

Une méthode d'évaluation des scénarios de fin de vie pour des produits en phase de conception préliminaire

MARIE REMERY¹, CHRISTIAN MASCLE¹, BRUNO AGARD²

¹ DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE, ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTREAL
BP 6079, Station Centre-Ville, Montréal, Québec, Canada H3C 3A7
marie.remery@polymtl.ca; christian.mascle@polymtl.ca

² DEPARTEMENT DE GENIE INDUSTRIEL, ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTREAL
BP 6079, Station Centre-Ville, Montréal, Québec, Canada H3C 3A7
bruno.agard@polymtl.ca

Résumé - Le choix d'un scénario de fin de vie approprié pour les produits hors d'usage est devenu un problème important, que l'on considère l'impact provoqué par les déchets ou la saturation des décharges. Une manière de résoudre ce problème est d'optimiser la conception des produits en vue de leur fin de vie, dès le début de leur conception dans le but de minimiser les impacts environnementaux et de respecter les lois et normes en vigueur, tout en assurant la réalisation d'un bénéfice économique. La méthode ELSEM (End-of-Life Scenario Evaluation Method) décrite dans cet article est un outil simple et rapide destiné aux concepteurs afin de les aider dans le processus de prise de décision, menant au choix d'un scénario de fin de vie. ELSEM est construite en utilisant la méthode TOPSIS floue, approche multicritère tout-à-fait appropriée dans le contexte incertain et imprécis dans lequel se trouve le concepteur au début de la phase de conception. Son utilisation est illustrée par une étude de cas sur une portière de voiture.

Abstract - The choice of an appropriate end-of-life (EOL) scenario for discarded products has become an important issue, given the current problems of environmental waste impact and landfill saturation. To address this issue, the products design must be optimized at the beginning of their development with a view to incorporating in these products an environmentally sustainable EOL scenario which respects economic and legislative constraints. The new EOL scenario evaluation method (ELSEM) that we propose in this paper provides a simple and intuitive tool for designers to help them construct arguments for the EOL decision-making process. ELSEM is built using the fuzzy TOPSIS method, a multi-criteria decision process that is highly appropriate in the uncertain and subjective environment in which the designer works during the early stages of product development. This method is illustrated with a case study involving a vehicle door.

Mots clés - Conception pour l'environnement, Conception pour la fin de vie, Analyse multicritère, Logique floue

Keywords - Design for environment; Design for end-of-life; Multi-criteria analysis; Fuzzy logic; Ecodesign

1 INTRODUCTION

La société actuelle est de plus en plus concernée par les produits arrivés en fin de vie, dont la quantité est devenue incontrôlable : les décharges débordent et les déchets génèrent des rejets nocifs pour l'environnement et la santé humaine. Ce problème a conduit à l'apparition de nouvelles réglementations imposant des taux de réutilisation et de recyclage (par exemple pour les DEEE : Déchets des Équipements Électriques et Électroniques) interdisant l'utilisation de certaines substances dangereuses et encourageant les concepteurs à améliorer la conception des produits en vue de leur fin de vie [Commission des communautés européennes, 2002]. En réponse à cet objectif, de nouvelles méthodes de conception appelées DfEOL (Design for End-of-life), ont été développées afin d'aider aux choix des matériaux, des attachements et de la structure du produit en fonction de sa destination en fin de vie.

La première étape de ce type de méthode est donc de décider quel scénario de fin de vie sera le plus approprié pour un produit donné, et ceci avant de fixer les principaux paramètres de conception, qu'il sera difficile de modifier par la suite [Tonnelier *et al.*, 2005 ; Spath *et al.*, 1996].

En général, les entreprises choisissent une stratégie de fin de vie en se basant sur une politique globale et des objectifs environnementaux [Brissaud et Zwolinski, 2004 ; Choi *et al.*, 2008]. Tout en respectant cette décision, ainsi qu'en s'assurant de la réalisation d'un bénéfice économique, du respect des lois et de l'environnement, l'équipe de conception doit identifier et évaluer les différents scénarios de fin de vie possibles pour le produit, c'est-à-dire l'ensemble des traitements appropriés pour chacun de ses éléments. Ceci conduira à la création d'arguments techniques pour la négociation des spécifications de conception détaillée.

Cependant, les concepteurs n'ont en général pas les outils requis pour évaluer adéquatement ces scénarios puisque cela requiert des données avancées dans le domaine du traitement en fin de vie des produits. Pour les aider, différentes méthodes ont donc été développées. Malheureusement, la plupart d'entre elles demandent des informations précises et quantitatives, non disponibles en phase de conception préliminaire, ou s'avèrent trop complexes et longues à utiliser en pratique.

Le but de cet article est donc de proposer une nouvelle méthode d'évaluation des scénarios en fin de vie des produits, utilisable en phase de conception préliminaire, et respectant les contraintes de simplicité et de rapidité d'application nécessaire à toute méthode destinée aux concepteurs.

Pour évaluer les options de fin de vie, nous utilisons une approche multicritère qui permet de traiter aussi bien des données qualitatives et quantitatives avec un haut degré de flexibilité [Powell, 1996]. Les approches multicritères ont aussi été prouvées efficaces par de nombreux travaux pour résoudre des problèmes environnementaux et de traitement des déchets [Chiou et Tzeng, 2002 ; Salminen et al., 1998 ; Chan et Tong, 2007 ; Vego et al., 2008]. Parmi les méthodes existantes, nous utilisons la méthode TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) [Hwang et Yoon, 1981], car (i) elle est logique et suit la rationalité du choix humain ; (ii) pour chaque alternative, elle prend en compte sa distance par rapport à la meilleure solution aussi bien qu'à la pire ; et (iii) elle est simple et facile à implémenter [Shih et al., 2007]. Par ailleurs, étant donné que les caractéristiques précises du produit ne sont pas encore déterminées en phase de conception préliminaire, nous appliquons TOPSIS avec la théorie de la logique floue, qui est adaptée à la résolution des problèmes décisionnels impliquant des données subjectives et imprécises [Herrera et Herrera-Viedma, 2000 ; Yeh et al., 2000].

Après avoir décrit l'état de l'art sur les méthodes existantes en DfEOL en section 2, nous expliquons la méthode proposée pour l'évaluation des scénarios de fin de vie en section 3, puis nous l'appliquons sur une portière d'automobile en section 4.

2 ETAT DE L'ART

Les méthodes DfEOL appartiennent au domaine du « Design for Environment » (DfE) dont le but est de réduire l'impact de chacune des étapes du cycle de vie d'un produit, sans compromettre les autres aspects importants tels que la qualité, la fonctionnalité et le coût.

Pour intégrer le choix de fin de vie dans un projet de DfE, deux approches sont utilisées. La première, décrite par Lee et al. (2006) est une approche itérative : le meilleur scénario de fin de vie est choisi à la fin de la phase de conception détaillée en se basant sur les paramètres précis du produit venant d'être définis. Si ce scénario respecte la stratégie de fin de vie fixée par l'entreprise, la conception est validée. Dans le cas inverse, une reconception doit être envisagée. La seconde approche, linéaire, est décrite par [Brezet et Hemel, 1998]. Elle consiste à faire le choix d'un scénario en phase de conception préliminaire, puis de réaliser la conception détaillée adaptée à ce choix. L'approche linéaire permet d'économiser le temps et l'effort nécessaire aux multiples boucles de reconception possiblement engendrées par l'approche itérative, mais peut conduire à un choix de scénario moins précis et moins pertinent puisque peu d'informations sont disponibles pour le réaliser.

Les méthodes d'évaluation et de choix de fin de vie nécessitant l'utilisation d'une approche itérative sont nombreuses. Lee et

al., (2001) ont développé une méthode consistant à déterminer d'une part la fin de vie la plus bénéfique pour chaque composant du produit et d'autre part la séquence de désassemblage optimale en utilisant l'algorithme MSA (Multiple Sequence Alignment). Hula et al. (2003) et Takeuchi et Saitou (2006) utilisent des algorithmes génétiques pour identifier la séquence de désassemblage la moins coûteuse en considérant un grand nombre de facteurs tels que les caractéristiques des composants, leurs liens dans le produit, l'impact environnemental, les réglementations de fin de vie et des variables de coût, d'infrastructure et de marché. La méthode AEOLOS (An EOL of Product Systems) [Kiritzis et al., 2003] laisse le concepteur construire un ensemble initial de scénarios possibles, en se basant sur sa propre expérience et son jugement personnel, et permet seulement d'évaluer chacun des scénarios retenus par une approche multicritère. Chacun des scénarios est défini comme un ensemble de couples (élément du produit, fin de vie de cet élément) ordonnés par ordre de désassemblage. La méthode développée par Mathieux et al. (2008) utilise également les opérations de tri, de broyage et de logistique pour définir les scénarios. Gehin et al. (2007; 2010) considèrent uniquement les aspects environnementaux, puisqu'ils évaluent les scénarios en utilisant une SLCA (Social Life Cycle Assessment). Ils développent le modèle des « life cycle bricks » afin de différencier les différents scénarios en ajoutant ou retirant certaines phases du cycle de vie du produit. Enfin, Kumar et al. (2007) créent une nouvelle approche originale pour comparer les scénarios, en évaluant la valeur résiduelle dans le produit hors d'usage telle que perçue par le consommateur ainsi que par l'entreprise chargée de la récupération de celui-ci.

Ces méthodes sont difficilement utilisables par le concepteur puisqu'elles requièrent des connaissances avancées ainsi qu'une bonne expérience en récupération et en traitement de produits usagés afin de construire l'ensemble initial de scénarios à évaluer. Par ailleurs, elles nécessitent d'être utilisées avec l'approche itérative puisqu'elles se basent sur les données précises de la conception détaillée. Or il est clair que pour avoir une chance d'être intégrée au processus de conception déjà très complexe, toute méthode d'intégration de l'environnement devrait être la plus rapide et la moins contraignante possible, même si c'est au prix d'une diminution de la précision et de la fiabilité des résultats. L'approche itérative, qui peut nécessiter beaucoup de temps et d'effort est donc à éviter au profit de l'approche linéaire.

Dans l'approche linéaire, qui place le choix de fin de vie en phase de conception préliminaire, bien moins d'informations sont disponibles. Il faut donc judicieusement choisir les données à implémenter dans la méthode. Dans sa méthode ELDA (End-of-Life Design Advisor), Rose et al. (1998, 2000, 2001) utilisent six caractéristiques techniques du produit : la durée de vie, le cycle technologique, le niveau d'intégration, le nombre de pièces, la durée du cycle de conception et la raison de reconception. En s'appuyant sur de nombreux cas d'application, ils appliquent ensuite l'algorithme CART (Classification And Regression Trees) pour obtenir un arbre de décision final. Xing et al., (2003) remarquent que certaines de ces caractéristiques sont redondantes et simplifient ELDA en créant la méthode PEOLSP. Ils utilisent seulement 4 caractéristiques (durée de vie, cycle technologique, niveau d'intégration et raison de reconception) et calculent à partir de celles-ci deux indicateurs reflétant les effets de la détérioration physique et de l'obsolescence technologique qui permettent un choix final de fin de vie.

Ces méthodes sont très adaptées à notre cas d'étude car elles sont utilisables en début de conception et nécessitent peu de temps et d'efforts. Cependant, elles sont tellement simplifiées que certains aspects importants, tels que les réglementations ou le bénéfice économique sont négligés. De plus, elles ne donnent une option de fin de vie que pour le produit au complet alors qu'en réalité, lorsqu'un produit hors d'usage est désassemblé, les divers éléments résultants de la séquence de désassemblage peuvent se voir attribuer des fins de vie différentes. C'est ce scénario précis que le concepteur doit trouver pour être capable de choisir les paramètres de conception détaillée. Prendre cette perspective en considération implique la création d'une méthode d'évaluation de la fin de vie de chaque sous-assemblage individuel du produit identifiable en conception préliminaire (que nous appelons « module » par la suite), ce qui nécessite de prendre en compte non seulement ses caractéristiques propres, mais aussi de considérer sa situation dans le produit et les attachements qui l'y relient. À cette fin, nous avons développé la méthode ELSEM.

3 DESCRIPTION DE LA METHODE ELSEM

La méthode ELSEM est un nouvel outil d'évaluation des scénarios de fin de vie en début de phase de conception. Le but de cette méthode est d'aider les concepteurs à examiner la performance des différents traitements possibles de fin de vie afin d'être capable : (i) d'identifier les scénarios applicables étant donné la politique environnementale et la stratégie de l'entreprise ; (ii) de trouver les paramètres de conception les plus adaptés aux scénarios correspondants ; (iii) dans certains cas, de négocier la stratégie de fin de vie choisie par

l'entreprise avec les responsables du projet si celle-ci semble irréaliste. Ces différentes caractéristiques permettent à ELSEM d'être un assistant efficace d'aide décisionnel pour le choix de la fin de vie.

3.1 Données implémentées dans la méthode TOPSIS floue

ELSEM évalue les performances de 6 options de fin de vie A_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) pour chacun des modules du produit. Ces 6 options sont (Cf figure 1) :

- A1 - *Reuse (REU)* : le module est réutilisé tel quel, dans le même but que ce pour quoi il a été conçu au départ,
- A2 - *Remanufacturing (REM)* : une grande quantité de modules relativement semblables sont amenés dans un centre de désassemblage. Leurs pièces constitutives sont alors démontées, triées par type, nettoyées, inspectées, réparées selon le cas. Des modules refabriqués sont alors remontés en utilisant ces pièces,
- A3 - *Recycling with disassembly (Rwd)*: le module est désassemblé manuellement, afin de séparer les différents matériaux qui sont ensuite recyclés,
- A4 - *Recycling without disassembly (Rwod)*: tout le module est broyé, puis les matériaux sont récupérés, triés si possible par différentes méthodes et recyclés,
- A5 - *Incineration with energy recovery (IER)*: le module est brûlé et l'énergie résultante est récupérée sous forme de chaleur ou d'électricité
- A6 - *Disposal (Disp)*: le module est envoyé en décharge.

Pour construire les critères d'évaluation utilisés pour appliquer la méthode TOPSIS, nous avons identifié les aspects fondamentaux de la récupération des produits hors d'usage. D'après [Rao et Padmanabhan, 2010 ; Navin Chandra, 1994],

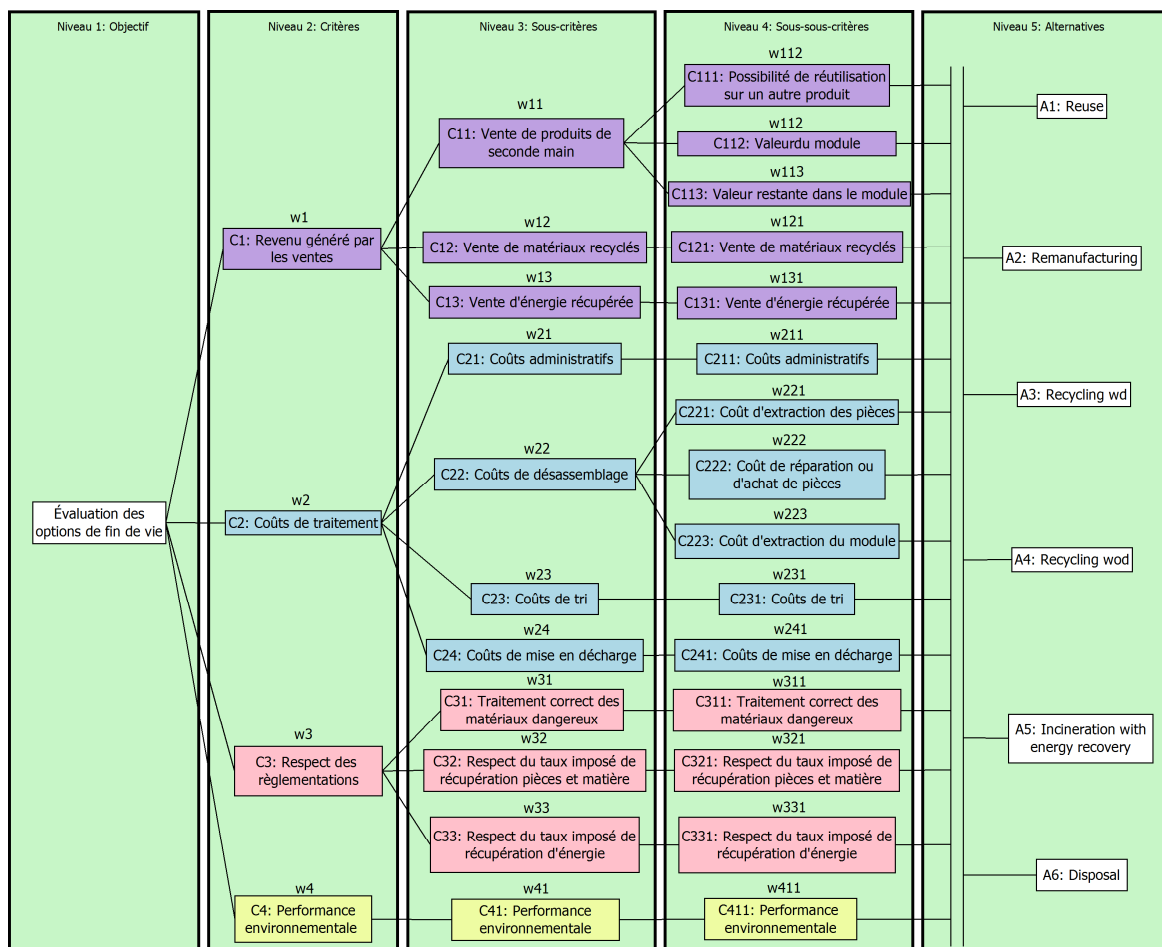


Figure 1. Hiérarchie du problème multicritère à cinq niveaux : objectif, critères, sous-critères, sous-sous-critères, alternatives

les principaux critères que les entreprises considèrent en choisissant une fin de vie pour leurs produits sont : le bénéfice économique, le respect des réglementations et le respect de l'environnement. En divisant le bénéfice en un critère de revenu et un critère de coût, nous obtenons finalement 4 critères principaux, notés C_j (leurs poids relatifs sont notés w_j). A partir de l'étude des processus de récupération [Brezet et Hemel, 1998 ; Hammond et al., 1998 ; Knemeyer et al., 2002 ; Srivastava, 2007 ; Johnson et Wang, 1998 ; Thierry et al., 1995], nous les avons décomposés en sous-critères (C_{jk} , poids relatifs w_{jk}) et sous-sous-critères (C_{jkl} , poids relatifs w_{jkl}) pour finalement obtenir la hiérarchie à cinq niveaux du problème multicritère présentée Figure 2.

Le calcul des performances des 6 fins de vie selon ces critères est effectué en utilisant certaines caractéristiques du module, choisies en fonction de leur influence sur la fin de vie et de leur disponibilité en phase de conception préliminaire. Parmi les paramètres influençant la fin de vie du module trouvés dans la littérature [Brezet et Hemel, 1998 ; Rose *et al.*, 1998 ; Parlikad *et al.*, 2003 ; Xing *et al.*, 2003 ; Sy et Mascle ; 2009], nous en avons retenus 15 pertinents et utilisables en phase de conception préliminaire. Ils sont décrits ci-après :

- P1 : Adaptabilité : Capacité du module d'être réassemblé sur un produit différent de celui pour lequel il a été originalement conçu
- P2 : Durabilité : Importance de la durée de vie du module par rapport à celle du produit
- P3 : Valeur du module sur le marché : Prix initial du module
- P4 : Condition en fin de vie : Niveau de propreté, aspect esthétique et niveau de fonctionnalité en fin de vie
- P5 : Quantité de matériaux de grande valeur : Quantité de matériaux pouvant être revendus à un prix élevé
- P6 : Capacité calorifique du module
- P7 : Difficulté de désassemblage du module : Difficulté d'accès au module et de destruction des attachements le liant au produit
- P8 : Niveau d'intégration : Nombre de fonctions réalisée par chaque sous-assemblage du module (représentatif de la complexité)
- P9 : Quantité de pièces : Comprend les éléments indissociables du produit excepté les pièces réalisant une fonction d'attachement
- P10 : Difficulté de détachement des fixations : Lié au coût de détachement des connexions entre les diverses pièces du module
- P11 : Quantité de matériaux différents : Quantité de matériaux de différents types, devant être séparés avant recyclage
- P12 : Quantité de matériaux dangereux
- P13 : Taux de récupération pièce et matière imposée : Taux imposé par les lois et incluant Reuse, Remanufacturing, Rwd, Rwod
- P14 : Taux de récupération d'énergie : Taux imposé par les lois et incluant l'incinération with energy recovery
- P15 : Poids du module

Pour pouvoir appliquer ELSEM, le concepteur doit évaluer les valeurs de P_{13} et P_{14} pour le produit au complet puis les valeurs des 13 autres paramètres pour chacun des modules composant le produit. La note attribuée à un paramètre P_n , notée N_n , est une variable linguistique et est représentée par un nombre triangulaire flou.

Les variables linguistiques et les nombres flous correspondants utilisés pour décrire les notes N_n , les performances des fins de vie et les poids des critères sont données dans le Tableau 1.

Les poids relatifs des critères sont répartis sur l'intervalle [0, 1] afin d'obtenir des matrices de décision pondérées et comparables. Les performances et les notations N_n ($n=1, \dots, 14$) s'étalent uniformément sur l'intervalle [0, 10] qui est communément utilisé dans les systèmes de notations et s'avère donc intuitif. Seul le paramètre P_{15} est noté sur [0, 1] puisqu'il est utilisé comme un poids d'influence plutôt que comme une performance.

Basé sur l'évaluation des 15 paramètres d'influence, il est ensuite possible de calculer les performances de chaque alternative de fin de vie A_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) selon chaque sous-sous-critère C_{jkl} à l'aide d'un ensemble d'expressions, reliant les notations N_n aux performances z_{il} .

Connaissant ces dernières, nous pouvons donc appliquer la méthode TOPSIS floue.

Tableau 1. Variables linguistiques utilisées pour les performances, poids et paramètres d'influence et nombres triangulaires correspondants

Performances z_{il} , N_n ($n=1, \dots, 14$)		
Variable linguistique	Notation	Nombre triangulaire
Très petit	TP	(0, 0, 2.5)
Petit	P	(0, 2.5, 5)
Modéré	Md	(2.5, 5, 7.5)
Grand	G	(5, 7.5, 10)
Très Grand	TG	(7.5, 10, 10)
Poids relatifs, N_{15}		
Variable linguistique	Notation	Nombre triangulaire
Très faible	TF	(0, 0, 0.25)
Faible	F	(0, 0.25, 0.5)
Moyen	My	(0.25, 0.5, 0.75)
Important	I	(0.5, 0.75, 1)
Très important	TI	(0.75, 1, 1)

3.1 Méthode TOPSIS floue

Les différentes étapes de la méthode sont résumées dans la Figure 2.

Les 6 alternatives de fin de vie A_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) sont évaluées par 4 critères C_j ($j = 1, 2, \dots, 4$). Chacun d'entre eux est décomposé en p_j sous-critères C_{jk} ($k = 1, 2, \dots, p_j$). Chaque sous-critère est encore décomposé en q_{jk} sous-sous-critères C_{jkl} ($l = 1, 2, \dots, q_{jk}$).

La matrice de décision pour les 4 critères principaux et les 6 alternatives est donnée par $X = [x_{ij}]_{6 \times 4}$ où x_{ij} représente la performance floue de la fin de vie A_i pour le critère C_j .

Si les sous-critères C_{jk} sont utilisés pour le critère C_j , nous définissons la sous-matrice de décision $Y_{C_j} = [y_{ik}]_{6 \times p_j}$, où y_{ik} représente la performance floue de la fin de vie A_i pour le sous-critère C_{jk} .

Si les sous-sous-critères C_{jkl} sont utilisés pour le sous-critère C_{jk} , nous définissons la sous-sous-matrice de décision $Z_{C_{jk}} = [z_{il}]_{6 \times q_{jk}}$ où z_{il} représente la performance floue de la fin de vie A_i pour le sous-sous-critère C_{jkl} .

Exprimés en termes linguistiques, les poids des critères, sous-critères et sous-sous-critères sont donnés respectivement par :

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_4)$$

$$W_j = (w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jp_j})$$

$$W_{jk}=(w_{jk1}, w_{jk2}, \dots, w_{jkqjk})$$

Le vecteur W doit être déterminé par le concepteur, en fonction des préférences et objectifs de l'entreprise. Des valeurs initiales pour les vecteurs W_j et W_k , sont données dans la méthode ELSEM car elles nécessitent des connaissances approfondies en traitement de produits en fin de vie. Elles peuvent cependant être modifiées au besoin par le concepteur. Pour calculer les termes de la sous-matrice de décision (respectivement la matrice de décision), il suffit pour chaque sous-critère (respectivement critère), de calculer la moyenne des performances selon ses sous-sous-critères (respectivement sous-critères) le décomposant, pondérée par les termes du vecteur W_{jk} (respectivement W_j). La matrice de décision est ensuite normalisée et pondérée par les le vecteur W pour finalement obtenir la matrice $V = [v_{ij}]_{6 \times 4}$.

Le principe de TOPSIS est de considérer que les 6 alternatives évaluées selon les 4 critères sont 6 points dans un espace à 4 dimensions. Plus une alternative se rapproche de la meilleure solution et s'éloigne de la pire, meilleure elle est.

La solution floue la plus idéale possible A^* et la solution floue la pire possible A^- sont définies de la manière suivante [Önüt et Soner, 2008] :

$$A^* = \{v_1^*, v_2^*, v_3^*, v_4^*\} \text{ Avec } v_j^* = \begin{cases} (\max v_{ij} \text{ si } j \in B), \\ (\min v_{ij} \text{ si } j \in C) \end{cases} \quad (1)$$

et

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, v_3^-, v_4^-\} \text{ Avec } v_j^- = \begin{cases} (\min v_{ij} \text{ si } j \in B), \\ (\max v_{ij} \text{ si } j \in C) \end{cases} \quad (2)$$

B correspondant à l'ensemble des critères favorables pour les fins de vie les respectant (bénéfice, concordance avec les lois, respect de l'environnement) et C correspondant à l'ensemble des critères défavorables pour les fins de vie les respectant (coût de traitement).

La distance de chacune des alternatives A_i à la meilleure solution et à la pire solution sont respectivement données par :

$$D_i^* = \sum_{j=1}^{j=4} d(v_{ij}, v_j^*) \text{ et } D_i^- = \sum_{j=1}^{j=4} d(v_{ij}, v_j^-) \quad (3)$$

L'évaluation finale des alternatives est finalement donnée en calculant le coefficient de proximité de chacune d'elles. Ce coefficient indique l'ampleur de la proximité de chaque alternative de fin de vie à la meilleure et à la pire solution. Il est donné par :

$$CC_i = \frac{D_i^-}{D_i^* + D_i^-} \quad (4)$$

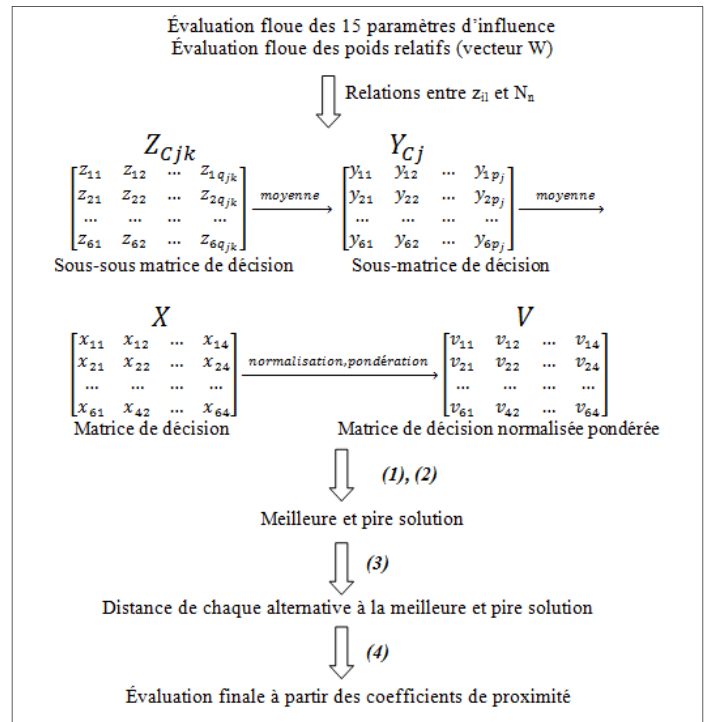


Figure 2. Résumé des étapes de la méthode ELSEM

4 CAS D'ETUDE

Pour illustrer la méthode ELSEM, nous l'avons appliquée à une porte de voiture, les automobiles étant largement concernées par la valorisation des produits en fin de vie depuis la création de la directive européenne ELV (End-of-Life Vehicle) créée en 2007.

Les notes données à chaque paramètre sont présentées dans le Tableau 2. Nous avons supposé par ailleurs $W = (TI, TI, F, TF)$: les poids relatifs des revenus et coûts sont considérés très importants, celui du respect des réglementations faible et celui du respect de l'environnement très faible. Ces valeurs ont été prises dans le but de se rapprocher des préférences communément appliquées dans l'industrie.

Tableau 2. Notes de chacun des facteurs d'influence pour la portière de voiture

P1	Adaptabilité	P
P2	Durabilité	TG
P3	Valeur du module sur le marché	P
P4	Etat en fin de vie	G
P5	Quantité de matériaux de valeur	Md
P6	Capacité calorifique	P
P7	Difficulté de désassemblage du module	TP
P8	Niveau d'intégration	G
P9	Quantité de pièces	Md
P10	Difficulté de détachement des attachements des pièces	G
P11	Quantité de matériaux	G
P12	Quantité de matériaux dangereux	Md
P13	Pourcentage de récupération imposé	Md
P14	Pourcentage de valorisation énergétique	TP
P15	Poids du module	My

Ce tableau se lit de la manière suivante : le facteur P_1 , dont le nom est indiqué dans la deuxième colonne (Adaptabilité) a la note $N_1=P$ donnée dans la troisième colonne...

Après application de la méthode TOPSIS floue, nous obtenons les CC_i calculés pour chaque critère présentés Figure 3 et les CC_i finaux présentés Figure 4.

Sur la Figure 3, on peut lire pour chaque fin de vie, son score final pour les 4 principaux critères. Par exemple, on peut voir que pour le REM, les revenus générés par les ventes ont un CC_1 de 0.9 et la faiblesse des coûts de traitement a un CC_1 nul. Par ailleurs, le REM est l'une des meilleures alternatives pour le respect des réglementations et la performance environnementale puisqu'ils ont des CC_1 de 1.

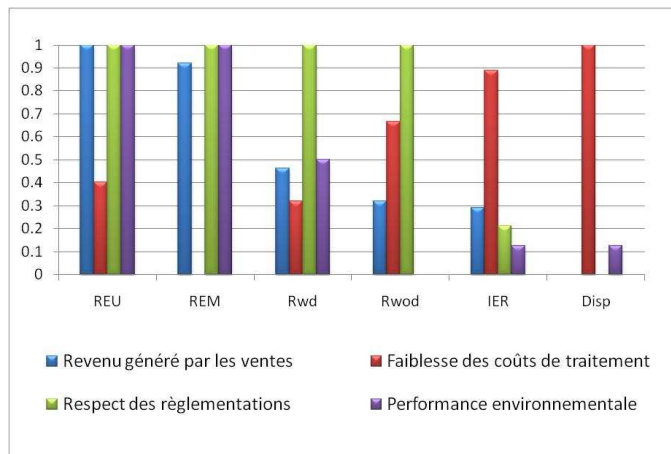


Figure 3. Coefficients de proximité par critère pour la portière de voiture

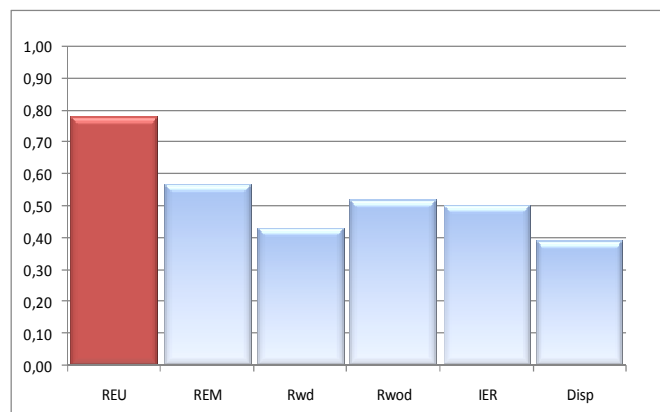


Figure 4. Coefficients de proximité finaux pour la portière de voiture

La Figure 4 montre que la performance pour l'option de réutilisation est la meilleure avec un coefficient de proximité de 0,78, un résultat que nous pouvons facilement comprendre puisque pour le critère de revenus, le REU est la meilleure option avec un CC égal à 1. Cette option est aussi la meilleure fin de vie selon le respect des réglementations et la performance environnementale puisque leurs CC valent également 1. Finalement le coût est modéré et reste bien plus faible que celui du Remanufacturing.

Le Remanufacturing et le Rwod viennent après la réutilisation avec des CC s respectivement égaux à 0,57 et 0,52, dû au revenu significatif généré par les portes refabriquées et la faible quantité de matériaux dans le module, permettant un tri rapide après broyage et donc un coût de traitement plus faible que le Rwd.

Finalement, le Rwd, l'incinération et le Disposal ne sont pas conseillés car ils génèrent un faible revenu et ont une faible concordance avec les lois, tout comme leur performance environnementale.

Dans cet exemple, la fin de vie conseillée correspond à la fin de vie communément appliquée dans l'industrie. Nous avons également testé 6 autres modules de voiture et 4 modules d'ordinateurs et les résultats ont montré une concordance dans 8 cas sur 10, ce qui va dans le sens de la validation de la méthode.

5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cet article introduit la méthode ELSEM, proposée pour évaluer les différentes options possibles de fin de vie pour un produit (composé de modules et sous modules), dans le but de favoriser la sélection des options les plus respectueuses de l'environnement tout en assurant un bénéfice économique. Cette méthode est rapide et simple à utiliser puisque les informations implémentées par le concepteur ne demandent pas d'expertise particulière en fin de vie et sont évaluées à l'aide de variables linguistiques. ELSEM reste également flexible, puisque l'importance relative des aspects considérés peut être modifiée, et utilisable en phase de conception préliminaire ce qui est un avantage par rapport à la plupart des autres méthodes existantes ne pouvant s'appliquer qu'à la fin de la conception détaillée.

En plus d'aider les concepteurs à évaluer chaque scénario de fin de vie, ELSEM les guide dans le processus de prise de décision effectué avec le reste de l'équipe de conception. Avec l'aide de cette méthode, les négociations aboutiront au choix d'une option de fin de vie pour chaque module du produit et à la détermination des caractéristiques techniques précises du futur produit adaptées au scénario de fin de vie choisi.

Ce qu'il reste à accomplir est (i) de tester la méthode sur des types de produits variés pour finaliser sa validation et (ii) créer un outil logiciel simple à destination du concepteur pour l'implémentation de la méthode.

6 REFERENCES

- Brezet H., Hemel C. V., (1998) EcoDesign: A promising approach to sustainable production and consumption. Disponible: <http://www.ivt.ntnu.no/ipm/und/fag/TMM4145/ecodesign/theory/step2/step2.htm> [Consulté le 15 mai 2010].
- Brissaud D., Zwolinski P., (2004) End-of-Life-Based Negotiation Throughout the Design Process. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 53, no. 1, pp. 155-158.
- Chan J., Tong T., (2007) Multi-criteria material selections and end-of-life product strategy: Grey relational analysis approach. *Materials & Design*, vol. 28, no. 5, pp. 1539-1546.
- Chiou H., Tzeng G., (2002) Fuzzy multiple-criteria decision-making approach for industrial green engineering. *Environmental Management*, vol. 30, no. 6, pp. 816-830.
- Choi J., Nies L., Ramani K., (2008) A framework for the integration of environmental and business aspects toward sustainable product development. *Journal of Engineering Design*, vol. 19, no. 5, pp. 431-446.
- Commission des Communautés Européennes, (2002) Directive of the European Parliament and the council on waste electronics on waste electrical and electronic equipment (WEEE).
- Gehin A., Zwolinski P., Brissaud D., (2007) Towards the use of LCA during the early phase to define EOL Scenarios. *Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses*, Part 2, A1, pp. 23-28..
- Gehin, A., Zwolinski P., Brissaud D., (2007) Evaluer les stratégies de fin de vie par l'analyse du cycle de vie. *Les*

- systèmes de production: applications interdisciplinaires et mutations*, Hermes science, pp. 279-291.
- Hammond R., Amezquita T., Bras B., (1998) Issues in the automotive parts remanufacturing industry: a discussion of results from surveys performed among remanufacturers. *Engineering Design and Automation*, vol. 4, pp. 27-46.
- Herrera F., Herrera-Viedma E., (2000) Linguistic decision analysis: steps for solving decision problems under linguistic information. *Fuzzy sets and systems*, vol. 115, no. 1, pp. 67-82.
- Hula A., Jalali K., Hamza K., Skerlos S. J., Saitou K., (2003) Multi-Criteria Decision-Making for Optimization of Product Disassembly under Multiple Situations. *Environmental Science and Technology*, vol. 37, pp. 5303-5313.
- Hwang C. L., Yoon K., (1981) Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications. Springer, Heidelberg, Berlin.
- Johnson M., Wang M., (1998) Economical evaluation of disassembly operations for recycling, remanufacturing and reuse. *International Journal of Production Research*, vol. 36, no. 12, pp. 3227-3252.
- Kiritsis D., Bufardi A., Xirouchakis P., (2003) Multi-criteria decision aid for product end of life options selection. *2003 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, Piscataway, NJ, USA, 19-22 Mai, pp. 48-53.
- Knemeyer A., Ponzurick T., Logar C., (2002) A qualitative examination of factors affecting reverse logistics systems for end-of-life computers. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 32, no. 6, pp. 455-479.
- Kumar V., Shirodkar P., Camelio J., Sutherland W., (2007) Value flow characterization during product lifecycle to assist in product decision. *International Journal of Production Research*, vol. 45, pp. 4555-4572.
- Lee H. M., Gay R., Lu W. F., Song B., (2007) The framework of information sharing in end-of-life for sustainable product development. *2006 IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN'06 - Singapour*, 16-18 Août, pp. 73-78.
- Lee S. G., Lye S. W., et Khoo M. K., (2001) A multi-objective methodology for evaluating product end-of-life options and disassembly. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 18, no. 2, pp. 148-156.
- Mathieux F., Froelich D., Moszkowicz P., (2008) ReSICLED : a new recovery-conscious design method for complex products based on a multicriteria assessment of the recoverability. *Journal of Cleaner Production*, vol. 16, pp. 227-298.
- Navin Chandra D., (1994) The recovery problem in product design. *Journal of Engineering Design*, vol. 5, no. 1, pp. 65-86.
- Önüt S., Soner S., (2008) Transshipment site selection using the AHP and TOPSIS approaches under fuzzy environment. *Waste Management*, vol. 28, no. 9, pp. 1552-1559.
- Parlikad A. K., McFarlane D. C., Fleisch E., Gross S., (2003) The Role of Product Identity. End-of-Life Decision Making, *Auto-ID Centre White Paper*.
- Powell J., (1996) The evaluation of waste management options. *Waste management & research*, vol. 14, no. 6, pp. 515.
- Rao R., Padmanabhan K., (2010) Selection of best product end-of-life scenario using digraph and matrix methods. *Journal of Engineering Design*, vol. 21, no. 4, pp. 455-472.
- Rose C. M., (2001) Design for environment: A method for formulating product end-of-life strategies. Ph.D., Stanford University, USA, Californie.
- Rose C. M., Ishii K., Masui K., (1998) How product characteristics determine end-of-life strategies. *Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, ISEE*, Oak Brook, IL, USA, 4-6 Mai, pp. 322-327.
- Rose C. M., Stevels A., Ishii K., (2000) A new approach to end-of-life design advisor (ELDA). *2000 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, October 8, October 10, San Francisco, CA, United states*, pp. 99-104.
- Salminen P., Hokkanen J., Lahdelma R., (1998) Comparing multicriteria methods in the context of environmental problems. *European Journal of Operational Research*, vol. 104, no. 3, pp. 485-496.
- Shih H., Shyr H., Lee E., (2007) An extension of TOPSIS for group decision making. *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 45, no. 7-8, pp. 801-813.
- Spath D., Hartel M., Tritsch C., (1996) Recycling-oriented information management: a prerequisite for life cycle engineering. *Journal of Engineering Design*, vol. 7, no. 3, pp. 251-264.
- Srivastava S., (2007) Green supply chain management: A state of the art literature review. *International Journal of Management Reviews*, vol. 9, no. 1, pp. 53-80.
- Sy M., Mascle C., (2009) Product design analysis based on life cycle features. *Journal of Engineering Design*, <http://dx.doi.org/10.1080/09544820903409899>.
- Takeuchi S., Saitou K., (2006) Design for optimal end-of-life scenario via product-embedded disassembly. *2006 ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information In Engineering Conference, DETC2006*, Philadelphie, PA, USA, 10-13 Septembre.
- Thierry M., Salomon M., Van Nunen J., Van Wassenhove L., (1995) Strategic issues in product recovery management. *California management review*, vol. 37, no. 2, pp. 115.
- Tonnelier P., Millet D., Richir S., Lecoq M., (2005) Is it possible to evaluate the recovery potential earlier in the design process? Proposal of a qualitative evaluation tool. *Journal of Engineering design*, vol. 16, no. 3, pp. 297-309.
- Vego G., Kucar-Dragicevic S., Koprivanac N., (2008) Application of multi-criteria decision-making on strategic municipal solid waste management in Dalmatia, Croatia. *Waste Management*, vol. 28, no. 11, pp. 2192-2201.
- Xing K., Abhary K., Luong L., (2003) IREDA: An Integrated Methodology for Product Recyclability and End-of-life Design. *The Journal of Sustainable Product Design*, vol. 3, no. 3, pp. 149-171.
- Xing K., Motevallian B., Luong L., Abhary K., (2003) A design strategy support tool for product reutilisation. *4th International DAAAM Symposium 'Intelligent Manufacturing and Automation: Focus on Reconstruction and Development'*, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina: DAAAM International, pp. 505-506.
- Yeh C., Deng H., Chang Y., (2000) Fuzzy multicriteria analysis for performance evaluation of bus companies. *European Journal of Operational Research*, vol. 126, no. 3, pp. 459-473.