistique du coffret 6. Tri + recyclage des châssis-holders 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tri des plastiques du cache-arrière 2. Démontage du coffret 3. Logistique du cache-arrière 4. Démontage des châssis-holders 5. Démontage du cache-arrière
	Positives	-	<ol style="list-style-type: none"> 1. Revente des plastiques du coffret 2. Revente des plastiques des châssis-holders
IIER (ED)	Négatives	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tri + recyclage de cache-arrière 2. Tri + recyclage du coffret 3. Tri + recyclage des châssis-holders 4. Logistique du cache-arrière, du coffret, des châssis-holders 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tri + recyclage du cache-arrière 2. Tri + recyclage du coffret 3. Tri + recyclage des châssis-holders 4. Logistique du cache-arrière, du coffret, des châssis-holders
	Positives	<ol style="list-style-type: none"> 1. Revente des plastiques du cache-arrière 2. Revente des plastiques du coffret 3. Revente des plastiques des châssis-holders 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Revente des plastiques du cache-arrière (=0) 2. Revente des plastiques du coffret 3. Revente des plastiques des châssis-holders
IIER (WE)	Négatives	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tri + recyclage du cache-arrière 2. Tri + recyclage du coffret 3. Logistique du cache-arrière 4. Tri + recyclage des châssis-holders 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tri + recyclage du cache-arrière 2. Logistique du cache-arrière 3. Tri + recyclage du coffret 4. Logistique du coffret
	Positives	<ol style="list-style-type: none"> 1. Revente des plastiques du cache-arrière 2. Revente des plastiques du coffret 3. Revente des plastiques des châssis-holders 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Revente des plastiques du cache-arrière (=0) 2. Revente des plastiques du coffret 3. Revente des plastiques des châssis-holders

Table A.27. Table de correspondance entre contributions des scénarii A et B et « points faibles de conception » des pièces plastiques.

Procédés	Conditions d'entrée	Transformation	IRM contribution négative	IER		IIER	
				Contribution négative	Contribution positive	Contribution négative	Contribution positive
Tri par « froth flotation » du scénario A	Particules plastiques broyées	Production de 4 fractions de particules : 1 fraction concentré en PP ; 1 fraction en ABS ; 1 fraction en HIPS ; 1 fraction de déchets	<ul style="list-style-type: none"> • Pertes de 10% du PP • Perte de 17% de l'HIPS • Perte de 22% de l'ABS 	(Masse) X (Coût du traitement)	-	(Masse) X (Impacts du procédé)	-
Revente des plastiques recyclés du scénario B	Matériau recyclé (ABS ou HIPS, avec ou sans additif) présentant des propriétés mécaniques équivalentes à celles de la matière vierge	Matériau revendu et utilisé dans une nouvelle application	- (car $K_{marché}=1$)	-	(Masse de matériau recyclé) X (Cours économique des matériaux)	-	(Masse recyclée) X (Contenu environnemental du matériau vierge) ($K_S=1$) et ($K_{marché}=1$)

ANNEXE XV. Proposition d'écriture vectorielle / matricielle des modèles produit et valorisation – Approche appliquée à une étape de tri de matériaux

Nous proposons ici des formats compatibles d'écriture des modèles « produit » et « valorisation ». Le format commun proposé doit permettre de combiner les modèles afin de définir les transformations subies par le produit au cours de sa valorisation. Le format proposé est de type vectoriel pour le produit et de type matriciel pour le procédé. Ce choix est effectué pour les raisons suivantes :

- C'est un mode simple et structuré de stockage de données ;
- Le calcul matriciel permet le suivi des transformations des éléments au cours de la valorisation ;
- Le format constitue un préalable à la transposition du calcul des indicateurs sous forme informatique.

Cette écriture a de plus été pensée afin d'être compatible avec la structure du modèle produit proposée au Chapitre 2.

Nous nous intéressons à un procédé de tri appliqué à un mélange de particules contenant plusieurs matériaux. Un mélange de particules est un « élément intermédiaire » obtenu à partir du broyage de plusieurs pièces plastiques.

Un format d'écriture est d'abord proposé pour un tri générique de matériaux ; il est ensuite appliqué à tri par « froth-flotation » de particules plastiques.

↳ **Écriture générique du tri d'un mélange de matériaux**

Soit un mélange de particules contenant n matériaux, présenté sous forme d'un vecteur (nx1), dont les composantes représentent les masses des matériaux présents, comme représenté dans la Table A.28.

Table A.28. Proposition d'écriture vectorielle d'un élément intermédiaire « mélange de particules ».

$$(\text{Mélange_de_matériaux}) = \begin{pmatrix} \text{Masse_matériau}_1 \\ \dots \\ \text{Masse_matériau}_i \\ \dots \\ \text{Masse_matériau}_n \end{pmatrix}$$

A ce mélange de matériaux, est appliqué un tri qui consiste en la création de N+1 fractions, dont une est destinée à l'élimination.

L'entrant principal de type « mélange » est transformé en sortant principal de type « mélange ». L'entrant principal étant modélisé par une matrice colonne (nx1), la matrice de

transformation du tri peut être modélisée à l'aide de N+1 matrices $Transfo_j$ ($1 < j \leq N+1$) diagonales de dimensions (nxn) dont les composantes sont de valeur $TR_{i,j}$, taux de récupération du matériau i dans le sortant principal j, comme représenté dans la Table A.29.

Table A.29. Proposition d'écriture de la matrice de transformation d'un procédé de tri de mélange de matériaux.

$$Transfo_j = \begin{bmatrix} TR_{1,j} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & TR_{i,j} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & TR_{n,j} \end{bmatrix}$$

Les sortants principaux du tri sont des mélanges de matériaux. Ils s'écrivent sous forme de N+1 vecteurs de dimension (nx1), tel que présenté dans la Table A.30 :

Table A.30. Proposition d'écriture vectorielle des sortants principaux d'un tri de matériaux.

$$(Mélange_de_matériaux)_j = \begin{pmatrix} Masse_matériau_1 \times TR_{1,j} \\ \dots \\ Masse_matériau_i \times TR_{i,j} \\ \dots \\ Masse_matériau_n \times TR_{n,j} \end{pmatrix}$$

↳ Application au tri par « froth-flotation » d'un mélange de particules plastiques

Soit l'entrant principal *Mélange_plastiques* qui est un mélange de 10 kg de particules plastiques, contenant 35% d'HIPS, 30% d'ABS, 25% de PP et 10% d'autres matériaux. Son écriture vectorielle est présentée dans la Table A.31.

Table A.31. Proposition d'écriture vectorielle d'un mélange de particules plastiques.

$$(Mélange_plastiques) = \begin{pmatrix} m_{HIPS} = 3.5 \\ m_{ABS} = 3 \\ m_{PP} = 2.5 \\ m_{Autres} = 1 \end{pmatrix}$$

Le mélange de plastiques subit un tri par « froth-flotation » présentant les performances de tri décrites par J. Wei dans (WEI 2002), dont les caractéristiques sont rappelées dans l'Annexe 14. Les quatre matrices de transformations de ce mélange de matériaux sont représentées dans la Table A.32(a),(b),(c) et (d).

Table A.32. Proposition d'écriture de la matrice de transformation du tri par « froth-flotation » du mélange de plastiques vers (a) la fraction HIPS triée, (b) la fraction ABS triée, (c) la fraction PP triée, (d) la fraction déchets.

(a)	(b)
$Transfo_{HIPS} = \begin{bmatrix} 0.83 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & TR_{ABS,HIPS} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & TR_{PP,HIPS} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & TR_{Autres,HIPS} \end{bmatrix}$	$Transfo_{ABS} = \begin{bmatrix} TR_{HIPS,ABS} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.78 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & TR_{PP,ABS} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & TR_{Autres,ABS} \end{bmatrix}$
(c)	(d)
$Transfo_{PP} = \begin{bmatrix} TR_{HIPS,PP} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & TR_{ABS,PP} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.90 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & TR_{Autres,PP} \end{bmatrix}$	$Transfo_{Déchets} = \begin{bmatrix} TR_{HIPS,Déchets} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & TR_{ABS,Déchets} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & TR_{PP,Déchets} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & TR_{Autres,Déchets} \end{bmatrix}$

Remarque : pour le procédé de « froth-flotation », seules sont connues les valeurs des $TR_{i,i}$ et elles sont répertoriées dans les matrices de la Table A.32 ; les valeurs de $TR_{i,j}$ conservent leur écriture générique.

Les sortants principaux obtenus à la suite du tri sont au nombre de quatre. Leur écriture vectorielle est proposée dans la Table A.33(a), (b), (c) et (d).

Table A.33. Proposition d'écriture vectorielle des sortants principaux du tri par « froth-flotation » (a) fraction HIPS triée, (b) fraction ABS triée, (c) fraction PP triée, (d) fraction déchets.

(a)	(b)
$(HIPS_{trié}) = \begin{pmatrix} m_{HIPS} \times 0.83 \\ m_{ABS} \times TR_{ABS,HIPS} \\ m_{PP} \times TR_{PP,HIPS} \\ m_{Autres} \times TR_{Autres,HIPS} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.9 \\ m_{ABS} \\ m_{PP} \\ m_{Autres} \end{pmatrix}$	$(ABS_{trié}) = \begin{pmatrix} m_{HIPS} \times TR_{HIPS,ABS} \\ m_{ABS} \times 0.78 \\ m_{PP} \times TR_{PP,ABS} \\ m_{Autres} \times TR_{Autres,ABS} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{HIPS} \\ 2.34 \\ m_{PP} \\ m_{Autres} \end{pmatrix}$
avec $\frac{2.9}{2.9 + m_{ABS} + m_{PP} + m_{Autres}} = 0.98$	avec $\frac{2.34}{m_{HIPS} + 2.34 + m_{PP} + m_{Autres}} = 0.98$
(c)	(d)
$(PP_{trié}) = \begin{pmatrix} m_{HIPS} \times TR_{HIPS,PP} \\ m_{ABS} \times TR_{ABS,PP} \\ m_{PP} \times 0.9 \\ m_{Autres} \times TR_{Autres,PP} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{HIPS} \\ m_{ABS} \\ 2.25 \\ m_{Autres} \end{pmatrix}$	$(Déchets) = (Mélange_plastiques) - (HIPS_{trié}) - (ABS_{trié}) - (PP_{trié})$
avec $\frac{2.25}{m_{HIPS} + m_{ABS} + 2.25 + m_{Autres}} = 0.98$	

CONTRIBUTION À L'INTÉGRATION DE LA VALORISATION EN FIN DE VIE DÈS LA CONCEPTION D'UN PRODUIT

Une méthode basée sur l'évaluation multicritères de la recyclabilité du produit et sur l'identification de ses points faibles de conception

RESUME : De plus en plus, les producteurs de matériels se doivent d'améliorer la recyclabilité de leurs produits dès la conception. L'intégration de la valorisation en fin de vie en conception de produit n'est aujourd'hui pas aisée puisque les concepteurs ont une perception partielle des réalités de la valorisation ; elle est encore rendue plus difficile par le fait que le système de valorisation des produits en fin de vie est encore en structuration et que ses performances, notamment technologiques et économiques, ne sont pas pleinement établies.

Nos recherches ont permis de définir une méthode originale permettant d'identifier les points faibles de recyclabilité d'un produit dès sa conception, en vue de l'amélioration de ses performances, et ce dans le contexte de non maîtrise des filières de valorisation. Notre proposition consiste en la définition et la construction d'indicateurs multicritères de recyclabilité permettant de juger l'adéquation du produit avec le système de valorisation appliqué. Pour ce faire, nous proposons une modélisation du système à partir de la combinaison des modélisations de procédés élémentaires tel que le démontage, le broyage, le tri ou encore le recyclage. L'évaluation de recyclabilité est réalisée pour différents scénarii de valorisation, y compris des scénarii prospectifs, devant être disponibles lors du traitement du produit. Une méthode d'identification des points faibles du produit à partir de l'évaluation de sa recyclabilité est enfin proposée : elle permet la formulation de règles d'amélioration de conception.

L'application de la proposition méthodologique à des produits du secteur électr(on)ique simule l'utilisation de la méthode en entreprise. Les études de cas conduisent à la formulation de règles concrètes d'amélioration de conception, dont l'applicabilité est discutée. Elles permettent de montrer la richesse des caractéristiques de la méthode et l'intérêt d'adopter une démarche prospective. Enfin, des recommandations pour une intégration optimisée de la méthode en entreprise sont formulées.

Mots clés : recyclabilité de produit ; éco-conception ; complexité et variabilité des filières ; scénario ; électrique / électronique.

ABSTRACT : There is more and more incentive for manufacturers to improve the recyclability of their products at the design stage. Taking into account the end-of-life recovery aspects during the design of a product is not easy as the design team has got a partial understanding of the reality of the recovery activity; moreover, the dynamic aspects of end-of-life products' recovery systems which are still under construction and which technical and economical performances are not fully established, turn it even more difficult.

During our researches, we built an original method that leads to the identification of recyclability weak points during the design stage, in order to find some improvement opportunities, taking into account the dynamic context of recovery routes. The method is based on the calculation of multi-criteria recyclability indicators that give a quantitative evaluation of the appropriateness of the product with the recovery system. An original modelling of the recovery processes, e.g. dismantling, shredding, sorting, recycling, and of the recovery system is proposed. The recyclability assessment is calculated for several recovery scenarios, including prospective scenarios that should be available at the time of the product's end-of-life. A procedure that leads to the identification of design weak points is finally proposed: the design team is then able to formulate some specific design guidelines.

The method is applied to some electr(on)ic equipments. The study of case studies leads to the formulation of concrete design guidelines, whose applicability is discussed. The richness of the method and the advantage to consider prospective scenarios is also demonstrated. Some recommendations on how integrating the method in the companies' practices are finally formulated.

Key words: product recyclability ; ecodesign ; recovery routes complexity and variability ; scenario ; electric and electronic.

