

VERS UNE CONCEPTION DE PRODUITS PLUS CONSCIENTE DES CONTRAINTES DE LA VALORISATION EN FIN DE VIE

UTILISATION D'INDICATEURS DE RECYCLABILITÉ EN COURS DE CONCEPTION

Fabrice Mathieux*, Daniel Froelich*, Pierre Moszkowicz**

* *MAPIE - Ensam de Chambéry*

** *Laepsi - Insa de Lyon*

La valorisation des produits en fin de vie devient de plus en plus capitale pour les producteurs de produits complexes. Cependant, l'intégration des aspects relatifs à la valorisation dans le processus de conception des produits n'est aujourd'hui pas aisée et les méthodes et outils destinés à cet usage s'avèrent encore insatisfaisants. Une nouvelle méthode est ici présentée et mise en œuvre. Son utilisation permet aux concepteurs de produit d'appréhender et de maîtriser la complexité et la variabilité des filières de valorisation et de réaliser des choix de conception. La méthode comporte une modélisation originale des filières de valorisation, une évaluation multicritère et multiscénarii de la recyclabilité et une procédure menant à l'élaboration de règles de conception. La méthode est appliquée à un produit électronique. Cette mise en œuvre permet de souligner l'originalité et la richesse de la méthode. Son efficacité est mise en évidence grâce à l'élaboration de règles d'amélioration de conception efficaces et pertinentes.

The recovery of end-of-life products is today becoming an important issue for manufacturers of complex products. However, recovery aspects are not currently fully integrated at the products' design stage as tools and methods are still unsatisfactory. In this paper, a new method of recovery conscious design is presented and applied. Its use allows product designers to understand and control the complexity and variability of recovery routes and to make design choices. The method includes an original modelling of recovery routes, a multicriteria and multiscenarii recyclability assessment and a procedure that leads to design guidelines. The method is applied to an existing electronic product. This validation underlines the originality and the benefits of the method. It is also showed that the obtained guidelines are efficient and relevant.

INTRODUCTION

Dans l'optique de la réduction de la quantité de déchets mis en décharge et des impacts sur la santé humaine et l'environnement qui en résultent, l'Union européenne (UE) a établi une liste de déchets prioritaires. Parmi ces déchets, on compte un certain nombre de produits complexes, comme les véhicules hors d'usage ou les équipements électriques et électroniques en fin de vie. En 1998, la quantité d'équipements électr(on)iques arrivant annuellement en fin de vie dans l'Europe des 15 était estimée à 6 millions de tonnes. Elle représentait ainsi 4 % des déchets générés par les municipalités. Il est estimé que leur quantité augmente de 3 à 5 % par an. En 1998, 90 % des équipements électr(on)iques en fin de vie ne recevaient pas de traitement préalable à l'élimination en centre d'enfouissement technique ou en incinérateur [1].

L'activité de valorisation des produits en fin de vie est aujourd'hui émergente et elle pourrait présenter à terme de larges implications positives dans les sphères environnementale, économique et sociale, avec notamment la réduction des pollutions, l'économie des ressources et la structuration d'un domaine industriel dynamique et fortement créateur d'emplois.

Dans un tel contexte, les producteurs doivent aujourd'hui orienter la conception de leurs produits pour que ceux-ci soient adaptés au mieux aux filières de valorisation vers lesquelles ils seront envoyés à la fin de leur vie. Cependant, les outils et méthodes permettant aux équipes d'identifier des opportunités d'amélioration de la conception des produits manquent encore.

Face à ce constat, les recherches présentées ici et développées dans le cadre d'une thèse doctorale, mènent à

la construction d'une méthode originale permettant de traduire la potentialité de la valorisation de produit aux équipes de conception et ainsi de faciliter leurs choix en cours du processus de conception. Notre étude porte essentiellement sur les produits électriques et électroniques en fin de vie (PEEFV).

Dans la première partie de cette publication, le contexte de la recherche est exposé. La deuxième partie est une présentation détaillée de la méthode, des protocoles expérimentaux et des hypothèses. Dans la troisième partie, les résultats des évaluations sont présentés et discutés pour deux études de cas. La quatrième partie synthétise les éléments faisant encore défaut à la méthode et qui devraient à terme permettre son déploiement. Sont enfin exposées les conclusions des travaux.

CONTEXTE DE L'AMÉLIORATION DE LA CONCEPTION DES PRODUITS

Une pression de plus en plus importante sur les producteurs

Avec l'adoption en janvier 2003 de la directive européenne [2], les producteurs d'équipements électriques et électroniques sont désormais identifiés comme responsables de la valorisation en fin de vie de leurs propres équipements. A partir du 13 août 2005, les producteurs assumeront le financement du regroupement, du traitement, de la valorisation et de l'élimination non polluante des PEEFV. Ils sont désormais responsables de la mise en place de systèmes de traitement qui utilisent les meilleures techniques disponibles. Ils doivent également faire en sorte que les produits atteignent des taux de valorisation massique fixés. Ces taux massiques de valorisation sont par exemple de [2]:

- 80 % (dont 75 % de réutilisation et recyclage) pour les gros appareils ménagers (par exemple réfrigérateur, lave-vaisselle),
- 75 % (dont 65 % de réutilisation et recyclage) pour les équipements informatiques et de télécommunication (par exemple ordinateur, imprimante, télécopieur) et les matériels grand public (par exemple téléviseur, magnétoscope),
- 70 % (dont 50 % de réutilisation et recyclage) pour les petits appareils ménagers (par exemple fer à repasser) et les outils (par exemple équipement de fraisage et tournage, tondeuse à gazon).

Dans le même temps, les clients des producteurs, industriels ou consommateurs, se préoccupent de plus en plus du devenir des produits en fin de vie.

Pour favoriser l'amélioration de la valorisation des produits en fin de vie, deux stratégies complémentaires sont traditionnellement identifiées [3]: des actions curatives visant l'amélioration des performances des filières de valorisation ; des actions préventives visant une amé-

lioration de la recyclabilité des produits. La deuxième stratégie, appelée dans la suite éco-conception orientée valorisation (ECOV), concerne les ingénieurs chargés du développement des produits. Elle est l'objet de la présente publication.

Une activité de valorisation non maîtrisée et fortement évolutive

Alors que la valorisation des PEEFV est souvent perçue comme la mise en œuvre du seul démontage manuel, nos observations du terrain ont montré que l'activité est en réalité constituée d'une combinaison de nombreux procédés en étroites interrelations, tels que par exemple le démontage, le broyage, le tri ou encore le recyclage : à ce titre, l'activité doit être envisagée dans un cadre systémique [4]. L'activité de valorisation des PEEFV présente de plus un caractère dynamique. Quantitativement, elle est en effet marquée par une grande augmentation du gisement. Qualitativement, l'activité est stimulée par d'importantes innovations technologiques : par exemple, les technologies de tri telles que le tri par identification spectroscopique [5], le tri par flottation [6], ou encore le tri triboélectrique [7] sont autant de procédés en cours de développement qui devraient permettre à l'avenir de détourner les matières plastiques des centres d'enfouissement technique. Ainsi, lorsque les produits atteindront leurs fins de vie, dans une dizaine d'années, le système de valorisation devrait peu ressembler à ce qu'il est aujourd'hui.

Des outils insuffisants pour la conception

Comme toute méthodologie d'éco-conception, l'ECOV a besoin non seulement d'outils d'évaluation des performances de recyclabilité selon des critères pertinents, mais également d'outils d'amélioration de conception intégrables au processus de conception de produit [8]. La complexité et le caractère dynamique des filières de valorisation doivent de plus être soigneusement pris en compte.

Une revue bibliographique approfondie des principales méthodes d'ECOV recensées est présentée dans [4]. Celle-ci est résumée dans les quatre premières colonnes du tableau I (page suivante) où plusieurs méthodes récentes d'ECOV sont analysées qualitativement selon les quatre axes suivants : l'aptitude à être bénéfique en cours de processus de conception du produit ; les critères d'évaluation de recyclabilité ; les caractéristiques des filières considérées ; la prise en compte des variabilités des filières.

De par leurs constructions, aucune des méthodes d'ECOV identifiées ne semble donc entièrement performante selon les critères retenus pour notre analyse, mettant ainsi en évidence des vides méthodologiques devant être comblés.

Ceci nous permet d'établir la nécessité de développer

Tableau I : Analyse qualitative des performances de quelques méthodes d'ECO

Axes d'analyses		Méthodes existantes				ReSICLED
		euroMat ¹	Atroid	AVF	QWERTY	
Conception	Intégration dans le processus de conception	✓ ¹	✓ ² (évaluation seule)	✓	(✓) (évaluation seule)	✓
	Massique	0 ³	0	✓	(✓)	✓
Critères de recyclabilité	Economique	✓	✓	✓	✓	✓
	Environnemental	(✓)	0	0	✓	✓
Système de valorisation considéré		Filières agrégées	Démontage puis filières agrégées	Démontage puis filières agrégées	Filières désagrégées	Filières désagrégées
Intégration de la variabilité des filières		(✓)	0	✓	(✓)	✓
Référence		[9]	[10]	[3, 11]	[12]	[4]

1. Entièrement intégré - 2. Partiellement intégré - 3. Non intégré

une méthode originale rendant possible :

- une évaluation de recyclabilité qui oriente l'amélioration de la conception du produit et qui est utile en cours de processus de conception,
- une évaluation multicritère de la recyclabilité,
- une prise en considération des performances des nombreux procédés de valorisation disponibles et de leurs évolutions dans le temps.

MÉTHODOLOGIE

Exposé succinct de la méthode

Présentation globale de la méthode

La méthode proposée dans nos travaux de recherche [4] se nomme ReSICLED, pour Recovery systems modelling & Indicators calculation leading to end-of-life conscious design. La méthode se construit comme suit :

- l'aptitude à la valorisation en fin de vie d'une option de conception existante est évaluée selon plusieurs scénarii de valorisation et selon plusieurs critères de recyclabilité,
- l'analyse des résultats de l'évaluation conduit l'équipe en charge du développement du produit à élaborer une liste de voies d'amélioration de sa conception.

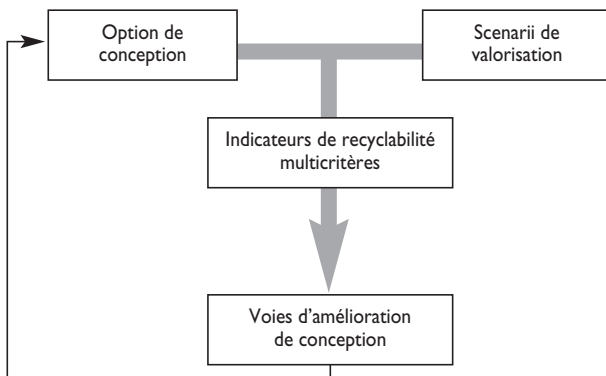


Figure I : Synoptique de la méthode ReSICLED.

Le synoptique de la méthode est présenté sur la figure 1.

Modélisation des scénarii de valorisation

Un scénario de valorisation est modélisé comme une combinaison cohérente de procédés de valorisation élémentaires, et mène à la transformation d'un produit en matériau / énergie secondaire et en déchets résiduels. Cette modélisation est appelée « multi procédés ». Les procédés de valorisation, comme par exemple le démontage, le broyage, le tri ou encore le recyclage, transforment des entrants principaux en sortants principaux issus du produit, et consomment des entrants secondaires et rejettent des sortants secondaires, propres aux procédés. Les procédés présentent également des conditions d'entrée qui leur sont propres. Ces aspects de la modélisation ainsi que les notations utilisées dans la suite sont schématisés sur la figure 2 (page suivante).

Cette modélisation des procédés permet de prendre en compte les performances propres des procédés et leurs évolutions possibles. La modélisation d'un scénario permet d'intégrer le caractère systémique de l'activité de valorisation.

Nos recherches ont permis de créer des modèles pour sept types de procédés de valorisation : le démontage manuel, le broyage, le tri, le recyclage, la revente de matériau / énergie secondaire, l'incinération avec récupération d'énergie, l'élimination en centre d'enfouissement technique. Le procédé de logistique a également été modélisé.

Ces modélisations génériques permettent de lier entrants et sortants principaux et secondaires aux performances fonctionnelles, économiques et environnementales des procédés. Des données empiriques collectées auprès d'acteurs de la valorisation de PEEFV permettent de renseigner ces performances pour quelques procédés spécifiques. Les procédés sont ensuite assemblés selon des séquences observées ou pressenties sur le terrain afin de former un scénario de valorisation du produit en fin de vie.

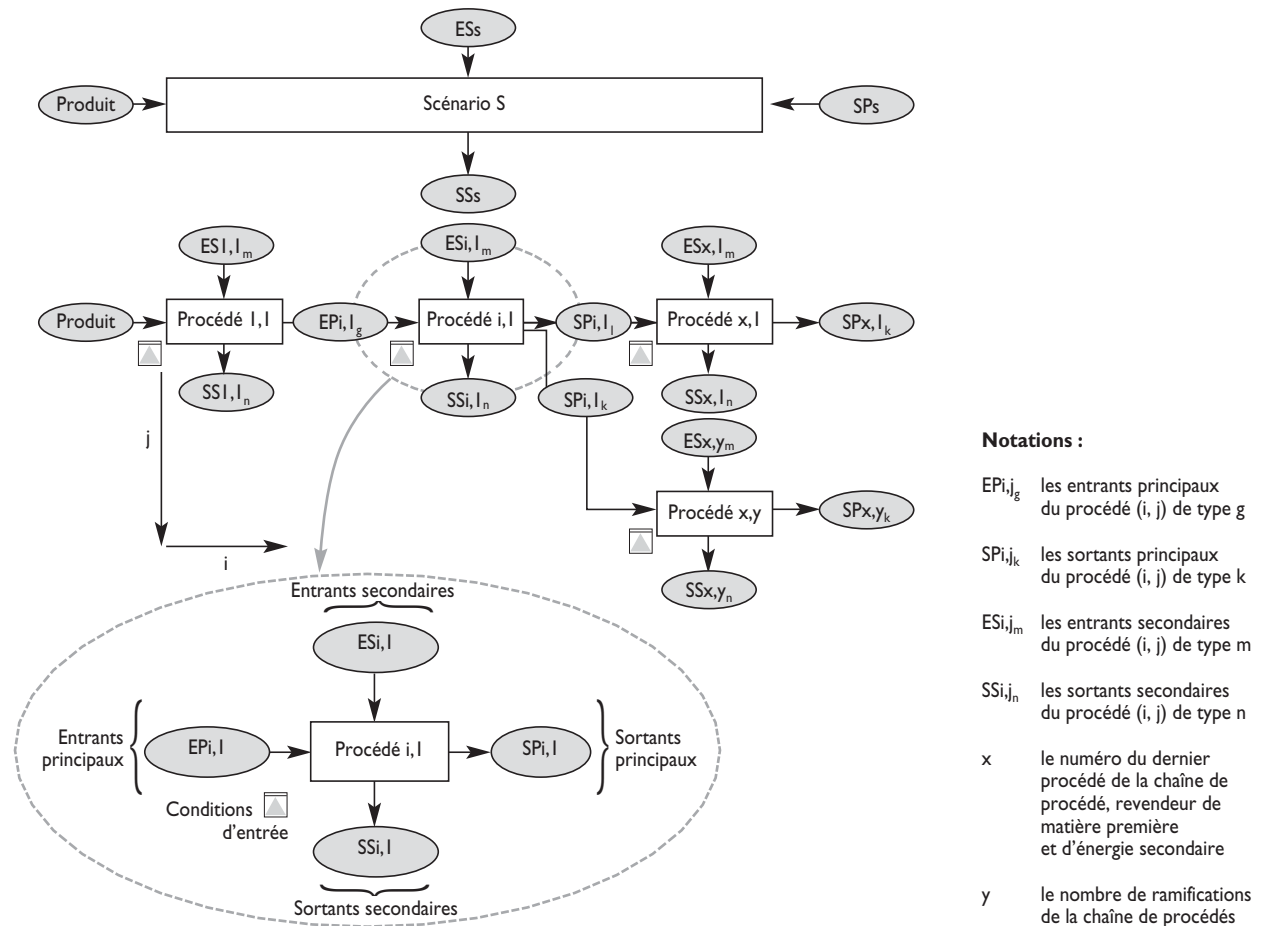


Figure 2 : Modélisation d'un scénario de valorisation de produit comme une combinaison des modélisations des procédés mis en œuvre.

Une évaluation multicritère de la recyclabilité

Pour un producteur de produits, la recyclabilité d'un produit ne correspond pas seulement à un taux massique de valorisation comme proposée par la législation [2]. Puisqu'il est responsable financier de la valorisation, la recyclabilité est également fonction du coût (ou du bénéfice) associé à la valorisation du produit. Dans un objectif plus large de limitation de l'impact environnemental du cycle de vie d'un produit (cf. par exemple le projet de Directive européenne [13]), la recyclabilité est également liée à l'impact (ou au bénéfice) environnemental associé à la valorisation. Cette multiplicité des aspects du problème nous mène donc à évaluer la recyclabilité d'un produit selon plusieurs critères distincts et les trois indicateurs suivants sont proposés :

- l'**Indicateur massique de recyclabilité**, IMR, est le pourcentage massique (%) du produit qui est valorisé ; il correspond au taux massique de valorisation énoncé dans la directive Européenne [2] ;
- l'**Indicateur économique de recyclabilité**, IER, positif ou négatif, exprimé en € par produit, ou en € par unité de masse de produit, représente le bénéfice économique (> 0) – ou le coût (< 0) – de la valorisation du produit ;

– l'**Indicateur d'impact environnemental de recyclabilité**, IIER_i, positif ou négatif, exprimé dans les unités relatives aux classes d'impacts environnementaux I, représente le bénéfice (> 0) – ou l'impact (< 0) – environnemental induit par la valorisation du produit. Les classes d'impacts environnementaux sont celles considérées dans les analyses de cycle de vie. Comme recommandé dans les textes de normalisation (cf. par exemple [14]), aucune agrégation des critères environnementaux n'est proposée dans notre méthode : les classes d'impacts sont considérées successivement. L'agrégation pourra cependant être menée par l'utilisateur de la méthode, à condition qu'elle le soit dans la transparence. L'IIER_i est normé (en %) par rapport au bénéfice environnemental maximum qui équivaut, au signe prêt, à l'impact environnemental associé à la production du produit.

Dans un premier temps, il est proposé de considérer ces trois critères de façon distincte. Les utilisateurs de la méthode conservent néanmoins la possibilité de hiérarchiser ces critères, voire de les combiner.

Selon les notations de la figure 2, les écritures mathématiques des trois indicateurs sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Ecriture mathématique des indicateurs multicritères de recyclabilité.

$$IMR = 1 - \frac{\sum_{i=1,x;j=1,y} SPi, j_{déchets}}{\text{masse_du_produit}} \quad (1)$$

$$IER = \sum_{j=1,y} SPx, j_k \times \gamma_k - \sum_{i=1,x;j=1,y} (\sum (EPi, j \times CPi, j_{déchets} + SPi, j_{déchets} \times \gamma_{déchets})) \quad (2)$$

$$IIER_l = \frac{\sum_{j=1,y} SPx, j_k \times \eta IP_k - \sum_{i=1,x;j=1,y} (\sum (ESi, j_m \times \eta IP_m + SSi, j_n \times \eta IR_n + SPi, j_{déchets} \times \eta IR_{déchets}))}{\eta IP_{\text{produit}}} \quad (3)$$

γ_k est le cours économique d'une unité de masse de matériau de type k ;

CPi, j est le coût de mise en œuvre du procédé (i,j) par unité massique d'entrant principal ;

ηIP_m est l'impact environnemental selon la classe l associé à la production d'une unité de masse de matériau de type m ;

ηIR_n est l'impact environnemental selon la classe l associé au rejet d'une unité de masse de matériau/composé de type n ;

ηIP_{produit} est l'impact environnemental selon la classe l associé à la production / fabrication du produit étudié.

Les indicateurs font donc intervenir les sommes algébriques des contributions positives et négatives des procédés à la recyclabilité de produit. En particulier :

– l'indicateur IMR est calculé à partir de la somme des déchets générés lors de la mise en œuvre de tous les procédés,

– l'indicateur IER est la différence entre les bénéfices économiques associés à la revente de matériaux / composants / énergie secondaires et les coûts de mise en œuvre des procédés,

– le numérateur de l'indicateur $IIER_l$ est la différence entre les bénéfices environnementaux associés à l'utilisation de matériaux / composants / énergie secondaires dans des cycles de vie aval de produits et les impacts associés à la mise en œuvre des procédés.

Lors de l'amélioration de la conception d'un produit, on cherchera donc à maximiser les trois indicateurs, autrement dit à :

- augmenter la part de composants/matériaux valorisés,
- augmenter le bénéfice économique (ou diminuer le coût) de la valorisation,
- augmenter le bénéfice (ou diminuer l'impact) environnemental associé à la valorisation.

Une évaluation multiscénarii de la recyclabilité

Afin d'intégrer les variabilités des filières de valorisation lors de l'évaluation de la recyclabilité de produit, les scénarii de valorisation considérés 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 prospectives, c'est-à-dire des technologies prometteuses mais pas encore largement dis-

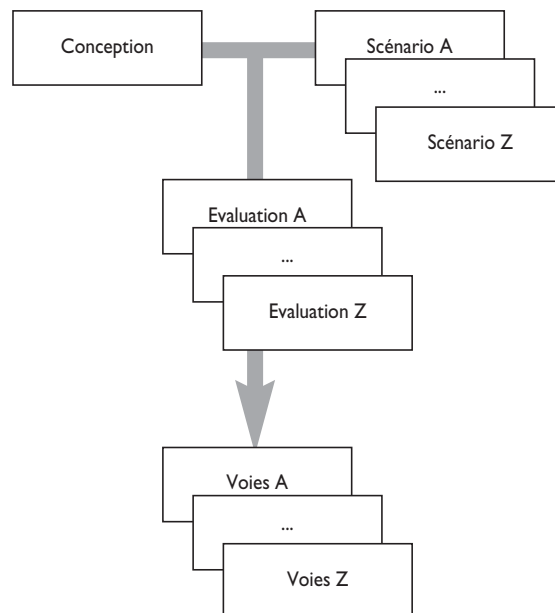


Figure 3 : Synoptique de l'élaboration de voies d'amélioration de conception en considérant successivement plusieurs scénarii de valorisation.

ponibles, sont intégrées à quelques uns de ces scénarii, qui sont alors dits prospectifs.

La gestion des scénarii est de type what-if, c'est-à-dire qu'elle permet d'établir quel taux de recyclabilité atteint le produit si un type de scénario de valorisation lui est appliqué. Ainsi, comme représenté dans la figure 3, les évaluations multicritères de recyclabilité de l'option de conception selon les scénarii numérotés de A à Z conduisent à l'élaboration des listes de voies d'amélioration numérotées de A à Z à partir de l'analyse des évaluations numérotées de A à Z.

Positionnement de ReSICLED parmi les méthodes d'ECOV

La méthode ReSICLED vise donc une évaluation multi-critère de la recyclabilité d'un produit selon plusieurs scénarii de valorisation applicables à un produit, y compris des scénarii prospectifs. Les scénarii de valorisation sont des combinaisons désagrégées de procédés élémentaires. La méthode prévoit également l'utilisation des évaluations de recyclabilité par les équipes de conception en cours de développement de produit. Les caractéristiques de la méthode ReSICLED sont résumées dans la cinquième colonne du tableau 1.

Protocoles expérimentaux

Application aux produits électr(on)iques

La proposition méthodologique a été appliquée à plusieurs équipements électr(on)iques. Ces produits sont en effet tels que :

- leur valorisation est d'une grande actualité législative et technologique,
- ils sont constitués d'un mélange de matériaux, de composants, et d'éléments polluants et leurs valorisations en fin de vie nécessitent une combinaison de procédés,
- il nous a été possible de construire des partenariats industriels fructueux.

Evaluation de la recyclabilité d'un téléviseur et recherches de voies d'amélioration de sa conception

Nous avons appliqué la méthode d'évaluation de la recyclabilité à un téléviseur démonté et analysé par nos

soins. L'analyse approfondie des résultats en étroite coopération avec l'entreprise productrice nous a permis d'identifier des voies d'amélioration possibles de la conception du produit.

Le produit analysé est un téléviseur 14" commercialisé en 2001 par la société Thomson. Il est constitué d'un tube cathodique, d'une carte électronique, d'un déviateur, d'un câble d'alimentation, de pièces en métaux ferreux, d'un coffret, d'un cache-arrière, d'un châssis-holder et d'autres pièces en matériaux plastiques. Les masses et compositions en matériaux de ces pièces sont répertoriées dans le tableau 3.

Deux batteries de scénarii de valorisation sont appliquées à tout ou partie du téléviseur :

Etude de cas n°1 : trois scénarii actuels appliqués au produit entier

Le produit entier est initialement démonté selon un mode opératoire observé chez un démonteur de PEEFV. Les fractions verre, métaux ferreux et non ferreux sont recyclées dans des filières disponibles aujourd'hui en Europe. Seul le traitement des pièces en matériaux plastiques diffère : ces pièces sont traitées par des filières aujourd'hui disponibles en quelques exemplaires en Europe (scénarii 1, 2 et 3);

Etude de cas n°2 : deux scénarii prospectifs appliqués aux pièces mécaniques en matériaux plastiques

Seules les pièces plastiques du téléviseur sont ici considérées. Les pièces coffret, cache-arrière et châssis-holder, initialement extraites du téléviseur, subissent les

Tableau 3 : Masse et composition en matériaux des principales pièces du téléviseur
Destinations de ces pièces pour les scénarii des études de cas n°1 et 2

Pièces	Masse (g)	Composition en matériaux	Etude de cas n°1			Etude de cas n°2	
			Scénario 1 (Europe)	Scénario 2 (Europe)	Scénario 3 (Europe)	Scénario 4 (Etats-Unis)	Scénario 5 (Japon)
Tube cathodique	5165	Verre au Plomb, verre au baryum, luminophores	Séparation manuelle des verres et recyclage dans un nouveau tube cathodique			NA ¹	
Carte électronique et élément cuivreux	1292	Métaux précieux, cuivre, plastique	Recyclage des métaux non-ferreux et valorisation énergétique des plastiques en fours de fonderie			NA	
Cache-arrière	806	Polypropylène (PP)	Elimination en CET ²	Broyage, tri gravimétrique et recyclage du PP	Démontage poussé, tri par spectro. IR et recyclage	Broyage, tri par « froth-flotation » et recyclage du PP, de l'ABS et de l'HIPS	Démontage poussé, tri par spectro. Raman et recyclage des styréniques
Coffret	583	Polystyrène Choc (HIPS)					
Chassis-holder	102	Polystyrène Choc + additif (HIPS-AD)					
Autres plastiques	8	Variés : HIPS, PC-ABS, ...	Elimination en CET			Elimination en CET	
Câble d'alimentation	102	Cuivre, plastique	Broyage, séparation des matériaux et recyclage du cuivre			NA	
Métaux ferreux	445	Métaux ferreux	Broyage, purification et recyclage des ferreux en aciérie			NA	
Total	8503						

1. NA : non applicable

2. CET : Centre d'enfouissement technique

scénarii 4 et 5 qui intègrent des procédés innovants de tri et de recyclage en cours de développement aux Etats-Unis et au Japon. Ces scénarii pourraient être disponibles en Europe dans 10 ans, lorsque le téléviseur atteindra sa fin de vie.

Les filières appliquées aux composants du téléviseur pour les deux études de cas sont explicitées dans le tableau 3.

Hypothèses concernant l'indicateur IIER

Les catégories d'impacts considérés lors du calcul sont celles adoptées par le logiciel d'évaluation environnementale et d'éco-conception EIME :

- « Epuisement des ressources naturelles »,
 - « 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'air »,
 - « Eutrophisation de l'eau »
- et « Quantité de déchets dangereux ».

Puisque, comme il est affirmé dans [15], il est difficile de considérer toutes les classes d'impacts lors d'une évaluation environnementale en cours de conception de produit, un choix parmi les classes d'impacts s'impose afin de permettre la prise de décision. En accord avec les partenaires industriels du projet [4], trois classes d'impacts prioritaires sont privilégiées pour les évaluations. Il s'agit de la classe d'impact « Epuisement des ressources naturelles », en vertu de la problématique d'ECOV envisagée, et des classes d'impact « Effet de serre » et « Eutrophisation de l'eau », auxquelles les concepteurs sont généralement sensibles.

Une simulation de l'application de la méthode en processus de conception

La démarche d'éco-conception est une re-conception : elle consiste en l'amélioration d'un produit existant. Elle se situe en phase de conception détaillée, alors que le degré de liberté de l'équipe de conception est essentiellement limité au choix des matériaux, notamment plastiques.

Les voies d'amélioration identifiées ne sont pas mises en œuvre en projet mais leur faisabilité est discutée avec le partenaire industriel : elles pourraient ainsi être mises en œuvre pour des générations futures du produit.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Etude de cas n°1

Analyse des résultats

Les évaluations de recyclabilité de la conception initiale du téléviseur sont présentées dans les lignes 'Conception originale' du tableau 4. Elles varient largement selon les scénarii. En particulier, le produit respecte les taux de valorisation proposés par la législation – fixé à 75 % en masse [2] – pour seulement deux des trois scénarii envisagés. De même, le coût de la valorisation pour le critère massique, varie pratiquement du simple au double selon les scénarii. La notion de recyclabilité de produit apparaît donc étroitement liée aux scénarii de valorisation qui lui sont appliqués : ceux-ci doivent donc être définis avec soin avant de tenter d'améliorer la conception du produit. La richesse de l'approche multiscénarii est ainsi mise en évidence.

L'analyse fine des évaluations, présentée dans [4], permet de mieux comprendre les contributions des composants du téléviseur. Par exemple, il semble que les matières plastiques contenues dans le produit influencent :
– largement l'indicateur IMR,

Tableau 4 : Etude de cas n°1 - Résultats de l'évaluation de recyclabilité multicritère du téléviseur – Scénarii de valorisation actuels

Scénarii	Conception	Indicateurs de recyclabilité				
		IMR	IER	IIER _i (% gain maximal)		
		(% masse des pièces)	(€ /produit)	ES ¹	ERN ²	EE ³
Scénario 1	Conception originale ⁴	67 %	-2,20	57 %	94 %	40 %
	Re-conception ⁵	67 %	-2,20	59 %	94 %	40 %
	Variation ⁶	+0 %	+0 %	+3 %	+0 %	0 %
Scénario 2	Conception originale	75 %	-2,23	66 %	94 %	42 %
	Re-conception	80 %	-2,06	75 %	94 %	43 %
	Variation	+6,5 %	+7,6 %	+13 %	+0 %	+2 %
Scénario 3	Conception originale	84 %	-3,55	78 %	94 %	44 %
	Re-conception	84 %	-3,59	80 %	94 %	44 %
	Variation	0 %	-1,1%	+2 %	0 %	+0 %
Scénarii 1+2+3	Variation	+2,2 %	+1,6 %	+4 %	+0 %	+1 %

1. Impact « Effet de serre »

2. Impact « Economie des ressources naturelles »

3. Impact « Eutrophisation de l'eau »

4. Conception initiale du téléviseur

5. Re-conception du téléviseur après mise en œuvre de la règle R1

6. Variation entre conception initiale du téléviseur et re-conception

Tableau 5 : Etude de cas n°2 - Résultats de l'évaluation de recyclabilité multicritère des pièces plastiques du téléviseur – Scénarii de valorisation prospectifs

Indicateurs de recyclabilité						
Scénarii	Conception	IMR	IER	IIER _i (% gain maximal)		
		(% masse des pièces)	(€ /produit)	ES	ERN	EE
Scénario 4	Conception originale	72 %	-0,21	72 %	72 %	70 %
	Re-conception ¹	74 %	-0,23	73 %	74 %	71 %
	Variation	+3 %	-10 %	+1 %	+3 %	+1 %
Scénario 5	Conception originale	40 %	-0,51	48 %	46 %	38 %
	Re-conception	84 %	+ 0,24	79 %	79 %	79 %
Scénarii 4+5	Variation	+110 %	+ 147 %	+64 %	+69 %	+107 %
	Variation	+41 %	+ 98 %	+26 %	+30 %	+38 %

1. Re-conception du téléviseur après mise en œuvre de la règle R4

- de façon limitée l'indicateur IER,
- de façon variable les indicateurs IIER.

Ces observations mettent en évidence l'intérêt de l'approche multicritère.

Amélioration de la conception

L'amélioration de la conception du produit est envisagée selon le scénario 2 : ce scénario est en effet déjà présent en Europe en plusieurs exemplaires et permet d'atteindre les taux massiques de valorisation au meilleur coût.

Un certain nombre de voies d'amélioration concernant l'assemblage du produit, les types de tube et de carte sont identifiés pour les trois critères de recyclabilité [4] : à ce moment de la conception, ces éléments apparaissent non modifiables. Puisque le procédé mis en œuvre permet de trier seulement le polypropylène (PP), la règle de conception R1 suivante est identifiée : « Préférer le matériau PP pour les pièces plastiques ».

Les évaluations des recyclabilités lors de la simulation de la mise en œuvre de R1 sont répertoriées dans le tableau 4, dans les lignes « Re-conception ». Les variations sur les indicateurs entre la conception initiale et la re-conception sont également exprimées (lignes « Variation »).

La règle R1 apparaît particulièrement bénéfique pour le scénario 2. Elle est le plus souvent bénéfique pour les autres scénarii, sauf pour le critère économique du scénario 3 : ceci est lié au fait que le PP recyclé est de valeur économique moins importante que l'HIPS recyclé. R1 semble donc par ailleurs globalement positif pour tous les critères si les trois scénarii se partagent équitablement le gisement (ligne « Scénarii 1 + 2 + 3 »).

Les gains économiques obtenus après re-conception, de 7,6 % pour le seul scénario 2 à 1,6 % pour un mélange des trois scénarii semblent modestes. A l'échelle d'un gisement de téléviseurs en fin de vie, ces gains pourraient pourtant représenter des économies considérables pour un producteur.

Etude de cas n°2

Analyse des évaluations de recyclabilité

L'analyse des indicateurs de recyclabilité de la conception initiale des pièces du téléviseur (cf. tableau 5, lignes

« Conception originale ») indique que les performances de recyclabilité sont bien meilleures pour le scénario 4 que pour le scénario 5 : ceci s'explique par le fait que le téléviseur ne contient que très peu de matériaux visés par le scénario 5 et que sa conception actuelle n'est donc pas adaptée à ce scénario.

Pour les deux scénarii, l'analyse approfondie des contributions des procédés aux indicateurs de recyclabilité permet d'identifier un certain nombre de points faibles des pièces plastiques du téléviseur. Ces points faibles incluent : le type de matériau de certaines pièces, le type d'additif et la présence d'étiquettes [4].

Vers des voies d'amélioration variées et élaborées

Il est alors possible de proposer en collaboration avec l'équipe de conception des règles de conception propres à chacun des scénarii 4 et 5, comme présentées dans le tableau 6. Puisque aucune information ne permet de déterminer quel scénario a le plus de chance d'exister à l'avenir, il convient de proposer une règle de conception favorable aux deux scénarii : il s'agit de la règle R4 du tableau 6, règle hybride des règles R2 et R3.

En comparaison avec les règles élaborées dans l'étude de cas n°1, les règles de cette étude de cas sont :

- d'une part plus variées : elles concernent non seulement les types de matériaux mais également les additifs ou encore les revêtements,
- d'autre part plus élaborées : des conditions sur la masse des pièces auxquelles s'appliquent les règles sont par exemple proposées.

Ces caractéristiques s'expliquent par le fait que les données concernant les scénarii 4 et 5 ont été collectées directement auprès des recycleurs et que les connaissances concernant leurs performances sont donc plus fines. Les procédés mis en œuvre dans ces scénarii sont de plus non seulement plus performants que précédemment, mais leurs performances influencent également un plus grand nombre de paramètres du produit. La mise en œuvre de la règle R4 est simulée pour les pièces plastiques du téléviseur : l'HIPS est désormais choisi comme matériau pour le cache-arrière. Les gains de recyclabilité obtenus

nus sont répertoriés dans le tableau 5 dans les lignes « Re-conception ». Les variations entre conception initiale et re-conception sont également précisées. La règle R4 conduit à des gains substantiels de recyclabilité selon les trois critères de recyclabilité et pour les deux scénarii considérés.

Enseignements des deux protocoles expérimentaux

Identification de voies d'amélioration concrètes

Les études de cas montrent que le calcul et l'analyse des indicateurs multicritères de recyclabilité d'un produit permet à une équipe de conception d'identifier des voies d'amélioration concrètes qui devraient mener à un progrès des performances des produits lors de leur valorisation en fin de vie.

La méthode permet ainsi 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.

Caractéristiques d'un produit influençant son aptitude à la valorisation en fin de vie

Les études de cas ont permis d'identifier les caractéristiques d'un produit qui influencent sa recyclabilité. Ces caractéristiques sont nombreuses [4]. Par exemple, la densité et la résistance à la rupture d'un matériau, la masse, la taille, la couleur ou encore le revêtement d'une pièce, sont autant de caractéristiques qui influencent la recyclabilité d'une pièce ou d'un produit. Tous les acteurs d'une équipe de conception peuvent donc, par leurs choix, influencer la recyclabilité du produit.

Robustesse de la méthode

Les évaluations de recyclabilité semblent précises, 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 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.

Tableau 6 : Combinaison de règles d'amélioration de la conception dans un contexte multiscénarii

Scénarii	Règles de conception
Scénario 4	R2 : « pour les pièces plastiques, préférer la hiérarchie de matériaux : 1. HIPS ; 2. PP ; 3. ABS »
Scénario 5	R3 : « pour les pièces plastiques, préférer les matériaux ABS ou HIPS pour les pièces de masse > 20 g »
Scénarii 4 + 5	R4 : « pour les pièces plastiques de masse > 20 g, préférer la hiérarchie de matériaux : 1. HIPS ; 2. ABS ; Pour les autres pièces, préférer la hiérarchie : 1. HIPS ; 2. PP ; 3. ABS »

Applicabilité en équipe de conception

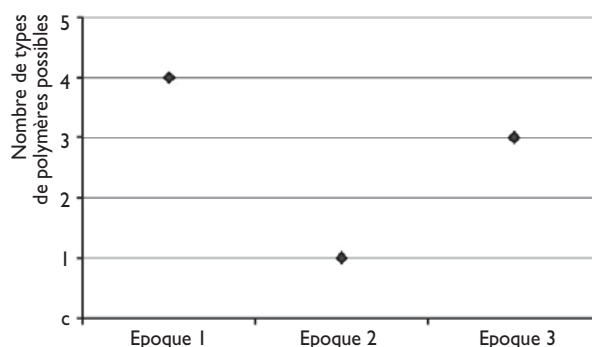
Les études de cas ont été menées en coopération très étroite avec le responsable environnement de l'entreprise productrice du téléviseur, acteur très au fait de la problématique de la valorisation en fin de vie. La mise en œuvre de la méthode en équipe de conception devra néanmoins être explorée : ce déploiement posera probablement des problèmes puisqu'il sera mené avec des non spécialistes. Néanmoins, la créativité des concepteurs devrait permettre de proposer des alternatives de conception originales et innovantes.

Des scénarii prospectifs laissant plus de liberté aux équipes de conception

La prise en compte de scénarii actuels semble très contraignante pour les équipes de conception : par exemple, dans l'étude de cas n°1, puisque le procédé de tri est peu sélectif, un seul matériau (le PP) peut permettre l'amélioration des performances du produit. Inversement, la prise en compte de scénarii prospectifs semble laisser plus de liberté aux équipes de conception : les procédés mis en œuvre sont en effet plus performants, et peuvent ainsi être plus tolérants vis-à-vis de la conception du produit.

Ce propos est illustré sur la figure 4 en positionnant pour trois époques différentes le nombre de matériaux plastiques potentiellement utilisables pour la conception du coffret et du cache-arrière du téléviseur. Ce nombre de matériaux possibles représente le degré de liberté dont dispose l'équipe de conception.

Précisons cependant que la prise en compte de scénarii prospectifs est un pari sur l'avenir et qu'elle doit être réalisée seulement sous certaines conditions. Par exemple, un producteur pourrait retenir un scénario prospectif à condition qu'il contribue lui-même activement à la pérennisation de la filière en entretenant une coopération scientifique et commerciale avec le porteur de la filière [4].



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°1)
 Epoque 3 : intégration des aspects valorisation en fin de vie en considérant les scénarii de valorisation prospectifs (étude de cas n°2)

Figure 4 : Evolution du degré de liberté d'une équipe de conception selon trois époques.

PERSPECTIVES DE DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODE

Des modules manquant qui devraient favoriser le déploiement de la méthode

Nos travaux ont permis d'élaborer un cadre méthodologique à une meilleure intégration des aspects valorisation en fin de vie en conception de produit. La méthode ReSICLED permet en effet de combler un certain nombre de vides méthodologiques concernant l'intégration des évaluations de recyclabilité en conception, les critères de recyclabilité et la modélisation des filières de valorisation.

Cependant, quelques aspects méthodologiques devront encore être explorés avant que la méthode ne soit utilisée de façon routinière par les concepteurs. On citera par exemple le besoin de :

- proposer des modélisations supplémentaires de procédés et de filières, telle que le démontage, le broyage ou encore la réutilisation de pièce,
- proposer un mode d'évaluation de la disponibilité des filières au lieu et au moment de la fin de vie du produit,
- valider les données de performances des procédés collectées sur le terrain,
- proposer un modèle de quantification des incertitudes des évaluations,
- proposer une procédure rendant la méthode robuste lors de l'intégration de nouveaux composants et de nouveaux matériaux,
- traduire la méthode en langage logiciel.

Le besoin d'utiliser la méthode plus en amont dans le processus de conception des produits

Les études de cas présentées ici ont consisté en une re-conception positionnée en phase de conception détaillée d'un téléviseur 14". Ce produit subit de très nombreuses contraintes, notamment économiques, et chaque nouvelle génération de produit intègre aujourd'hui un nombre limité d'innovations technologiques. Dans ce schéma hyper contraint, la mise en œuvre des voies d'améliorations identifiées conduit à des améliorations modestes sur l'indicateur environnemental : les IIER_i gagnent par exemple de 0 à 4% lors de la mise en œuvre de R1, et 26 à 38 % lors de la mise en œuvre de R4. Ces améliorations, de type re-conception, sont typiques des facteurs 1 (de 0 à 50 % de réduction des impacts) et 2 (50 % de réduction) des

niveaux d'éco-conception proposés par H. Brezet [16].

A terme, il s'agira d'appliquer la méthode très en amont du processus de conception de produits intégrant des sauts technologiques importants : le passage pour les téléviseurs des écrans à tube cathodique aux écrans LCD et plasma pourra par exemple être étudié. Ceci correspond à une réelle éco-conception et pourrait permettre d'assurer des améliorations substantielles de la recyclabilité des produits, correspondant, pour les facteurs d'amélioration de H. Brezet, à des facteurs 5 (80 % de réduction des impacts) à 20 (95 % de réduction).

De telles améliorations des performances environnementales des produits sont positionnées par rapport aux niveaux d'éco-conception dans la figure 5.

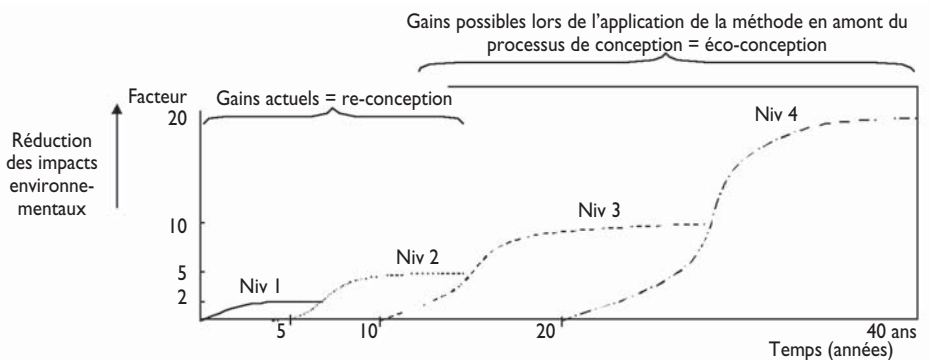


Figure 5 : Positionnement des réductions d'impacts environnementaux lors de la mise en œuvre actuelle et future de la méthode par rapport aux quatre niveaux d'éco-conception proposés par H. Brezet (figure adaptée de [16]).

Une prise en compte en amont nécessitera néanmoins une adaptation de la méthode aux pratiques des entreprises afin d'apporter des informations pertinentes à toutes les phases du processus de conception.

Le développement de la démarche lié à des orientations sociétales

Grâce à la méthode décrite dans cette publication, les producteurs de produits sont aujourd'hui en mesure de mieux intégrer les aspects valorisation en fin de vie lors de la conception de produits en tenant compte des variabilités des filières de valorisation. Néanmoins, la conception de produits effectivement plus performants d'un point de vue de la valorisation en fin de vie se heurte encore aux obstacles suivants :

- les incitations réglementaires se sont fait attendre et les clients sont encore trop peu exigeants sur les performances de recyclabilité d'un produit ; en conséquence, le critère 'recyclabilité' reste encore secondaire en conception,
- les filières de valorisation de produits sont encore trop peu performantes et établies,
- les connaissances sur les performances de ces filières

sont encore trop partielles.

A partir de ce constat, l'alternative sociétale suivante apparaît :

- soit il est réaffirmé par les politiques de façon encore plus déterminée que la valorisation des produits en fin de vie est une priorité européenne : il sera alors nécessaire de favoriser pleinement le développement des filières de valorisation, et de permettre l'acquisition de connaissances sur les performances de ces filières (grâce, par exemple, à un Centre européen du recyclage),
- soit l'aptitude à la valorisation en fin de vie n'est que l'un des nombreux critères à prendre en compte en conception de produit et ce critère reste secondaire : dans ce cas, seules les opportunités d'amélioration de la recyclabilité synergiques avec d'autres critères seront retenues et l'amélioration des performances d'un produit en fin de vie resteront modestes.

Quoiqu'il en soit, les contextes économiques et législatifs devront favoriser le développement technologique et la pérennisation des acteurs de la valorisation, dont les innovations technologiques permettront de conserver des degrés de liberté suffisamment grands en conception.

CONCLUSIONS

Une nouvelle méthode d'éco-conception orientée valorisation de produit a été présentée. Elle consiste en une évaluation de la recyclabilité d'un produit et en une procédure d'intégration de cette évaluation en cours de développement du produit. L'évaluation quantitative de recyclabilité est réalisée selon trois critères pertinents et est fonction des performances techniques, économiques, environnementales des procédés mis en œuvre lors de la valorisation. L'intégration en cours de développement de produit permet d'orienter les choix des équipes de conception, tout en leur laissant un certain degré de liberté.

L'utilisation de la méthode est en particulier simulée pour un téléviseur pour différents types de scénarii de valorisation. Les études de cas permettent de souligner les bénéfices associés aux caractères multicritère et multis-cénarii de la méthode et à la possibilité de considérer des procédés prospectifs. Des gains substantiels de recyclabilité peuvent ainsi être réalisés.

Après quelques adaptations, la méthode générique proposée devra être déployée en entreprise. Elle devrait permettre à chaque équipe projet de proposer ses propres solutions, menant à des améliorations importantes de recyclabilité des produits. Les impacts de la phase de fin de vie des produits complexes – masse de déchets résiduels, coûts économiques et pollutions associées – devraient en être réduits.

Remerciements

Ces recherches ont été réalisées grâce aux concours financiers de la Région Rhône-Alpes et de l'Ademe. Nous tenons à remercier A. Clément (Thomson), P. Dubots (Alcatel) et M. Lauraire (Schneider Electric) dont la coopération a rendu possible la

construction d'une méthodologie répondant aux attentes des concepteurs. L'application de la méthodologie a bénéficié des informations livrées par de nombreux recycleurs, en particulier par L. Magnin (Valdelec, recycleur de PEEFV, Chambéry, France), T. Imai (Technopolymer, recycleur de matériaux plastiques, Nagoya, Japon) et R. Kobler (RPI, recycleur de matériaux plastiques, Salt Lake City Etats-Unis). Les données environnementales utilisées pour les calculs des IIER ont été extraites des bases de données du logiciel EIME.

Fabrice Mathieux, Daniel Froelich

MAPIE - Ensam de Chambéry - Savoie Technolac - BP 295 F-73375 Le Bourget-du-Lac Cedex, France. Courriel : fabrice.mathieux@libertysurf.fr

Pierre Moszkowicz

Laepsi - Insa de Lyon - Bât Sadi Carnot - 9, rue de la Physique F-69621 Villeurbanne Cedex, France

Références

bibliographiques

- [1] UE, (2000), *Explanatory memorandum of the draft proposal for a European Parliament and Council directive on waste of electrical and electronic equipment*. Union européenne : Bruxelles (Belgique), 13 juin 2000
- [2] UE, (2003), *Directive du Parlement Européen et du Conseil relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques*. Union Européenne : Bruxelles (Belgique), 27 janvier 2003.
- [3] Coppens, C., (1999), *Méthode de conception en vue d'optimiser la valorisation des véhicules hors d'usage*, Laboratoire Conception de Produits Nouveaux et Innovation, ENSAM Paris, 251 p.
- [4] Mathieux, F., (2002), *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 points faibles de conception*, Thèse de doctorat, Institut Conception, Mécanique et Environnement, ENSAM Chambéry, 288p., <http://pastel.paristech.org/documents/disk0/00/00/03/15/index.html>
- [5] Imai, T., (2001), *Sorting of plastics from WEEE - New recycle process for plastics recovered from wasted E&E equipment*. In: Proceedings of Identiplast 2001, Bruxelles (Belgique)
- [6] Kobler, R.W., Winslow, G., Bedell, C.J., Christopher, P., (2002), *Apre-production pilot plant processing of automotive shredder residues*. In: Proceedings of 8th Annual Global Plastics Environmental Conference (GPEC), pp.333-340, 13-14/02/2002. Detroit (USA)
- [7] Krummenacher, B., Peuch, P., Fisher, M., Biddle, M., (1998), *Automatic identification and sorting plastics from different waste streams*, Technical report, APME - Identiplast, 19 p.
- [8] Janin, M., (2000), *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., <http://pastel.paristech.org/documents/disk0/00/00/01/82/index.html>.
- [9] Fleischer, G., Becker, J., Braunmiller, U., Klocke, F., Klopffer, W., Michaeli, W., (2000), *Eco-Design - Effiziente Entwicklung nachhaltiger Produkte mit euroMat*. Berlin (Germany): Springer Verlag, ISBN 3-540-65814-9
- [10] Kang, H.Y., Jung, J.W., Herrmann, C., (2001), *Recycling oriented design - A case study on house appliances using the software ATRQD*. In: Proceedings of EcoDesign 2001 - Second international symposium on environmentally conscious design and inverse manufacturing, pp.309-314, Tokyo (Japon) : IEEE
- [11] 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 (September 2002): pp.68-72
- [12] Huisman, J., Boks, C., Stevels, A., (2003), *Quotes for environmentally weighted recyclability - The concept of describing product recyclability in terms of environmental value*. International Journal of Production Research. Sous presse
- [13] 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*. Union Européenne : Bruxelles (Belgique), Octobre 2002
- [14] Afnor, (1997), *Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadres*. Association Française de Normalisation: Paris, ISO 14040:1997
- [15] 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
- [16] Brezet, H., Van Hemel, C., (1997), *Ecodesign: a promising approach to sustainable production and consumption*. Paris (France) : UNEP