

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MÉTHODE DE SÉLECTION ENVIRONNEMENTALE DES MATÉRIAUX POUR LA FIN
DE VIE DES PRODUITS PAR ÉVALUATION FLOUE

FABIEN DENEU

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)

OCTOBRE 2010

© Fabien Deneu, 2010.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

MÉTHODE DE SÉLECTION ENVIRONNEMENTALE DES MATÉRIAUX POUR LA FIN
DE VIE DES PRODUITS PAR ÉVALUATION FLOUE

présenté par : DENEU Fabien

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. BALAZINSKI Marek, Ph.D, président

M. MASCLE Christian, Doc. ès Sciences, membre et directeur de recherche

Mme BECAERT Valérie, Ph.D, membre

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche, M. Mascle pour le soutien financier qu'il m'a accordé, pour sa disponibilité et pour les conseils avisés qu'il m'a donné tout au long de cette Maitrise.

Je tiens aussi à remercier M. Balazinski et Mme Becaert d'avoir accepté d'être rapporteur de ce mémoire.

Merci aux différentes personnes avec qui j'ai pu partager quelques souvenirs dans le laboratoire : Florian, Thomas, Loic, Marie, Antoine, etc. Ainsi que toutes celles que j'ai pu oublier.

Je tiens à remercier tous mes proches, qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite dans ce travail de recherche.

RÉSUMÉ

Ce mémoire présente les travaux de recherche effectués dans le cadre de la Maitrise sur la sélection environnementale des matériaux pour la fin de vie des produits. La revue de littérature établit l'état de l'art dans le domaine de la sélection environnementale des matériaux. Nous abordons plusieurs sujets : les différentes méthodes de sélection environnementales existantes, les différents paramètres présentés dans la littérature et la validité de ces paramètres dans le cycle de vie des produits. Par la suite nous décrivons la méthode proposée qui permet de réaliser la sélection environnementale des matériaux en conception préliminaire. Cette méthode repose sur le traitement des données par logique floue. Elle personnalise l'évaluation des matériaux selon la fin de vie du produit étudiée. La logique floue est l'élément central de cette méthode car elle permet de traiter les données disponibles en conception préliminaire, chose difficile avec les méthodes numériques traditionnelles. Le traitement des données, par logique floue, est donc explicite et détaillé. Ensuite, nous présentons l'implémentation informatique de la méthode (logiciel ECMSPEOL) réalisée pendant la Maitrise qui met en application la méthode présentée précédemment. Les différentes opérations réalisées par ECMSPEOL et leur chronologie sont également détaillées. Pour finir, deux études de cas sont présentées pour vérifier la validité de la méthode. Ainsi, deux produits aux caractéristiques différentes (un vérin monostable et un ferme-porte) sont étudiés et les résultats (contenus en annexe) sont synthétisés. Finalement, nous concluons ce mémoire en proposant différentes pistes de recherches potentielles.

ABSTRACT

This Master thesis presents research conducted on the environmental selection of materials for product's end-of-life. The literature review establishes the state of art in the field of environmental material's selection. Several issues are studied: existing environmental materials selection methods, parameters and validity of these parameters in product's life cycle. Subsequently, we describe the proposed method which allows designer to select materials in preliminary design. This method is based on fuzzy logic data processing. The product's end-of-life personalizes material's assessment to select best materials for the studied product. Fuzzy logic is the core of proposed method: it allows processing of preliminary design's data, easier than the traditional numerical methods. Then, we present the computer implementation of the method (software ECMSPEOL) made during master's project. The various operations performed by ECMSPEOL are also detailed. Two case studies are presented to verify method's validity. Thus, two products with different characteristics (pneumatic cylinder and a door closer) are studied. Results (Annexe 5) are summarized and discussed. Finally, we conclude this paper by proposing different lines of potential research.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT	V
TABLE DES MATIÈRES	VI
LISTE DES TABLEAUX.....	X
LISTE DES FIGURES.....	XI
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XIV
LISTE DES ANNEXES.....	XV
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	4
1.1 Sélection des matériaux et développement de produit.....	4
1.2 Sélection environnementale des matériaux.....	6
1.2.1 Pensée cycle de vie.....	6
1.2.2 Méthodes de sélection environnementale des matériaux	13
1.3 Logique floue et sélection des matériaux	23
1.4 Conclusion.....	24
CHAPITRE 2 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE DE LA SÉLECTION DES MATÉRIAUX	26
2.1 Objectifs	26
2.2 Limitations	27
2.3 Cadre de la méthode.....	28
2.3.1 Traitement des informations.....	28
2.3.2 Contexte d'utilisation et contexte de sélection des matériaux	28

2.3.3	Fins de vie des produits considérées par la méthode	30
2.3.4	Adaptation aux données et aux situations rencontrées par le concepteur	32
2.3.5	Bilan	33
2.4	Évaluation des matériaux	34
2.4.1	Logique floue	34
2.5	Définition de la méthode d'évaluation environnementale des matériaux	37
2.5.1	Calcul de l'indice d'EOL-abilité de chaque propriété pour chaque matériau	39
2.5.2	Calcul de l'indice d'EOL-abilité global de chaque matériau	40
2.5.3	Classement des matériaux	40
2.5.4	Bilan	41
2.6	Propriétés évaluées	41
2.6.1	Choix des propriétés considérées par la méthode	42
2.6.2	Types de propriétés	43
2.6.3	Propriétés simples « Matériau »	43
2.6.4	Propriétés simples « Produit »	44
2.6.5	Propriétés circonstanciellelles « Matériau - Produit »	44
2.6.6	Propriétés circonstanciellelles « Matériau - Produit - Environnement »	45
2.6.7	Pondération des propriétés évaluées	45
2.7	Résultats de l'évaluation	46
CHAPITRE 3 PARAMÈTRES ET DONNÉES		47
3.1	Définitions des propriétés évaluées	47
3.1.1	Nombre de sous-ensembles flous des propriétés	47
3.1.2	Forme des sous-ensembles flous	47
3.1.3	Chevauchement des sous-ensembles	48

3.2	Présentation et caractéristiques des propriétés évaluées	49
3.2.1	Résistance à la corrosion	49
3.2.2	Recyclabilité.....	51
3.2.3	Dégradabilité	52
3.2.4	Uniformité du matériau dans le composant.....	53
3.2.5	Diversité des matériaux	55
3.2.6	Marquage des composants	57
3.2.7	Compatibilité de recyclage des matériaux	58
3.2.8	Capacité de triage des matériaux.....	60
3.2.9	Durabilité du matériau.....	61
3.3	Bilan	63
CHAPITRE 4 IMPLÉMENTATION INFORMATIQUE DE LA MÉTHODE		65
4.1	Cahier des charges fonctionnel du logiciel	65
4.1.1	Interacteurs	66
4.1.2	Fonctions remplies par le logiciel	67
4.1.3	Bilan	68
4.2	Moyens techniques mis en œuvre	69
4.2.1	Langage de programmation.....	69
4.2.2	Génération d'un compte rendu de sélection des matériaux.....	70
4.2.3	Paramétrage du logiciel par fichier externe.....	70
4.3	Présentation du programme ECMSPEOL.....	71
4.3.1	Fonctionnement du logiciel.....	71
4.3.2	Interface graphique.....	74
4.3.3	Bilan	80

CHAPITRE 5	ÉTUDES DE CAS	82
5.1	Objectifs des études de cas	82
5.2	Présentation des produits étudiés	83
5.2.1	Vérin monostable	83
5.2.2	Ferme-porte	84
5.3	Principe des études de cas	86
5.3.1	Principe.....	86
5.3.2	Conditions initiales des études de cas	87
5.4	Résultats des études de cas.....	91
5.4.1	Influence de la fin de vie sur l'évaluation des matériaux par ECMSPEOL.....	91
5.4.2	Influence de la fin de vie sur l'attribution des matériaux.....	94
5.4.3	Aptitude de ECMSPEOL à être utilisé en condition réelle.....	96
5.5	Discussions.....	98
CONCLUSION	100
BIBLIOGRAPHIE	102
ANNEXES	109

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Les différentes formes des données utilisées	41
Tableau 2.2 : Origines et étendue des propriétés évaluées.....	42
Tableau 2.3 : Les propriétés simples « Matériau » et leurs champs d'application	43
Tableau 2.4 : Les propriétés simples « Produit » et leurs champs d'application	44
Tableau 2.5 : Les propriétés circonstanciellelles « Matériau-Produit » et leurs champs d'application	45
Tableau 2.6 : La propriété circonstancielle « Matériau-Produit-Environnement » et son champ d'application.....	45
Tableau 27 : Classement des matériaux selon leur EOL-abilité	46
Tableau 3.1 : Table d'évaluation de l'uniformité du matériau dans le composant	54
Tableau 3.2 : Table d'évaluation du marquage des composants.....	57
Tableau 3.3 : Table d'évaluation de la durabilité d'un matériau pour un composant.....	62
Tableau 3.4 : Caractéristiques des différentes propriétés.....	63
Tableau 4.3 : Chronologie des tâches effectuées par ECMSPEOL	81
Tableau 5.1 : Attribution des matériaux du vérin.....	83
Tableau 5.2 : Nomenclature du ferme-porte	85
Tableau 5.3 : Valeur de la durabilité entrée dans ECMSPEOL pour le vérin.....	89
Tableau 5.4 : Valeur de l'uniformité entrée dans ECMSPEOL pour le vérin	89
Tableau 5.5 : Valeur de la durabilité entrée dans ECMSPEOL pour le ferme-porte	90
Tableau 5.6 : Valeur de l'uniformité entrée dans ECMSPEOL pour le ferme-porte.....	91
Tableau 5.7 : Nombre de choix de niveau des paramètres à réaliser selon la fin de vie du produit	97

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Les besoins d'informations sur les matériaux durant le processus de conception	5
Figure 1.2 : Les relations entre le cycle de vie du produit et le cycle de vie du matériau.	6
Figure 1.3 : Les différentes fins de vie possibles pour un produit	10
Figure 1.4 : Philosophies de conception et cycle de vie du produit	13
Figure 1.5 : Les phase(s) du cycle de vie concernée(s) par les règles de sélection environnementale des matériaux	15
Figure 1.6 : Graphe d'Ashby de sélection des matériaux	20
Figure 1.7 : Diagramme ternaire des performances des matériaux St-1, St-2, St-3.....	22
Figure 1.8 : Domaine de validité des méthodes par rapport aux phases du cycle de vie d'un produit	25
Figure 2.1 : Les données « produit » à prendre en compte pour la sélection des matériaux.....	29
Figure 2.2 : Contexte d'utilisation et sélection des matériaux	30
Figure 2.3 : Cadre général de la méthode de sélection environnementale des matériaux.....	33
Figure 2.4 : Représentation de différentes formes de fonctions d'appartenance	36
Figure 2.5 : Chronologie de l'évaluation de plusieurs matériaux	38
Figure 3.2 : Fonctions d'appartenance typiques utilisée pour la méthode proposée.....	49
Figure 3.1 : Représentation graphique de la fonction d'appartenance de la résistance à la corrosion.....	50
Figure 3.2 : Représentation graphique de la fonction d'appartenance de la recyclabilité	52
Figure 3.3 : Représentation graphique de la fonction d'appartenance de la dégradabilité	53
Figure 3.4 : Représentation graphique de la fonction d'appartenance de l'uniformité du matériau dans le composant	55
Figure 3.5 : Représentation graphique de la fonction d'appartenance de la diversité des matériaux	56

Figure 3.6 : Représentation graphique de la fonction d'appartenance du marquage des composants	58
Figure 3.7 : Représentation graphique de la fonction d'appartenance de la compatibilité de recyclage.....	59
Figure 3.8 : Représentation graphique de la fonction d'appartenance de la capacité de triage des matériaux	60
Figure 3.9 : Représentation graphique de la fonction d'appartenance de la durabilité du matériau	63
Figure 4.1 : Expression du besoin du logiciel de sélection des matériaux.....	65
Figure 4.2 : Diagramme des interacteurs du logiciel de sélection des matériaux	69
Figure 4.3 : Diagramme des actions réalisées par ECMSPEOL.....	73
Figure 4.4 : Organigramme des différentes vues et boites de dialogue d'ECMSPEOL	75
Figure 4.5 : Entrée des informations relatives au produit dans ECMSPEOL.....	76
Figure 4.6 : Entrée des informations relatives aux composants dans ECMSPEOL.....	76
Figure 4.7 : Sélection du composant dont le matériau doit être choisi dans ECMSPEOL	77
Figure 4.8 : Renseignement de la valeur des propriétés dans ECMSPEOL	77
Figure 4.9 : Les différentes versions de la vue permettant d'attribuer une valeur aux propriétés .	78
Figure 4.10 : Sélection finale du matériau parmi le panel de matériaux évalué dans ECMSPEOL	79
Figure 4.11 : Possibilités du logiciel après la sélection du matériau du premier composant.....	80
Figure 5.1 : Vérin monostable étudié.....	83
Figure 5.2 : Ferme-porte étudié.....	84
Figure 5.3 : Arbre des possibilités des études de cas	87
Figure 5.4 : Principe de calcul de la divergence de classement	92
Figure 5.5 : Évolution du classement des matériaux selon la fin de vie pour chaque composant du vérin.....	93

Figure 5.6 : Évolution du classement des matériaux selon la fin de vie pour les composants typiques du ferme-porte	93
Figure 5.7 : Principe d'évaluation de la divergence d'attribution des matériaux	95
Figure 5.8 : Influence de la fin de vie du produit sur l'attribution des matériaux.....	96
Figure 5.9 : Évolution du nombre d'informations à entrer pour sélectionner le matériau d'un composant.....	98

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ACV	Analyse du Cycle de Vie
ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie
ASTM	American Society for Testing and Material
CMED	Commission mondiale sur l'Environnement et le Développement
DFD	Design For Disassembly
DFDis	Design For Disposal
DFE	Design For Environment
DFR	Design For Recycling
DFRem	Design For Remanufacturing
DFReu	Design For Reusing
ECD	Environmental Conscious Design
EEA	European Environment Agency
ELDA	End-of-Life Design Advisor
ECMSPEOL	Environmental and Contextual Materials Selector for Products End-Of-Life
EOL-abilité	End-Of-Life-abilité
EPA	Environment Protection Agency
FC	Fonction Contrainte
FP	Fonction Principale
NACE	National Association of Corrosion Engineers
ONU	Organisation des Nations Unies
PEOLSP	Product End-Of-Life Support Planification
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
REPA	Resources and Environmental Profile Analysis
SETAC	Society for Environmental Toxicology and Chemistry

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : Dégradabilité des matériaux	109
ANNEXE 2 : Compatibilité de recyclage des matériaux	111
ANNEXE 3 : Évaluation de la capacité de triage des matériaux	113
ANNEXE 4 : Paramétrage du logiciel pour les essais	122
ANNEXE 5 : Résultats des études de cas	124

INTRODUCTION

Le 20^{ème} siècle a été une période de développement sans précédent pour l'humanité. Les sciences et les techniques se sont imposées jusqu'à être omniprésentes dans les produits que nous utilisons quotidiennement. Cette démocratisation a permis l'émergence de nouveaux modes de consommation des produits : consommation de masse, consommation frénétique, etc. Ces derniers ont décuplés les effets indésirables de l'industrie sur l'environnement : épuisement de ressources non-renouvelables, contamination des sols et de l'air, génération de pluies acides, etc. La pollution de l'environnement a augmenté de manière vertigineuse au cours du 20^{ème} siècle. Pour illustration : en 2007, plus de 372 millions de produits électroniques, représentant plus de 2,25 millions de tonnes de déchets, ont été déclarés en fin de vie uniquement au sein des États-Unis d'Amérique. Sur cette quantité seulement 18,4% ont été recyclés [1]. Cela laisse tout de même plus de 300 millions de produits enfouis dans les décharges des États-Unis.

Afin de comprendre et d'analyser les conséquences du développement industriel, plusieurs études et conférences ont menées. En 1968, le Club de Rome, organisation non-gouvernementale reliée au MIT, commanda un rapport sur les conséquences du développement industriel et de la croissance démographique mondiale sur les ressources et la pollution de l'environnement. Ce rapport soulignait déjà les conséquences désastreuses des activités humaines sur l'écosystème de notre planète. En 1972, l'ONU réunit 113 pays pour la conférence des Nations Unies sur l'Environnement Humain à Stockholm. En 1987, le rapport Brundtland [2], portant sur l'état du développement et de l'environnement mondial est remis à son commanditaire, la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement. L'expression « développement durable » apparaît pour la première fois dans ce rapport officiel. En 1992, la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement a lieu à Rio de Janeiro. De cette conférence émerge notamment le protocole de Kyoto.

Toutes ces conférences et rapports ont mis en évidence le manque de considération des impacts environnementaux produits par les activités humaines. Pour permettre la mise en place d'actions politiques plusieurs organismes ont été créés au niveau international et national. Le PNUE (Programme des Nations Unies pour l'environnement) a été créé le 15 décembre 1972 à la suite de la conférence des Nations Unies sur l'Environnement Humain. En 1983, la création de la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement (CMED) est officialisée par

l'assemblée Générale des Nations Unies. La commission européenne a initié, en 1972, les premières actions environnementales communautaires après avoir reçu des responsabilités élargies à la suite de la conférence de Paris du 19 au 21 novembre 1972. L'EPA (Environmental Protection Agency) a été créée aux États-Unis d'Amérique en 1970 pour protéger et étudier la santé des citoyens des États-Unis. La législation sur l'environnement a commencé au milieu des années 1970. Les contraintes sur l'industrie sont devenues de plus en plus fortes, les obligeant dans le même temps à modifier leurs habitudes les plus néfastes pour l'environnement. Le cycle de vie est alors devenu le maître mot pour gérer les impacts environnementaux des produits. Pour pouvoir mieux les maîtriser et à moindre coût, plusieurs méthodologies de conception ont été créées : Design for Recycle, Design for Remanufacture, Design for Disposal, etc. Le Design for Environment a émergé au début des années 1990 par un programme de l'EPA nommé Design for the Environment.

Dans ce contexte, la sélection des matériaux a été une des premières préoccupations des législateurs et par conséquent des industriels. L'interdiction d'utilisation d'un nombre important de substances toxiques et dangereuses a permis de diminuer l'impact environnemental des produits. Par la suite, l'analyse du cycle de vie s'est imposée comme l'outil principal de sélection environnementale des matériaux. Cet outil est très fiable et efficace pour sélectionner les matériaux les plus respectueux de l'environnement en réalisant l'inventaire de leur cycle de vie. Cependant, nous constatons que les méthodes de sélection des matériaux ne prennent pas en compte le contexte d'utilisation du matériau. Ce contexte d'utilisation est composé :

- du produit dans lequel le matériau sera intégré;
- de l'environnement général du produit.

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire porte sur la sélection environnementale des matériaux dans leur contexte d'utilisation. La question de recherche est :

La prise en compte du contexte d'utilisation du matériau modifie-t-elle la sélection environnementale d'un matériau?

Les objectifs de notre recherche sont les suivants :

- Identifier les propriétés caractérisant le contexte d'utilisation du matériau pour assurer la sélection environnementale;

- Identifier les propriétés du matériau permettant d'assurer la sélection environnementale;
- Créer une méthode d'évaluation des propriétés matériaux et des propriétés du contexte d'utilisation pour réaliser la sélection environnementale des matériaux;
- Réaliser un programme informatique opérationnel permettant d'appliquer cette méthode;
- Confirmer ou infirmer l'apport d'une méthode de sélection de ce type par rapport aux méthodes existantes.

Le mémoire ci-présent, est structuré de la manière suivante :

- Le chapitre 1 présente la revue de littérature effectuée dans le cadre du travail de recherche présenté ici. Il aborde la sélection environnementale des matériaux, les différentes méthodes de conception existantes pour la fin de vie et les processus d'évaluation des matériaux présents dans la littérature;
- Le chapitre 2 expose les objectifs, les limitations de notre méthode ainsi que le cadre général de la méthode de sélection environnementale des matériaux. Puis, le processus d'évaluation choisi et son application pour notre méthode de sélection environnementale des matériaux sont décrits. Les propriétés évaluées sont également abordées;
- Le chapitre 3 présente les données relatives aux propriétés ainsi que leur caractérisation dans la méthode de sélection ;
- Le chapitre 4 expose l'implémentation de la méthode dans le programme informatique créé au cours du projet de recherche. Les objectifs de cette implémentation sont annoncés, les moyens mobilisés pour les remplir également. Nous présentons le logiciel de sélection environnementale des matériaux ECMSPEOL;
- Le chapitre 5 présente deux études de cas réalisées sur deux produits différents. Une interprétation des résultats est suivie par une discussion sur l'apport de la méthode au processus de sélection des matériaux.

Enfin nous terminerons par la conclusion de ce mémoire.

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre a pour but principal de rendre compte de l'état de l'art dans le domaine de la sélection environnementale des matériaux. Premièrement, nous explorerons la sélection des matériaux d'une manière générale. Nous abordons son intégration dans le développement de produit. Ensuite, nous nous concentrerons sur la pensée cycle de vie et la sélection environnementale. Les différentes méthodes permettant de la réaliser sont mentionnées. Enfin, nous exposerons l'état de l'art de la sélection des matériaux par logique floue.

1.1 Sélection des matériaux et développement de produit

La sélection des matériaux est une tâche critique du développement d'un produit où la matière devient le support des idées du concepteur. La sélection est non triviale car elle doit répondre à plusieurs catégories de besoins [3] :

- Physiques : résistance mécanique, conductivité électrique, isolation thermique, etc.;
- Métaphysiques : esthétisme, toucher agréable, etc.;
- Économiques : coût d'achat, coût de retraitement en fin de vie, etc.;
- Environnementaux : épuisement des ressources naturelles, toxicité, etc.

Le concepteur doit considérer et évaluer un nombre important de propriétés pour faire son choix parmi un panel de matériaux disponibles [4]. Ce panel croit constamment aussi bien en type qu'en nombre. Roth le soulignait déjà en 1994 [5] et l'émergence des matériaux nano-renforcés, des bio-polymères au cours de la dernière décennie conforte la tendance observée. Selon Ljungberg [6], plus de 100 000 matériaux sont actuellement commercialisés.

Karana [7] définit la sélection des matériaux comme un compromis entre les avantages et les inconvénients des matériaux. En effet le nombre de propriétés à prendre en compte pour réaliser la sélection des matériaux empêche, dans la plupart des cas, l'émergence d'une solution idéale sous la forme d'un matériau. Le compromis de sélection est réalisé par un concepteur ou une équipe de sélection et plusieurs remarques peuvent être effectuées. Selon Edwards [8] :

- L'expérience des concepteurs combinée avec une connaissance des résultats antérieurs est très néfaste pour la précision de la sélection;

- Les concepteurs novices ont besoin d'outils et de données disponibles pour appuyer la sélection des matériaux.

L'intégration de la sélection environnementale des matériaux dans le développement des produits est un autre aspect à étudier car il s'agit du contexte d'utilisation réel. Nous pouvons souligner que la sélection des matériaux est réalisée séquentiellement en parallèle des phases de conception. Selon Ashby [9], nous pouvons identifier trois phases :

- Le « concept design » où le concepteur a besoin de données sur tous les matériaux avec peu de précisions pour sélectionner un ensemble de matériaux;
- Le « embodiment design » où le concepteur a besoin de données pour un sous-ensemble de matériaux seulement. Les données doivent être plus précises pour permettre la sélection du matériau;
- Et enfin le « detail design » où le matériau est d'or et déjà sélectionné, le besoin d'information porte sur un seul matériau. Les informations doivent alors être très précises.

La figure 1.1 illustre ces différentes phases :

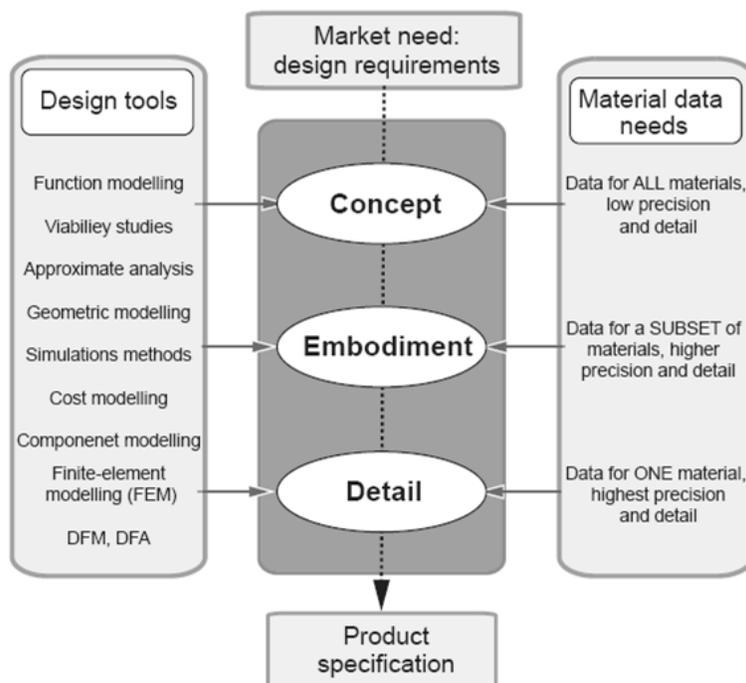


Figure 1.1 : Les besoins d'informations sur les matériaux durant le processus de conception, [9]

1.2 Sélection environnementale des matériaux

1.2.1 Pensée cycle de vie

1.2.1.1 Cycle de vie matériau et cycle de vie produit

La conscientisation des autorités, des industriels et des consommateurs a permis à la réduction des impacts environnementaux de devenir un objectif de premier plan lors de la sélection des matériaux. En effet, les matériaux interviennent dans la majeure partie du cycle de vie du produit : de la fabrication à la fin de vie. Ils produisent, par ce biais, des impacts environnementaux significatifs [10] modifiant l’empreinte environnementale totale du produit. La figure 1.2, adapté de [11], présente les relations entre les cycles de vie des produits et des matériaux.

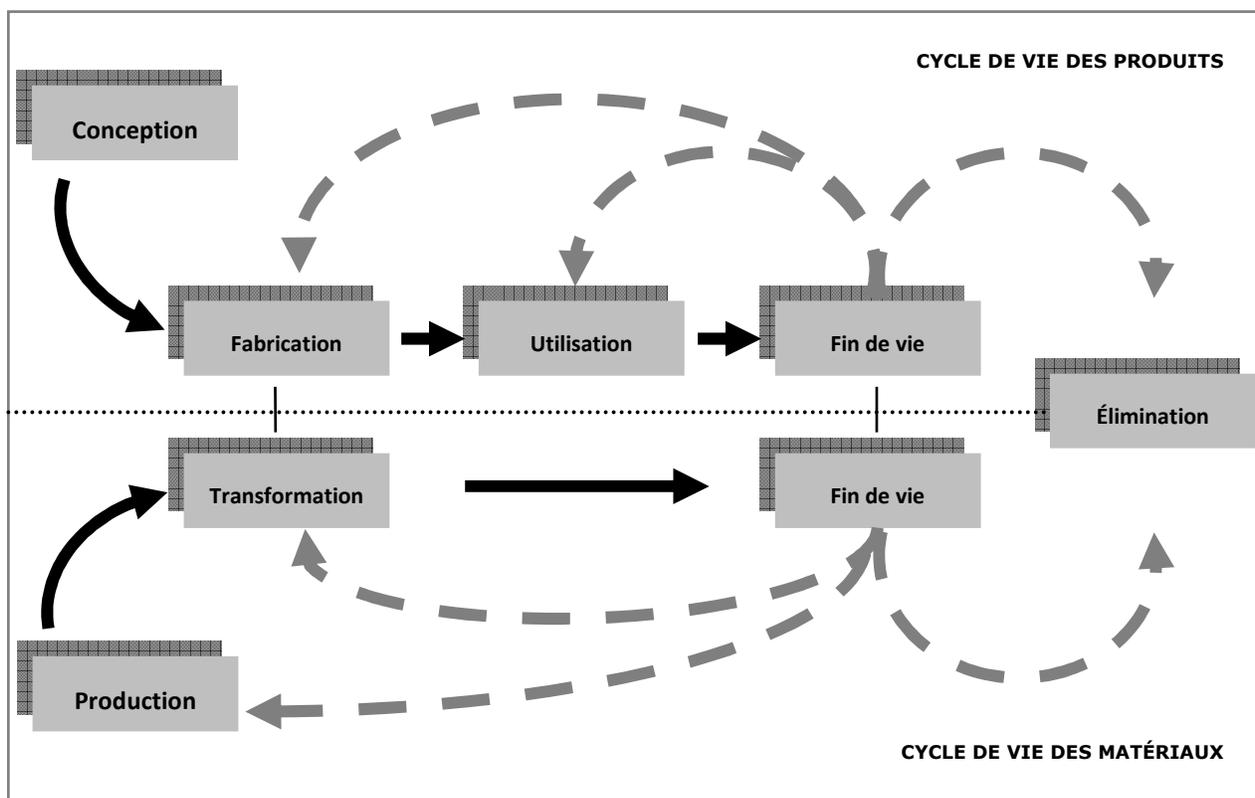


Figure 1.2 : Les relations entre le cycle de vie du produit et le cycle de vie du matériau.

La pensée cycle de vie s’est donc imposée dans les années 1990, comme un moyen de réduire les impacts environnementaux des produits [12, 13]. Elle est même désignée comme « l’essence de l’écologie supérieure et du développement de produit durable » par Behrendt [14].

1.2.1.2 Les nombreuses fins de vie possibles

La pensée cycle de vie a permis aux fins de vie des produits d'être enfin considérées comme des phases réelles du cycle de vie du produit. Les produits en fin de vie sont ambivalents : ils peuvent être une source d'impacts environnementaux non négligeables et ils sont également une source de richesse non exploitée lorsque la fin de vie n'est pas considérée [15]. De plus la fin de vie d'un produit peut être réellement différentes, elle donne au produit des possibilités de traitement très différentes : Élimination (Disposal), Recyclage (Recycle), Refabrication (Remanufacture), Réutilisation (Reuse), etc. Ces fins de vie générales possèdent elles-mêmes différentes variantes. Après avoir étudié la littérature sur le sujet nous pouvons énumérer les fins de vie suivante (d'après Ishii [16], Stevels [17], Rose [18], Low [19], Staffiere [20], Lee [21] et Xing [22]) :

- Upgrading – Mise à jour : Évolution du produit et/ou de ses composants pour lui permettre d'être utilisé pendant plusieurs cycles de vie;
- Reusing-Réutilisation : Réutilisation du produit, de l'un de ses sous-assemblages ou de l'un de ses composants dans une deuxième utilisation identique à la première;
- Service-Maintenance : Extension de la vie du produit en réparant ou en reconstruisant le produit avec des pièces viables sur le même lieu que son lieu d'utilisation [18];
- Refurbishing-Reconditionnement : Remise sur le marché de seconde main, d'une pièce reconditionnée et nettoyée [21];
- Remanufacturing Refabrication : Démantèlement d'un produit avec réparation(s) et nettoyage(s) s'il y a lieu de ses composants pour réutilisation des composants dans un nouveau produit. Cette stratégie de fin de vie nécessite une similarité des produits assez importante ainsi qu'un traitement centralisé des produits en fin de vie pour permettre sa mise en place;
- Recycling-Recyclage : Plusieurs types de recyclage sont définis. Rose [18] distingue deux types de recyclage : le recyclage avec désassemblage et le recyclage sans désassemblage. Stevels [17] distingue plusieurs niveaux de recyclage. Le recyclage primaire qui permet une utilisation identique du matériau. Le recyclage secondaire qui permet seulement une utilisation du matériau avec des exigences inférieures à sa première utilisation. Le recyclage tertiaire qui permet une utilisation des éléments de base du matériau dans la

production d'un nouveau matériau. Il est à noter que cette classification de recyclage est très nettement orientée vers le recyclage des matières plastiques;

- Incinération : Plusieurs types d'incinération sont identifiés : Incinération avec récupération ou non d'énergie, incinération avec traitement ou non des gaz créés, incinération de matériaux recyclables ou non;
- Disposal – Mise au rebut : Les produits, sous-assemblages ou composants sont définitivement mis au rebut, stockés en décharge avec ou sans traitement antérieur.

La figure 1.3 illustre la hiérarchie des différentes fins de vie et précise les deux traitements possibles des matériaux :

- Récupération, le matériau est récupéré en fin de vie par le producteur, le collecteur. Il peut être totalement transformé dans le cas du recyclage, ou le matériau peut être modifié seulement en surface sans changement important de la structure du composant (reconditionnement, refabrication, maintenance et réutilisation).
- Élimination : le matériau n'existe plus en tant que tel, il n'est pas possible de le réintégrer dans le cycle de vie d'un produit.

La conception des produits conditionne le comportement des produits dans les différentes étapes de leurs cycles de vie, elle permet d'influencer, d'améliorer ce comportement [23, 24]. Ainsi, plusieurs méthodes de planification de la fin de vie ont été créées pour connaître la fin de vie probable du produit et donc de concevoir les produits en leur donnant les caractéristiques leurs permettant d'avoir un bon comportement dans cette fin de vie. La littérature comporte plusieurs méthodes permettant de réaliser cette planification.

- Rose a créé en 2002, une méthode nommée « End-of-Life Design Advisor » (ELDA) en 2002 [25]. Cette méthode repose sur une analyse statistique des fins de vie de différents produits permettant de mettre en place les relations entre différents paramètres cités ci-dessous. Ces paramètres sont au nombre de cinq : Wear-Out Life, Technologie Cycle, Level of Integration of Functions, Number of parts, Reason for Redesign. Six fins de vie sont envisageables pour le produit : Reuse, Service, Remanufacturing, Recycle with disassembly, Recycle without disassembly, Disposal.

- Xing simplifie la méthode de Rose et crée PEOLSP [26]. Dans cette méthode seuls quatre paramètres sont retenus pour assurer le choix de la stratégie de fin de vie : Wear-Out Life, Technology Cycle, Reason for Redesign et Function Integration Level. Trois fins de vie sont alors possibles : Reuse, Remanufacturing et Recovery.
- Hulla [27] a mis en place une méthode de planification de la fin de vie par algorithme génétique. Le principe de la méthode repose sur le choix du meilleur compromis entre les impacts environnementaux et les différentes fins de vie du produit.

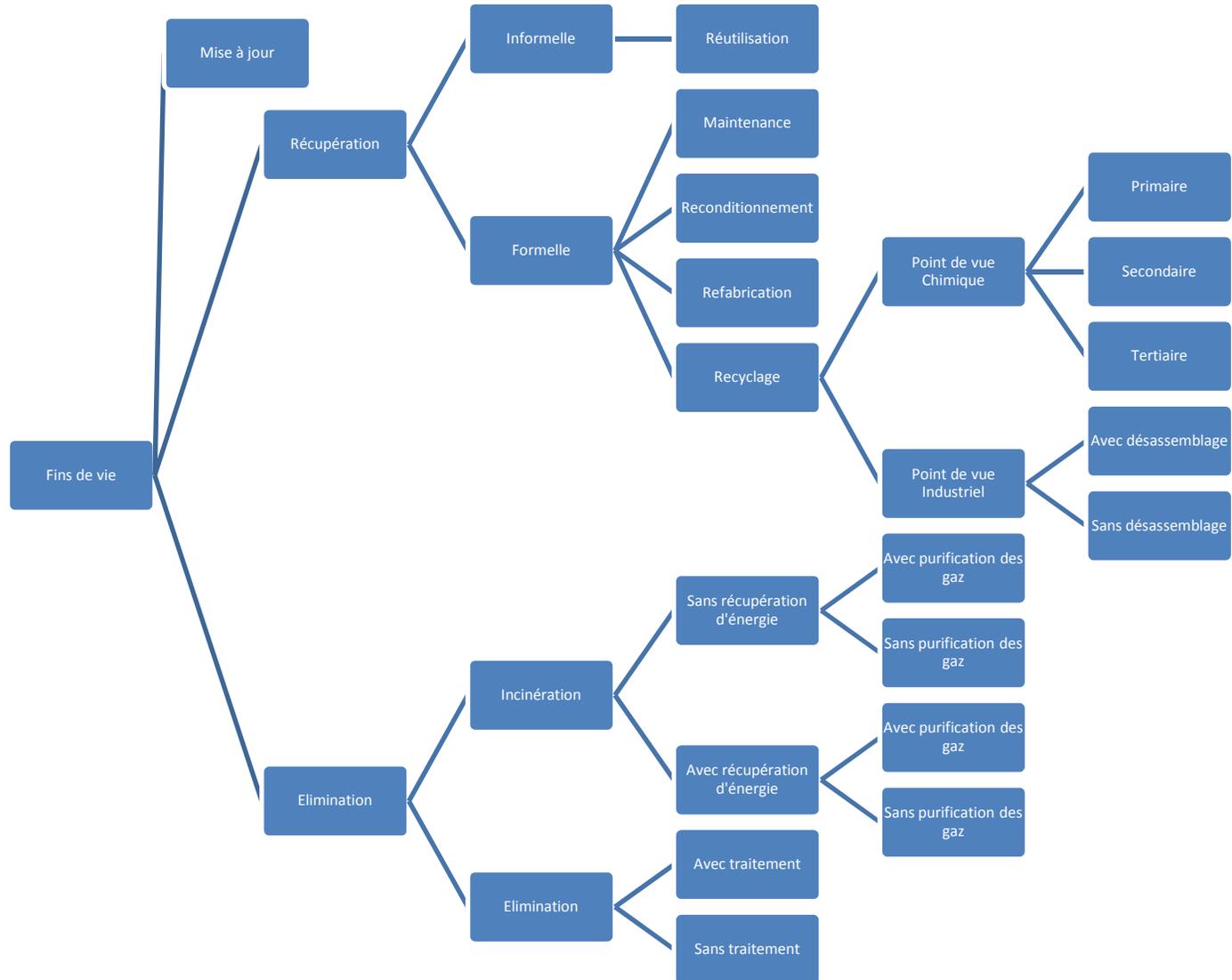


Figure 1.3 : Les différentes fins de vie possibles pour un produit

1.2.1.3 Les méthodes de conception de la pensée cycle de vie

A la suite de l'écllosion de la pensée cycle de vie, plusieurs philosophies de conception sont apparues : Life Cycle Design (LCD), Eco-Design, Design for Recycle (DFR), Design for Remanufacture (DFRem), Design for Reuse (DFReu), Design for Disposal (DFDisp), Design for Disassembly (DFD), Design for Environnement (DFE), Environnementally Conscious Design (ECD), etc.

Ces philosophies de conception traitent l'intégralité ou une partie seulement du cycle de vie du produit. Nous les décrivons dans la suite de ce document pour bien comprendre les motivations de chacune :

- Design For Disposal : cette philosophie de conception traite de la conception des produits pour une des fins de vie possibles : leur élimination. Elle s'est d'abord concentrée sur les applications spécifiques comme l'élimination des matériaux à grande profondeur et le stockage de matériaux spéciaux (munitions, déchets nucléaires, etc) [28], [29]. Avec l'émergence de la pensée cycle de vie, l'élimination des matériaux a été étudiée de pair avec la conception des produits et les propriétés essentielles étudiées sont la dégradabilité et la toxicité des matériaux [14], [30]. Mais les griefs à l'encontre de cette stratégie de fin de vie ont été très vite formulés. Constance [31] recense les avis de plusieurs responsables d'entreprises et formule clairement dès 1992, que la solution du recyclage est préférable à l'élimination des produits.
- Design For Recycle : la conception pour le recyclage est apparue au début des années 1990. L'élimination des déchets montrait réellement ses limites et les chercheurs ont commencé à intégrer les contraintes de cette fin de vie dans la conception des produits. L'élément principalement considéré dans cette méthode de conception est le choix des matériaux. Ce type de conception a été traité largement dans la littérature car le design for recycle était la solution aux problèmes d'élimination des déchets observés à la fin des années 1980.

Même si le design for recycle a été une grande avancé dans l'intégration des contraintes des fins de vie dès la conception du produit, d'autres méthode de recherche ont vu le jour pour réduire encore plus les impacts environnementaux.

Design For Remanufacture : La conception pour la refabrication a pour but de simplifier les processus de refabrication. Pour cela cette méthode s'intéresse aux composants (forme, traitement, matière) et aux liaisons entre composants. L'idée principale est que les produits, les composants n'ont pas forcément la nécessité d'être détruits pour l'unique récupération de leur matériau. Pour cela, les chercheurs ont étudiés les caractéristiques des produits permettant à un composant d'être réutilisé après des opérations de refabrication.

- Design For Disassembly : La conception pour le désassemblage est une méthode transversale permettant d'assurer le bon suivi de différentes fins de vie : réutilisation, refabrication et recyclage. Comme son nom le suggère, cette méthode se concentre sur les attachements, les liaisons entre pièces au sein d'un produit. les matériaux restent très peu traités dans cette méthode de conception.
- Design For Reuse : Il s'agit d'une conception assurant le recyclage ultime comme les auteurs aiment la surnommée. En fait, il s'agit de recyclage de composant et de produit et nom de matériau comme dans le Design for Recycle. Cette méthode de conception traite principalement des attachements et liaisons entre pièces mais les matériaux sont aussi considérés.
- DFE, Eco-Design, LCD et ECD : Ces méthodes de conception sont applicables à l'ensemble du cycle de vie. Elles regroupent les principales propositions des méthodes détaillées et elles y ajoutent d'autres consignes très générales appliquées à l'ensemble du cycle de vie du produit.

La figure 1.4 illustre les champs d'application de ces méthodes dans le cycle de vie du produit.

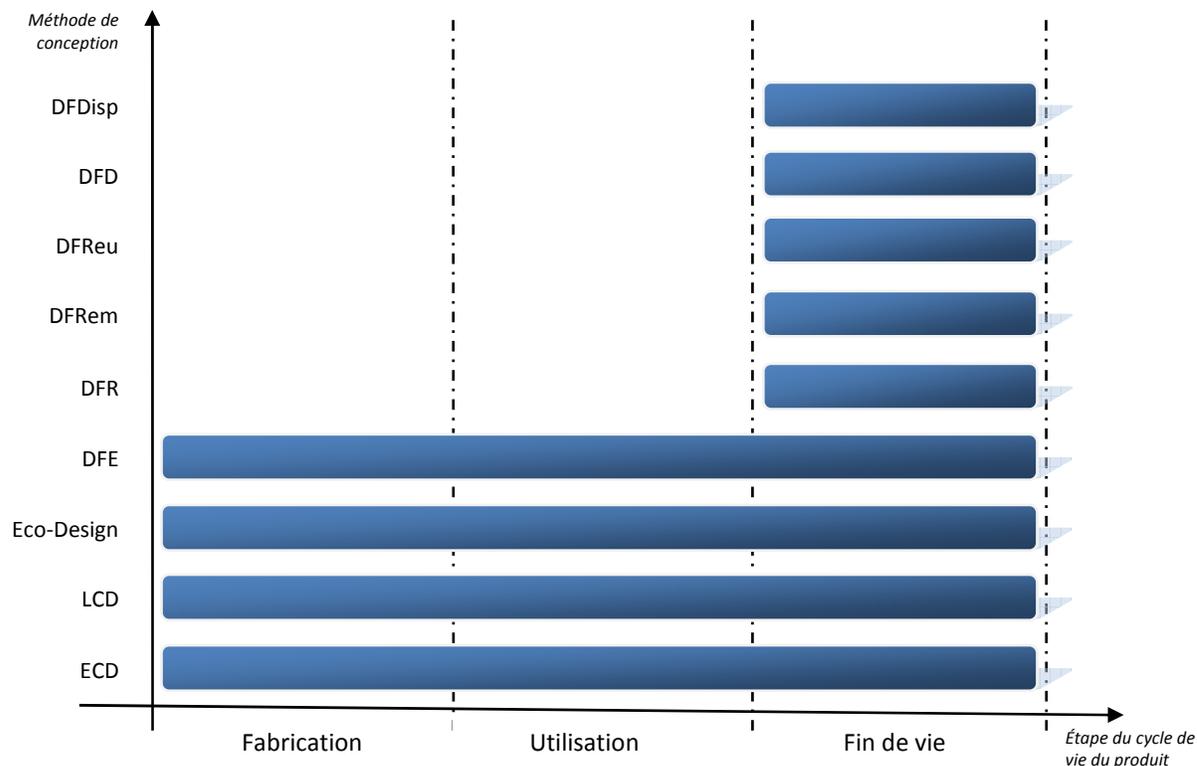


Figure 1.4 : Philosophies de conception et cycle de vie du produit

1.2.2 Méthodes de sélection environnementale des matériaux

La pensée cycle de vie et les méthodes de conception pour le cycle de vie ont fixé un objectif qui est de minimiser les impacts environnementaux tout au long du cycle de vie du produit. Cependant, il ne s'agit que d'une « déclaration d'intention », des outils ont dû être créés pour permettre l'application de ces intentions.

Les méthodes et outils de sélection pour réaliser la sélection environnementale sont très nombreux. Plus de vingt années sont passées depuis l'émergence de la conception écologique. Nous exposons dans la suite de ce chapitre une synthèse des méthodes et outils permettant de réaliser une sélection des matériaux plus respectueuse de l'environnement. L'étude de la littérature a permis de synthétiser ces méthodes et outils en trois catégories :

- Les règles de conception;
- L'analyse du cycle de vie;
- Les méthodes multicritères.

1.2.2.1 Les règles de sélection

Les règles de sélection sont le premier type de méthode générée sur un sujet de recherche. Elles offrent une grande adaptabilité et permettent donc au concepteur de les utiliser dans la plupart des situations qu'ils rencontrent.

L'étude de la littérature nous a permis d'identifier 16 règles de sélection pour le cycle de vie :

- Règle n°1 : Minimiser la toxicité des matériaux [30, 32-39]. Cette règle est la règle la plus présente dans la littérature et la plus détaillée. Lin [38] présente une étude plus avancée que les autres auteurs. La dissociation des différents types de toxicité est exposée, de même que la législation régulant la toxicité des substances et des produits.
- Règle n°2 : Maximiser l'utilisation des matériaux qui demandent une faible consommation d'énergie pour leur production [34, 35, 37-40].
- Règle n°3 : Maximiser l'utilisation des matériaux provenant de ressources renouvelables [14, 35, 38].
- Règle n°4 : Maximiser l'utilisation des matériaux composés de matière recyclée [32, 35, 39, 40].
- Règle n°5 : Minimiser la quantité de matériaux utilisés dans les produits [32, 35, 39].
- Règle n°6 : Maximiser l'utilisation de matériaux recyclables [11, 14, 30, 32-36, 38, 39].
- Règle n°7 : Maximiser l'utilisation de matériaux compatibles pour le recyclage [11, 14, 30, 32-36, 38, 39].
- Règle n°8 : Minimiser la diversité des colorants présents dans les matériaux [34, 37].
- Règle n°9 : Maximiser l'utilisation de peintures et de revêtements sur les matériaux pour les produits qui ont une fin de vie de type « Remanufacture » [40].
- Règle n°10 : Minimiser l'utilisation de peintures et de revêtements sur les matériaux pour les produits qui ont une fin de vie de type « Recycle » [34, 35].
- Règle n°11 : Minimiser la compositivité des matériaux dans un composant [34, 35]. Cette règle a pour but de diminuer l'utilisation de composant bi-matériaux, l'ajout d'inserts, etc.

- Règle n°12 : Maximiser le marquage des composants pour l'identification des matériaux [14, 32, 34, 35, 37].
- Règle n°13 : Minimiser la diversité des matériaux dans le produit [14, 32, 34, 35, 37, 39, 41].
- Règle n°14 : Optimiser la durabilité du matériau par rapport à la fin de vie [34, 36].
- Règle n°15 : Maximiser la résistance à la corrosion des matériaux [32, 35, 36].
- Règle n°16 : Maximiser la dégradabilité des matériaux [14, 30, 32, 33, 35].

Nous remarquons la présence de plusieurs catégories dans les règles de sélection relevées dans la littérature :

- Les règles impliquées dans l'intégralité du cycle de vie du produit (règle 1 à 5);
- Les règles impliquées dans une ou plusieurs étapes précises du cycle de vie (règle 6 à 16).

La figure 1.5 illustre le champ d'application des règles dans le cycle de vie du produit.

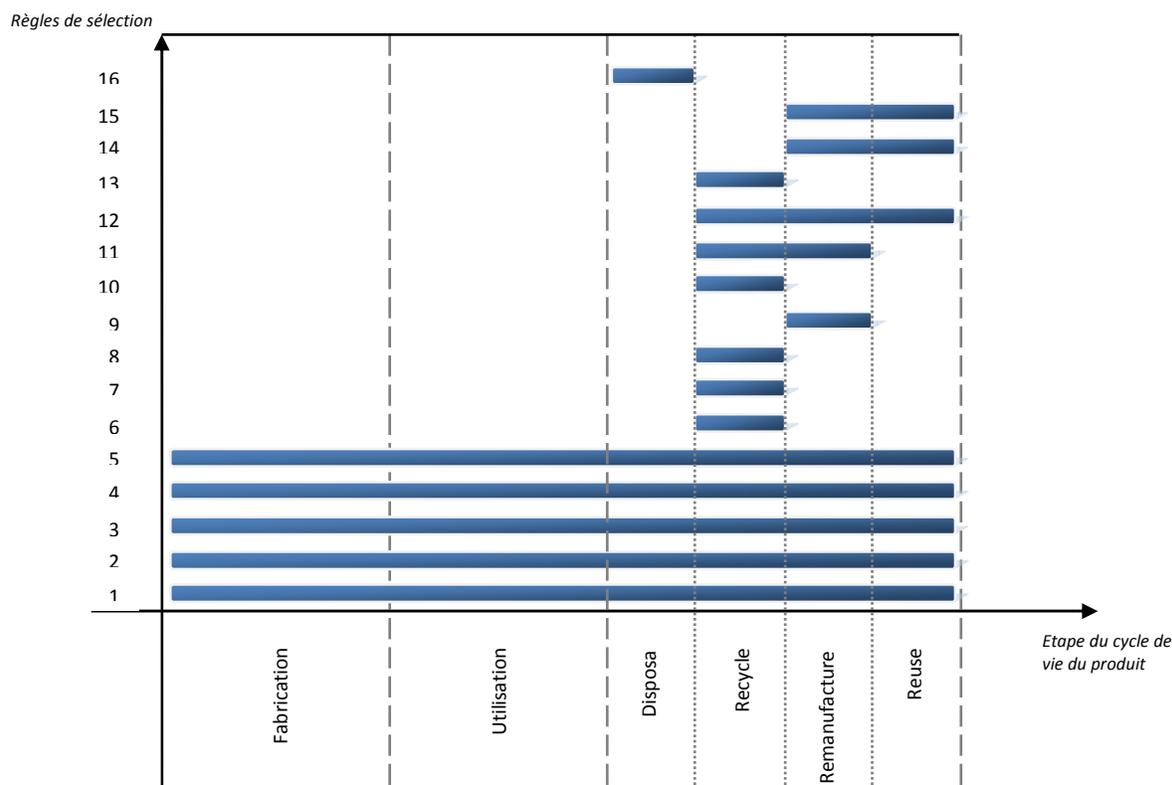


Figure 1.5 : Les phase(s) du cycle de vie concernée(s) par les règles de sélection environnementale des matériaux

Les observations générales sur le champ d'application des règles sont que :

- La fin de vie « Disposal » est très peu traité dans l'ensemble des règles de sélection (uniquement par la règle numéro seize).
- La fin de vie « Recycle » est la fin de vie la plus traitée dans la littérature (sept règles);

Nous pouvons expliquer les deux remarques précédentes par plusieurs remarques. Le Design For Disposal est considéré comme une philosophie de conception environnementale à bas potentiel environnemental [31]. Cela peut expliquer le petit nombre de règle de conception concernant cette fin de vie pour les produits industriels communs. Cependant, les applications plus spécifiques comme les déchets nucléaires sont très détaillées. Le Design For Recycle traite pour sa plus grande partie de la sélection des matériaux car les principales difficultés rencontrées dans cette fin de vie dépendent des matériaux.

Les règles de conceptions, malgré leurs qualités (décrites au début de ce paragraphe) possèdent plusieurs défauts :

- L'efficacité de la sélection environnementale des matériaux dépend principalement des concepteurs ou des équipes de conception qui les utilisent.
- Elles ne reposent pas sur un processus de sélection bien défini et fiable, ce qui peut entraîner des changements indésirables dans la sélection des matériaux d'un produit entraînant une hausse des impacts de ce dernier.

Les règles de sélection permettent au concepteur de se concentrer sur certaines phases du cycle de vie ou de prendre en compte l'intégralité du cycle de vie du produit. Nous pouvons remarquer que cinq règles de sélection concernent l'intégralité du cycle de vie du produit et onze concernent uniquement la fin de vie du produit qui peut être de quatre types différents suivant ces règles : élimination, recyclage, refabrication et réutilisation. De plus les règles de sélections prennent en compte le produit, l'environnement et les matériaux. Les règles de sélection permettent donc de sélectionner les matériaux de la façon la plus complète. Néanmoins, cette sélection se fait de la manière la moins structurée ce qui peut poser des problèmes de fiabilité des résultats des sélections.

1.2.2.2 L'Analyse du Cycle de Vie (ACV)

L'analyse du cycle de vie est une méthode de sélection des matériaux très utilisée actuellement pour sélectionner les matériaux sur critère environnemental. Cette méthode quantifie les impacts environnementaux d'un matériau en réalisant l'inventaire des impacts environnementaux produits durant toutes les phases de son cycle de vie. Les origines de cette méthode remontent à la fin des années 1960 [42]. Les chercheurs ont alors défini le principe d'évaluation des impacts environnementaux d'un produit tout au long de son cycle de vie. La première analyse du cycle de vie a été réalisée pour Coca-Cola, mais ne fut jamais publiée. Puis le « Midwest Research Institute » MRI publia les premières ACV. La crise pétrolière du début des années 1970 poussa les industries à étudier la consommation des ressources naturelles et à quantifier les échanges de matières et d'énergie avec l'environnement. L'ACV était alors nommée « Resources and Environmental Profile Analysis » (REPA) aux Etats-Unis. En 1990, le terme REPA a été abandonné et l'analyse du cycle de vie est devenue le nouveau terme générique. L'ACV moderne, post 1990, a été principalement portée, maturée et normalisée par trois organisations :

- La SETAC (Society for Environmental Toxicology and Chemistry)
- L'ISO (International Organization for Standardization)
- Le PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement)

La SETAC a permis la définition de l'ACV par l'organisation d'un workshop sur celle-ci, l'ACV est alors, pour la première fois, définie dans sa forme actuelle [43]. Plusieurs cadres d'évaluation ont été créés et diffusés jusqu'en 1997 où l'ISO a standardisé l'ACV avec la série des normes 14040 [44]. Enfin, en 2002, le PNUE s'est associé à la SETAC pour initier une nouvelle réflexion sur l'amélioration de l'ACV dans le but d'avoir une approche plus efficace de l'ACV [45].

Une analyse de cycle de vie complète se compose de quatre étapes principales :

1. Définition des objectifs et de l'étendue de l'analyse.
2. Inventaire et analyse de l'inventaire
3. Évaluation des impacts du cycle de vie

4. Interprétation des résultats.

Ces quatre phases sont définies par la norme ISO 14040 version 2006 et 14044 [46]. Par la réalisation de ces étapes, l’empreinte environnementale d’un matériau est quantifiée pour son utilisation dans le cycle de vie d’un produit.

L’ACV permet de déterminer précisément les impacts environnementaux des matériaux, cela en fait un outil couramment utilisé pour sélectionner les matériaux [6] [47]. Différentes méthodes d’ACV peuvent être réalisées en variant les objectifs de l’analyse de cycle de vie dans l’étape 1.

Pour faciliter la diffusion de l’ACV, différentes bases de données appelées ont été créées [48]. Ces bases de données stockent les résultats d’étapes de l’ACV décrits ci-dessus : inventaires, méthodes d’évaluation des impacts environnementaux. Elles interviennent donc à des étapes différentes de l’analyse du cycle de vie. La liste suivante comprend les principaux éco-indicateurs :

- Eco’indicateur 95 & 99 [49, 50] – Évaluation impacts environnementaux
- Impact 2002+ [51] – Évaluation impacts environnementaux
- Eco’invent [52] – Base de données d’inventaires.

L’analyse du cycle de vie (ACV) est un outil fiable et reconnu internationalement qui permet de sélectionner les matériaux sur critère environnementale. La normalisation réalisée par l’ISO a permis à cette méthode d’être largement diffusée. Elle permet d’évaluer les impacts environnementaux potentiellement générés par un produit durant tout son cycle de vie. Cependant l’ACV est principalement utilisée pendant le « detail design » pour confirmation du choix du matériau ou simplement pour évaluation de l’empreinte environnementale du produit. En effet, la littérature mentionne clairement le fait que l’ACV n’est pas un outil de sélection des matériaux ergonomique pour un processus de conception [23, 35, 39, 53] par le temps et la précision des données qu’elle requiert. Elle ne peut pas être utilisée pour les étapes de conception du « Concept Design » et du « Embodiment Design ». Stuart puis Telenko [35, 39] ajoutent qu’il s’agit plus d’un outil de rétrospection que d’un outil d’aide à la sélection ou d’un outil de sélection. En effet, l’application de l’ACV nécessite la définition complète de certaines caractéristiques des composants comme la masse de chaque composant, les énergies entrantes et sortantes de chaque

étape du cycle de vie. Ces informations sont typiquement indisponibles en conception préliminaire (concept design et embodiment design).

1.2.2.3 Méthodes multicritères de sélection environnementale des matériaux

La littérature comporte également des méthodes multicritères qui permettent de sélectionner des matériaux sur critères environnementaux. Elles permettent de comparer plusieurs matériaux entre eux et de les classer. Ce classement illustre l'ordre de préférence d'utilisation pour respecter des objectifs de diminution des impacts environnementaux et des objectifs de coûts et techniques. Certaines méthodes de sélection prennent en compte des critères économiques et techniques pour permettre de réaliser une sélection plus complète. Le paragraphe ci-présent a pour but de présenter ces méthodes et de réaliser un état de l'art des méthodes de sélection environnementale des matériaux.

Nous pouvons classer les différentes méthodes en trois catégories :

- Les méthodes graphiques qui permettent d'avoir un résultat rapidement accessible. La précision de l'évaluation est cependant plus faible que les autres types de méthodes présentés ci-dessous. Le classement doit être réalisé par l'utilisateur dans ce type de méthode;
- Les méthodes analytiques de sélection des matériaux. Ces méthodes sont basées sur différents processus (exposés ci-dessous) et permettent de désigner ou de classer les matériaux selon les paramètres choisis par l'auteur;
- Les méthodes d'optimisation du choix des matériaux. Ces méthodes, dans le cas de la sélection des matériaux sont basées sur l'utilisation des algorithmes génétiques (pour la sélection environnementale des matériaux) qui permettent d'avoir un choix quasi-optimal des matériaux selon les paramètres entrés dans le modèle d'analyse.

Les méthodes graphiques pour la sélection des matériaux facilitent la sélection des matériaux dans le processus de conception. Ainsi, Weaver [12] et Holloway [54] présentent une application des graphes de sélection créés par Ashby [9]. Les graphes de sélection d'Ashby permettent de réaliser une sélection des matériaux avec des propriétés matériaux très différentes [55]. Weaver présente un cas d'application sur la sélection environnementale de l'isolation d'un

réfrigérateur. Les indices utilisés dans le graphe de sélection sont : la conductivité thermique des matériaux et la consommation d'énergie des matériaux à travers l'intégralité de leur cycle de vie, le coût des matériaux et la résistance au feu des matériaux. Le résultat final de cette méthode est la production de trois graphes de sélection représentant les positions des différents matériaux par rapport à un cas idéal (cf. figure 1.6). Holloway applique la même méthode sur un contenant à boisson en utilisant l'indice de pollution de l'eau, la résistance mécanique des matériaux et la masse volumique des matériaux. L'outil proposé par Ashby et adapté par Weaver et Holloway pour la sélection environnementale des matériaux est un bon outil pour son accessibilité, sa manipulation aisée par un large public mais son utilisation demande de respecter certaines hypothèses :

- Le nombre de matériaux étudiés ne doit pas être trop important, au risque que le graphe ne soit plus lisible [54] (cf. figure 1.6);
- Les graphes permettent d'obtenir une comparaison et une optimisation du choix des matériaux pour deux propriétés, ou un ensemble de propriétés par rapport à une autre. Mais, il semble que la prise en compte de toutes les propriétés dans une même évaluation ne soit pas réalisée aujourd'hui. En effet, les graphes deviennent rapidement très complexes à lire. La figure 1.6 illustre cette méthode uniquement pour seulement deux propriétés : la lecture n'est déjà pas des plus aisées.

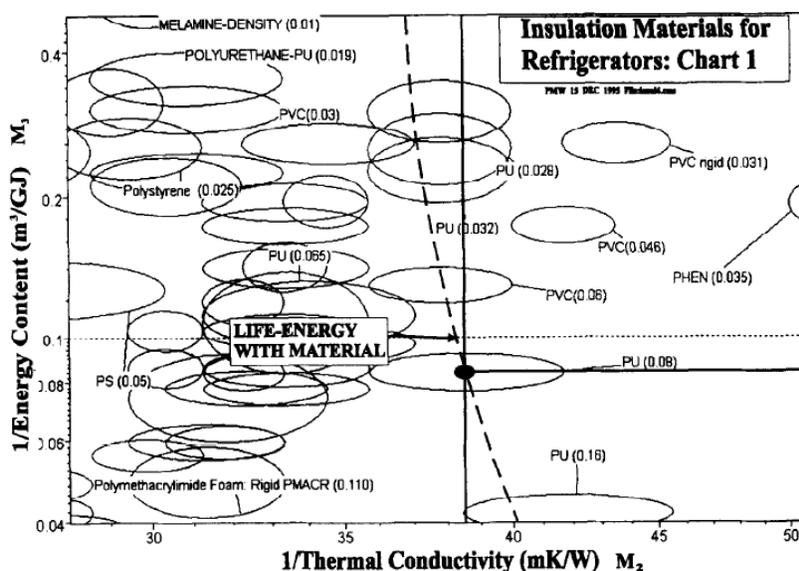


Figure 1.6 : Graphe d'Ashby de sélection des matériaux, [12]

Les méthodes multicritères analytiques de sélection environnementale des matériaux sont les plus nombreuses dans la littérature. Huang a présenté en 2006 une méthode [56] permettant de réaliser la sélection des matériaux sur critères environnementaux adapté de TOPSIS (introduite par Yoon et Hwang [57]). Cette méthode permet d'évaluer un nombre important de propriétés de matériaux. Ces propriétés sont comparées aux objectifs de performances que le concepteur doit renseigner. Chan [58] propose une méthode de sélection multicritères qui permet de sélectionner simultanément les matériaux et la fin de vie du produit. L'analyse relationnelle Grey est utilisée pour obtenir les scores des paires matériaux-fin de vie. La méthode se base sur différents paramètres environnementaux influençant la santé humaine, la qualité de l'écosystème, l'état des ressources, etc. Elle prend en compte également des paramètres techniques (résistance mécanique, l'allongement, etc.) et des paramètres économiques (coût d'achat des matériaux, le coût de production, etc.). L'origine des différentes données n'est pas mentionnée dans l'article. Ribeiro expose les fondements de sa méthode de sélection environnementale [59], qui permet de réaliser une sélection environnementale, économique et technique. Ribeiro utilise l'éco-indicateur « Eco Indicator 99 » pour les données environnementales. Les données sont représentées par un diagramme tertiaire (cf. figure 1.7), qui permet d'identifier rapidement le profil du matériau. Guidice [60] présente une méthode de sélection des matériaux dans une pensée « conception pour le cycle de vie ». Elle repose principalement sur les données d'analyse de cycle de vie de l'indicateur « Eco Indicator 99 », sur la masse du composant et sur le cout d'achat du matériau. L'objectif de la méthode est de sélectionner le matériau ayant le plus faible impact en pondérant les impacts environnementaux et les couts par rapport à leur phase du cycle de vie. Un classement est réalisé suivant le score obtenu par chaque matériau.

L'optimisation de la sélection environnementale des matériaux a été traitée par Zhou [61] et Ermolaeva[62] avec des algorithmes génétiques. Les algorithmes génétiques permettent d'optimiser les systèmes qui évoluent [63]. Une sélection naturelle est appliquée aux différents modèles d'un système à optimiser. Zhou propose une méthode permettant de prendre en compte les critères mécaniques, économiques et environnementaux. L'optimisation permet de choisir le meilleur matériau suivant les trois critères mentionnés précédemment. Alors qu'Ermolaeva présente une méthode permettant d'optimiser la masse et l'impact environnemental d'un composant réalisée en matériau composite sandwich suivant le type de sollicitations subies par le

composant. Il s'agit réellement d'une méthode de conception détaillée car le volume du composant pour les différents matériaux évalués (alliages d'aluminium) est connu.

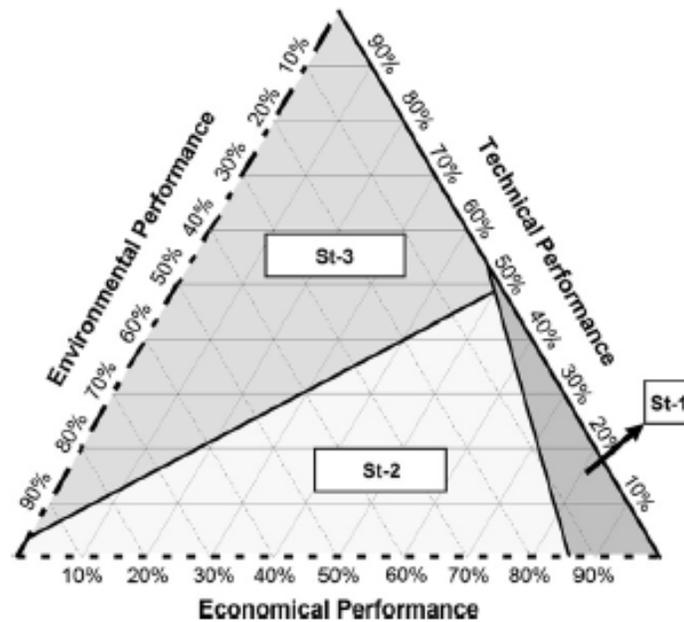


Figure 1.7 : Diagramme ternaire des performances des matériaux St-1, St-2, St-3, de [59].

1.2.2.4 Bilan des méthodes de sélection environnementale rencontrées dans la littérature

Nous pouvons émettre les remarques générales suivantes sur les différentes méthodes de sélection environnementale des matériaux :

- Les règles de sélection des matériaux sont nombreuses, elles mènent à des méthodes plus spécialisées. Cela s'explique par le fait que les règles sont soumises uniquement à l'appréciation du concepteur, elles n'ont pas de cadres théoriques;
- A contrario, l'ACV apporte un cadre précis et normalisé permettant d'assurer une uniformité des procédures réalisées. Cette méthode donne des résultats très reconnus. Cependant, elle ne peut pas être réellement utilisée dans la conception préliminaire des produits;
- Les méthodes multicritères de sélection environnementale sont basées sur l'évaluation de plusieurs catégories de critères : les critères environnementaux (avec l'utilisation des Eco-indicateurs d'ACV), les critères techniques et/ou économiques. Elles apportent par ce biais, des informations supplémentaires au concepteur en intégrant les données

environnementales de l'ACV avec les données techniques et économiques du produit, des procédés.

1.3 Logique floue et sélection des matériaux

La logique floue a été créée par Zadeh dans les années 60 [64]. Initialement cette théorie a été créée pour simplifier la résolution de problèmes complexes en s'approchant du comportement humain. En effet, l'homme peut résoudre des problèmes avec des variables définies par des valeurs linguistiques (faible, moyen, fort) sans utiliser des équations pour résoudre ces problèmes. Cette résolution par des systèmes mathématiques était alors très complexe, ce qui a poussé Zadeh à formuler la théorie permettant de traiter mathématiquement ce type de variables. Par la suite, Zadeh développa la logique floue en exposant notamment le principe d'extension [65] permettant d'étendre les fonctions mathématiques aux nombres, sous-ensembles et ensembles flous. Dans les années 1970, les premières applications ont été réalisées, mais il a fallu attendre les années 1980 pour que son utilisation soit plus importante, notamment dans les produits électroniques [66, 67]. L'utilisation de la logique floue dans le développement des produits a été traitée au début des années 1990. Lors de la conception préliminaire, les informations traitées sont incertaines et imprécises. Dans ce cas, Thurston [68] recommande l'utilisation de la logique floue pour réaliser la sélection des matériaux.

Plusieurs méthodes de sélection des matériaux sont apparues pour d'autres applications que celles environnementales. Wang expose une méthode de sélection de matériaux pour un outil de coupe [69]. La sélection repose sur l'évaluation de sept propriétés des matériaux : usinabilité, résistance à l'eau, résistance à l'adoucissement à température élevée, dureté, sécurité pendant la trempe, stabilité des propriétés des matériaux, coût d'achat du matériau. La méthode requiert une pondération de chaque propriété par le concepteur. Après renseignement des valeurs des propriétés, la méthode fournit au concepteur un classement des différents matériaux. Chen [70] propose une méthode plus légère au niveau des calculs à effectuer pour obtenir le résultat. Il illustre cette méthode avec la sélection de matériaux pour outil de coupe. Les paramètres considérés sont les mêmes que ceux choisis par Wang. L'apport principal de cette méthode est réellement la simplification des calculs à réaliser pour obtenir le classement des matériaux. Liao [71] présente un cadre d'évaluation par logique floue pour l'aide à la prise de décision dans la sélection des matériaux. La méthode générale repose sur le principe d'extension de la logique

floue [65], qui permet de simplifier la sélection des matériaux et sa mise en œuvre dans des outils informatiques. Liao présente également la caractérisation des propriétés des matériaux dans les nombres flous adéquats, qu'elles soient qualitatives ou quantitatives. Dernièrement, Sarfaraz Khabbaz a exposé une méthode de sélection des matériaux reposant sur des propriétés qualitatives et quantitatives [72]. Elle demande néanmoins, la définition des règles d'inférences, ce qui oblige le concepteur à considérer des fonctions d'appartenance à trois sous-ensembles flous selon Sarfaraz Khabbaz. Il justifie cette limitation par la simplification du renseignement des règles d'inférences. Sept propriétés sont évaluées dans la méthode proposée : dureté, résistance à la limite d'élasticité, module d'Young, densité, dilatation thermique, conductivité thermique, chaleur spécifique. Les sous-ensembles flous sont représentés par des fonctions sigmoïdes.

1.4 Conclusion

Pour conclure, la sélection environnementale des matériaux est largement traitée dans la littérature. L'analyse du cycle de vie est prééminente dans ce type de sélection. La plupart des articles consultés sur la sélection environnementale des matériaux utilise les résultats de différentes méthodes d'ACV (Eco-indicator, Eco-invent, etc). D'un autre côté, les règles de sélection des matériaux permettent au concepteur de tenir compte des impacts des matériaux et du produit où le matériau va être intégré. Cela fait des règles de sélection un outil précieux pour la conception préliminaire, précieux car aucune méthode de sélection n'est sur le même « créneau » de la conception du produit. Pahl et Beitz [73] souligne cette répartition des rôles entre les règles de sélection et l'analyse du cycle de vie par rapport aux différentes phases du cycle de vie du produit (cf. figure 1.8).

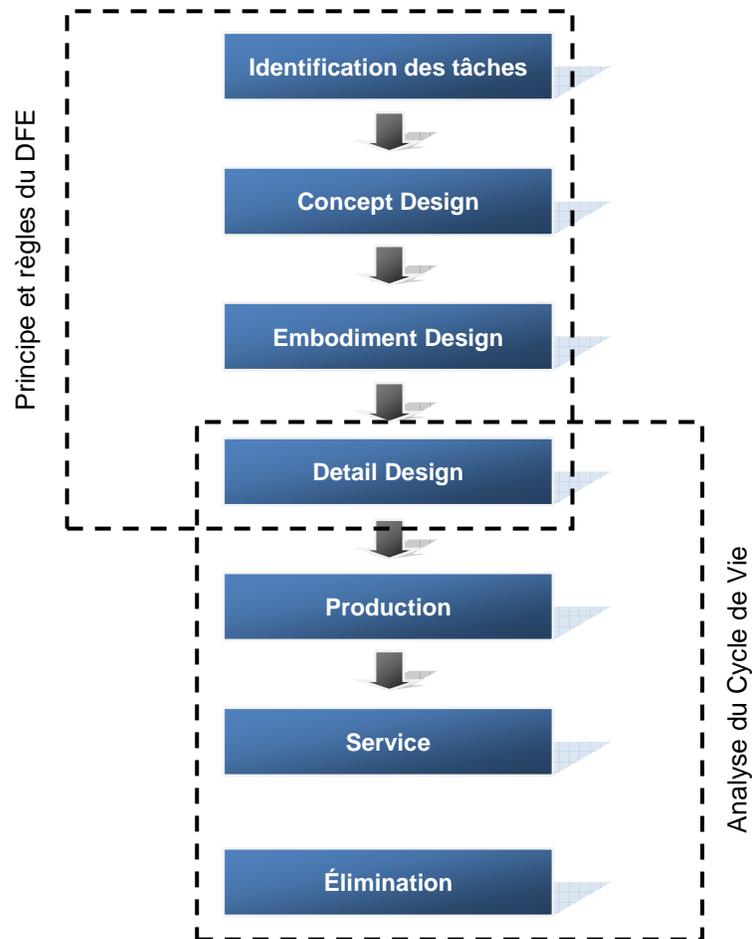


Figure 1.8 : Domaine de validité des méthodes par rapport aux phases du cycle de vie d'un produit

La conception préliminaire (concept design et embodiment design) est difficile à traiter avec une méthode analytique car les informations sont encore imprécises. Mais comme nous avons pu le remarquer dans le sous-chapitre 1.3, la logique floue semble pouvoir s'adapter à ce type de situation.

Nous pouvons également remarquer que les méthodes présentes, à l'exception des règles de sélection, ne prennent absolument pas en considération le contexte d'utilisation du matériau, le produit lui-même, pour sélectionner les matériaux. Ainsi, la bonne sélection des matériaux par rapport au produit où ils seront intégrés n'est pas assurée. Il s'agit pourtant d'un problème pouvant générer des impacts environnementaux non-négligeables [12].

CHAPITRE 2 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE DE LA SÉLECTION DES MATÉRIAUX

La revue de littérature présentée dans le chapitre précédent a permis de mettre en valeur l'état d'avancement de la recherche dans la sélection environnementale des matériaux. Nous présentons, dans ce chapitre, la méthode de sélection créée. Pour cela, nous commencerons par exposer les objectifs de la méthode et ses limitations. Ensuite nous définirons le cadre général de la méthode de sélection environnementale des matériaux. Puis nous exposerons le processus d'évaluation des matériaux, ses paramètres et ses résultats.

2.1 Objectifs

Nous avons identifié plusieurs objectifs que la méthode doit remplir. L'accomplissement de ces objectifs est nécessaire pour apporter une valeur ajoutée aux recherches déjà réalisées dans le domaine de la sélection environnementale des matériaux :

Premièrement, la méthode doit permettre la sélection des matériaux, durant la conception préliminaire, avec une meilleure fiabilité et répétabilité que celles obtenues avec les règles de sélection. La revue de littérature a déjà souligné ces défauts.

Deuxièmement, la sélection des matériaux doit être la plus appropriée au contexte d'utilisation du matériau. Le contexte du matériau est très contraignant lors de la sélection si nous voulons améliorer le traitement en fin de vie du produit. Or ce contexte n'est pas toujours pris en compte et cela est potentiellement générateur d'impacts environnementaux additionnels à ceux déjà générés lors de la fabrication et de l'utilisation.

Troisièmement, la méthode doit permettre la sélection pour les différentes fins de vie que le produit est susceptible de rencontrer. La revue de littérature a permis de mettre en valeur la diversité des règles de sélection et des méthodes de conception qui traitent de la fin de vie des produits. L'objectif est d'avoir une méthode globale capable de traiter un ensemble représentatif des fins de vie.

Quatrièmement, la méthode doit permettre de s'adapter aux données disponibles en conception préliminaire. Les types de données (numériques, linguistiques, discrètes, floues, etc.) rencontrés sont très divers et il est primordial que la méthode puisse les prendre en compte.

Cinquièmement, la méthode doit avoir une souplesse d'utilisation qui permette de l'utiliser en prenant en compte les contraintes que le concepteur rencontre. Qu'il s'agisse de contraintes techniques ou économiques, elles peuvent contraindre le concepteur à ne pas sélectionner le matériau qui paraissait le meilleur compromis.

2.2 Limitations

La limitation de la méthode est nécessaire pour pouvoir établir un modèle robuste. Dans ce but, nous allons citer les différentes limitations.

Premièrement, la méthode est une méthode de sélection environnementale des matériaux. Nous entendons par le terme environnemental, qu'elle tend à diminuer les impacts environnementaux des produits mais qu'elle n'a aucun objectif de type technique ou économique.

Deuxièmement, la méthode est uniquement valable en conception préliminaire. La revue de littérature a mis en évidence que les méthodes de sélection environnementale formelles en conception préliminaire sont inexistantes et que la conception détaillée bénéficie déjà d'une méthode très précise, fiable et reconnue avec l'ACV. Le but est d'apporter des informations complémentaires sur la sélection des matériaux durant la conception préliminaire.

Troisièmement, la méthode se limite à l'étude des fins de vie principales de type recyclage, refabrication, réutilisation. La revue de littérature a mis en avant un nombre important de règle de sélection applicables à différentes fins de vie du produit. La multitude de règle de sélection complique la sélection environnementale des matériaux pour l'étape générale fin de vie du cycle de vie du produit. Les autres étapes générales du produit ont un nombre de règles de sélection très nettement inférieur. C'est pourquoi nous traitons cette phase (la fin de vie du produit) plus particulièrement dans la suite de ce document.

2.3 Cadre de la méthode

Les objectifs et les limitations, décrites ci-dessus, nous permettent de mettre en place le cadre général de la méthode. Nous présentons les différentes solutions choisies avec l'aide de la revue de littérature dans les paragraphes suivants.

2.3.1 Traitement des informations

Pour assurer que la méthode remplisse le premier objectif (la fiabilité et la répétabilité) la méthode doit utiliser un processus logique d'évaluation des matériaux permettant de les classer. Cette solution permet d'avoir un résultat de référence (le classement) sur lequel les concepteurs peuvent se fier. En effet, les règles de sélection laissent une liberté totale au concepteur dans l'interprétation des différents paramètres, dans leur évaluation et dans la prise de décision.

Le traitement logique des informations doit également s'adapter aux types d'informations disponibles pendant la conception préliminaire (quatrième objectif). Or, celles-ci peuvent être non-précises, floues [9]. Cela complique leur traitement par des méthodes de traitement d'informations traditionnelles, nous utiliserons donc la logique floue qui permet de traiter efficacement ce type d'information et qui est notamment recommandée par Thurston pour le traitement des informations en conception préliminaire [4].

2.3.2 Contexte d'utilisation et contexte de sélection des matériaux

Le contexte d'utilisation est très important dans la sélection des matériaux en conception préliminaire. La considération de cet élément est nécessaire pour éviter l'utilisation inappropriée des matériaux. Pour cela nous commencerons par l'étudier. Par la suite, nous étudierons, de même, le contexte de sélection des matériaux.

2.3.2.1 Le contexte d'utilisation

Nous pouvons identifier deux éléments du contexte d'utilisation des matériaux :

1. Le produit où le matériau sera intégré;
2. L'environnement d'utilisation du matériau et donc du produit.

En effet, le produit a une influence sur la sélection du matériau, il a une architecture définie, des propriétés bien précises et des matériaux peuvent être déjà attribués à certains de ces composants. Nous détaillons ces différentes données dans la figure 2.1.

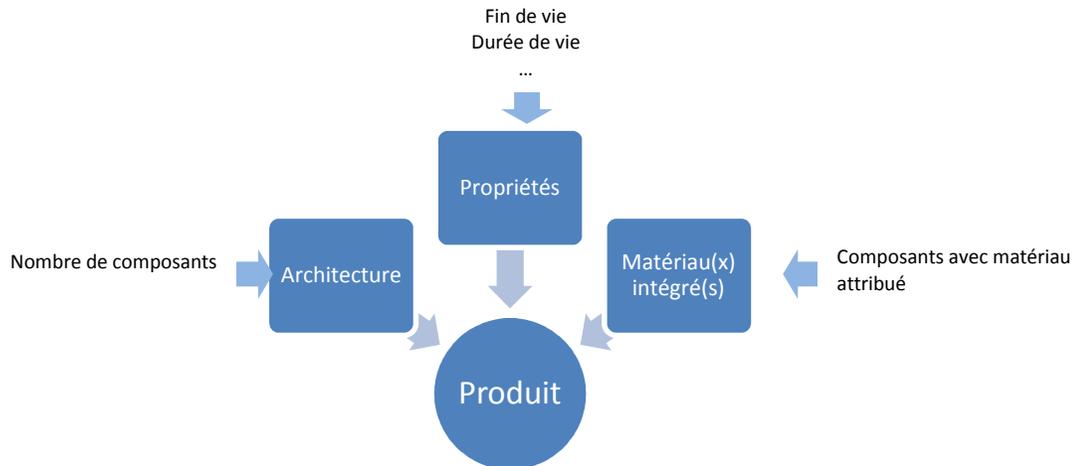


Figure 2.1 : Les données « produit » à prendre en compte pour la sélection des matériaux

L'environnement du produit possède lui aussi plusieurs propriétés qui peuvent modifier les caractéristiques du produit et des matériaux : agressivité, neutralité, sévérité, etc.

2.3.2.2 Le contexte de sélection

Nous nous intéressons maintenant au contexte de sélection. Celui-ci est très important car il nous permet de créer la méthode de sélection en accord avec les différents éléments pour remplir les objectifs définis au paragraphe 2.1.

Nous pouvons prendre en compte les deux éléments du contexte d'utilisation (produit et environnement). Nous devons également prendre en compte les matériaux comme un élément propre du contexte de sélection. En effet, les matériaux ont des propriétés qui influencent fortement le comportement futur du produit, sa durée de vie. Et la sélection se fait parmi un panel de matériau pour chaque composant. Ils font donc partie du contexte de sélection des matériaux.

Nous pouvons donc résumer les différents éléments du contexte de sélection influençant la sélection des matériaux par la figure 2.2.

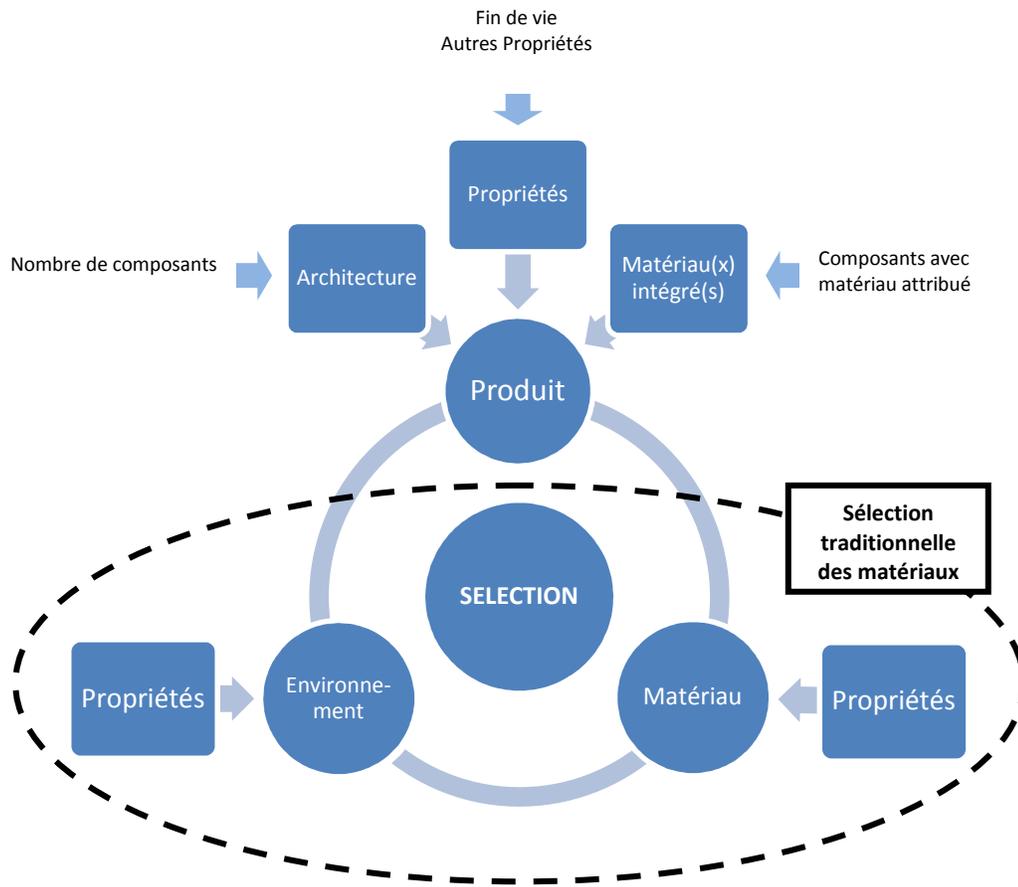


Figure 2.2 : Contexte d'utilisation et sélection des matériaux

2.3.3 Fins de vie des produits considérées par la méthode

L'étude de la littérature nous a permis de remarquer que certaines règles de sélection sont utilisées pour plusieurs fins de vie. Pour fournir au concepteur une seule méthode complète de sélection des matériaux pour la fin de vie, nous considérons uniquement les fins de vie principales. Plusieurs méthodes permettent de réaliser la planification de fin de vie avec des paramètres industriels facilement identifiables en conception préliminaire : ELDA, PEOLSP, Hula. La prise en compte des fins de vie présentes dans ces méthodes de planification, dans notre méthode de sélection, nous permet d'obtenir une bonne intégration de la nouvelle méthode de sélection. Nous augmentons ainsi le potentiel d'utilisation de la méthode par les concepteurs, ce

qui est très positif. Nous avons choisi d'intégrer les fins de vie définies dans la méthode ELDA de Rose [25] qui sont au nombre de six et définies de la manière suivante :

- Réutilisation : Réutilisation du produit, de l'un de ses sous-assemblages ou d'un de ses composants dans une deuxième utilisation identique à la première ;
- Maintenance : Extension de la vie du produit en réparant ou en reconstruisant le produit avec des pièces viables sur le même lieu que son lieu d'utilisation ;
- Refabrication : Démantèlement d'un produit avec réparation(s) et nettoyage(s) s'il y a lieu de ses composants, pour réutilisation des composants dans un nouveau produit. Cette stratégie de fin de vie nécessite une similarité des produits assez importante ainsi qu'un traitement centralisé des produits en fin de vie pour permettre sa mise en place ;
- Recyclage avec désassemblage : Les composants sont séparés par désassemblage afin d'écartier les matériaux contaminants, dangereux ou les composants à haute valeur ajoutée ;
- Recyclage sans désassemblage : Le produit est détruit pour obtenir un gain de place. Les matériaux sont alors triés par des méthodes reposant sur certaines propriétés basiques des matériaux : magnétisme, densité, etc ;
- Élimination : Les produits, sous-assemblages ou composants sont définitivement mis au rebut, stockés en décharge avec ou sans traitement antérieur.

Les autres méthodes ont été écartées pour les raisons suivantes :

- PEOLSP est une simplification de ELDA et permet seulement la planification de trois fins de vie : récupération, refabrication et réutilisation. Le faible nombre des fins de vie planifiables ne semblent pas satisfaisant pour réaliser une méthode de sélection adaptable aux différents cas industriels (cinquième objectif). Par exemple, les recyclages avec ou sans désassemblage ne sont pas dissociés alors que ces deux fins de vie ont des influences très différentes sur la sélection des matériaux.
- Hulla base sa méthode sur des algorithmes génétiques pour choisir la meilleure fin de vie pour un produit. Les algorithmes génétiques sont reconnus pour assurer un choix quasi-optimal mais leur mise en place demande beaucoup plus de ressources et une

quantité de données assez importante pour réaliser leur apprentissage. Cela peut affecter l'opérabilité de la méthode de sélection. Nous avons donc choisi de ne pas choisir cette méthode de planification de la fin de vie.

2.3.4 Adaptation aux données et aux situations rencontrées par le concepteur

Le quatrième et le cinquième objectif de la méthode est d'avoir une bonne adaptation de la méthode aux différentes données et situations rencontrées par le concepteur.

2.3.4.1 Données rencontrées

Le concepteur peut rencontrer plusieurs types d'informations et de données tant sur le produit, sur l'environnement que sur les matériaux :

- Données discrète : la propriété est mesurable et définie par une valeur précise définissant la qualité du matériau, de l'environnement ou du produit pour la propriété. Nous pouvons donner par exemple la valeur de la résistance élastique de l'acier qui est de 210 MPa ;
- Données sous forme d'intervalle : La propriété est mesurable mais sa valeur ne peut pas être définie précisément pour toutes les situations. La valeur de la propriété est donc donnée sous la forme d'un intervalle de valeur comprenant toutes les valeurs possibles de la propriété. Nous pouvons donner par exemple la valeur de la résistance à la corrosion dans les sols qui est donnée sous la forme d'intervalle car la valeur dépend du type de sol dans lequel le matériau est enterré ;
- Données sous forme linguistique : Appelée aussi donnée floue, celle-ci est donnée lorsque la propriété est très difficilement mesurable ou accessible au concepteur. Cette forme de données est précisément celle traitée par la logique floue et celle le plus souvent disponible en conception préliminaire. Par exemple, quelle sera la durabilité d'un matériau dans son contexte d'utilisation : elle ne peut pas être mesurée simplement parce que l'évaluation de la durabilité n'est pas formalisé mais le concepteur a bien conscience que s'il met un matériau dans un élément qui lui est agressif, la durabilité du matériau sera faible, voire très faible.

2.3.4.2 Situations rencontrées

Pour que la méthode de sélection puisse être utilisée, il faut qu'elle s'adapte aux situations rencontrées par le concepteur. La méthode permet de réaliser une sélection environnementale mais le concepteur est soumis à des contraintes techniques et économiques, les ignorer serait très préjudiciable. Pour remplir cet objectif, nous laissons au concepteur le choix final du matériau. Ainsi, la méthode produit un classement environnemental des matériaux mais il revient au concepteur de faire le choix final pour tenir compte des contraintes économiques, techniques, logistiques, etc.

2.3.5 Bilan

Le cadre général de la méthode est représenté par la figure 2.3 ci-dessous. Il est délimité par les objectifs et les limitations exposés au début de ce chapitre.

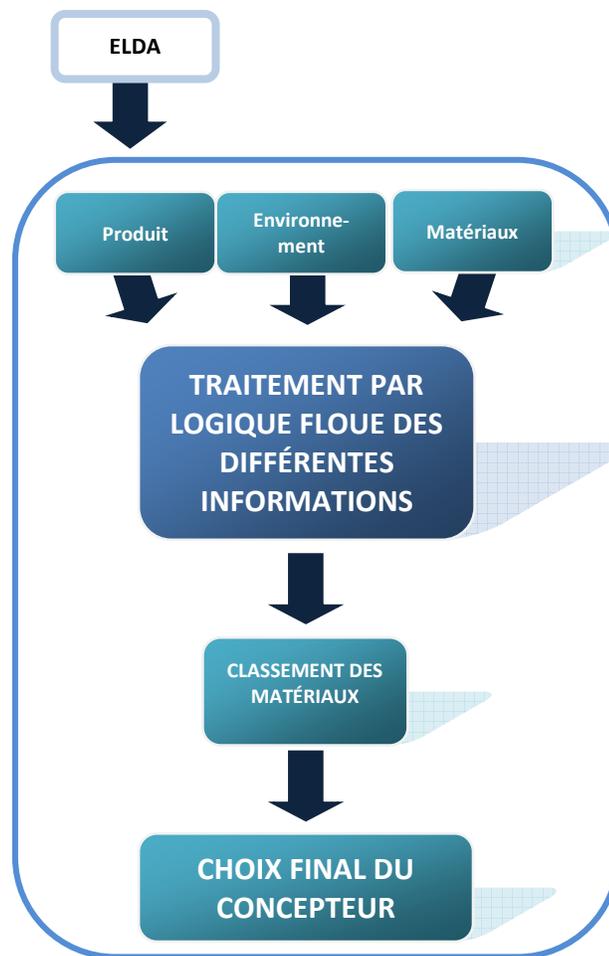


Figure 2.3 : Cadre général de la méthode de sélection environnementale des matériaux

Les informations qui transitent entre le produit, l'environnement, les matériaux et le traitement par logique floue peuvent être des trois types définis précédemment dans ce chapitre. Les autres informations qui transitent sont des informations discrètes.

2.4 Évaluation des matériaux

L'évaluation des matériaux est la tâche la plus influente sur la fiabilité et la répétabilité des résultats, qui est le premier objectif à remplir par notre méthodologie. Il faut aussi que cette évaluation s'adapte aux informations disponibles en conception préliminaire. Pour répondre à ce problème, nous avons choisi la logique floue, comme méthode de traitement logique des informations. Mais il nous reste à définir plus précisément le processus d'évaluation. Nous exposons donc en détail dans la suite de cette section, le fonctionnement de la méthode d'évaluation des matériaux par logique floue.

2.4.1 Logique floue

2.4.1.1 Genèse

La logique floue repose sur les ensembles flous définis par Zadeh [64]. Zadeh définit un sous-ensemble flou \tilde{A} de X par une fonction d'appartenance $f_{\tilde{A}}$ qui relie chaque élément x de X à un nombre réel dans l'intervalle $[0,1]$. La valeur de la fonction $f_{\tilde{A}}$ représente l'appartenance de x à \tilde{A} . Les fonctions d'appartenances des sous-ensembles flous peuvent avoir plusieurs formes : triangulaire, carré, rectangulaire, trapézoïdale, peigne, etc. (cf. figure 3.1).

2.4.1.2 Évaluation par logique floue

La logique floue a permis la création de plusieurs méthodes d'évaluation. Les deux grandes catégories sont :

1. L'évaluation floue par règles d'inférence;
2. L'évaluation floue par le principe d'extension.

L'évaluation floue par règle d'inférence nécessite une expertise dans le domaine où l'évaluation est réalisée. En effet, la définition des règles d'inférences devient très vite fastidieuse lorsque les paramètres sont nombreux et que ces paramètres sont définis avec beaucoup de niveaux. Elle est aussi très critique dans le cas décrit précédemment car elle demande d'étudier

chaque combinaison possible des paramètres et de définir le résultat de chaque combinaison (règle d'inférence). Cela est possible pour un faible nombre de propriétés mais lorsque les propriétés sont plus nombreuses, la définition des règles d'inférences est très difficile. Le nombre de règle d'inférence croit très fortement lorsque le nombre de paramètres augmente : par exemple pour cinq variables définies par cinq sous-ensembles flous chacune, nous arrivons à un nombre de combinaisons possibles égal à trois mille cent vingt-cinq.

L'évaluation floue par le principe d'extension nécessite une expertise moins importante. Ce type d'évaluation requiert la définition floue des variables, la définition du poids de chaque variable dans le résultat final et la valeur désirée que le décideur souhaite obtenir pour chaque variable, autrement dit la valeur optimale. Cette méthode d'évaluation floue, nous permet d'être plus proche du concepteur car elle nous permet de demander au concepteur la définition du cas « optimal » ce qui est beaucoup plus aisé que de définir chaque résultat pour toutes les combinaisons possibles des variables.

2.4.1.3 Méthode d'évaluation des matériaux choisie

Nous avons choisi d'adopter la méthode reposant sur le principe d'extension de la logique floue, pour les avantages non-négligeables qu'elle possède. Pour cela, nous nous sommes basés sur le cadre d'évaluation floue multicritère pour la sélection des matériaux proposé par Liao [71]. Ce cadre reprend les caractéristiques décrites ci-dessus et il ajoute un paramètre nommé « coefficient d'optimisme » qui permet au concepteur d'insérer dans la méthode son degré d'optimisme dans la fiabilité des informations fournies à la méthode.

Le principe d'extension proposé par Zadeh [64], complété par la théorie d'arithmétique floue proposée par Kaufmann [74, 75] permet de simplifier le traitement des variables floues, de leurs sous-ensembles flous et de leurs fonctions d'appartenance. Ainsi les fonctions d'appartenance sont définies par un vecteur de la forme suivante :

$$f_{\bar{A}} = (a, b, c, d) \quad (1)$$

Avec :

$$X \leq a \leq b \leq c \leq d \leq Y \quad (2)$$

Où X et Y sont les bornes de l'intervalle des valeurs que peut prendre le sous-ensemble flou \tilde{A} . La figure 2.4 permet de visualiser la correspondance des a, b, c, d avec la forme géométrique de la fonction d'appartenance.

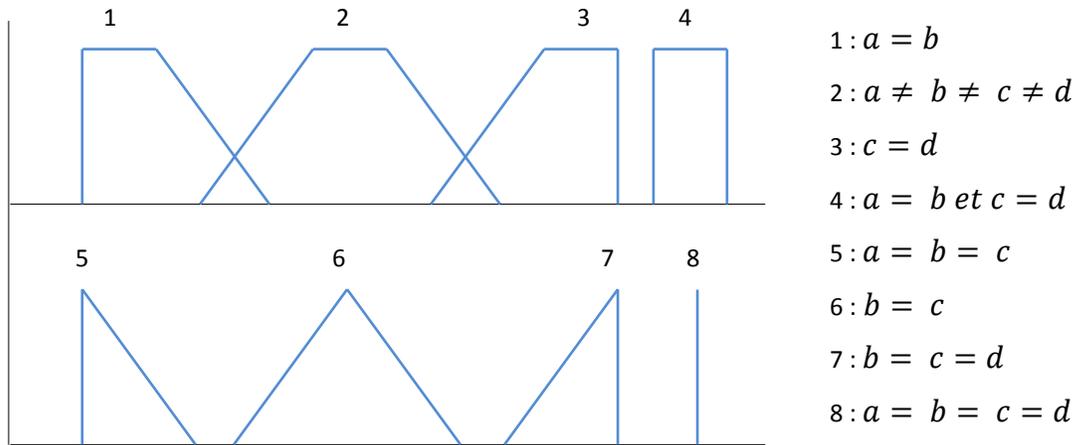


Figure 2.4 : Représentation de différentes formes de fonctions d'appartenance, adapté de [71]

Les équations qui régissent la fonction d'appartenance d'un sous-ensemble flou \tilde{A} sont :

$$f_{\tilde{A}}(x) = f_{\tilde{A}}^L(x), \text{ pour } a \leq x \leq b \quad (3)$$

$$f_{\tilde{A}}(x) = 1, \text{ pour } b \leq x \leq c \quad (4)$$

$$f_{\tilde{A}}(x) = f_{\tilde{A}}^R(x), \text{ pour } c \leq x \leq d \quad (5)$$

$$f_{\tilde{A}}(x) = 0, \text{ pour les autres cas : } x < a \text{ et } x > d \quad (6)$$

Où :

$$f_{\tilde{A}}^L(x) : [a, b] \rightarrow [0,1] - f_{\tilde{A}}^L(x) = (x - a)/(b - a) \quad (7)$$

$$f_{\tilde{A}}^R(x) : [c, d] \rightarrow [0,1] - f_{\tilde{A}}^R(x) = (x - d)/(c - d) \quad (8)$$

La théorie d'arithmétique floue de Kaufmann définit plusieurs opérateurs permettant de manipuler les sous-ensembles trapézoïdaux plus aisément. Les quatre opérateurs créés sont :

- L'addition \oplus ;
- La soustraction \ominus ;
- La multiplication \otimes ;

- La division \oslash .

Ces opérateurs arithmétiques sont définis par les règles suivantes :

- Addition :

$$k \oplus (a, b, c, d) = (k + a, k + b, k + c, k + d) \text{ avec } k \text{ constant} \quad (9)$$

$$(w, x, y, z) \oplus (a, b, c, d) = (w + a, x + b, y + c, z + d) \quad (10)$$

- Soustraction :

$$(a, b, c, d) \ominus k = (a - k, b - k, c - k, d - k) \text{ avec } k \text{ constant} \quad (11)$$

$$(w, x, y, z) \ominus (a, b, c, d) = (w - a, x - b, y - c, z - d) \quad (12)$$

- Multiplication :

$$k \otimes (a, b, c, d) = (k.a, k.b, k.c, k.d) \text{ avec } k \text{ constant} \quad (13)$$

$$(w, x, y, z) \otimes (a, b, c, d) \approx (w.a, x.b, y.c, z.d) \text{ si } w, a \geq 0 \quad (14)$$

- Division :

$$(w, x, y, z) \oslash (a, b, c, d) \approx \left(\frac{w}{a}, \frac{x}{c}, \frac{y}{b}, \frac{z}{d} \right) \text{ si } w, a \geq 0 \quad (15)$$

- Changement de signe :

$$-(a, b, c, d) = (-d, -c, -b, -a) \quad (16)$$

2.5 Définition de la méthode d'évaluation environnementale des matériaux

La méthode présentée dans ce mémoire réalise une sélection environnementale des matériaux pour chaque fin de vie définie dans le chapitre 2 par le cadre de la méthode. La méthode doit s'adapter à chaque fin de vie et définir pour la fin de vie du produit l'adéquation du matériau avec la fin de vie et son contexte d'évaluation. C'est ce que nous appellerons par la suite l'EOL-abilité (End-Of-Life-abilité).

L'EOL-abilité est la propriété des matériaux exprimant leur capacité à faciliter le traitement lors de la fin de vie du produit. Il s'agit d'un terme général pouvant être décliné selon

les différentes fins de vie étudiées. Dans notre cas, la méthode doit pouvoir évaluer six EOL-abilité :

- Réutilisation-abilité;
- Maintenance-abilité;
- Refabrication-abilité;
- Recyclage avec désassemblage-abilité;
- Recyclage sans désassemblage-abilité;
- Élimination-abilité.

Ces EOL-abilités correspondent aux différentes fins de vie considérées par la méthode ELDA de Rose (Réutilisation, Maintenance, Refabrication, Recyclage avec désassemblage, recyclage sans désassemblage et élimination.

La chronologie des différentes étapes de l'évaluation de l'EOL-abilité des matériaux sont décrites ci-dessous par la figure 2.5.

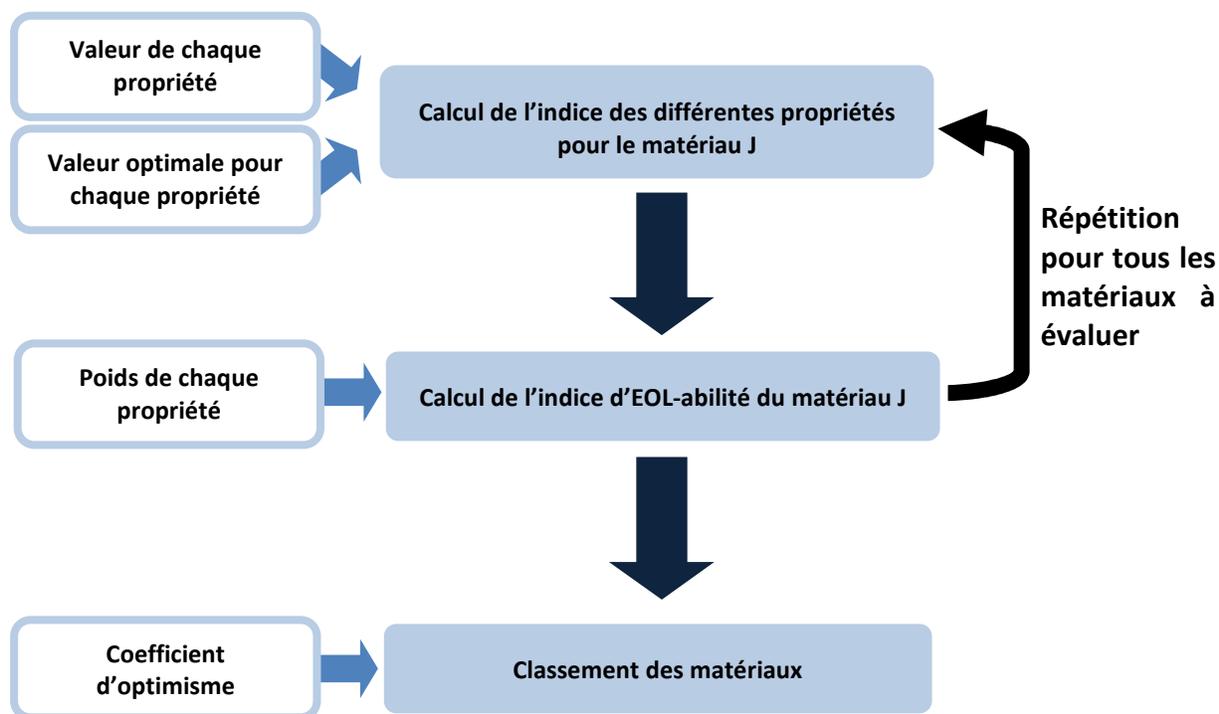


Figure 2.5 : Chronologie de l'évaluation de plusieurs matériaux

2.5.1 Calcul de l'indice d'EOL-abilité de chaque propriété pour chaque matériau

Le calcul de l'indice d'EOL-abilité de chaque propriété permet d'évaluer l'adéquation de la valeur de la propriété avec la valeur optimale.

Soit :

- \tilde{S}_{ij} l'indice de la propriété j du matériau i;
- \tilde{AP}_{ij} la valeur de la propriété j du matériau i ajustée par rapport à la valeur optimale;
- $\tilde{D}_j = (da_j, db_j, dc_j, dd_j)$, la valeur optimale de la propriété; (17)

- $\tilde{P}_{ij} = (pa_{ij}, pb_{ij}, pc_{ij}, pd_{ij})$ la valeur de la propriété j du matériau i. (18)

Deux situations se présentent et modifient les équations mises en jeu. Ces deux situations dépendent de l'orientation de la valeur optimale :

- Si la valeur optimale correspond à la valeur la plus élevée possible de la propriété du matériau :

$$\tilde{S}_{ij} = (\tilde{AP}_{ij} \ominus \tilde{D}_j) \otimes \tilde{D}_j \quad (19)$$

$$\tilde{AP}_{ij} = nd_j \oplus (pa_{ij}, pb_{ij}, pc_{ij}, pd_{ij}) \quad (20)$$

$$(nd_j = |\min(pa_{ij}) - dd_j|) \quad (21)$$

- Si la valeur optimale correspond à la valeur la plus faible possible de la propriété du matériau :

$$\tilde{S}_{ij} = (\tilde{D}_j \ominus \tilde{AP}_{ij}) \otimes \tilde{D}_j \quad (22)$$

$$\tilde{AP}_{ij} = (pa_{ij}, pb_{ij}, pc_{ij}, pd_{ij}) \ominus nd_j \quad (23)$$

$$nd_j = |da_j - \max(pd_{ij})| \quad (24)$$

Il faut remarquer que cette étape demande la connaissance de la valeur optimale \tilde{D}_j de chaque propriété. Cette valeur optimale est réellement nécessaire pour pouvoir appliquer la méthode de

sélection. Nous constatons néanmoins que la valeur optimale est assez facilement identifiée pour chaque propriété de matériaux.

2.5.2 Calcul de l'indice d'EOL-abilité global de chaque matériau

L'indice d'EOL-abilité global du matériau est obtenu par agrégation des différentes propriétés. Le poids des propriétés intervient dans cette étape.

Soit :

- \tilde{S}_i , l'indice d'EOL-abilité global du matériau i ;
- \tilde{w}_j , le poids de la propriété j , avec $1 < j < n$ et n le nombre de propriétés du matériau évaluées.

L'indice d'EOL-abilité du matériau i est égal à :

$$\tilde{S}_i = \frac{1}{n} \cdot \otimes [(\tilde{S}_{i1} \otimes \tilde{w}_1) \oplus (\tilde{S}_{i2} \otimes \tilde{w}_2) \oplus (\dots) \oplus (\tilde{S}_{in} \otimes \tilde{w}_n)] \quad (25)$$

\tilde{S}_i est de la forme :

$$\tilde{S}_i = (sa_i, sb_i, sc_i, sd_i). \quad (26)$$

Cette étape requiert la connaissance du poids \tilde{w}_j , des différentes propriétés. Le poids de chaque propriété permet de pondérer l'évaluation floue (*cf.* figure 2.5). La pondération des propriétés est propre à chaque fin de vie. Il s'agit d'un paramètre essentiel dans le calcul de l'indice d'EOL-abilité du matériau comme nous l'indique l'équation (25). Le tableau présent en Annexe 4 illustre la pondération des propriétés utilisée pour les études de cas exposées dans le chapitre 5.

2.5.3 Classement des matériaux

Le classement des matériaux est ensuite réalisé par comparaison. Nous introduisons un coefficient d'optimisme dans cette phase. Ainsi, d'après Liao, la note finale d'un matériau est directement calculable par l'équation suivante :

Soit :

- $I_T^\mu(\tilde{S}_i)$, la note finale d'EOL-abilité du matériau;
- μ , le coefficient d'optimisme compris dans l'intervalle $[0,1]$.

$$I_T^\mu(\tilde{S}_i) = \frac{1}{2} [\mu(sc_i + sd_i) + (1 - \mu)(sa_i + sb_i)] \quad (27)$$

La note finale d'EOL-abilité du matériau est exprimée sous la forme d'un scalaire, simplifiant le classement des matériaux.

2.5.4 Bilan

Nous avons détaillé les différentes opérations à réaliser sur les facteurs pour réaliser l'évaluation des matériaux. Ces opérations sont réalisées grâce au principe d'extension et à ses opérateurs arithmétiques. Le cadre d'évaluation présenté demande que plusieurs données soient fournies :

- Valeur optimale de chaque propriété;
- Poids de chaque propriété;
- Valeur des propriétés évaluées pour chaque matériau;
- Coefficient d'optimisme.

Toutes ces données sont exprimées, dans la méthode, sous la forme d'un vecteur à quatre constantes à l'exception du coefficient d'optimisme qui est exprimé par un scalaire. Cependant, le concepteur n'utilise pas forcément la même forme pour chaque donnée. Le tableau 3.1 présente les caractéristiques des données utilisées par le concepteur et les caractéristiques utilisées par la méthode d'évaluation.

Tableau 2.1 : Les différentes formes des données utilisées

Données	Forme utilisée par le concepteur	Forme utilisée par la méthode
Valeur optimale de chaque propriété	Scalaire ou intervalle	Vecteur (a, b, c, d)
Poids de chaque propriété	Valeur floue	Vecteur (a, b, c, d)
Valeur des propriétés des matériaux	Scalaire ou intervalle	Vecteur (a, b, c, d)
Coefficient d'optimisme	Scalaire	Scalaire

2.6 Propriétés évaluées

La méthode nécessite d'évaluer plusieurs propriétés pour sélectionner les matériaux comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent. Nous allons maintenant énumérer, dans les

tableaux 2.3, 2.4 et 2.5 ci-dessous, les différentes propriétés prises en compte dans la méthode de sélection.

2.6.1 Choix des propriétés considérées par la méthode

Les propriétés considérées ont été choisies principalement en tenant compte de la littérature sur les règles de sélection. Nous avons également considéré les objectifs et limitations fixés au chapitre 2. En effet, elles fournissent les propriétés qui influencent le traitement du produit en fin de vie, la tendance à respecter et la fin de vie ou il est intéressant de prendre en compte cette propriété. Le tableau 2.2 résume les différentes informations concernant les propriétés évaluées.

Tableau 2.2 : Origines et étendue des propriétés évaluées

Propriétés	Règle de sélection correspondante	Fin(s) de vie considérée(s)					
		Réutilisation	Maintenance	Refabrication	Recyclage avec désassemblage	Recyclage sans désassemblage	Élimination
Résistance à la corrosion	15	X	X	X			
Recyclabilité	6				X	X	
Dégradabilité	16						X
Uniformité du matériau dans le composant	8-9-10-11			X	X	X	
Diversité des matériaux	13				X	X	
Marquage des matériaux	12	X	X	X	X		
Compatibilité de triage	7				X	X	
Capacité de triage	7					X	
Durabilité des matériaux	14	X	X	X			

2.6.2 Types de propriétés

L'étude du contexte de sélection nous a permis d'identifier plusieurs éléments participants à la sélection. En rapport avec ce contexte, les propriétés évaluées peuvent être classés selon plusieurs catégories :

- Les propriétés simples « Matériau ». Les matériaux ont des propriétés qui ne dépendent que de leur constitution chimique, atomique, par exemple : la résistance mécanique, la résistance à la corrosion, etc.;
- Les propriétés simples « Produit ». De la même façon que les matériaux, les produits ont des propriétés qui ne dépendent que d'eux-mêmes, par exemple : la durée de vie du produit.
- Les propriétés circonstancielles « matériau-produit ». A contrario, les propriétés circonstancielles sont des propriétés reliant le matériau à son contexte d'utilisation. Nous pouvons citer à titre d'exemple, la compatibilité de recyclage d'un matériau qui dépend de ses caractéristiques et du produit car des matériaux peuvent déjà être intégrés au produit;
- Les propriétés circonstancielles « matériau-produit-environnement ». Ce type de propriété est le plus compliqué à évaluer. Il sera dans la plupart des cas évalué par valeur linguistique. En effet, ce type de propriété est obtenu en prenant trois éléments en considération : les matériaux potentiellement sélectionnables, le produit où le matériau sélectionné sera intégré et l'environnement du matériau, du produit d'une manière plus générale. Il ne s'agit donc pas d'une propriété disponible dans un aide-mémoire ou facilement obtenue par un calcul mathématique. Nous faisons appel à la sensibilité, l'intuition du concepteur dans l'évaluation de ces propriétés.

2.6.3 Propriétés simples « Matériau »

Les propriétés simples « Matériau » sont considérées pour caractériser le matériau. La méthodologie prend en compte trois propriétés de ce type, leurs champs d'application sont définis dans le tableau 2.3 ci-dessous.

Tableau 2.3 : Les propriétés simples « Matériau » et leurs champs d'application

	Réutilisation	Maintenance	Refabrication	Recyclage avec désassemblage	Recyclage sans désassemblage	Élimination
Résistance à la corrosion	X	X	X			
Recyclabilité				X	X	
Dégradabilité						X

2.6.4 Propriétés simples « Produit »

Les propriétés simples « Produit » sont les propriétés qui permettent de savoir dans quelles conditions les matériaux seront utilisés et quelles seront les caractéristiques du produit. Le produit est un élément essentiel du contexte d'utilisation, ce qui motive la prise en compte de ses propriétés. Le concepteur possède les informations nécessaires pour les définir. Nous prenons en compte trois propriétés simples « Produit ».

Tableau 2.4 : Les propriétés simples « Produit » et leurs champs d'application

	Réutilisation	Maintenance	Refabrication	Recyclage avec désassemblage	Recyclage sans désassemblage	Élimination
Uniformité du matériau dans le composant			X	X	X	
Diversité des matériaux				X	X	
Marquage des composants	X	X	X	X		

2.6.5 Propriétés circonstancielles « Matériau - Produit »

Les propriétés circonstancielles « Matériau-Produit » représentent les propriétés des matériaux par rapport à leur utilisation dans le produit. Nous considérons deux propriétés circonstancielles.

Tableau 2.5 : Les propriétés circonstancielles « Matériau-Produit » et leurs champs d'application

	Réutilisation	Maintenance	Refabrication	Recyclage avec désassemblage	Recyclage sans désassemblage	Élimination
Compatibilité de recyclage des matériaux				X	X	
Capacité de triage des matériaux					X	

2.6.6 Propriétés circonstancielles « Matériau - Produit - Environnement »

Les propriétés circonstancielles « Matériau-Produit-environnement » représentent les propriétés des matériaux par rapport à leur utilisation dans le produit et par rapport à l'environnement du produit. Une seule propriété de cette catégorie est considérée dans la méthode de sélection.

Tableau 2.6 : La propriété circonstancielle « Matériau-Produit-Environnement » et son champ d'application

	Réutilisation	Maintenance	Refabrication	Recyclage avec désassemblage	Recyclage sans désassemblage	Élimination
Durabilité des matériaux	X	X	X			

2.6.7 Pondération des propriétés évaluées

La pondération des différentes propriétés est nécessaire pour pouvoir appliquer la méthode de sélection décrite dans le paragraphe 2.5. La pondération des propriétés est propre à chaque fin de vie. Il s'agit d'un paramètre essentiel dans le calcul de l'indice d'EOL-abilité du matériau comme nous l'indique l'équation (25). La définition de la pondération des propriétés est réalisée dans ce document par le concepteur. Elle repose sur l'évaluation de l'importance que le concepteur donne à chaque propriété. Cette évaluation permet de personnaliser la méthode selon le contexte d'utilisation. Par exemple dans une zone géographique où le recyclage des matériaux est très performant grâce aux moyens industriels utilisés, la recyclabilité des matériaux pourra avoir une

pondération plus faible que dans une zone où le processus de recyclage est difficile. Le tableau présent en Annexe 4 illustre la pondération des propriétés utilisée pour les études de cas exposées dans le chapitre 5.

2.7 Résultats de l'évaluation

La méthode de sélection permet d'évaluer l'EOL-abilité des matériaux qui correspond à la capacité d'un matériau à faciliter son traitement de fin de vie. Nous obtenons une note finale pour chaque matériau $I_T^H(\tilde{S}_j)$ qui nous permet de fournir au concepteur un classement décroissant des matériaux. Le tableau 2.7 présente un exemple de résultat final :

Tableau 27 : Classement des matériaux selon leur EOL-abilité

Rang	Matériau	EOL-abilité
1	Matériau A	X
2	Matériau B	Y
3	Matériau C	Z
...
n	Matériau N	W

Le concepteur peut ainsi choisir le matériau parmi ce classement. Nous lui laissons le choix final du matériau pour que la méthode s'adapte aux différentes situations et contraintes rencontrées par le concepteur. Nous pouvons remarquer que cela est également en accord avec les limitations formulées au début de ce chapitre.

CHAPITRE 3 PARAMÈTRES ET DONNÉES

Le chapitre suivant expose plus précisément les propriétés évaluées qui ont été présentées succinctement au chapitre précédent. Les références de la littérature, les sources des données ou le mode de calcul appliqué sont présentés dans ce chapitre.

3.1 Définitions des propriétés évaluées

3.1.1 Nombre de sous-ensembles flous des propriétés

Les propriétés évaluées doivent comporter différents sous-ensembles flous définissant leur valeur pour pouvoir être évaluée. Le nombre de sous-ensembles flous par propriétés est défini comme étant égal à cinq. Ce nombre permet la définition floue de la propriété avec une résolution assez forte. Les sous-ensembles flous sont alors égaux à : Très faible, Faible, Moyen(ne), Fort(e), Très Fort(e). Néanmoins, nous avons du constater que certaines propriétés lorsqu'elles dépendaient de données devant être trouvées dans la littérature ou par étude du produit (Résistance à la corrosion, Recyclabilité, Dégradabilité, Diversité, Compatibilité de recyclage, Capacité de triage) étaient définis différemment. Ainsi certaines propriétés pouvaient être définies avec seulement trois niveaux car les données présentes dans la littérature étaient de ce type. Il s'agit des propriétés suivantes : Résistance à la corrosion, Dégradabilité, Compatibilité de recyclage et capacité de triage. Les autres propriétés évaluées (Recyclabilité et Diversité) sont définies avec des sous-ensembles flous de types peigne. En effet, dans les deux cas, ces propriétés sont issues du calcul d'un rapport entre deux quantités. Nous obtenons donc une valeur sans incertitude.

3.1.2 Forme des sous-ensembles flous

La forme des sous-ensembles flous utilisés est de deux types : triangle ou peigne. Nous avons uniformisé la définition des sous-ensembles flous avec triangle pour toutes les propriétés (à part celles définies par des peignes (Recyclabilité et Diversité). Cette uniformisation des formes des sous-ensembles flous nous permet d'assurer une équivalence de traitement pour toutes les propriétés. L'exemple traité avec la figure 3.1 nous permet d'illustrer ce principe :

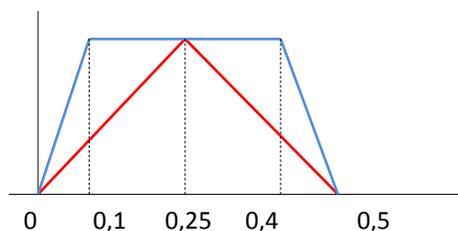


Figure 3.1 : Exemple de définition de sous-ensembles flous triangulaire et trapézoïdale

Ainsi lorsque nous défuzzifions ces sous-ensembles flous selon l'équation (27) fourni par Liao avec un coefficient d'optimisme de 0,7. Nous obtenons la valeur 0,465 pour le sous-ensemble trapézoïdal et 0,3 pour le sous-ensemble triangulaire. Si une propriété serait utilisée avec des sous-ensembles trapézoïdaux et une autre propriété avec des sous-ensembles triangulaires nous privilégierons es et une autre avec des triangles nous privilégierons la propriété définie grâce à des sous-ensembles trapézoïdaux sans réellement connaître la pondération implicite de ce choix de forme de sous-ensembles.

3.1.3 Chevauchement des sous-ensembles

Les fonctions d'appartenance des propriétés sont définies pour chaque propriété dans la suite de ce chapitre. Les fonctions d'appartenance typiques qui ont été adoptés sont présentées en figure 3.2. Nous pouvons remarquer que les fonctions d'appartenance triangulaires ont deux types de définitions : celles qui ont cinq sous-ensembles flous sont définies avec un chevauchement complet, tandis que celle à trois sous-ensembles flous sont définies avec un chevauchement partiel. Nous avons réalisé ce choix en fonction des caractéristiques des propriétés. Pour les propriétés évaluées par le concepteur, nous avons opté pour un chevauchement complet des sous-ensembles flous parce que l'évaluation du concepteur est par définition très floue. A contrario, les propriétés dont les valeurs sont définies grâce à des données obtenues dans la littérature ont un chevauchement partiel car elles reposent sur des données établies. Cela nous permet de discréditer plus fortement les différentes valeurs floues (sous-ensembles) des propriétés.

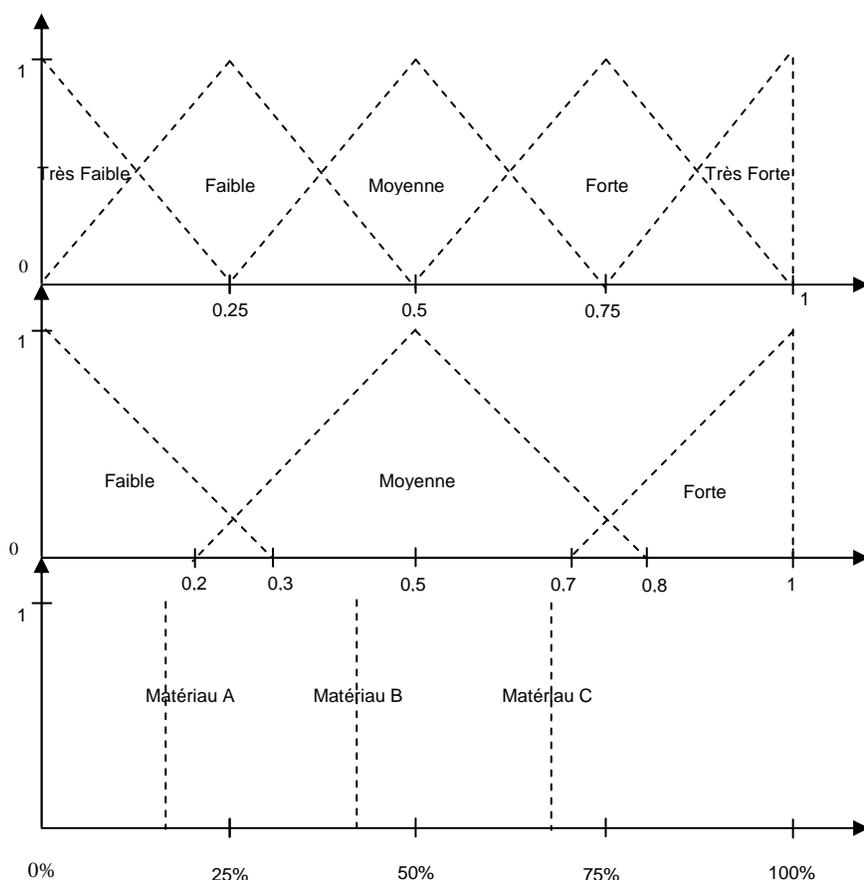


Figure 3.2 : Fonctions d'appartenance typiques utilisée pour la méthode proposée.

3.2 Présentation et caractéristiques des propriétés évaluées

3.2.1 Résistance à la corrosion

3.2.1.1 Définition de la résistance à la corrosion

La propriété des matériaux, résistance à la corrosion, permet d'évaluer la sensibilité des matériaux à leur futur environnement. Cette propriété est prise en compte dans trois fins de vie : Réutilisation, Maintenance, Refabrication. La littérature mentionne très souvent cette propriété comme une des propriétés déterminante dans ces trois fins de vie.

3.2.1.2 Source de données

La résistance à la corrosion des matériaux est largement étudiée par plusieurs organisations. La National Association of Corrosion Engineers (NACE) et l'American Society

for Testing and Material ont réalisé des tests complets et précis sur un large panel de matériaux employés en industrie. Ces tests sont consignés dans plusieurs aide-mémoires [76-78]. Les valeurs obtenues sont soit discrètes, soit floues.

3.2.1.3 Caractéristiques de la résistance à la corrosion

Les données sont présentées par une valeur de résistance à la corrosion exprimée en mm.y^{-1} ou en notation floue avec des indices s'étendant de un à trois (Notation NACE). Même si plusieurs unités cohabitent, l'unité du système international est privilégiée. L'intervalle de cette propriété est $[0, \infty]$. L'agglomération des données est faite dans le but de fournir au logiciel des données homogènes floues. Ainsi les valeurs discrètes sont traduites en valeurs floues grâce à la règle suivante : la résistance à la corrosion est faible si la résistance est supérieure à $150 \mu\text{m/année}$, moyenne si elle est comprise entre 150 et $50 \mu\text{m/année}$ et faible si elle est inférieure à $50 \mu\text{m/année}$. Cette règle est tirée de l'aide mémoire de l'ASM (volume 13) [78].

3.2.1.4 Définition de la fonction d'appartenance de la résistance à la corrosion

La représentation graphique de la fonction d'appartenance de la résistance à la corrosion est de type triangle.

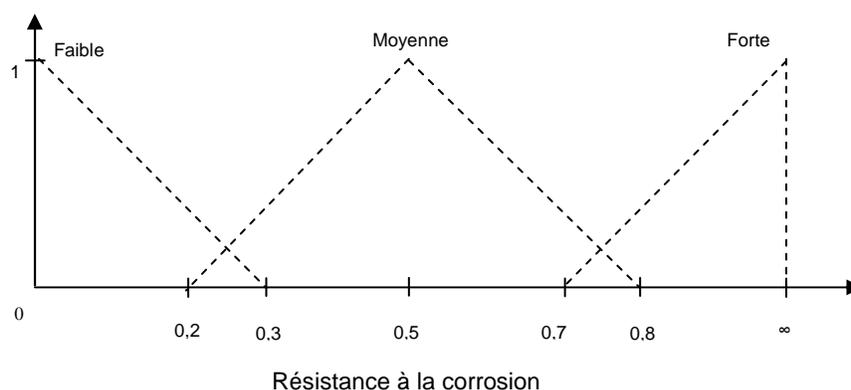


Figure 3.1 : Représentation graphique de la fonction d'appartenance de la résistance à la corrosion

3.2.2 Recyclabilité

3.2.2.1 Définition de la recyclabilité

La recyclabilité des matériaux exprime la facilité avec laquelle un matériau est recyclé. Cette propriété est très souvent mentionnée dans la littérature. Cependant, les données définissant la propriété, ou une méthode d'évaluation de cette propriété ne semblent pas encore créées. Il est mentionné qu'elle dépend de la capacité chimique du matériau à être recyclé, à l'efficacité de la chaîne logistique permettant de collecter les matériaux [11, 79] et au marché des matières recyclées qui peut favoriser le recyclage temporairement.

La définition de la recyclabilité que nous avons adoptée, dans notre projet, est celle qui met en jeu le taux de recyclage des matériaux dans une zone géographique précise. Actuellement, la résolution de l'étude de la recyclabilité est de l'ordre du pays car les agences environnementales traitent les données le plus souvent à cette échelle. La définition de paramètre pour évaluer l'efficacité de la chaîne logistique ou la capacité chimique à être recyclée est très complexe, ces paramètres dépendent du lieu considéré, des équipements utilisés, etc. Aussi en considérant le volume de matériau réellement recyclé et le volume de matériau contenu dans les produits mis hors service, nous obtenons un pourcentage de recyclabilité révélant la recyclabilité effective des matériaux dans une zone géographique précise. Cette recyclabilité nous donne la quantité exacte d'un matériau susceptible d'être recyclée dans notre produit. Soit Y , la quantité de matériaux déclarée en fin de vie et X , la quantité de ces matériaux recyclée. Nous avons donc :

$$\%Recyclabilité = \frac{X}{Y} \quad (28)$$

Les données sont donc statistiques et reflètent vraiment la recyclabilité des matériaux à un instant donné. Mais cela nécessite une mise à jour régulière et géographique des valeurs de cette propriété.

3.2.2.2 Source de données

Les données ont été collectées en évaluant la situation actuelle du recyclage des matériaux. Les agences environnementales de différents pays produisent chaque année des rapports sur le traitement des déchets en détaillant les volumes des différents matériaux recyclés, éliminés. De cette manière nous pouvons obtenir le pourcentage recyclé de chaque matériau.

3.2.2.3 Caractéristiques de la recyclabilité

La recyclabilité est exprimée en pourcentage et elle est comprise dans l'intervalle [0, 100].

3.2.2.4 Définition de la fonction d'appartenance de la recyclabilité

La représentation graphique de la fonction d'appartenance de la propriété recyclabilité est de la forme peigne. En effet, la recyclabilité est exprimée par une valeur discrète : un pourcentage. Ainsi la fonction d'appartenance des différents sous-ensembles flous de la propriété sont représentés comme ci-dessous :

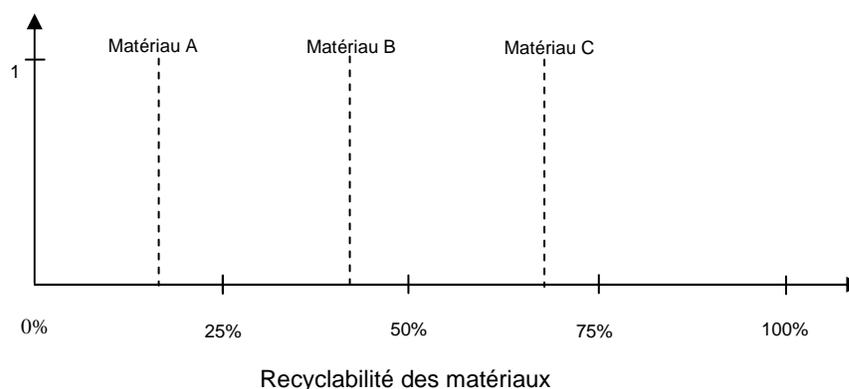


Figure 3.2 : Représentation graphique de la fonction d'appartenance de la recyclabilité

3.2.3 Dégradabilité

3.2.3.1 Définition de la dégradabilité

La dégradabilité des matériaux est la propriété qui exprime leur capacité à se dégrader. Il est donc question de rapidité de dégradation pour discriminer les matériaux entre eux. Cela est exprimé par deux méthodes : le taux de corrosion de l'échantillon et la perte de masse de l'échantillon dans le sol. En effet, la fin de vie « Élimination » définie par Rose est principalement centrée sur l'enfouissement des déchets.

3.2.3.2 Source de données

Les données sur la dégradabilité des matériaux proviennent principalement de deux sources : un aide-mémoire intitulé « Handbook of biodegradable polymers » [80] et un autre aide-mémoire intitulé « Corrosion Control » publié aux éditions CASTI [81]. L'agrégation des données nous permet d'obtenir le tableau présent en Annexe 1

3.2.3.3 Caractéristiques de la dégradabilité

La dégradabilité des matériaux est exprimé par trois sous-ensembles flous de valeur linguistique : Faible, Moyenne et Forte.

3.2.3.4 Définition de la fonction d'appartenance de la dégradabilité

La représentation graphique de la propriété dégradabilité est la suivante :

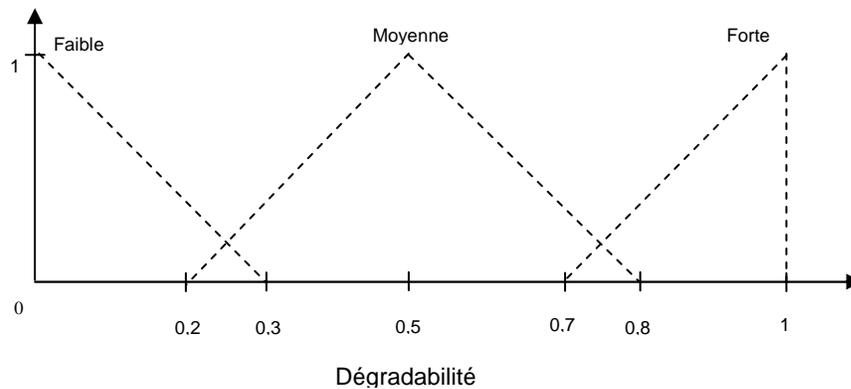


Figure 3.3 : Représentation graphique de la fonction d'appartenance de la dégradabilité

L'expression arithmétique de la fonction d'appartenance de la dégradabilité est la suivante :

$$\left. \begin{aligned} \widetilde{F}_a &= (0 ; 0 ; 0_f ; 0,3) \\ \widetilde{M} &= (0,2 ; 0,5 ; 0,5 ; 0,8) \\ \widetilde{F}_o &= (0,7 ; 1 ; 1 ; 1) \end{aligned} \right\} (29)$$

3.2.4 Uniformité du matériau dans le composant

3.2.4.1 Définition de l'uniformité du matériau dans le composant

L'uniformité du matériau dans le composant a pour but de déterminer si le concepteur va utiliser un autre matériau dans le composant sous la forme d'une peinture, d'un revêtement quelconque ou d'un insert de matériau (matériau composite, renfort métallique dans une pièce en plastique, etc.). Il s'agit d'une propriété qui décrit les composants. Il peut, par exemple, s'agir d'un composant bi-matériaux avec une partie structurelle ayant un matériau résistant et une autre partie du composant ergonomique possédant un autre matériau plus esthétique. Il peut s'agir

d'inserts permettant une meilleure fixation du composant. Le matériau ainsi ajouté doit être critique pour la fin de vie étudiée pour qu'il soit pris en compte dans l'évaluation de la propriété : l'intégration de deux matériaux compatibles entre eux pour le recyclage, dans le même composant et sous les formes indiquées ci-dessus, n'influencera pas l'uniformité du matériau dans le composant si la fin de vie du produit est de type recyclage.

3.2.4.2 Source de données

Le concepteur évalue lui-même l'uniformité du matériau dans le composant avec la table d'évaluation représentée dans le tableau 3.1 ci-dessous.

3.2.4.3 Caractéristiques de l'uniformité du matériau dans le composant

La propriété est définie directement par le concepteur de manière floue par valeur linguistique. Cinq sous-ensembles flous sont définis (Très Faible, Faible, Moyenne, Forte, Très Forte).

Tableau 3.1 : Table d'évaluation de l'uniformité du matériau dans le composant

Valeur linguistique	Description	Valeur numérique
Très Faible	Le matériau est utilisé avec insert formé d'un autre matériau et de peinture, de revêtements non compatibles avec la fin de vie	[0 ; 0,25[
Faible	Le matériau est utilisé avec insert formé d'un autre matériau non compatible avec la fin de vie.	[0 ; 0,5[
Moyenne	Le matériau est utilisé avec plusieurs types de revêtements, peintures non compatibles avec la fin de vie.	[0,25 ; 0,75[
Forte	Le matériau est utilisé avec un revêtement ou une peinture non compatible avec la fin de vie.	[0,5 ; 1[
Très Forte	Le matériau est utilisé seul, sans inserts, peintures, ou revêtements non compatibles avec la fin de vie.	[0,75 ; 1]

3.2.4.4 Définition de la fonction d'appartenance de l'uniformité du matériau dans le composant

La représentation graphique de la fonction d'appartenance de l'uniformité des matériaux est la suivante :

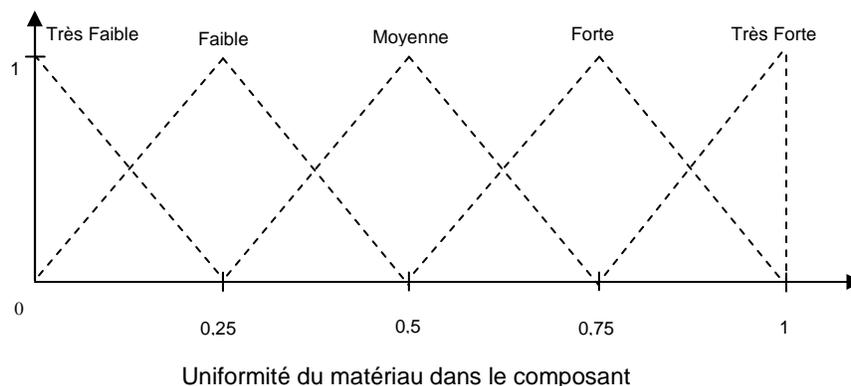


Figure 3.4 : Représentation graphique de la fonction d'appartenance de l'uniformité du matériau dans le composant

L'expression arithmétique de la fonction d'appartenance de la propriété « Uniformité du matériau dans le composant » est :

$$\begin{aligned}
 \widetilde{T\overline{F}a} &= (0 ; 0 ; 0 ; 0,25) \\
 \widetilde{F\overline{a}} &= (0 ; 0,25 ; 0,25 ; 0,5) \\
 \widetilde{M} &= (0,25 ; 0,5 ; 0,5 ; 0,75) \\
 \widetilde{F\overline{o}} &= (0,5 ; 0,75 ; 0,75 ; 1) \\
 \widetilde{T\overline{F}o} &= (0,75 ; 1 ; 1 ; 1)
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \widetilde{T\overline{F}a} \\ \widetilde{F\overline{a}} \\ \widetilde{M} \\ \widetilde{F\overline{o}} \\ \widetilde{T\overline{F}o} \end{aligned}} \right\} (30)$$

3.2.5 Diversité des matériaux

3.2.5.1 Définition de la diversité des matériaux

La diversité des matériaux est une propriété du produit essentielle dans les fins de vie de type recyclage. En effet, plus les matériaux sont nombreux, plus il faudra réaliser des désassemblages ou du triage pour le recyclage sans désassemblage.

3.2.5.2 Source de données

Le produit lui-même nous permet de connaître le nombre de matériaux présents dans celui-ci. Nous définissons la diversité des matériaux comme le rapport entre le nombre de matériaux différents utilisés dans le produit (NbMat) et le nombre de composants qu'il possède (NbComp).

Nous avons donc :

$$\% \text{ Diversité} = \frac{\text{NbMat}}{\text{NbComp}} \quad (31)$$

3.2.5.3 Caractéristiques de la diversité des matériaux

La diversité des matériaux dans le produit est exprimée en pourcentage et elle est comprise dans l'intervalle [0,100].

3.2.5.4 Définition de la fonction d'appartenance de la diversité des matériaux

La représentation graphique de la fonction d'appartenance de la propriété diversité des matériaux est de type peigne car aucune incertitude n'est présente dans le calcul de la diversité : elle est déduite du produit.

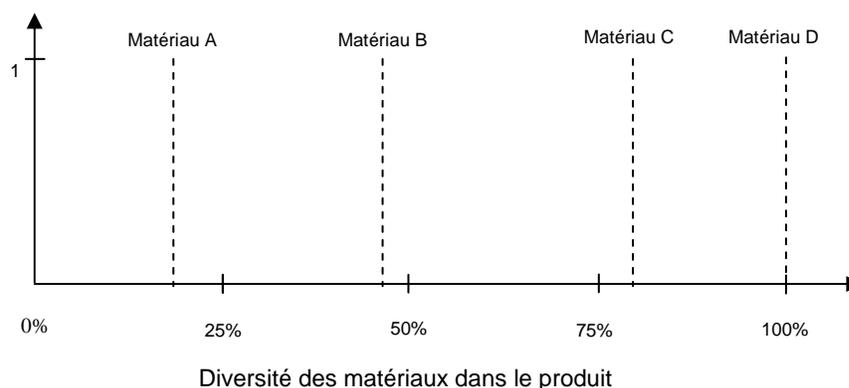


Figure 3.5 : Représentation graphique de la fonction d'appartenance de la diversité des matériaux

3.2.6 Marquage des composants

3.2.6.1 Définition du marquage des composants

La propriété du produit marquage des composants permet de caractériser si les matériaux sont plus ou moins identifiables rapidement par un sigle normalisé. Cette propriété est très importante par exemple pour le recyclage avec désassemblage.

3.2.6.2 Source de données

Le concepteur estime le nombre de composants pourvu d'un label ou d'un sigle qui permet d'identifier le matériau. Ainsi, le marquage des composants est exprimé en pourcentage : il s'agit du rapport entre le nombre estimé de composants marqués ($NbMarq$) et le nombre de composants du produit ($NbComp$).

Nous avons donc :

$$\% \text{ Marquage} = \frac{NbMarq}{NbComp} \quad (32)$$

Le marquage des matériaux est défini de manière floue à l'aide de la table suivante :

Tableau 3.2 : Table d'évaluation du marquage des composants

Valeur linguistique	Description	Valeur numérique
Très Faible	Entre 0% et 25% des matériaux sont marqués	[0 ; 0,25[
Faible	Entre 0% et 50% des matériaux sont marqués	[0 ; 0,5[
Moyenne	Entre 25% et 75% des matériaux sont marqués	[0,25 ; 0,75[
Forte	Entre 50% et 100% des matériaux sont marqués	[0,5 ; 1[
Très Forte	Entre 75% et 100% des matériaux sont marqués	[0,75 ; 1]

3.2.6.3 Caractéristiques du marquage des composants

Le marquage des composants est exprimé en pourcentage et il est compris dans l'intervalle [0,100].

3.2.6.4 Définition de la fonction d'appartenance du marquage des composants

La représentation graphique de la fonction d'appartenance de la propriété marquage des composants est la suivante :

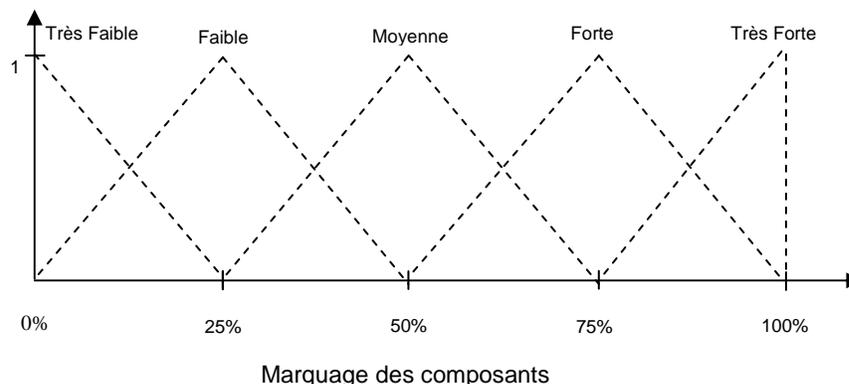


Figure 3.6 : Représentation graphique de la fonction d'appartenance du marquage des composants

L'expression arithmétique de la fonction d'appartenance du marquage des composants est :

$$\left. \begin{aligned}
 \widetilde{TFa} &= (0 ; 0 ; 0 ; 0,25) \\
 \widetilde{Fa} &= (0 ; 0,25 ; 0,25 ; 0,5) \\
 \widetilde{M} &= (0,25 ; 0,5 ; 0,5 ; 0,75) \\
 \widetilde{Fo} &= (0,5 ; 0,75 ; 0,75 ; 1) \\
 \widetilde{TFo} &= (0,75 ; 1 ; 1 ; 1)
 \end{aligned} \right\} (33)$$

3.2.7 Compatibilité de recyclage des matériaux

3.2.7.1 Définition de la compatibilité de recyclage des matériaux

La compatibilité de recyclage est une propriété circonstancielle des matériaux qui permet de définir la compatibilité des matériaux évalués avec les matériaux potentiellement déjà présents dans le produit. Cette propriété est très influente dans les fins de vie de type recyclage. Deux matériaux compatibles entre eux permettent d'éviter un désassemblage ou une opération de tri.

3.2.7.2 Sources de données

La littérature comportait différentes données sur la compatibilité de recyclage des matériaux [82, 83]. L'agrégation des données contenues dans les références [82] et [83] nous permet d'obtenir une matrice de compatibilité de recyclage des matériaux (*cf.* Annexe 2).

3.2.7.3 Caractéristiques de la compatibilité de recyclage des matériaux

La compatibilité de recyclage est exprimé par trois sous-ensembles flous de valeur linguistique : Faible, Moyenne et Forte.

3.2.7.4 Définition de la fonction d'appartenance de la compatibilité de recyclage des matériaux

La représentation graphique de la propriété compatibilité de recyclage est la suivante :

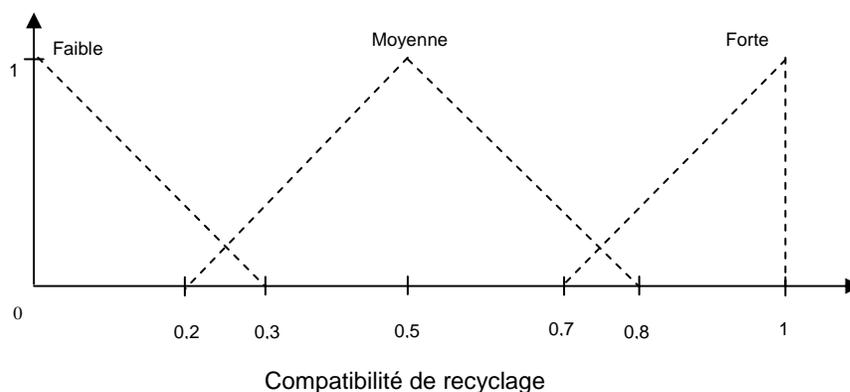


Figure 3.7 : Représentation graphique de la fonction d'appartenance de la compatibilité de recyclage

L'expression arithmétique de la fonction d'appartenance de la compatibilité de recyclage est la suivante :

$$\left. \begin{aligned} \widetilde{F}_a &= (0 ; 0 ; 0 ; 0,3) \\ \widetilde{M} &= (0,2 ; 0,5 ; 0,5 ; 0,8) \\ \widetilde{F}_o &= (0,7 ; 1 ; 1 ; 1) \end{aligned} \right\} (34)$$

3.2.8 Capacité de triage des matériaux

3.2.8.1 Définition de la capacité de triage des matériaux

La capacité de triage intervient uniquement dans le recyclage sans désassemblage. Cette fin de vie impose en effet un tri après broyage des produits. Cette propriété permet d'assurer l'utilisation appropriée des matériaux dans le contexte d'utilisation en évaluant la capacité des matériaux à évaluer avec les matériaux potentiellement déjà présents dans le produit

3.2.8.2 Sources de données

Les données relatives à la capacité de triage n'ont pas été disponibles directement. Nous avons mené une évaluation de la capacité de triage en étudiant les processus de triage disponibles et leurs caractéristiques (cf. Annexe 3). Les données qui ont permis de réaliser cette étude proviennent principalement de l'ADEME, Recyc-Québec et les Techniques de l'Ingénieur.

3.2.8.3 Caractéristiques de la capacité de triage des matériaux

La capacité de triage est exprimée par trois sous-ensembles flous de valeur linguistique : Faible, Moyenne, Forte.

3.2.8.4 Définition de la fonction d'appartenance de la capacité de triage des matériaux

La représentation graphique de la fonction 'd'appartenance' de la propriété capacité de triage est la suivante :

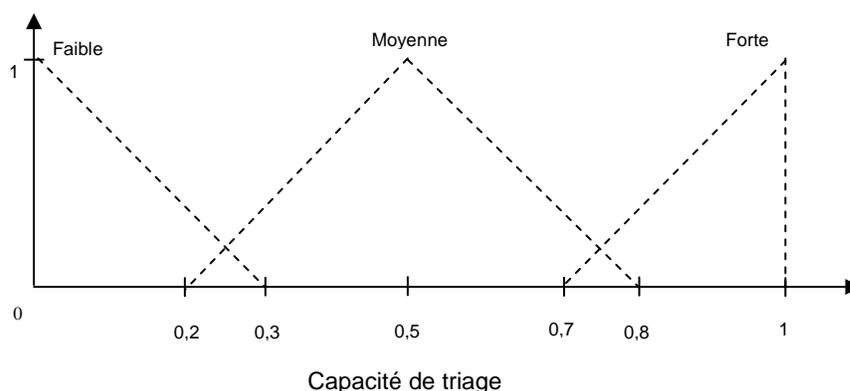


Figure 3.8 : Représentation graphique de la fonction d'appartenance de la capacité de triage des matériaux

L'expression arithmétique de la fonction d'appartenance de la propriété capacité de triage est la suivante :

$$\left. \begin{aligned} \widetilde{F}_a &= (0 ; 0 ; 0 ; 0,3) \\ \widetilde{M} &= (0,2 ; 0,5 ; 0,5 ; 0,8) \\ \widetilde{F}_o &= (0,7 ; 1 ; 1 ; 1) \end{aligned} \right\} (35)$$

3.2.9 Durabilité du matériau

3.2.9.1 Définition de la durabilité du matériau

La durabilité du matériau exprime la capacité du matériau à durer dans son contexte d'utilisation. Cette propriété est définie pour tous les matériaux pour chaque composant dépendamment des sollicitations externes du composant. Le concepteur utilise alors son jugement pour renseigner la valeur de la durabilité du matériau pour le composant. Par exemple, pour une pièce soumise à une contrainte de cisaillement forte, l'acier aura une forte durabilité alors qu'un plastique PE aura une durabilité très faible.

3.2.9.2 Source de données

Le concepteur évalue lui-même la durabilité d'un matériau pour un composant précis avec la table d'évaluation représentée dans le tableau 3.3 ci-dessous.

Tableau 3.3 : Table d'évaluation de la durabilité d'un matériau pour un composant.

Valeur linguistique	Description	Valeur numérique
Très Faible	Le matériau ne permet pas au composant d'assurer sa fonction.	$[0 ; 0,25[$
Faible	Le matériau permet au composant d'assurer sa fonction mais cela pendant un temps inférieur à la durée de vie du produit.	$[0 ; 0,5[$
Moyenne	Le matériau permet au composant d'assurer sa fonction en remplissant toutes les exigences.	$[0,25 ; 0,75[$
Forte	Le matériau permet au composant d'assurer pleinement sa fonction. La durée de vie du composant sera supérieure à celle du produit.	$[0,5 ; 1[$
Très Forte	Le matériau permet au composant d'assurer pleinement sa fonction. La durée de vie du composant sera très supérieure à celle du produit.	$[0,75 ; 1]$

3.2.9.3 Caractéristiques de la durabilité du matériau pour le composant

La propriété est définie directement par le concepteur de manière floue par valeur linguistique. Cinq sous-ensembles flous sont définis (Très Faible, Faible, Moyenne, Forte, Très Forte).

3.2.9.4 Définition de la fonction d'appartenance de la durabilité du matériau

La représentation graphique de la fonction d'appartenance de la durabilité du matériau est la suivante :

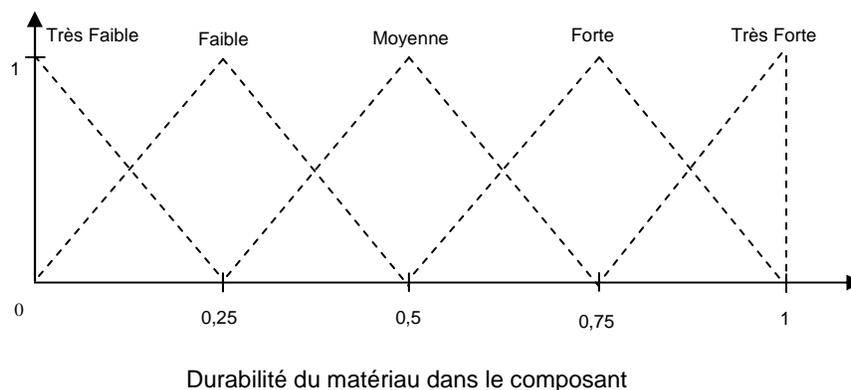


Figure 3.9 : Représentation graphique de la fonction d'appartenance de la durabilité du matériau
L'expression arithmétique de la fonction d'appartenance de la propriété « Durabilité du matériau » est :

$$\left. \begin{aligned}
 \widetilde{TFa} &= (0 ; 0 ; 0 ; 0,25) \\
 \widetilde{Fa} &= (0 ; 0,25 ; 0,25 ; 0,5) \\
 \widetilde{M} &= (0,25 ; 0,5 ; 0,5 ; 0,75) \\
 \widetilde{Fo} &= (0,5 ; 0,75 ; 0,75 ; 1) \\
 \widetilde{TFo} &= (0,75 ; 1 ; 1 ; 1)
 \end{aligned} \right\} (36)$$

3.3 Bilan

Le tableau suivant résume les différentes informations développées dans les paragraphes précédents : forme des sous-ensembles flous, incertitude des données et sources des données.

Tableau 3.4 : Caractéristiques des différentes propriétés

Propriétés	Sous-ensemble flou	Incertain	Source des données
Résistance à la corrosion	Triangle	OUI	Données extérieures
Recyclabilité	Peigne	NON	Données extérieures
Dégradabilité	Triangle	OUI	Données extérieures
Uniformité du matériau dans le composant	Triangle	OUI	Concepteur
Diversité des matériaux	Peigne	NON	Produit
Marquage des matériaux	Triangle	OUI	Concepteur
Compatibilité de recyclage	Triangle	OUI	Données extérieures
Capacité de triage	Triangle	OUI	Données extérieures
Durabilité	Triangle	OUI	Concepteur

Les formes de sous-ensembles flous utilisés pour décrire les paramètres évalués dans la sélection environnementale des matériaux dépendent de la précision des données. Ainsi, un paramètre évalué par des données numériques discrètes pourra être exprimé par un peigne. Si le paramètre a une valeur exprimée par un intervalle, il sera exprimé par un rectangle. Pour une valeur linguistique (faible, moyen, etc.) nous avons fait le choix de choisir des triangles pour exprimer la valeur. Cela est à mettre en relation avec le paragraphe 2.4.1.3 du chapitre 2 qui illustre les différentes formes de sous-ensembles flous et les implications sur les représentations par le principe d'extension.

CHAPITRE 4 IMPLÉMENTATION INFORMATIQUE DE LA MÉTHODE

Le chapitre suivant est consacré à la description de l'implémentation de la méthode dans un outil informatique. Il énonce les différentes caractéristiques du programme informatique, les moyens mis en œuvre pour sa réalisation. Pour finir, ce chapitre présente la forme finale du logiciel ainsi que les processus internes permettant de mener à bien l'implémentation.

4.1 Cahier des charges fonctionnel du logiciel

Nous présentons, ici, un cahier des charges fonctionnel du logiciel pour appréhender l'environnement du logiciel, ses utilisateurs et les fonctions qu'il doit remplir. La réalisation de ce cahier des charges nous permet de faciliter la conception du logiciel et d'assurer l'adéquation du logiciel avec les besoins des utilisateurs. La figure 4.1 illustre l'expression du besoin de l'utilisateur du logiciel.

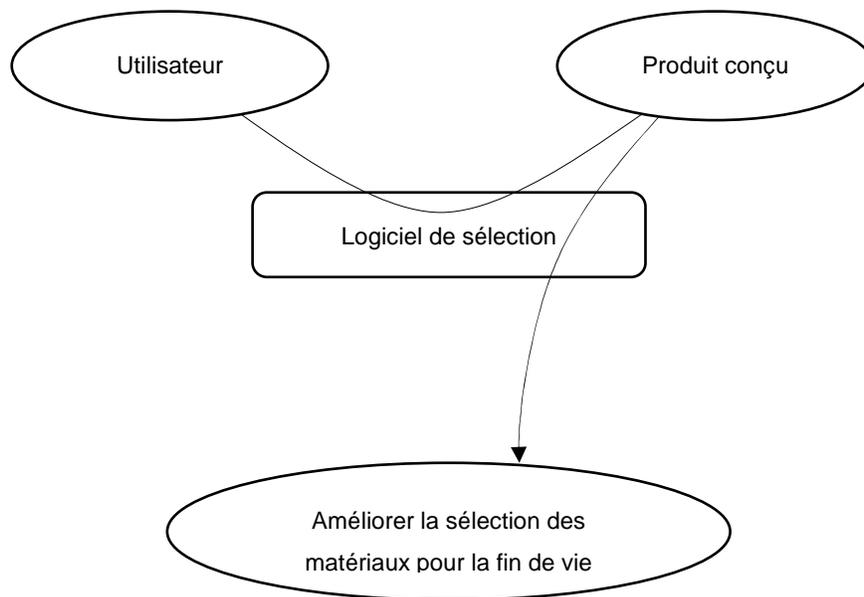


Figure 4.1 : Expression du besoin du logiciel de sélection des matériaux

4.1.1 Interacteurs

Les interacteurs principaux du logiciel sont :

- Le concepteur ou l'équipe de conception¹ du produit. Le concepteur ou l'équipe de conception du produit utilise le logiciel pour sélectionner le matériau d'un ou plusieurs composants d'un produit défini;
- Le produit en question dans la sélection des matériaux. Ce produit est défini pour pouvoir quantifier et qualifier certaines de ses caractéristiques permettant une sélection des matériaux plus effective;
- Les matériaux à sélectionner pour un ou des composants. Les matériaux potentiellement sélectionnés ont des propriétés différentes et influencent la sélection des matériaux;
- L'environnement du produit. Cet environnement peut modifier la réponse du produit au fil du temps et donc influencer la sélection des matériaux.

Nous avons identifié aussi deux autres interacteurs secondaires :

- L'administrateur du logiciel. L'administrateur désigne dans notre cas la personne qui personnalise le processus d'évaluation des matériaux : certains paramètres doivent être modifiés si les propriétés des matériaux évoluent (recyclabilité, capacité de triage, etc.). Nous pouvons remarquer que l'administrateur et le concepteur peuvent être une seule et même personne dans certains cas.
- Le mainteneur du logiciel. Les modifications, évolutions du logiciel sont des cas à prévoir lors de la programmation de celui-ci. Ces opérations seront effectuées par un ou plusieurs que nous dénommons sous le terme générique de mainteneur.

¹ Dans la suite du mémoire, le concepteur ou l'équipe de concepteur est utilisé sans distinction de sens

4.1.2 Fonctions remplies par le logiciel

Le programme devra remplir plusieurs fonctions permettant de répondre aux besoins des utilisateurs du logiciel (concepteur, administrateur et mainteneur). Ces fonctions sont nommées « fonctions principales » **FP**. Ces fonctions mettent en relation deux interacteurs parmi les six interacteurs identifiés ci-dessus, avec le logiciel de sélection. Un autre type de fonction est également identifié : les « fonctions contraintes » **FC** qui ne symbolisent que la relation entre un interacteur avec le logiciel.

4.1.2.1 Sélection des matériaux d'un ou de plusieurs composants d'un produit

Il s'agit du but de la méthode présentée dans ce mémoire. Nous pouvons sous-diviser ce but en plusieurs fonctions principales :

- Permettre la définition du produit dans le logiciel – FP1;
- Évaluer différents matériaux – FP2;
- Permettre le choix du matériau par le concepteur et l'intégrer à la définition du produit en vue d'une nouvelle sélection sur un autre composant – FP3;
- S'adapter aux contraintes techniques et/ou économiques rencontrées par le concepteur – FP4.

4.1.2.2 Être utilisable sans guide d'utilisateur – FC1

Cette fonction principale assure le fait que le logiciel de sélection puisse être utilisé sans que l'utilisateur soit contraint de rechercher des informations spécifiques dans un guide annexe.

4.1.2.3 Donner un retour d'information au concepteur sur la sélection réalisée – FC2

Le concepteur doit pouvoir avoir en sa possession un document rendant compte des résultats des évaluations réalisés par le logiciel, du choix final réalisé par le concepteur. Dans ce but, le logiciel doit générer un document récapitulatif de toutes ces opérations, actions et évaluations.

4.1.2.4 Paramétrage du logiciel – FP5

Le logiciel doit pouvoir être paramétré pour que l'évaluation réalisée puisse être fiable même si certaines propriétés des matériaux ont évolué (recyclabilité, capacité de triage, etc.). Cette fonction principale du programme sert essentiellement à l'administrateur. Elle permet de garantir l'adaptabilité du logiciel et donc l'utilisation de la méthode de sélection proposée.

4.1.2.5 Maintenabilité du logiciel - FC3

La maintenabilité du logiciel doit être assurée pour qu'il puisse être réutilisé, modifié ou intégré à un autre logiciel. Cet aspect concerne uniquement le mainteneur du logiciel et elle est fondamentale pour assurer la pérennité du travail réalisé dans le projet de recherche. Cette fonction principale est réalisée pendant la phase de programmation.

4.1.3 Bilan

Les relations entre les interacteurs, les fonctions remplies et le logiciel en lui-même sont représentés par la figure 4.2.

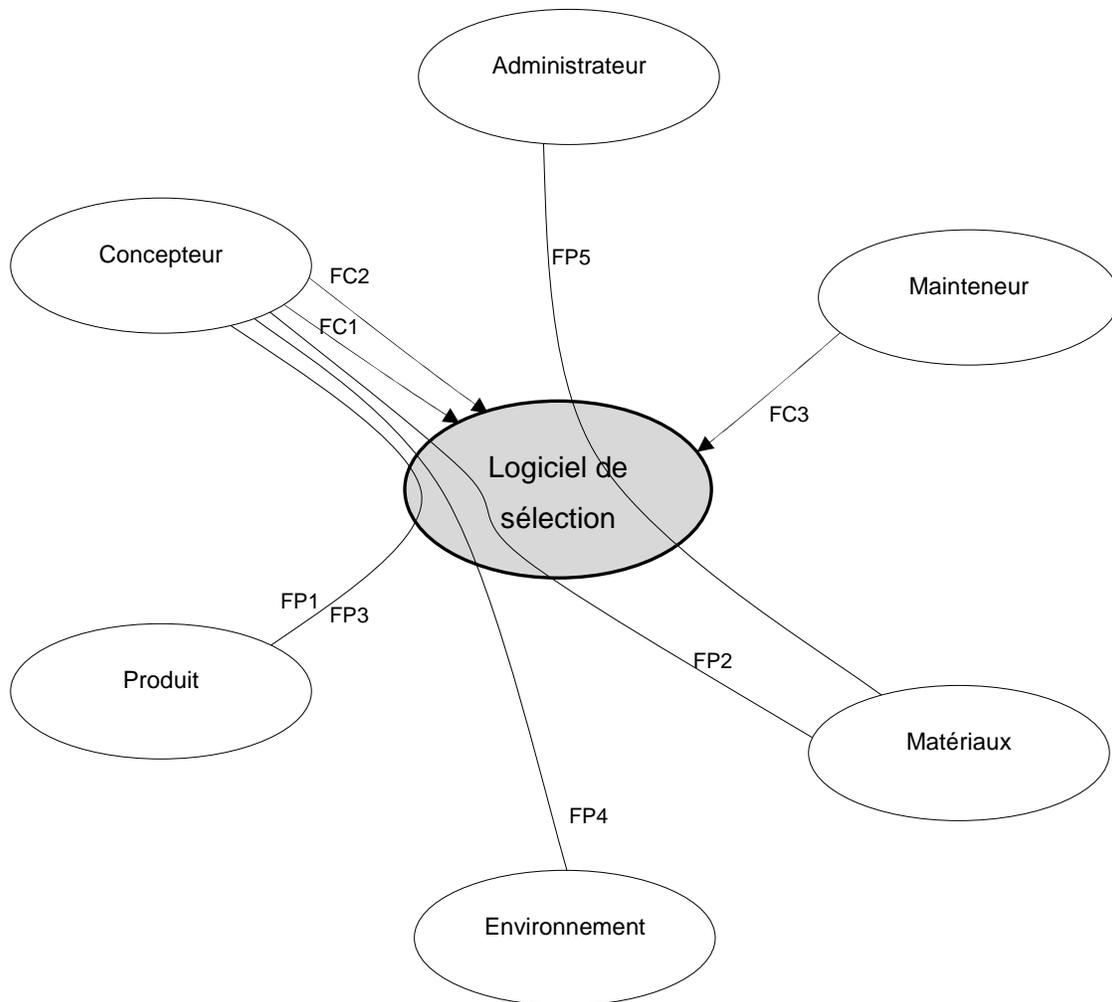


Figure 4.2 : Diagramme des interacteurs du logiciel de sélection des matériaux

4.2 Moyens techniques mis en œuvre

4.2.1 Langage de programmation

Le choix du langage de programmation a été effectué principalement par des raisons de compétence. En effet, le suivi de cours d'informatique pour programmation en C++ a orienté le choix du langage de programmation naturellement vers celui-ci. De plus, le langage C++, évolution du langage C possède des avantages indéniables :

- La rapidité du langage : le C++ a hérité des qualités du langage C et par ce biais est un langage très rapide car de bas niveau. Cela assure une bonne réactivité lors de l'utilisation du logiciel;

- La portabilité du langage : le langage C++ fonctionne sous les principaux systèmes d'exploitation utilisés aujourd'hui, que ce soit Linux, Mac OS ou Windows, seule la compilation du langage est à renouveler pour assurer le fonctionnement sur ces systèmes d'exploitations;
- Le support de la programmation objet : le langage C++ a été conçu dans le but de supporter la programmation objet qui permet une réutilisation et une maintenabilité du langage facilitées.

Le logiciel de sélection a donc été programmé sous C++ et compilé sous la forme d'un fichier de type « .exe » sans utilisation de fichier « .dll ». Ce dernier point est important car l'utilisation des fichiers « .dll » pose des problèmes récurrents pour la transmission et l'installation du programme sur de multiples ordinateurs.

4.2.2 Génération d'un compte rendu de sélection des matériaux

La génération d'un compte rendu de sélection des matériaux est réalisée par le programme à chaque étape de sélection pour archiver les différentes informations entrées par le concepteur, les résultats des évaluations exécutées par le logiciel et les choix finaux de matériaux réalisés par le concepteur. Le choix du format « .txt » a été motivé par différentes raisons techniques :

- La gestion native de ce type de format par le C++;
- La compatibilité de ce format à la majorité des systèmes informatiques;
- La légèreté de ce format pendant son utilisation.

4.2.3 Paramétrage du logiciel par fichier externe

Le paramétrage du logiciel de sélection est facilité par l'utilisation d'un fichier externe contenant les différentes valeurs des propriétés matériaux décrites dans les chapitres 2 et 3. Ces propriétés peuvent être classées dans différentes catégories :

- Les propriétés des matériaux. Elles sont au nombre de cinq : la résistance à la corrosion; la recyclabilité; la dégradabilité; la compatibilité de recyclage; la capacité de triage;

- Les données nécessaires au processus d'évaluation des matériaux. Cette catégorie regroupe : la pondération des propriétés dans l'évaluation des matériaux; la valeur désirée pour chaque propriété.

Les fichiers externes sont de type fichier Excel enregistré au format texte. Le programme de Microsoft, MS Excel est très utilisé aussi bien au niveau industriel que personnel. Le format « tableur » est souvent utilisé pour stocker ou communiquer différentes données textuelles ou numériques. Les étapes pour l'utilisation du logiciel sont les suivantes :

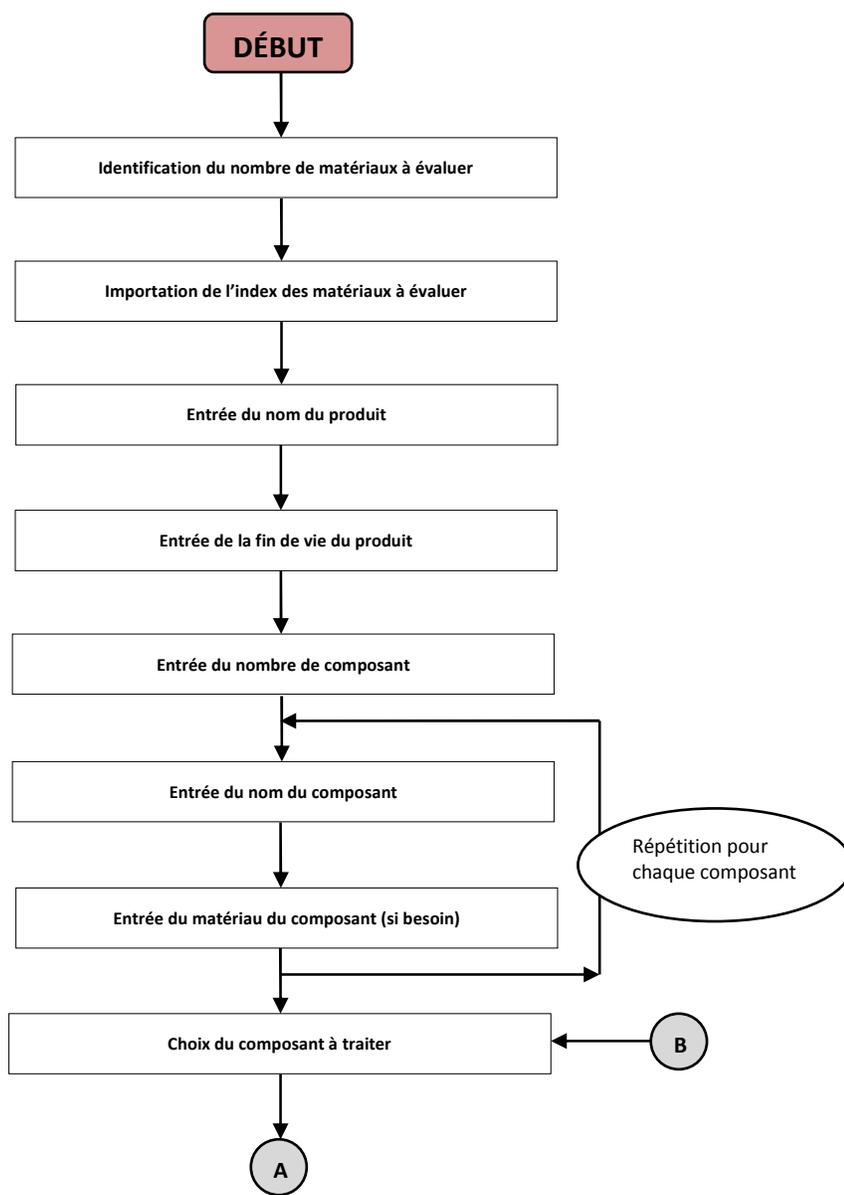
1. Constitution d'un tableau des différentes propriétés sous MS Excel;
2. Enregistrement du tableau au format « .txt »
3. Transfert du fichier « .txt » dans le répertoire ou le logiciel est stocké.

4.3 Présentation du programme ECMSPEOL

Le paragraphe suivant présente le programme informatique créé lors du projet de recherche. Ce logiciel est nommé ECMSPEOL pour « Environmental and Contextual Material's Selector for Products End-Of-Life ». Nous allons commencer par présenter le fonctionnement du logiciel et nous exposerons ensuite l'interface graphique que le concepteur rencontre lors de l'utilisation de ce logiciel.

4.3.1 Fonctionnement du logiciel

Nous présentons, dans la suite de ce paragraphe, les flux de données réalisés au sein du logiciel.



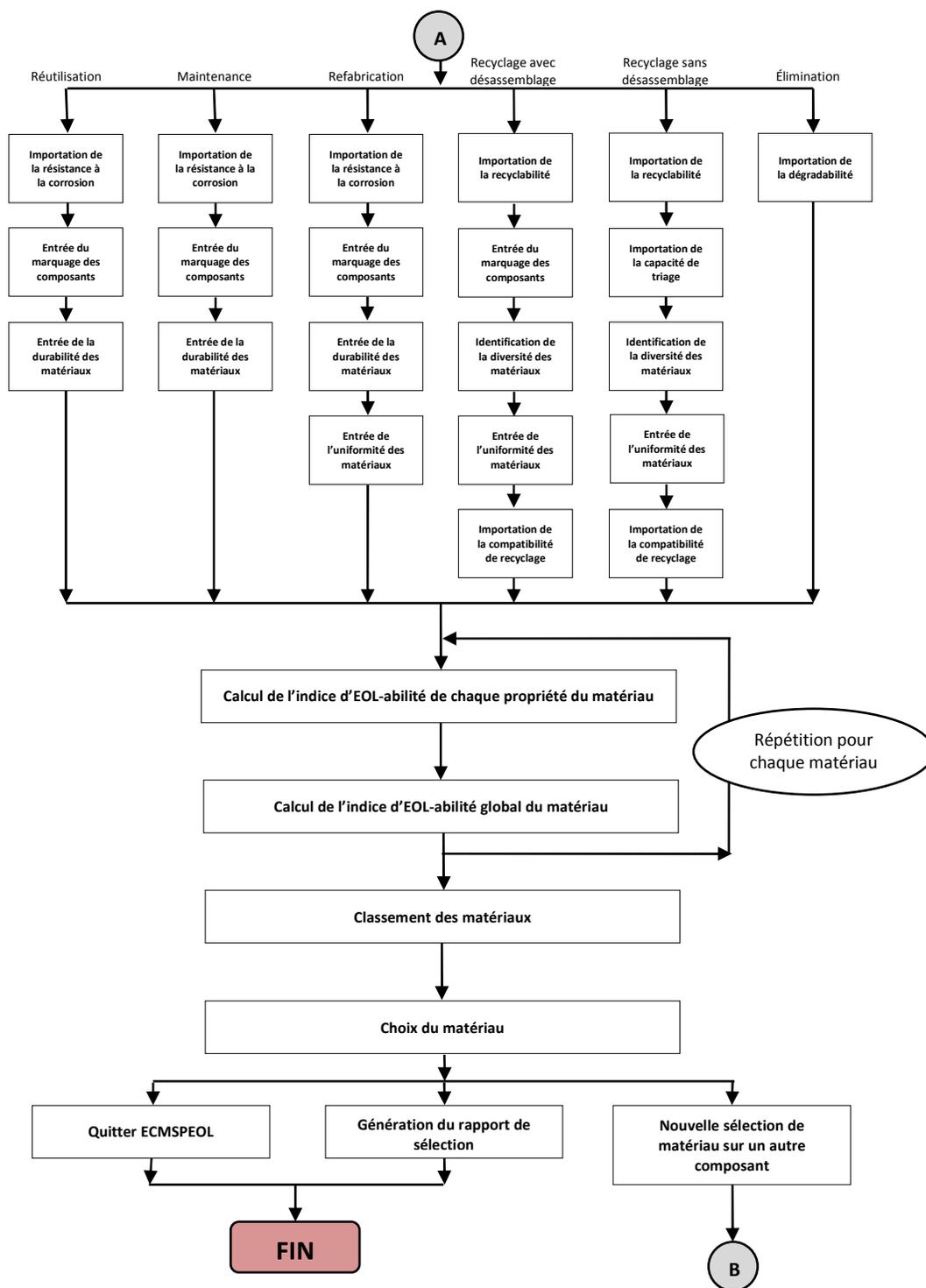


Figure 4.3 : Diagrammes des actions réalisées par ECMSPEOL

4.3.2 Interface graphique

L'interface graphique d'ECMSPEOL est composée de sept vues principales, de trois boîtes de dialogues complémentaires permettant au concepteur d'entrer des informations et de six boîtes d'aide. Nous ne détaillerons pas toutes les vues et boîtes de dialogues dans la suite de ce paragraphe mais nous présenterons un organigramme des différentes vues et boîte de dialogue et nous étudierons plus précisément les vues² correspondants aux étapes clés de la sélection des matériaux.

4.3.2.1 Organisation de l'interface graphique d'ECMSPEOL

La figure 4.4 représente l'organisation générale du programme et de ses différentes vues avec les boîtes de dialogues complémentaires et les boîtes d'aide. Nous pouvons remarquer que les boîtes d'aide sont assez nombreuses et présentes tout au long du programme.

² Le terme « vue » désigne une configuration précise de la fenêtre du programme, il existe plusieurs vues, pouvant s'apparenter à différentes étapes de sélection.

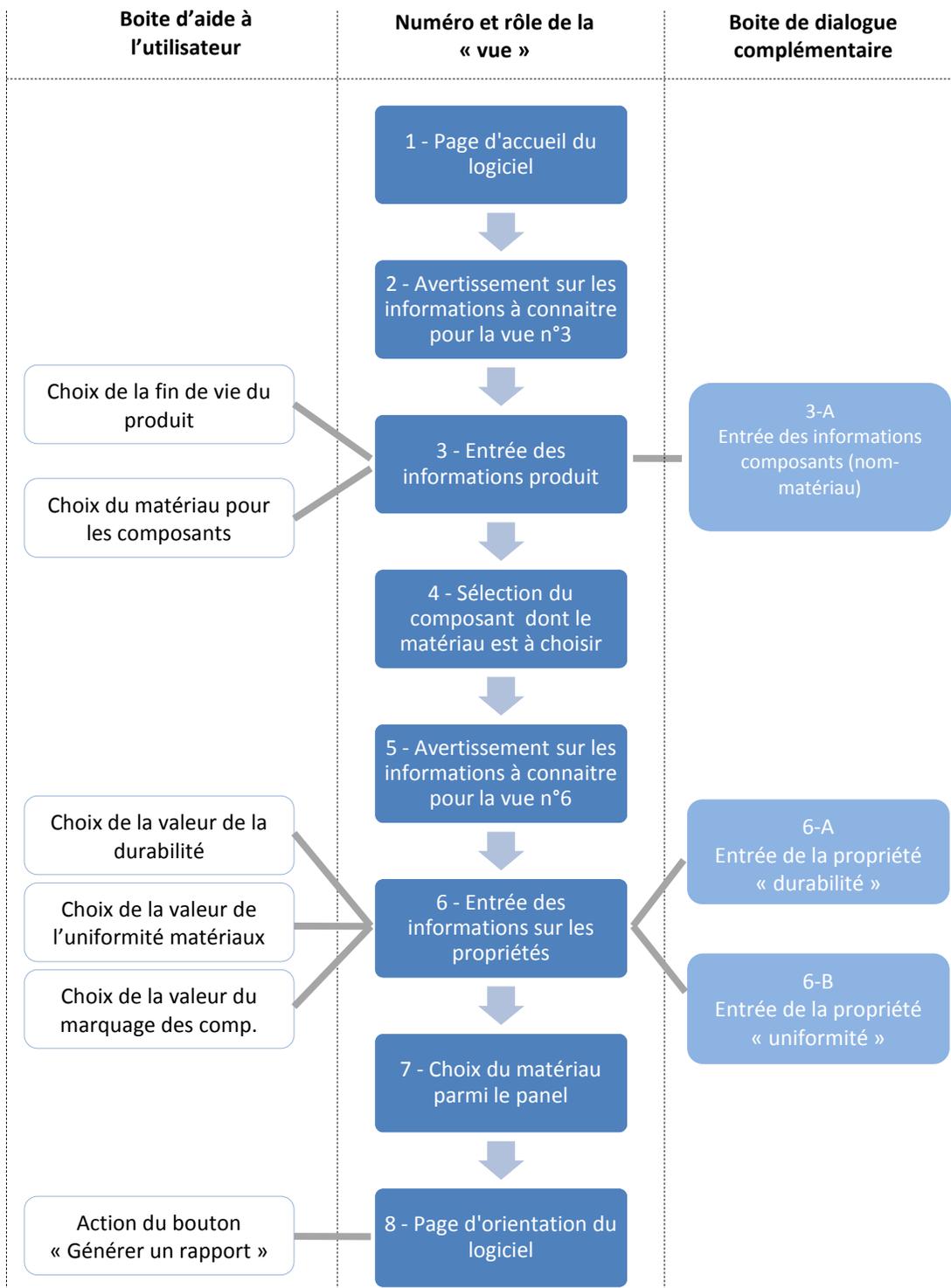
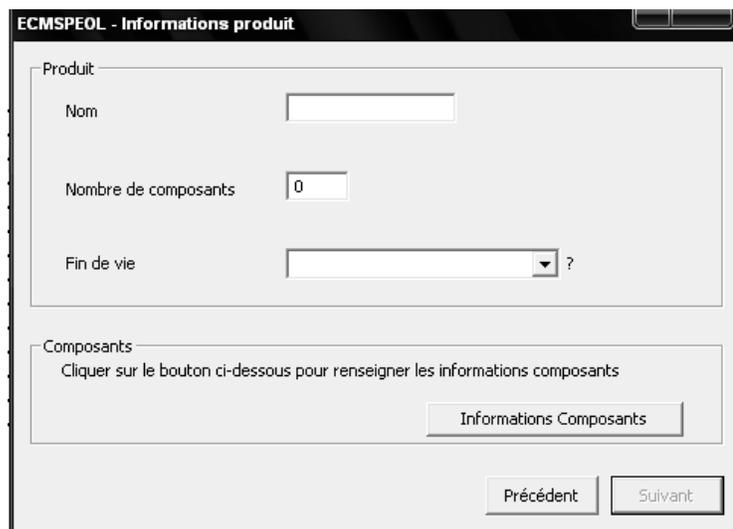


Figure 4.4 : Organigramme des différentes vues et boites de dialogue d'ECMSPEOL

4.3.2.2 Les principales vues du logiciel ECMSPEOL

4.3.2.2.1 Entrée des informations produit

L'entrée des informations relatives au produit se fait par l'intermédiaire de la vue illustrée par la figure 4.5.



The screenshot shows a window titled "ECMSPEOL - Informations produit". It is divided into two main sections. The top section, labeled "Produit", contains three input fields: "Nom" (a text box), "Nombre de composants" (a text box containing the number "0"), and "Fin de vie" (a dropdown menu with a question mark). The bottom section, labeled "Composants", contains a text box with the instruction "Cliquer sur le bouton ci-dessous pour renseigner les informations composants" and a button labeled "Informations Composants". At the very bottom of the window are two buttons: "Précédent" and "Suivant".

Figure 4.5 : Entrée des informations relatives au produit dans ECMSPEOL

Les entrées des informations relatives aux composants, qui font partie intégrante des informations relatives au produit, sont réalisées par la boîte de dialogue complémentaire exposée dans la figure 4.6.



The screenshot shows a window titled "ECMSPEOL - Informations Composants". It displays "Informations du composant n° 1 sur 7" at the top. Below this are two input fields: "Nom du Composant" (a text box) and "Matériau connu" (a dropdown menu with a question mark). On the right side of the window are two buttons: "OK" and "Annuler".

Figure 4.6 : Entrée des informations relatives aux composants dans ECMSPEOL

4.3.2.2.2 Sélection du composant dont le matériau doit être choisi

Le composant doit être sélectionné parmi les composants dont le matériau n'a pas été renseigné. Cette vue permet de le faire par le moyen d'une liste déroulante.

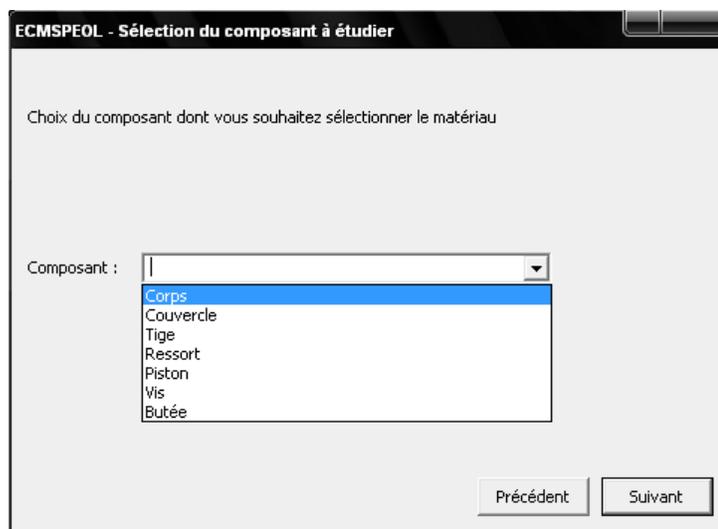


Figure 4.7 : Sélection du composant dont le matériau doit être choisi dans ECMSPEOL

4.3.2.2.3 Attribution de la valeur des propriétés et évaluation des matériaux

Les valeurs des propriétés peuvent être attribuées par lecture des fichiers externes et traitement du logiciel. Certaines peuvent aussi être renseignées par le concepteur. La figure 4.8 illustre les deux types de propriétés.

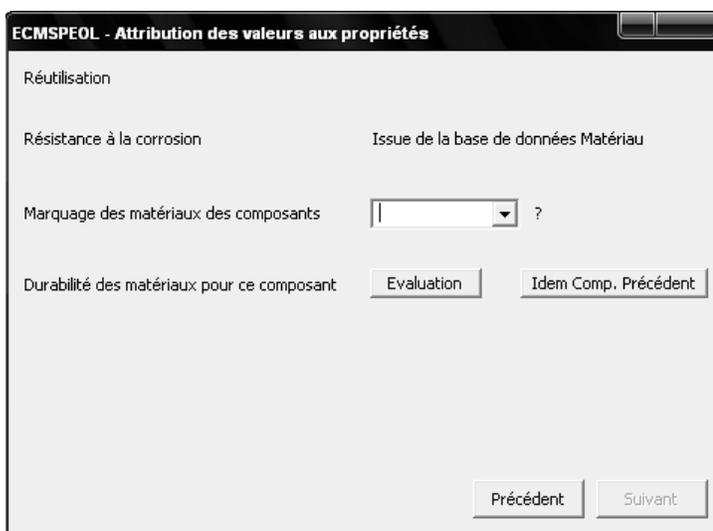


Figure 4.8 : Renseignement de la valeur des propriétés dans ECMSPEOL

Il faut remarquer que la vue présentée en figure 4.8 n'est pas la même selon la fin de vie du produit car les propriétés à évaluer ne sont pas les mêmes selon la fin de vie (cf. chapitre 2). La figure 4.9 présente une mosaïque des différentes versions de la vue :

Réutilisation

ECMSPEOL - Attribution des valeurs aux propriétés

Réutilisation

Résistance à la corrosion Issue de la base de données Matériau

Marquage des matériaux des composants ?

Durabilité des matériaux pour ce composant

Maintenance

ECMSPEOL - Attribution des valeurs aux propriétés

Maintenance

Résistance à la corrosion Issue de la base de données Matériau

Marquage des matériaux des composants ?

Durabilité des matériaux pour ce composant

Refabrication

ECMSPEOL - Attribution des valeurs aux propriétés

Refabrication

Résistance à la corrosion Issue de la base de données Matériau

Marquage des matériaux des composants ?

Durabilité des matériaux pour ce composant

Uniformité du matériau dans ce composant

Recyclage avec désassemblage

ECMSPEOL - Attribution des valeurs aux propriétés

Recyclage avec désassemblage

Recyclabilité Issue de la base de données Matériau

Marquage des matériaux des composants ?

Diversité des matériaux dans le produit Issue de l'étude du produit

Uniformité du matériau dans ce composant

Compatibilité de recyclage des matériaux Issue de la base de données Matériaux

Recyclage sans désassemblage

ECMSPEOL - Attribution des valeurs aux propriétés

Recyclage sans désassemblage

Recyclabilité Issue de la base de données Matériau

Capacité de triage Issue de la base de données Matériau

Diversité des matériaux dans le produit Issue de l'étude du produit

Uniformité du matériau dans ce composant

Compatibilité de recyclage des matériaux Issue de la base de données Matériaux

Élimination

ECMSPEOL - Attribution des valeurs aux propriétés

Elimination

Dégradabilité Issue de la base de données Matériau

Figure 4.9 : Les différentes versions de la vue permettant d'attribuer une valeur aux propriétés

Nous pouvons remarquer que les fins de vie réutilisation et maintenance ont les mêmes paramètres à évaluer. La littérature rapproche fortement ces deux fins de vie lors de la sélection des matériaux. La différence pourra être exprimée par les pondérations des paramètres propres à chaque fin de vie.

L'évaluation des différents matériaux contenus dans les fichiers externes est réalisée lors de la transition avec la vue postérieure à celle illustrée en figure 4.7. L'évaluation est réalisée selon la méthode exposée au chapitre 3.

4.3.2.2.4 Sélection du matériau pour un composant

La sélection du matériau pour un composant est réalisée par la vue présentée par la figure 4.8. Les matériaux ont une note attribuée lors de l'évaluation qui permet au concepteur d'avoir connaissance de l'adéquation du matériau avec la fin de vie du produit. La sélection est réalisée par simple « clic » sur la ligne du matériau. L'intégration de ce matériau est réalisée lors du passage à la vue suivante par le bouton « Suivant ».

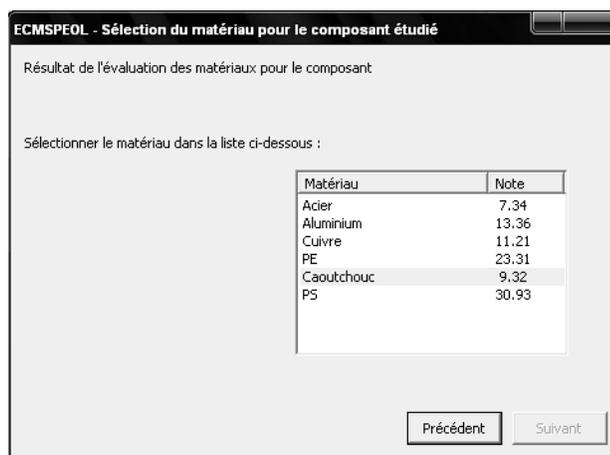


Figure 4.10 : Sélection finale du matériau parmi le panel de matériaux évalué dans ECMSPEOL

4.3.2.2.5 Génération du rapport final ou sélection du matériau d'un autre composant

La vue présentée en figure 4.11 permet à l'utilisateur du logiciel ECMSPEOL de choisir entre plusieurs actions :

- Continuer la sélection des matériaux sur un nouveau composant dont le matériau n'est pas attribué (retour à la vue présentée au paragraphe 5.4.1.2)
- Générer le compte rendu de sélection finale ;

- Quitter ECMSPEOL.



Figure 4.11 : Possibilités du logiciel après la sélection du matériau du premier composant

4.3.3 Bilan

Le programme permet une automatisation de certaines tâches fastidieuses comme la lecture de données sur les matériaux et leur évaluation, leur classement. Il nécessite néanmoins les connaissances du concepteur pour évaluer la valeur de certains paramètres :

- Marquage des composants ;
- Durabilité du matériau pour un composant ;
- Uniformité du matériau pour un composant.

Le tableau 4.3 synthétise les différentes informations présentées sur ECMSPEOL.

Tableau 4.3 : Chronologie des tâches effectuées par ECMSPEOL

Vue et boîte complémentaire	Actions	Réalisées par	Source
Vue 1	Identification du nombre de matériaux Importation de l'index des matériaux	ECMSPEOL ECMSPEOL	Fichier Externe Fichier Externe
Vue 2	-		-
Vue 3	Entrée du nom du produit Entrée de la fin de vie du produit Entrée du nombre de composant	Concepteur Concepteur Concepteur	Concepteur Concepteur Concepteur
Vue 3-A	Entrée du nom des composants Entrée (s'il y a lieu) du matériau des composants	Concepteur Concepteur	Concepteur Concepteur
Vue 4	Choix du composant à traiter	Concepteur	Concepteur
Vue 5	-		-
Vue 6	Importation de la résistance à la corrosion Importation de la recyclabilité Importation de la compatibilité de triage Importation de la capacité de triage Importation de la dégradabilité Entrée du marquage Identification de la diversité	ECMSPEOL ECMSPEOL ECMSPEOL ECMSPEOL ECMSPEOL Concepteur Concepteur	Fichier Externe Fichier Externe Fichier Externe Fichier Externe Fichier Externe Concepteur Produit
Vue 6-A	Entrée de la durabilité	Concepteur	Concepteur
Vue 6-B	Entrée de l'uniformité	Concepteur	Concepteur
Vue 7	Calcul de l'indice d'EOL-abilité de chaque propriété pour chaque matériau Calcul de l'indice d'EOL-abilité global de chaque matériau Classement des matériaux Choix du matériau pour le composant	ECMSPEOL ECMSPEOL ECMSPEOL Concepteur	Mémoire Programme Mémoire Programme Concepteur
Vue 8	Orientation vers : - Nouvelle sélection de matériau - Génération d'un rapport - Départ du programme	Concepteur	Concepteur

CHAPITRE 5 ÉTUDES DE CAS

Le chapitre précédent a permis d'exposer le logiciel créé pour réaliser la sélection des matériaux par la méthode décrite dans les chapitres 2 et 3. Ce chapitre présente l'étude de la sélection environnementale des matériaux pour la fin de vie de deux produits : un vérin monostable et un ferme-porte. Nous détaillons donc dans un premier temps les objectifs de ces études de cas, les moyens mis en œuvre pour atteindre les objectifs seront aussi présentés. Par la suite, nous présenterons les deux produits étudiés. Puis nous présenterons les résultats des études de cas et leur interprétation.

5.1 Objectifs des études de cas

Les études de cas ont pour mission de caractériser, de mettre en valeur les informations fournies par le logiciel. Pour cela nous fixons plusieurs paramètres lors des tests :

- La pondération des propriétés pour chaque fin de vie ;
- Les valeurs désirées pour chaque propriété et chaque fin de vie ;
- Les contraintes techniques appliquées sur certains composants (le choix du matériau est déjà fait car le composant est standard, l'application nécessite un matériau précis, etc.

Ainsi, en changeant la fin de vie du produit, nous pouvons vérifier le comportement du logiciel. Plus précisément, les études de cas réalisées dans ce chapitre doivent permettre de :

1. Déterminer l'influence de la fin de vie du produit sur l'évaluation des matériaux réalisée par ECMSPEOL ;
2. Déterminer les conséquences de l'utilisation de la méthode sur des produits déjà conçus ;
3. Déterminer l'aptitude du logiciel à être utilisé en condition réelle de conception.

Les valeurs des différentes propriétés importées dans le logiciel par fichier externe ne sont pas modifiées pendant les études de cas (*cf.* Annexe 4). En effet, ce fichier externe compose la base de données permettant de caractériser les matériaux, leurs propriétés et la pondération de ces propriétés. Il nous paraît donc peu fortuit d'essayer de caractériser l'influence d'une propriété sur

le résultat final car cette influence est intégrée à l'évaluation par l'administrateur du logiciel (pondération, valeur de la propriété d'un matériau, etc.).

5.2 Présentation des produits étudiés

Nous étudierons deux produits dans le cadre de ce mémoire pour caractériser la méthode et le logiciel créé. Ces deux produits sont :

- Un vérin monostable ;
- Un ferme-porte.

5.2.1 Vérin monostable

Le vérin monostable est un produit simple comportant uniquement six composants. Il s'agit d'un produit déjà utilisé par Boothroyd [84] pour illustrer sa méthode de conception pour l'assemblage. La figure 5.1 présente ce produit.

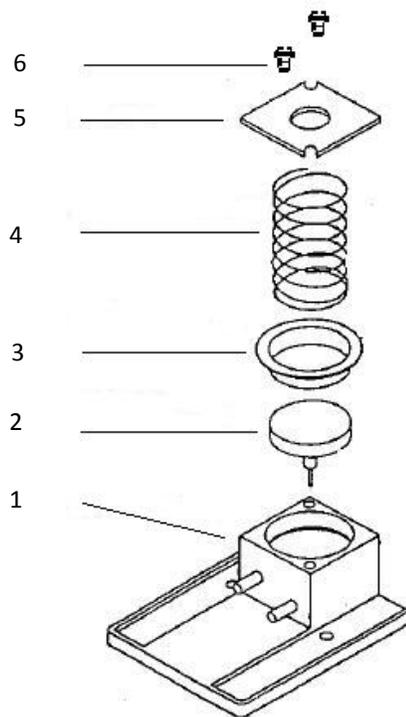


Figure 5.1 : Vérin monostable étudié

Le tableau 5.1 présente l'attribution des matériaux détaillée dans l'ouvrage de Boothroyd.

Tableau 5.1 : Attribution des matériaux du vérin

Sigle	Nom du composant	Matériau Attribué
1	Corps	Acier
2	Piston	Aluminium
3	Butée	PA
4	Ressort	Acier
5	Couvercle	Acier
6	Vis	Acier

5.2.2 Ferme-porte

Le second produit étudié est un ferme-porte. Ce produit est plus complexe que le vérin de Boothroyd par son nombre de composants plus important (vingt-neuf composants).

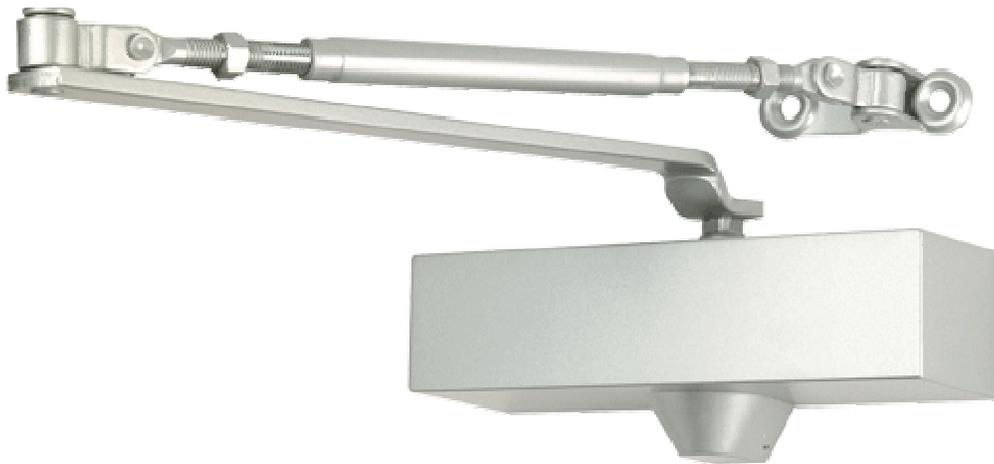


Figure 5.2 : Ferme-porte étudié

L'attribution des matériaux faite sur ce produit est décrite dans le tableau 5.2 :

Tableau 5.2 : Nomenclature du ferme-porte

Sigle	Nom du composant	Matériau Attribué
1	Boitier	Aluminium
2	Arbre denté	Acier
3	Piston crémaillère	Acier
4	Ressort	Acier
5	Couvercle latéral 1	Aluminium
6	Couvercle latéral 2	Aluminium
7	Bille	Acier
8	Cale de réglage	Acier
9	Rondelle Filtre	Acier
10	Coussinet fritté	Bronze
11	Vis spéciale M7 x 0,75	Acier
12	Chapeau fileté M28	Aluminium
13	Capuchon	Aluminium
14	Bras	Aluminium
15	Rondelle plate L6-18	Aluminium
16	Rondelle Grower W6	Acier
17	Vis H M6	Aluminium
18	Axe serti	Aluminium
19	Coussinet fritté	Bronze
20	Rondelle plate L5-18	Aluminium
21	Vis H M5	Aluminium
22	Rondelle Grower W5	Acier
23	Tube	Aluminium
24	Ecrou bas HM M8	Aluminium
25	Tige fileté M8	Aluminium
26	Axe serti	Aluminium
27	Collier	Aluminium
28	Axe	Aluminium
29	Fixation	Aluminium

5.3 Principe des études de cas

5.3.1 Principe

Pour réaliser les études de cas, nous avons constitué un arbre de possibilités. La figure 5.3 illustre cet arbre. Nous pouvons remarquer que le nombre d'études différentes à réaliser est égal à douze. Chaque étude correspond au déroulement de la sélection des matériaux pour chaque composant du produit. Si le vérin monostable comporte uniquement sept composants, ce qui rend plus facile les essais, le ferme-porte comporte vingt neuf composants rendant la durée des essais très supérieure à celle du vérin monostable.

Le paramétrage du logiciel pendant les études est toujours le même comme nous l'annoncions dans le paragraphe 5.1. Les différents fichiers externes utilisés sont présents en annexe (*cf.* annexe 4).

Pour chaque produit, les conditions initiales sont définies : si des composants ont l'obligation technique d'être constitué d'un certain matériau (composant standard), ce matériau est affecté au composant. De plus, les composants qui subissent des sollicitations significatives sont notifiés.

Pour chaque étude, les informations suivantes sont consignées : classement des matériaux avant sélection finale du matériau pour le composant ; choix final de matériau par le concepteur pour le composant.

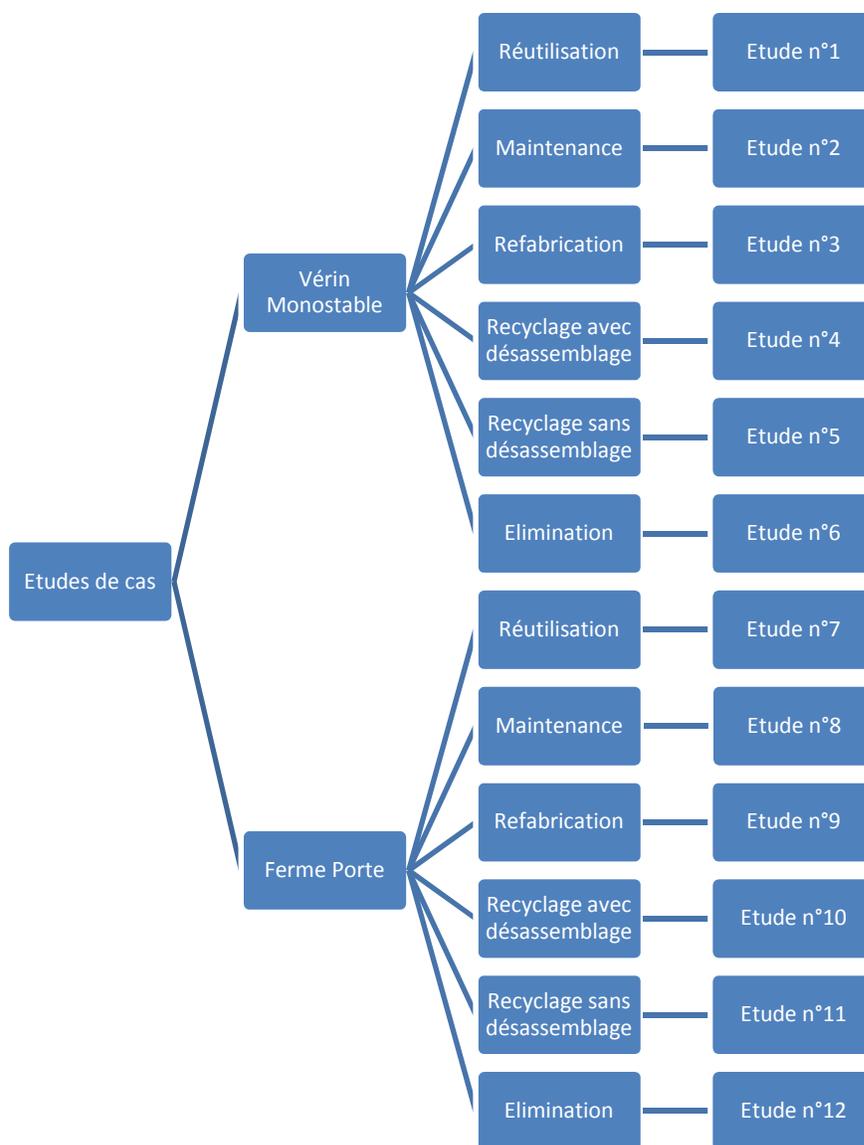


Figure 5.3 : Arbre des possibilités des études de cas

L'interprétation des différentes données collectées durant les études de cas permettra de remplir les différents objectifs notifiés dans le paragraphe 5.1.

5.3.2 Conditions initiales des études de cas

Le but des études de cas est de confirmer ou d'infirmer l'influence de la méthode sur la conception des produits. Les paramètres entrés dans ECMSPEOL sont donc détaillés pour assurer la transparence. Le paramétrage général du logiciel par fichier externe est exposé en annexe 4.

Nous traiterons ici plus spécifiquement du raisonnement de conception adopté et des conditions initiales des études de cas.

5.3.2.1 Vérin Monostable

Le vérin monostable est composé de six composants comme nous avons pu le voir ci-dessus. Deux composants du vérin doivent avoir des matériaux précis pour respecter les contraintes techniques du produit :

- Le ressort doit être en acier pour pouvoir stocker suffisamment d'énergie pour assurer sa fonction ;
- La butée doit être en PA (Polyamide) pour absorber les chocs efficacement.

De plus trois paramètres sont à renseigner par le concepteur durant le processus de sélection :

- Le marquage des composants (fixé à « Moyen ») ;
- La durabilité du matériau dans les composants ;
- L'uniformité du matériau dans les composants.

Les deux derniers paramètres sont dépendants du composant et du matériau. Les données entrées dans ECMSPEOL sont les suivantes :

Tableau 5.3 : Valeur de la durabilité entrée dans ECMSPEOL pour le vérin

Composant	Aciers	Alliages d'aluminium	Alliages de magnésium	PA	PVC	PE
Corps	Très Forte	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Faible
Piston	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Moyenne	Forte	Moyenne
Ressort	Acier					
Butée	PA					
Couvercle	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Faible	Moyenne	Faible
Vis	Très Forte	Moyenne	Moyenne	Faible	Faible	Très Faible

Tableau 5.4 : Valeur de l'uniformité entrée dans ECMSPEOL pour le vérin

Composant	Aciers	Alliages d'aluminium	Alliages de magnésium	PA	PVC	PE
Corps	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Faible	Faible	Faible
Piston	Forte	Très Forte	Très Forte	Forte	Forte	Forte
Ressort	Acier					
Butée	PA					
Couvercle	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Forte
Vis	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Très Forte

5.3.2.2 Ferme-porte

Le ferme-porte est composé de vingt neuf composants. Quatre composants doivent être constitués d'un matériau précis pour respecter les contraintes techniques :

- Le ressort (4) doit être réalisé avec un acier (même raison que pour le ressort du vérin monostable) ;
- La bille (7) doit être en acier pour ne pas subir de déformations au cours de l'utilisation du ferme-porte ;
- Les coussinets (10 et 19) qui doivent être en bronze pour obtenir les performances adéquates.

Comme pour le vérin, trois paramètres doivent être fixés pour être sûr d'étudier la sélection des matériaux dans les mêmes conditions. Nous fixons le marquage des matériaux au niveau « Moyen ».

Tableau 5.5 : Valeur de la durabilité entrée dans ECMSPEOL pour le ferme-porte

Composant	Aciers	Alliages d'aluminium	Alliages de magnésium	PA	PVC	PE
1	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Forte	Forte	Moyenne
2	Très Forte	Moyenne	Moyenne	Faible	Faible	Très Faible
3	Très Forte	Moyenne	Moyenne	Faible	Faible	Très Faible
4	ACIER					
5	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Forte	Forte	Moyenne
6	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Forte	Forte	Moyenne
7	ACIER					
8	Très Forte	Forte	Forte	Très Faible	Faible	Très Faible
9	Très Forte	Forte	Moyenne	Très Faible	Faible	Très Faible
10	BRONZE					
11	Très Forte	Forte	Moyenne	Très Faible	Faible	Très Faible
12	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Forte	Forte	Moyenne
13	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Forte	Forte	Moyenne
14	Très Forte	Moyenne	Moyenne	Faible	Faible	Très Faible
15	Très Forte	Forte	Moyenne	Très Faible	Faible	Très Faible
16	Très Forte	Forte	Moyenne	Très Faible	Faible	Très Faible
17	Très Forte	Forte	Moyenne	Très Faible	Faible	Très Faible
18	Très Forte	Moyenne	Moyenne	Faible	Faible	Très Faible
19	BRONZE					
20	Très Forte	Forte	Moyenne	Très Faible	Faible	Très Faible
21	Très Forte	Forte	Moyenne	Très Faible	Faible	Très Faible
22	Très Forte	Forte	Moyenne	Très Faible	Faible	Très Faible
23	Très Forte	Moyenne	Moyenne	Faible	Faible	Très Faible
24	Très Forte	Forte	Moyenne	Très Faible	Faible	Très Faible
25	Très Forte	Forte	Moyenne	Très Faible	Faible	Très Faible
26	Très Forte	Moyenne	Moyenne	Faible	Faible	Très Faible
27	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Faible	Forte	Faible
28	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Faible	Forte	Faible
29	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Faible	Forte	Faible

Tableau 5.6 : Valeur de l'uniformité entrée dans ECMSPEOL pour le ferme-porte

Composant	Aciers	Alliages d'aluminium	Alliages de magnésium	PA	PVC	PE
1	Forte	Très Forte	Forte	Très Forte	Très Forte	Très Forte
2	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Faible	Moyenne	Faible
3	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Faible	Moyenne	Faible
4	ACIER					
5	Forte	Très Forte	Forte	Très Forte	Très Forte	Très Forte
6	Forte	Très Forte	Forte	Très Forte	Très Forte	Très Forte
7	ACIER					
8	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Faible	Moyenne	Faible
9	Très Forte	Très Forte	Moyenne	Faible	Très Forte	Faible
10	BRONZE					
11	Très Forte	Très Forte	Moyenne	Faible	Très Forte	Faible
12	Forte	Très Forte	Forte	Très Forte	Très Forte	Très Forte
13	Forte	Très Forte	Forte	Très Forte	Très Forte	Très Forte
14	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Faible	Moyenne	Faible
15	Très Forte	Très Forte	Moyenne	Faible	Très Forte	Faible
16	Très Forte	Très Forte	Moyenne	Faible	Très Forte	Faible
17	Très Forte	Très Forte	Moyenne	Faible	Très Forte	Faible
18	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Faible	Moyenne	Faible
19	BRONZE					
20	Très Forte	Très Forte	Moyenne	Faible	Très Forte	Faible
21	Très Forte	Très Forte	Moyenne	Faible	Très Forte	Faible
22	Très Forte	Très Forte	Moyenne	Faible	Très Forte	Faible
23	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Faible	Moyenne	Faible
24	Très Forte	Très Forte	Moyenne	Faible	Très Forte	Faible
25	Très Forte	Très Forte	Moyenne	Faible	Très Forte	Faible
26	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Faible	Moyenne	Faible
27	Forte	Forte	Forte	Moyenne	Forte	Moyenne
28	Forte	Forte	Forte	Moyenne	Forte	Moyenne
29	Forte	Forte	Forte	Moyenne	Forte	Moyenne

5.4 Résultats des études de cas

Les résultats des études de cas sont présentés de manière exhaustive en Annexe 5, les classements donnés par ECMSPEOL sont transcrits pour les douze études de cas (six pour le vérin et six pour le ferme-porte). Nous détaillons dans ce titre les résultats relatifs aux différents objectifs prononcés au début de ce chapitre.

5.4.1 Influence de la fin de vie sur l'évaluation des matériaux par ECMSPEOL

Un des objectifs des études de cas est de comparer l'influence de la fin de vie sur la sélection des matériaux au niveau des composants. Dans ce but, nous étudions le classement des matériaux fourni par ECMSPEOL pour chaque composant et pour chaque fin de vie.

Nous calculons la différence des classements obtenus par ECMSPEOL entre un classement de référence (réutilisation) et les classements obtenus pour les autres fins de vie. Si un matériau voit sa position augmenter ou diminuer par rapport au classement de référence, un changement est comptabilisé. La figure 5.4 illustre le principe du calcul de la divergence de classement.

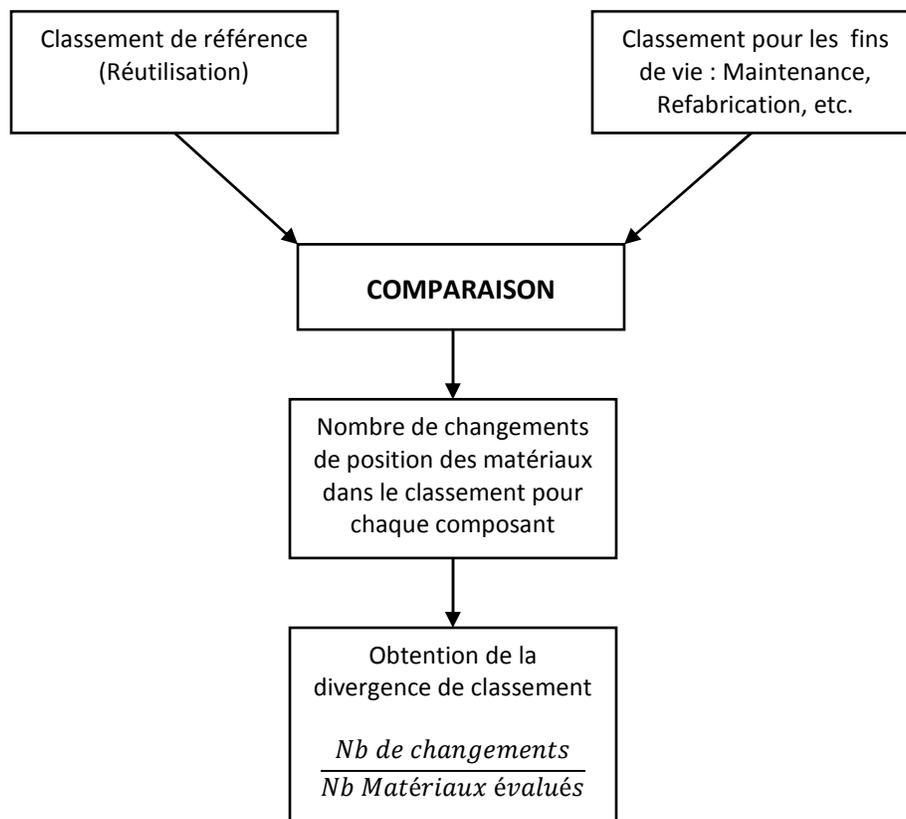


Figure 5.4 : Principe de calcul de la divergence de classement

La divergence de classement est calculée pour les différents cas d'études et les résultats sont notifiés dans les tableaux intitulés « récapitulatif des résultats » présents en annexe 5. Ainsi nous pouvons mettre en valeur l'évolution du classement des matériaux pour chaque composant selon la fin de vie du produit (vérin ou ferme-porte). Les résultats pour le vérin sont illustrés dans la figure 5.5 :

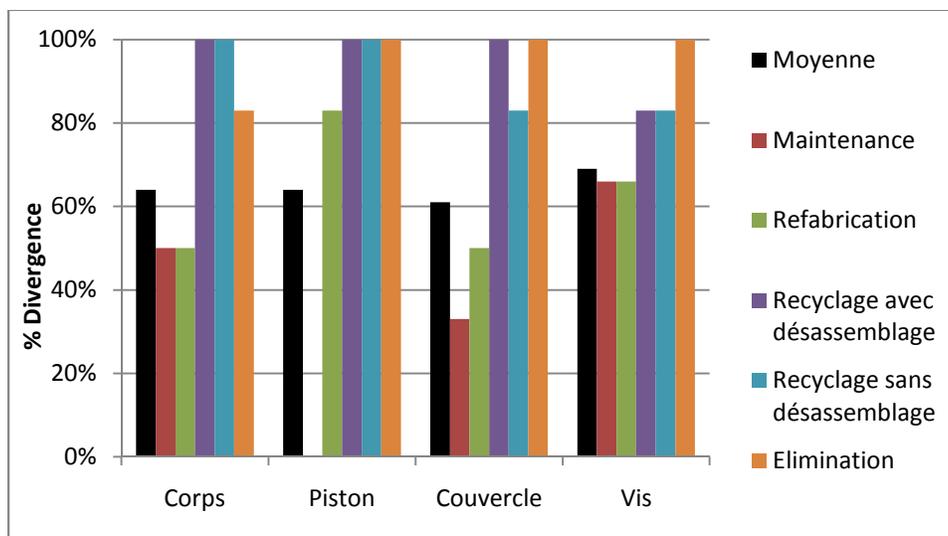


Figure 5.5 : Évolution du classement des matériaux selon la fin de vie pour chaque composant du vérin

Les résultats pour le ferme-porte sont illustrés dans la figure 5.6. Nous ne présentons cependant qu'une partie des résultats pour assurer la bonne lisibilité de ce mémoire. En effet, sur vingt-neuf composants, plusieurs composants obtenaient les mêmes résultats et changement de classement. Nous avons reproduit, ci-dessous, un échantillon typique des composants du ferme-porte

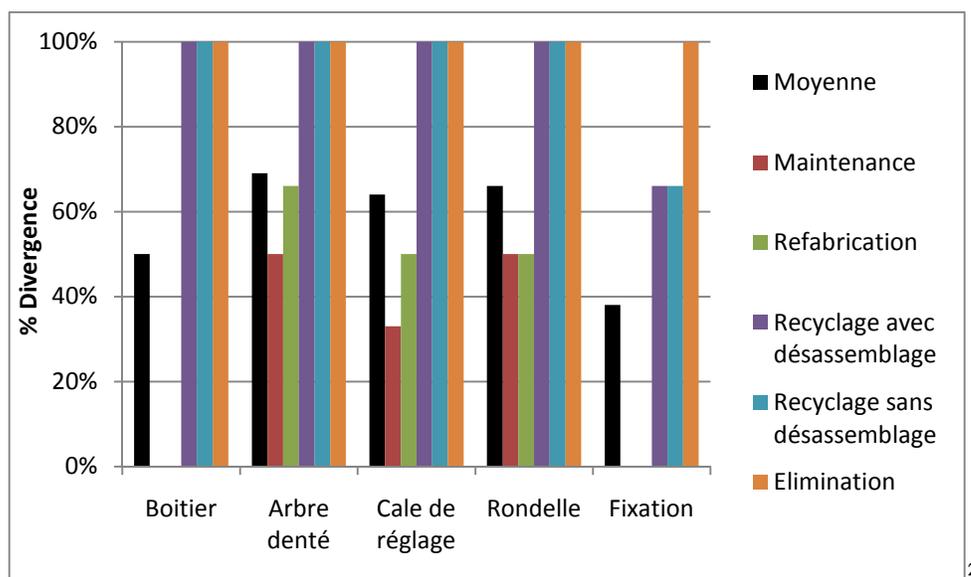


Figure 5.6 : Évolution du classement des matériaux selon la fin de vie pour les composants typiques du ferme-porte

Les études de cas des deux produits nous permettent de confirmer l'influence de la fin de vie sur le classement produit par ECMSPEOL. La divergence des classements obtenus par rapport à celui de référence (réutilisation) est comprise entre 33% et 100% selon les composants étudiés pour le vérin et le ferme-porte. De même, le calcul de la moyenne des divergences de classements pour chaque composant confirme notre observation :

- Pour le vérin cette moyenne de divergence est comprise entre 61% et 69% ;
- Pour le ferme-porte, la moyenne oscille entre 39% et 69%.

Il apparaît certain que la fin de vie du produit influence le classement des matériaux réalisé par ECMSPEOL. Et que le classement évolue également en fonction du composant traité. Ce qui nous permet d'affirmer que la méthode proposée prend bien en compte la spécificité du produit et de ses composants dans la sélection des matériaux.

5.4.2 Influence de la fin de vie sur l'attribution des matériaux

Il s'agit ici de caractériser l'influence de la fin de vie du produit sur la sélection des matériaux. Le paragraphe précédent nous a permis d'observer les changements sur les classements obtenus mais ne permet pas de rendre compte de l'apport réel de la méthode sur le choix des matériaux pour un produit.

Pour évaluer l'apport réel, nous considérons que le concepteur choisit le matériau qui est classé en première position par ECMSPEOL. Nous comparons donc l'attribution des matériaux réalisée par ECMSPEOL pour chaque fin de vie à la sélection des matériaux réalisée sur les produits déjà conçus (nomenclatures disponibles dans la description des produits). La figure 5.7 résume le principe de caractérisation de l'influence de la fin de vie sur l'attribution des matériaux :

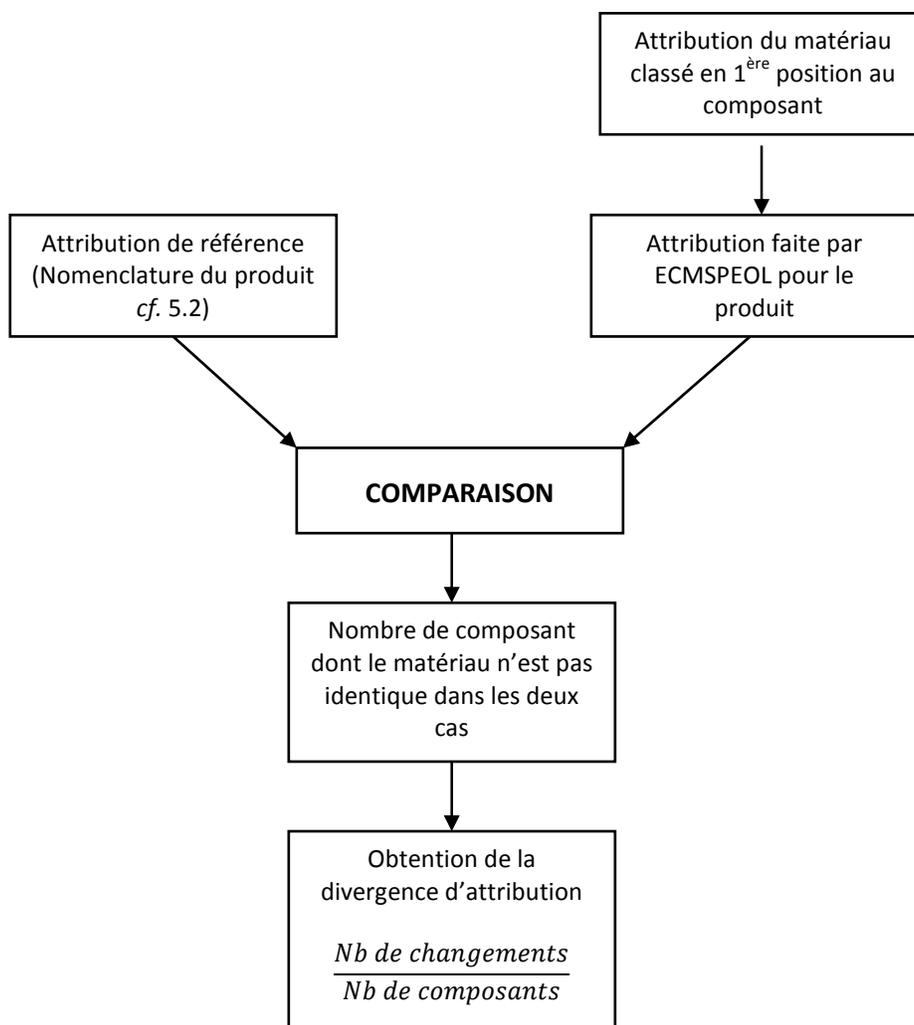


Figure 5.7 : Principe d'évaluation de la divergence d'attribution des matériaux

Les résultats sont synthétisés dans les tableaux « Attribution des matériaux avec ECMSPEOL » de l'annexe 5. Nous pouvons par ce moyen comparer les différentes divergences d'attribution des matériaux selon la fin de vie du produit. La figure 5.8 illustre l'évolution des divergences.

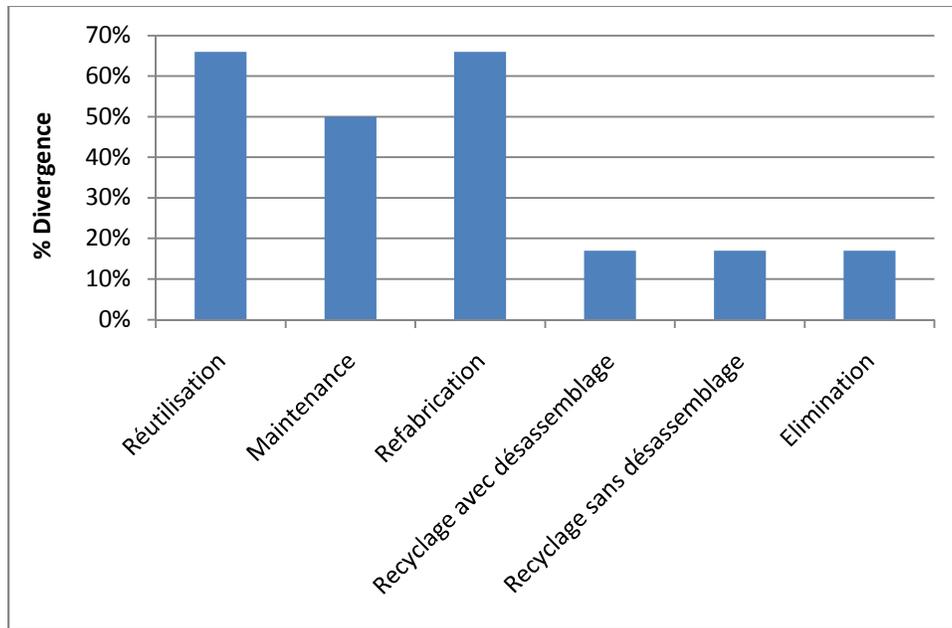


Figure 5.8 : Influence de la fin de vie du produit sur l'attribution des matériaux

Nous pouvons remarquer que les fins de vie de type réutilisation, maintenance et refabrication obtiennent des pourcentages de changement du même ordre pour les deux produits. Il en est de même pour les trois autres fins de vie (recyclage avec désassemblage, recyclage sans désassemblage et élimination). Le pourcentage moyen de changement de matériau pour le vérin est de 39%, tandis que celui du ferme-porte sont de 29%. La moyenne de changement sur les deux produits est de 34%.

Le changement observé est non négligeable dans le cas du vérin et du ferme-porte. Il est intéressant de remarquer que le vérin avait une conception orientée recyclage et élimination tandis que le ferme-porte était plus orienté vers une conception pour la réutilisation, la maintenance et la refabrication.

5.4.3 Aptitude de ECMSPEOL à être utilisé en condition réelle

L'interface graphique de ECMSPEOL rend agréable l'utilisation du logiciel. Le concepteur a donc seulement trois types d'informations à entrer dans le logiciel :

- Informations textuelles ;
- Choix de niveau de paramètres ;
- Choix de matériau.

Les informations textuelles sont peu nombreuses : nom du produit, nombre de composants et nom des composants. Le choix du matériau est, quant à lui, réalisé une seule fois par composant. Ces deux types d'informations ne demandent pas un nombre d'entrées important. Le troisième type d'informations entré par le concepteur dans ECMSPEOL demande plus d'attention.

En effet, suivant la fin de vie du produit le nombre d'entrée est différent, le tableau 5.7 présente le nombre d'entrées à réaliser par le concepteur pour sélectionner le matériau d'un composant.

Tableau 5.7 : Nombre de choix de niveau des paramètres à réaliser selon la fin de vie du produit

Fin de vie	Nombre de paramètres	Paramètres	Types de paramètres	Nombre d'entrées	Nombre total d'entrée à réaliser
Réutilisation	3	Résistance à la corrosion	Matériau	0	n+1
		Marquage	Produit	1	
		Durabilité	Matériau-Produit-Environnement	n	
Maintenance	3	Résistance à la corrosion	Matériau	0	n+1
		Marquage	Produit	1	
		Durabilité	Matériau-Produit-Environnement	n	
Refabrication	4	Résistance à la corrosion	Matériau	0	2n+1
		Marquage	Produit	1	
		Durabilité	Matériau-Produit-Environnement	n	
		Uniformité	Matériau-Produit	n	
Recyclage avec désassemblage	5	Recyclabilité	Matériau	0	n+1
		Marquage	Produit	1	
		Diversité	Produit	0	
		Uniformité	Matériau-Produit	n	
		Compatibilité de recyclage	Matériau-Produit	0	
Recyclage sans désassemblage	5	Recyclabilité	Matériau	0	n
		Capacité de triage	Matériau	0	
		Diversité	Produit	0	
		Uniformité	Matériau-Produit	n	
		Capacité de Tri	Matériau-Produit	0	
		Compatibilité de recyclage	Matériau-Produit	0	
Élimination	1	Dégradabilité	Matériau	0	0

Avec n le nombre de matériaux évalués.

Ce tableau nous permet de mieux appréhender les besoins du logiciel par rapport au concepteur. La figure 5.9 présente le nombre d'informations à rentrer pour sélectionner le matériau d'un composant pour différents nombre de matériaux à évaluer.

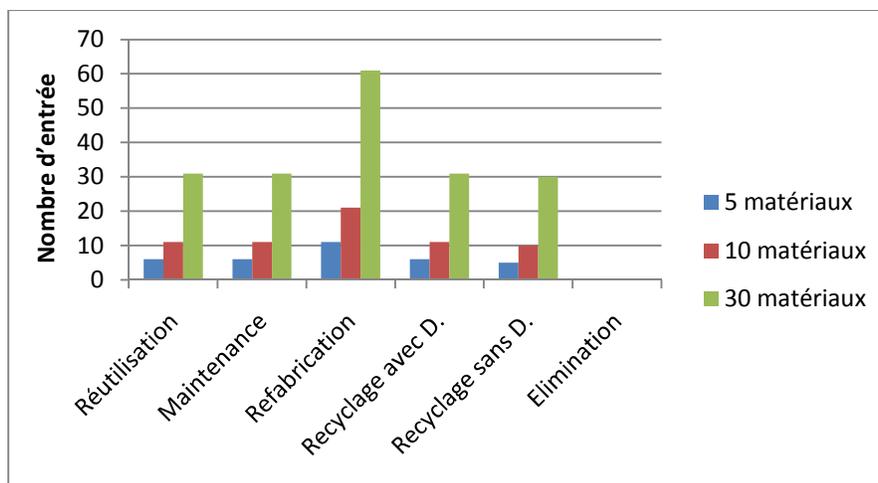


Figure 5.9 : Évolution du nombre d'informations à entrer pour sélectionner le matériau d'un composant

La fin de vie qui demande le plus d'informations de la part du concepteur est la fin de vie refabrication. Malgré tout, les informations demandées ne sont pas trop nombreuses pour présenter un blocage dans la sélection des matériaux. Pour trente matériaux évalués, la méthode demande soixante et une entrée de valeur de propriétés relatives aux matériaux.

5.5 Discussions

Les résultats des études de cas nous ont permis de montrer que la méthode de sélection environnementale des matériaux permettait de bien prendre en compte la spécificité de chaque fin de vie dans le classement des matériaux, que l'attribution des matériaux des composants d'un produit était impactée par l'utilisation de la méthode proposée dans ce mémoire et que l'utilisation de la méthode et du logiciel conçu (ECMSPEOL) est possible en situation réelle de conception. Dans la suite de ce chapitre nous discutons les résultats et leurs limites.

Les résultats contenus dans ce mémoire montrent que la méthode prend bien en compte les caractéristiques de chaque fin de vie. Les pourcentages de divergence de classement de chaque fin de vie pour chaque composant le confirment : la moyenne des divergences par composant varie entre 61% et 69% pour le vérin et entre 39% et 69% pour le ferme-porte. Cependant nous pouvons remarquer que les fins de vie, maintenance et refabrication ont des pourcentages de divergences plus faibles avec la fin de vie réutilisation. Les moyennes des divergences pour chaque composant varie entre 41,5% et 66% pour le vérin et entre 0% et 58%

pour le ferme-porte, tandis que les pourcentages de divergence des fins de vie recyclage avec désassemblage, recyclage sans désassemblage et élimination varient entre 94,3% et 100% pour le vérin et entre 77,3% et 100% pour le ferme porte.

Cette différence de divergences est compréhensible car les fins de vie maintenance et refabrication partage la même philosophie : récupérer le produit ou le composant avec les fonctionnalités qui lui ont été attribuées lors de la conception originelle du produit alors que les fins de vie recyclage avec désassemblage et recyclage sans désassemblage ont une orientation de destruction des fonctionnalités du produit pour la récupération des matériaux ou pour leur élimination.

La méthode proposée requiert l'expertise d'un concepteur pour renseigner la pondération des propriétés pour chaque fin de vie. L'évaluation de l'importance des propriétés impacte l'évaluation des matériaux et donc le résultat fourni par ECMSPEOL au concepteur. Il s'agit sûrement d'une limite de la méthode qui ne propose pas d'évaluation formalisée du poids de chaque propriété. Notons que cette problématique est complètement absente de la littérature. Cette pondération, laissée à la libre interprétation du concepteur, possède également l'avantage qu'elle peut être personnalisée suivant les besoins de l'utilisateur de la méthode.

Les résultats devraient être confirmés par l'utilisation en industrie de ce logiciel ou, tout du moins par comparaison des résultats obtenus par ECMSPEOL avec ceux obtenus sur des produits déjà conçus pour un plus grand nombre d'exemple. Cela permettrait d'affiner l'étude de la méthode proposée.

CONCLUSION

Après plus d'un siècle de développement industriel, la prise de conscience écologique s'est faite progressivement pour être incontournable aujourd'hui aussi bien dans la vie courante que dans les décisions politiques internationales.

La sélection environnementale des matériaux est une tâche de la conception des produits qui est devenue très importante dans l'optique de maîtriser les impacts environnementaux des produits et notamment leurs traitements en fin de vie. La revue de littérature nous a permis d'identifier les nombreuses méthodes déjà créées et de mettre en évidence l'absence de méthode globale de sélection des matériaux pour la fin de vie des produits en conception préliminaire.

Dans ce but, nous avons identifié les paramètres importants de la sélection pour chaque fin de vie, afin que la sélection environnementale prenne bien en compte les spécificités de chaque fin de vie. De plus, la conception préliminaire, pour laquelle a été conçue la méthode, a imposé certaines contraintes (diversité des données, traitement,..) qu'il nous a fallu intégrer dans la définition de la méthode proposée dans ce mémoire. Le choix du traitement des données a été porté sur la logique floue. Méthode déjà utilisée dans la sélection technique des matériaux, elle permet le traitement des informations imprécises et floues qui sont typiques de la conception préliminaire. L'adaptation aux situations rencontrées par le concepteur a été un objectif constant dans l'élaboration de la méthode de sélection environnementale.

L'implémentation de cette nouvelle méthode a été faite durant le projet de recherche pour permettre une application en conception de produit. Le paramétrage des différentes données relatives aux matériaux (résistance à la corrosion, recyclabilité, dégradabilité) et à leur traitement (pondération, valeur désirée) permet au logiciel ECMSPEOL d'évoluer et d'être personnalisé selon les connaissances de l'utilisateur. ECMSPEOL permet de réaliser la sélection environnementale des matériaux simultanément avec la conception du produit : un classement environnemental des matériaux est fourni au concepteur pour lui permettre de choisir le matériau en accord avec la sélection technique et économique.

Les études de cas réalisées pour tester le logiciel nous ont permis de vérifier que les fins de vie du produit et les caractéristiques du produit étaient prise en compte avec la méthode développée dans ce mémoire. L'esprit même de cette méthode est de pouvoir réaliser une sélection des matériaux pendant la conception du produit avec les données disponibles au concepteur qui correspondent le plus au cas particulier que constitue le produit étudié. Il ne s'agit pas d'une méthode d'évaluation de produit post conception qui obligerait le concepteur à renouveler la conception de son produit. Il s'agit d'une avancé par rapport aux autres méthodes de sélection environnementale des matériaux notamment des règles de sélection qui étaient jusqu'alors le seul moyen de sélectionner de manière environnementale des matériaux en conception préliminaire.

Plusieurs voies de recherches complémentaires pourront être menées pour améliorer la méthode présentée ici :

- Intégration de paramètres techniques et économiques dans la méthode;
- Intégration des résultats d'éco-indicateurs pour étendre la validité de la méthode à tout le cycle de vie du matériau utilisé dans le produit étudié.

La difficulté de récupération de données généralisées aux catégories de matériaux devra également être prise en compte pour pouvoir appliquer cette méthode. Un exemple pourrait être celui de la capacité de triage, qui dans ce travail de recherche a demandé un travail en amont pour obtenir une évaluation de la capacité de triage de chaque matériau.

Cependant, un intérêt particulier devra être porté à la compatibilité des nouvelles données intégrées avec les caractéristiques de la conception préliminaire pour éviter de transformer la méthode en une méthode valide uniquement pour la conception détaillée ou pour l'évaluation post conception.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] United States Environmental Protection Agency, "Electronics Waste Management In The United States," Office of Solid Waste, Ed. Washington, DC, 2007.
- [2] G. H. Brundtland, *World Commission on environment and development: our common future*: Oxford University Press, 1987.
- [3] L. Y. Ljungberg and K. L. Edwards, "Design, materials selection and marketing of successful products," *Materials & Design*, vol. 24, no. 7, pp. 519-529, 2003.
- [4] D. L. Thurston and A. Locascio, "Decision theory for design economics," *The Engineering Economist: A Journal Devoted to the Problems of Capital Investment*, vol. 40, no. 1, pp. 41 - 71, 1994.
- [5] R. Roth, F. Field, and J. Clark, "Materials selection and multi-attribute utility analysis," *Journal of Computer-Aided Materials Design*, vol. 1, no. 3, pp. 325-342, 1994.
- [6] L. Y. Ljungberg, "Materials selection and design for development of sustainable products," *Materials and Design*, vol. 28, no. 2, pp. 466-479, 2007.
- [7] E. Karana, P. Hekkert, and P. Kandachar, "Material considerations in product design: A survey on crucial material aspects used by product designers," *Materials & Design*, vol. 29, no. 6, pp. 1081-1089, 2008.
- [8] K. L. Edwards and Y. M. Deng, "Supporting design decision-making when applying materials in combination," *Materials and Design*, vol. 28, no. 4, pp. 1288-1297, 2007.
- [9] M. F. Ashby, *Materials selection in mechanical design*: Butterworth-Heinemann, 2005.
- [10] C. A. Abel, K. L. Edwards, and M. F. Ashby, "Materials, processing and the environment in engineering design: the issues," *Materials & Design*, vol. 15, no. 4, pp. 179-193, 1994.
- [11] K. Bellmann and A. Khare, "Economic issues in recycling end-of-life vehicles," *Technovation*, vol. 20, no. 12, pp. 677-690, 2000.
- [12] P. M. Weaver, M. F. Ashby, S. Burgess, and N. Shibaiki, "Selection of materials to reduce environmental impact: a case study on refrigerator insulation," *Materials and Design*, vol. 17, no. 1, pp. 11-18, 1996.

- [13] L. Alting, "Life cycle engineering and design," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 44, no. 2, pp. 569-580, 1995.
- [14] S. Behrendt, *Life cycle design: a manual for small and medium-sized enterprises*: Springer Verlag, 1997.
- [15] J. R. Kirby, T. Mann, O. D. Pitts, and R. C. Sanwald, "Factors affecting product end-of-life management (PELM) opportunities," *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, pp. 182-185, 1995.
- [16] K. Ishii, C. F. Eubanks, and P. Di Marco, "Design for product retirement and material life-cycle," *Materials & Design*, vol. 15, no. 4, pp. 225-233, 1994.
- [17] A. Stevels and T. van der Horst, "Ecodesign: a Promising Approach to Sustainable Production and Consumption," *United Nations Publication*, pp. 167-187, 1997.
- [18] C. M. Rose, K. A. Beiter, and K. Ishii, "Determining end-of-life strategies as a part of product definition," *Proceedings of 1990 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, pp. 219-224, 1999.
- [19] M. K. Low, D. Williams, and C. Dixon, "Choice of end-of-life product management strategy: a case study in alternative telephone concepts," *Proceedings of 1996 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, pp. 112-117, 1996.
- [20] D. T. Staffiere, "Designing product for the environment," *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, vol. 1, pp. 76-77, 1995.
- [21] H. M. Lee, R. Gay, W. F. Lu, and B. Song, "The framework of information sharing in end-of-life for sustainable product development," *IEEE International Conference on Industrial Informatics*, pp. 73-78, 2006.
- [22] K. Xing, M. Belusko, L. Luong, and K. Abhary, "An evaluation model of product upgradeability for remanufacture," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 35, no. 1, pp. 1-14, 2007.
- [23] T. E. Graedel and B. R. Allenby, *Industrial ecology*, Magazines for Industry, Inc., 1995.
- [24] K. Ishii, "Incorporating End-of-Life Strategy in Product Definition," *Proceedings of 1999 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, pp. 364 - 369, 1999.

- [25] C. M. Rose, A. Stevels, and K. Ishii, "A new approach to end-of-life design advisor (ELDA)", *Proceedings of 2000 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, San Francisco, CA, United states, pp. 99-104, 2000.
- [26] K. Xing, M. B., L. L.H.S., and K. Abhary, "A design strategy support tool for product reutilisation," in *Intelligent manufacturing & Automation : focus on precision engineering*, 2003.
- [27] A. Hula, K. Jalali, K. Hamza, S. J. Skerlos, and K. Saitou, "Multi-Criteria Decision-Making for Optimization of Product Disassembly under Multiple Situations," *Environmental Science and Technology*, vol. 37, no. 23, pp. 5303-5313, 2003.
- [28] R. S. Stewart, "Techniques of deep well disposal. Safe and efficient method of pollution control," *Proceedings on Industrial Waste Conference*, Ontario, pp. 37-42, 1968.
- [29] A. S. Cumming and N. C. Paul, "Environmental issues of energetic materials: A UK perspective," *Waste Management*, vol. 17, no. 2, pp. 129-133, 1998.
- [30] B. Lin, C. A. Jones, and C. Hsieh, "Environmental practices and assessment: a process perspective," *Industrial Management and Data Systems*, vol. 100, no. 1, pp. 71-79, 2001.
- [31] J. Constance, "Can durable goods be designed for disposability?," *Mechanical Engineering*, vol. 114, no. 6, pp. 60-62, 1992.
- [32] G. S. Bhandar, M. Hauschild, and T. McAloone, "Implementing life cycle assessment in product development," *Environmental Progress*, vol. 22, no. 4, p. 255, 2003.
- [33] J. Sarkis, "Evaluating environmentally conscious business practices," *European Journal of Operational Research*, vol. 107, no. 1, pp. 159-174, 1998.
- [34] K. Xing, K. Abhary, and L. Luong, "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, 2003.
- [35] C. Telenko, C. C. Seepersad, and M. E. Webber, "A Compilation of Design for Environment Principles and Guidelines," *ASME DETC Design for Manufacturing and the Lifecycle Conference Brooklyn, New York*, 2008.

- [36] T. Amezcuita, R. Hammond, M. Salazar, and B. Bras, "Characterizing the remanufacturability of engineering systems," in *ASME Advances in Design Automation Conference*, Boston, pp. 271-278, 1995.
- [37] H. Eskelinen, M. S. T. Luo, and X. Chen, "DFM (A)-Analysis and Aspects of Applying Internet Based Collaborative Design for Axial Eccentric Oil-Pump Design," 2004.
- [38] F. Lin and L. Lin, "A Discussion of the State-of-art Research on Environmentally Conscious Material Selection Methodologies for the Reduction of Products' Toxic Impact," *The Journal of Sustainable Product Design*, vol. 3, no. 3, pp. 119-134, 2003.
- [39] J. A. Stuart and R. M. Sommerville, "Materials selection for life cycle design," in *Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, pp. 151-158, 1998.
- [40] T. Amezcuita, R. Hammond, M. Salazar, and B. Bras, "Characterizing the remanufacturability of engineering systems," pp. 271-278, 1995.
- [41] E. Cohen-Rosenthal, "Making sense out of industrial ecology: a framework for analysis and action," *Journal of Cleaner Production*, vol. 12, no. 8, pp. 1111-1123, 2004.
- [42] R. G. Hunt and W. E. Franklin, "LCA—How it came about," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 1, no. 1, pp. 4-7, 1996.
- [43] W. Klöpffer, "The role of SETAC in the development of LCA," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 11, no. 1, pp. 116-122, 2006.
- [44] W. Klöpffer, "Life cycle assessment," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 4, no. 4, pp. 223-228, 1997.
- [45] A. Solgaard and B. Leeuw, "UNEP/SETAC life cycle initiative: promoting an life-cycle approach," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 7, no. 4, pp. 199-202, 2002.
- [46] M. Finkbeiner, A. Inaba, R. Tan, K. Christiansen, and H. J. Klüppel, "The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 11, no. 2, pp. 80-85, 2006.

- [47] M. D. Bovea and R. Vidal, "Increasing product value by integrating environmental impact, costs and customer valuation," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 41, no. 2, pp. 133-145, 2004.
- [48] J. Krozer and J. C. Vis, "How to get LCA in the right direction?," *Journal of Cleaner Production*, vol. 6, no. 1, pp. 53-61, 1998.
- [49] M. Goedkoop, "The Eco-indicator 95, final report and manual for designers," *Amersfoort, NL: VKi Consultants*, 1995.
- [50] M. Goedkoop, "The Eco-indicator 99, An oriented method for life cycle impact assessment," *Amersfoort, NL: VKi Consultants*, 1999.
- [51] O. Jolliet, M. Margni, R. Charles, S. Humbert, J. Payet, G. Rebitzer, and R. Rosenbaum, "IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 8, no. 6, pp. 324-330, 2003.
- [52] R. Frischknecht, N. Jungbluth, H. J. Althaus, G. Doka, R. Dones, T. Heck, S. Hellweg, R. Hischier, T. Nemecek, and G. Rebitzer, "The ecoinvent Database: Overview and Methodological Framework (7 pp)," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 10, no. 1, pp. 3-9, 2005.
- [53] B. R. Allenby, "Implementing industrial ecology: The AT&T matrix system," *Interfaces*, no. 1, pp. 42-54, 2000.
- [54] L. Holloway, "Materials selection for optimal environmental impact in mechanical design," *Materials and Design*, vol. 19, no. 4, pp. 133-144, 1998.
- [55] M. F. Ashby, "Multi-objective optimization in material design and selection," *Acta materialia*, vol. 48, no. 1, pp. 359-370, 2000.
- [56] H. Huang, G. Liu, Z. Liu, and J. Pan, "Multi-objective decision-making of materials selection in green design," *Jixie Gongcheng Xuebao(Chinese Journal of Mechanical Engineering)*, vol. 42, no. 8, pp. 131-136, 2006.
- [57] A. Shanian and O. Savadogo, "TOPSIS multiple-criteria decision support analysis for material selection of metallic bipolar plates for polymer electrolyte fuel cell," *Journal of Power Sources*, vol. 159, no. 2, pp. 1095-1104, 2006.

- [58] J. W. K. Chan and T. K. L. Tong, "Multi-criteria material selections and end-of-life product strategy: grey relational analysis approach," *Materials and Design*, vol. 28, no. 5, pp. 1539-1546, 2007.
- [59] I. Ribeiro, P. Pecas, A. Silva, and E. Henriques, "Life cycle engineering methodology applied to material selection, a fender case study," *Journal of Cleaner Production*, vol. 16, no. 17, pp. 1887-1899, 2008.
- [60] F. Giudice, G. La Rosa, and A. Risitano, "Materials selection in the life-cycle design process: a method to integrate mechanical and environmental performances in optimal choice," *Materials and Design*, vol. 26, no. 1, pp. 9-20, 2005.
- [61] C.-C. Zhou, G.-F. Yin, and X.-B. Hu, "Multi-objective optimization of material selection for sustainable products: Artificial neural networks and genetic algorithm approach," *Materials & Design*, vol. 30, no. 4, pp. 1209-1215, 2009.
- [62] N. S. Ermolaeva, M. B. G. Castro, and P. V. Kandachar, "Materials selection for an automotive structure by integrating structural optimization with environmental impact assessment," *Materials and Design*, vol. 25, no. 8, pp. 689-698, 2004.
- [63] S. Forrest, "Genetic algorithms," *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 28, no. 1, pp. 80-84, 1996.
- [64] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information & Control*, vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [65] L. A. Zadeh, "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning--I* 1," *Information sciences*, vol. 8, no. 3, pp. 199-249, 1975.
- [66] J. L. Amat and G. Yahiaoui, "Techniques avancées pour le traitement de l'information: réseaux de neurones, logique floue, algorithmes génétiques," 2002.
- [67] J. Yan, M. Ryan, and J. Power, *Using fuzzy logic*: Prentice Hall, 1994.
- [68] D. L. Thurston and J. V. Carnahan, "Fuzzy ratings and utility analysis in preliminary design evaluation of multiple attributes," *Journal of mechanical design*, vol. 114, no. 4, pp. 648-658, 1992.
- [69] M. J. J. Wang and T. C. Chang, "Tool steel materials selection under fuzzy environment," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 72, no. 3, pp. 263-270, 1995.

- [70] S. M. Chen, "A new method for tool steel materials selection under fuzzy environment," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 92, no. 3, pp. 265-274, 1997.
- [71] T. W. Liao, "A fuzzy multicriteria decision-making method for material selection," *Journal of manufacturing systems*, vol. 15, no. 1, pp. 1-12, 1996.
- [72] R. S. Khabbaz, B. D. Manshadi, A. Abedian, and R. Mahmudi, "A simplified fuzzy logic approach for materials selection in mechanical engineering design," *Mater Des*, vol. 30, no. 3, pp. 687-697, 2009.
- [73] G. Pahl and W. Beitz, "Engineering Design: A systematic approach," S. London, Ed., 2007.
- [74] A. Kaufmann and M. M. Gupta, *Introduction to fuzzy arithmetic: theory and applications*: Van Nostrand Reinhold New York, 1985.
- [75] A. a. G. Kaufmann, MM, "Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science," New York: Elsevier Science Publishers, 1988.
- [76] N. E. Hamner, "Corrosion Data Survey--Metals Section," *NACE, P. O. Box 1499, Houston, Tex. 77001*, 1974.
- [77] N. E. Hamner, "Nonmetals Section Corrosion Data Survey," Storming Media, 1975.
- [78] A. S. M. Handbook, "Corrosion, vol. 13," *Materials Park (USA): ASM International*, pp. 360-365, 2001.
- [79] S. Bell, B. Davis, A. Javaid, and E. Essadiqi, *Final Report on Design of Recyclable Products*, 2006.
- [80] C. Bastioli, *Handbook of biodegradable polymers*: Smithers Rapra Technology, 2005.
- [81] S. Bradford, *Corrosion control*: Casti Publishing, 2002.
- [82] SEI, "ECO-DESIGN Sectoral Manual for Furniture," 2006.
- [83] W. Beitz, "Design for Ease of Recycling (Guidelines VDI-2243)," *ICED Proceedings*, vol. 90, no. 1, 1990.
- [84] G. D. Boothroyd, P., "Design For Assembly," Amherts, Massachussets 01003: Massachussets University, 1983.

ANNEXE 1 – Dégradabilité des matériaux

Matériaux	Valeur Floue Dégradabilité
Aciers	3
Aciers Inoxydables	1
Alliages d'Aluminium	1
Alliages de Cuivre	1
Alliages de Magnésium	3
Alliages de Plomb	1
Alliages de Zinc	2
Verres	1
Caoutchoucs Naturels	3
Caoutchoucs Synthétiques	2
ABS	1
PA	1
PBT	1
PC	1
PE	1
LDPE	1
HDPE	1
PET	1
PMMA	2
POM	NA
PP	2
PS	1
PVC	1
SAN	NA

1 : Dégradabilité faible : corrosion dans les sols inférieure à 3 mm.y^{-1}

2 : Dégradabilité moyenne : corrosion dans les sols de 3 à 10 mm.y^{-1}

3 : Dégradabilité forte : corrosion dans les sols, supérieure à 10 mm.y^{-1}

Sources :

L'obtention des valeurs floues a été réalisée à partir des sources suivantes :

- S. Bradford, Corrosion control, Casti Publishing, 2002.
- Bastioli, Catia (2005). Handbook of Biodegradable Polymers. Smithers Rapra Technology.

Le tableau suivant est un exemple de données que nous avons recueillies :

Soil/Metal	Corrosion Rate (mm/y)	Maximum Pit Depth (mm)
Clay loam, good aeration		
Steel	0.012	1.72
Gray cast iron	<0.014	3.93
Aluminum ^a	0.001	0.53
Copper, tough pitch	0.001	0.15
Yellow brass	0.001	<0.15
Chemical lead	0.002	0.45
Zinc	0.007	0.43
Galvanized steel	0.002	<0.15

Compatibilité de recyclage des matériaux (2)

Matériaux	Caout. Synth.																
Caout. Synth.	3	ABS															
ABS	1	3	PA														
PA	3	1	3	PBT													
PBT	1	1	1	3	PC												
PC	1	3	1	3	3	PE											
PE	2	1	3	3	1	3	LDPE										
LDPE	1	1	1	1	1	1	3	HDPE									
HDPE	1	1	1	1	1	1	3	3	PET								
PET	1	1	1	1	3	2	1	1	3	PMMA							
PMMA	1	3	1	1	3	2	1	1	1	3	POM						
POM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	PP					
PP	3	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	3	PS				
PS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	PVC			
PVC	1	2	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	3	SAN		
SAN	1	3	1	1	3	1	1	1	1	3	1	1	1	3	3		

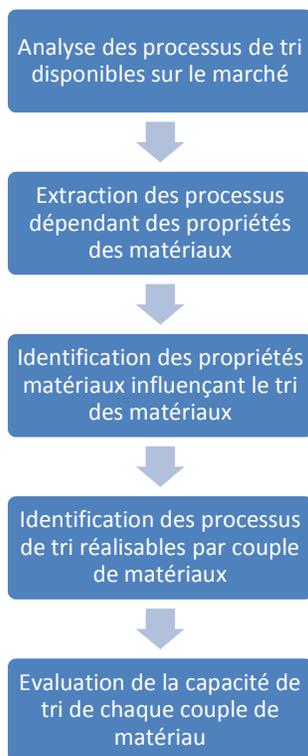
ANNEXE 3 – Évaluation de la capacité de triage des matériaux

I. Contexte

Le triage des matériaux est devenu une pratique incontournable depuis la prise de conscience écologique des institutions et collectivités territoriales. Le projet de recherche de notre maîtrise en tenait compte pour la fin de vie « recyclage sans désassemblage ». Cela a nécessité d'obtenir quelques informations au sujet de la facilité, la capacité des matériaux à être triés. Ainsi, une phase d'acquisition de données autour de ce processus de triage a été observée.

Mais les données « matériaux » sont peu disponibles et même plus peu générées. La quasi-totalité des données émises par les centres de tri sont relatives à un « gisement de déchets » qui correspond aux mélanges de matériaux réalisés en amont dans la chaîne logistique (exemple : les boîtes de conserves, les journaux et les emballages plastiques sont mélangés à Montréal, nous obtenons alors un gisement de plusieurs matériaux). Certes, les données pour les flux sortants sont disponibles mais ils n'ont aucune valeur si nous ne pouvons pas les comparer aux flux entrants. Il s'agit du principal obstacle à l'acquisition de données industrielles sur la capacité de triage des matériaux.

Par rapport à cet obstacle, nous avons réalisé une évaluation de la capacité de triage reposant sur les caractéristiques physiques, mécaniques des matériaux. La méthode d'évaluation a suivi cet ordre :



II. Analyse des processus de triage des matériaux

Les processus de triage disponibles sur le marché sont assez nombreux. Par agglomération des données d'étude de l'ADEME, des techniques de l'ingénieur et de Recyc-Québec, 21 processus de triage des matériaux ont été identifiés. Le tableau (ci-dessous) résume les différentes données acquises :

	Processus - Equipements	Discrimination	Effecteur	Performance	Caractéristiques Flux sortants
1	Crible Plan	Granulométrie	Grille	-	de 2 à 4 fractions
2	Crible à disques ou à étoiles	Granulométrie/Morphologie	Disque - Etoile	90-95%	de 2 à 4 fractions
3	Crible à godets	Granulométrie/Morphologie	Tapis à godets	-	2 fractions
4	Crible cylindrique	Granulométrie/Morphologie	Cylindre criblé	70-95%	de 2 à 4 fractions
5	Trommel aéraulique	Granulométrie/Morphologie	Cylindre criblé + buse	90%	de 2 à 4 fractions
6	Séparateur balistique	Morphologie/Densité/Rigidité	Batteur, Choc	> 98%	de 2 à 3 fractions
7	Table inclinée	Morphologie/Densité	Tapis roulant	-	de 2 à 3 fractions
8	Séparateur aéraulique	Morphologie/Densité	Buse, Cyclone	75-95%	de 2 à 3 fractions
9	Classificateur hydraulique par flottaison	Densité	Fluide	95-99,9%	2 fractions

10	Classificateur hydraulique par flottation	Densité/Hydrophobie	Fluide	>98%	2 fractions
11	Classificateur hydraulique par cyclone	Densité	Fluide	99,90%	2 fractions
12	Extracteur magnétique des métaux ferreux	Magnétisme	Électro-aimant	>95%	2 fractions
13	Extracteur des métaux non ferreux par courants de Foucault	Magnétisme	Électro-aimant	95-99%	2 fractions
14	Séparateur électrostatique	Électrostatisme	Tambour + Électrode	>99,5%	2 fractions
15	Séparateur triboélectrique	Électrostatisme	Électrode négative/positive	>99,5%	2 fractions
16	Spectrométrie proche infrarouge	Composition chimique	Capteur+Éjecteur	90-97%	de 2 à 7 fractions
17	Spectrométrie en infrarouge moyen	Spectre de réflexion	Capteur+Éjecteur	97-99%	de 2 à 4 fractions
18	Spectrométrie en fluorescence X	Spectre de fluorescence	Capteur+Éjecteur	> 95%	2 fractions
19	Colorimétrie	Couleur	Capteur+Éjecteur	>95%	de 2 à 7 fractions
20	Séparateur thermique	Comportement à la chaleur	Multiple	> 99%	2 fractions
21	Broyage différentiel	Densité/Élasticité/Résilience	Disque/Etoile/etc.	90-99,5%	2 fractions

III.Extraction des processus dépendant des propriétés des matériaux

Les processus dépendants uniquement des propriétés des matériaux sont identifiés. Cette discrimination est faite pour évaluer la capacité de triage uniquement par rapport aux caractéristiques des matériaux et non par rapport aux caractéristiques de la chaîne logistique ou des processus de triage.

Ainsi, nous avons identifié treize processus répondant à cette exigence :

- 9 : Classificateur hydraulique par flottaison ;
- 10 : Classificateur hydraulique par flottation ;
- 11 : Classificateur hydraulique par cyclone ;
- 12 : Extracteur magnétique des métaux ferreux ;
- 13 : Extracteur des métaux non ferreux par courants de Foucault ;
- 14 : Séparateur électrostatique ;
- 15 : Séparateur triboélectrique ;
- 16 : Spectrométrie proche infrarouge ;
- 17 : Spectrométrie en infrarouge moyen ;
- 18 : Spectrométrie en fluorescence X ;
- 19 : Colorimétrie ;
- 20 : Séparateur thermique ;
- 21 : Broyage différentiel.

IV. Identification des propriétés matériaux influençant le triage des matériaux

A la suite de l'identification des processus reposant sur les propriétés des matériaux, nous pouvons identifier les propriétés physiques, mécaniques des matériaux permettant le triage des matériaux :

N° Processus	Indice Catégorie	Propriétés
9, 10, 11	A	Densité
12	B	Électromagnétisme
13	C	Sensibilité aux courants de Foucault
14;15	D	Électrostatisme
16,17	E	Spectre du matériau dans l'infrarouge
18	F	Composition chimique
19	G	Couleur du matériau
20	H	Température de fusion
21	I	Rigidité

V. Identification des processus de triage réalisables par couple de matériaux

L'identification des processus permettant de trier un couple de matériau est faite après acquisition des valeurs des propriétés de chaque matériau (échantillon représentatif des matériaux utilisés en industrie) :

Matériau	Masse volumique ^(a) (g/cm ³)	Atome Halogène	T Fusion ^(b) (°C)	Magné- tisme	Courant de Foucault	Permittivité relative ^(c) (F/m)	Opacité	Rigidité
Aciers	7-8	NON	1500	OUI	NON	NON	OUI	Rigide
Aciers Inoxydables	7,6 - 8,1	NON	1500	OUI/NON	OUI	NON	OUI	Rigide
Alliages d'Aluminium	2,66 - 2,88	NON	660	NON	OUI	NON	OUI	Rigide
Alliages de Cuivre	8,2 - 8,9	NON	1080	NON	OUI	NON	OUI	Rigide
Alliages de Magnésium	1,76 - 1,83	NON	650	NON	OUI	NON	OUI	Rigide
Alliages de Zinc	6,6 - 7,2	NON	420	NON	OUI	NON	OUI	Rigide
Alliages de Plomb	11 - 11,4	NON	327	NON	OUI	NON	OUI	Mou
Verres	2,2 - 2,6	NON	1400	NON	NON	6	Translucide	Rigide
Caoutchoucs Naturels	0,92 - 1	-	165	NON	NON	4	OUI	Mou
Caoutchoucs Synthétiques	0,86-1,2	-	200	NON	NON	4,2	OUI	Mou
ABS	1 - 1,08	-	130	NON	NON	3	OUI	Rigide
PA	1,12-1,15	-	180	NON	NON	4	Opaque et Translucide	Rigide
PBT	1,31-1,38	-	225	NON	NON	3,3	Translucide	Rigide
PC	1,2	-	220	NON	NON	3,2	Transparent	Rigide
LDPE	0,91-0,92	-	100	NON	NON	2,4	Translucide	Mou
HDPE	0,94-0,96	-	150	NON	NON	2,4	Translucide	Rigide
PET	1,35-1,41	-	260	NON	NON	3,6	Translucide	Rigide
PMMA	1,18	-	180	NON	NON	3,7	Translucide	Rigide
POM	1,41-1,42	-	165	NON	NON	3,7	OUI (Blanc)	Rigide
PP	0,9-0,91	-	130	NON	NON	2,6	Opaque et Translucide	Mou
PS	1,04-1,07	-	160	NON	NON	3,4	Translucide	Rigide -> Mou
PVC	1,2-1,55	Cl	170	NON	NON	3,6	Translucide	Rigide -> Mou
SAN	1,04-1,07	-	170	NON	NON	3	Translucide	Rigide

(a), (b), (c) : Engineered Materials Handbook Desk Edition, 1995, ASM International Handbook Committee.

Verres	Verres								
Caoutchoucs Naturels	A, G, H, I	Caoutchoucs naturels							
Caoutchoucs Synthétiques	A, G, H, I	A, E, G	Caoutchoucs Synthétique						
ABS	A, G, H	A, E, G, I	E, G, H, I	ABS					
PA	A, G, H	A, I	I	A, E, G, H	PA				
PBT	A, G, H	A, E, G, H, I	A, E, G, I	A, E, G, H	A, E, G, H	PBT			
PC	A, G, H	A, E, G, H, I	A, E, G, I	A, D, E, G, H	A, E, G, H	A, E, G	PC		
LDPE	A, G, H	A, E, G, H, I	E, G, H, I	A, E, G	A, E, G, H	A, E, G, H	A, E, G, H	LDPE	
HDPE	A, G, H	E, G, I	E, G, H, I	A, E, G	A, E, G	A, E, G, H	A, E, G, H	A, E, G, H	A, E, G, H
PET	A, G, H	A, E, G, H, I	A, E, G, H, I	A, E, G, H	A, E, G, H	E, G	A, E, G, H	A, E, G, H	A, E, G, H
PMMA	A, G, H	A, E, G, I	E, G, I	A, D, E, G, H	A, E, G	A, E, G, H	A, E, G, H	A, E, G, H	A, E, G, H
POM	A, G, H	A, E, G, I	A, E, G, I	A, E, G	A, E, G	A, E, G, H	A, E, G, H	A, E, G, H	A, E, G, H
PP	A, G, H	A, E, G, I	E, G, H	A, E, G	A, E, G, H	A, E, G, H	A, E, G, H	A, E, G, H	A, E, G
PS	A, G, H	A, E, G, I	E, G, H, I	E, G	A, E, G	A, E, G, H	A, E, G, H	A, E, G, H	A, E, G, H
PVC	A, F, G, H	A, D, E, F, G, I	A, D, E, F, G, I	A, D, F, I, H	A, E, F, G	E, F, G, H	A, E, F, G, H	A, E, F, G, H	A, E, F, G, H
SAN	A, G, H	A, E, G, I	E, G, I	E, G, H	A, E, G	A, E, G, H	A, E, G, H	A, E, G, H	A, E, G, H

HDPE	HDPE							
PET	A, E, G, H	PET						
PMMA	A, E, G	A, E, G, H	PMMA					
POM	A, E, G	A, E, G, H	A, E, G	POM				
PP	A, E, G	A, E, G, H	A, E, G, H	A, E, G	PP			
PS	A, E, G	A, E, G, H	A, E, G	A, E, G	A, D, G	PS		
PVC	A, E, F, G	D, D, F, H	A, E, G, F	E, G, F	A, E, F, G, H	A, E, F, G	PVC	
SAN	A, E, G	A, E, G, H	A, E, G	A, E, G	A, E, G, H	E, G	A, E, F, G	

VI. Evaluation de la capacité de triage de chaque couple de matériau

La note globale de capacité de triage d'un couple de matériau peut donc être attribuée. Elle sera attribuée de la manière suivante : Le nombre de processus de triage possible peut varier entre 0 et 9. Nous attribuerons donc la valeur floue « faible » pour les couples de matériaux pouvant être triés par un nombre de processus variant entre 0 et 3, la valeur « moyenne » sera attribuée aux couples de matériaux ayant un nombre de processus de triage compris entre 4 et 6 et la valeur « forte » sera attribuée aux couples ayant un nombre de processus de triage compris entre 7 et 9.

Le tableau suivant récapitule les conditions et les résultats pour chaque catégorie :

Nombre de processus de triage utilisable par couple	Valeur Floue	Nombre de couples de matériaux par catégorie
0-3	Faible	73
4-6	Moyenne	159
7-9	Forte	21

Le tableau présent en page suivante présente les résultats finaux

ANNEXE 4 – Paramétrage du logiciel pour les études de cas

I. Propriété matériau

Matériau	Résistance à la corrosion ^(a)	Recyclabilité ^(b)	Dégradabilité
Acier	Moyenne	53%	Moyenne
Aluminium	Forte	44%	Faible
Magnésium	Forte	62%	Moyenne
PA	Forte	7%	Faible
PVC	Forte	7%	Faible
PE	Forte	7%	Faible

(a) NACE International, The Corrosion Society (2002). Corrosion Survey

(b) ADEME France - Bilan du recyclage 1998-2007

II. Valeur désirée des propriétés pour chaque fin de vie

	Durabilité	Résistance à la corrosion	Uniformité du matériau	Recyclabilité	Compatibilité de Recyclage	Diversité	Capacité de triage	Marquage	Dégradabilité
Réutilisation	Très Forte	Forte	- ³	-	-	-	-	Très Fort	-
Maintenance	Très Forte	Forte	-	-	-	-	-	Très Fort	-
Refabrication	Très Forte	Forte	Très Forte	-	-	-	-	Très Fort	-
Recyclage avec D.	-	-	Très Forte	-	Forte	Très Forte	-	Très Fort	-
Recyclage sans D.	-	-	Très Fort	Forte	Forte	Très Forte	Forte	Très Fort	-
Élimination	-	-	-	-	-	-	-	-	Très Forte

³ Le symbole – signifie que la propriété n'est pas considérée, qu'elle est sans intérêt pour la fin de vie. La pondération est donc nulle.

ANNEXE 5 – Résultats des études de cas

I. Résultats des études sur le vérin

I.1. Étude de cas 1

Étude de cas 1 - Réutilisation			
Composant	Classement des matériaux	Matériau classé en 1 ^{ère} position	Divergence du classement par rapport 1 ^{er} composant
1	AL>PVC>Acier>MG=PA=PE	ALUMINIUM	
2	AL>PVC>PA=PE>Acier=MG	ALUMINIUM	66%
3	-	ACIER	-
4	-	PA	-
5	AL>PVC>Acier=MG>PA>PE	ALUMINIUM	17%
6	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	ALUMINIUM	50%
Divergence d'attribution des matériaux classés en 1 ^{ère} position par rapport au produit connu			66%

I.2. Étude de cas 2

Étude de cas 2 - Maintenance			
Composant	Classement des matériaux	Matériau classé en 1 ^{ère} position	Divergence du classement par rapport 1 ^{er} composant
1	AL>Acier = PVC>MG>PA=PE	ALUMINIUM	-
2	AL>PVC>PA=PE>Acier=MG	ALUMINIUM	83%
3	-	ACIER	-
4	-	PA	-
5	AL>PVC=Acier=MG>PA=PE	ALUMINIUM	50%
6	AL=Acier>PVC=PA>MG>PE	ALUMINIUM / ACIER	83%
Divergence d'attribution des matériaux classés en 1 ^{ère} position par rapport au produit connu			De 33% à 66%

I.3. Étude de cas 3

Étude de cas 3 - Refabrication			
Composant	Classement des matériaux	Matériau classé en 1 ^{ère} position	Divergence du classement par rapport 1 ^{er} composant
1	AL>Acier>MG>PVC>PA=PE	ALUMINIUM	-
2	AL>MG>Acier>PVC>PA>PE	ALUMINIUM	50%
3	-	ACIER	-
4	-	PA	-
5	AL>Acier=MG=PVC>PA>PE	ALUMINIUM	50%
6	AL>Acier>PA=PVC>MG>PE	ALUMINIUM	83%
Divergence d'attribution des matériaux classés en 1 ^{ère} position par rapport au produit connu			66%

I.4. Étude de cas 4

Étude de cas 4 – Recyclage avec désassemblage			
Composant	Classement des matériaux	Matériau classé en 1 ^{ère} position	Divergence du classement par rapport 1 ^{er} composant
1	Acier>AL=MG>PA>PVC=PE	ACIER	-
2	Acier>AL>MG>PA>PVC=PE	ACIER	17%
3	-	ACIER	-
4	-	PA	-
5	Acier>AL>MG>PA>PVC=PE	ACIER	17%
6	Acier>MG>AL>PA>PVC=PE	ACIER	33%
Divergence d'attribution des matériaux classés en 1 ^{ère} position par rapport au produit connu			17%

I.5. Étude de cas 5

Étude de cas 5 – Recyclage sans désassemblage			
Composant	Classement des matériaux	Matériau classé en 1 ^{ère} position	Divergence du classement par rapport 1 ^{er} composant
1	Acier>AL=MG>PA>PVC=PE	ACIER	-
2	Acier>AL=MG>PA>PVC=PE	ACIER	0%
3	-	ACIER	-
4	-	PA	-
5	Acier>AL=MG>PA>PVC>PE	ACIER	17%
6	Acier>MG>AL>PA>PVC>PE	ACIER	50%
Divergence d'attribution des matériaux classés en 1 ^{ère} position par rapport au produit connu			17%

I.6. Étude de cas 6

Étude de cas 6 – Élimination			
Composant	Classement des matériaux	Matériau classé en 1 ^{ère} position	Divergence du classement par rapport 1 ^{er} composant
1	Acier>MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	-
2	Acier>MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	0%
3	-	ACIER	-
4	-	PA	-
5	Acier>MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	0%
6	Acier>MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	0%
Divergence d'attribution des matériaux classés en 1 ^{ère} position par rapport au produit connu			17%

I.7. Récapitulatif des études de cas du vérin

Attribution des matériaux avec ECMSPEOL	
Fin de vie	Divergence d'attribution des matériaux par rapport au produit connu
Réutilisation	66%
Maintenance	De 33 à 66%
Refabrication	66%
Recyclage avec désassemblage	17%
Recyclage sans désassemblage	17%
Élimination	17%

Récapitulatif des résultats				
Composant	Fin de vie	Classement des matériaux	Divergence des classements pour le même composant	Moyenne de divergence par composant
1	Réutilisation	AL>PVC>Acier>MG=PA=PE	Référence	64%
	Maintenance	AL>Acier=PVC>MG>PA=PE	50%	
	Refabrication	AL>Acier>MG>PVC>PA=PE	50%	
	Recyclage avec D.	Acier>AL=MG>PA>PVC=PE	100%	
	Recyclage sans D.	Acier>AL=MG>PA>PVC=PE	100%	
	Élimination	Acier>MG>AL=PA=PVC=PE	83%	
2	Réutilisation	AL>PVC>PA=PE>Acier=MG	Référence	64%
	Maintenance	AL>PVC>PA=PE>Acier=MG	0%	
	Refabrication	AL>MG>Acier>PVC>PA>PE	83%	
	Recyclage avec D.	Acier>AL>MG>PA>PVC=PE	100%	
	Recyclage sans D.	Acier>AL=MG>PA>PVC=PE	100%	
	Élimination	Acier>MG>AL=PA=PVC=PE	100%	
3		ACIER	-	-
4		PA	-	-
5	Réutilisation	AL>PVC>Acier=MG>PA>PE	Référence	61%
	Maintenance	AL>PVC=Acier=MG>PA=PE	33%	
	Refabrication	AL>Acier=MG=PVC>PA>PE	50%	
	Recyclage avec D.	Acier>AL>MG>PA>PVC=PE	100%	
	Recyclage sans D.	Acier>AL=MG>PA>PVC>PE	83%	
	Élimination	Acier>MG>AL=PA=PVC=PE	100%	
6	Réutilisation	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	Référence	69%
	Maintenance	AL=Acier>PVC=PA>MG>PE	66%	
	Refabrication	AL>Acier>PA=PVC>MG>PE	66%	
	Recyclage avec D.	Acier>MG>AL>PA>PVC=PE	83%	
	Recyclage sans D.	Acier>MG>AL>PA>PVC>PE	100%	
	Élimination	Acier>MG>AL=PA=PVC=PE	100%	

II. Résultats des études de cas sur le ferme-porte

II.1. Étude de cas 7

Étude de cas 7 - Réutilisation			
Composant	Classement des matériaux	Matériau classé en 1 ^{ère} position	Divergence du classement par rapport au composant 1
1	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	ALUMINIUM	Référence
2	AL>Acier>PA=PVC>PE>MG	ALUMINIUM	83%
3	AL>Acier>PA=PVC>PE>MG	ALUMINIUM	83%
4	ACIER		
5	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	ALUMINIUM	0%
6	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	ALUMINIUM	0%
7	ACIER		
8	AL>Acier>PVC>PA=PE>MG	ALUMINIUM	66%
9	AL>Acier>PVC>PA=PE>MG	ALUMINIUM	66%
10	BRONZE		
11	AL>Acier>PVC>PA=PE>MG	ALUMINIUM	66%
12	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	ALUMINIUM	0%
13	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	ALUMINIUM	0%
14	AL>Acier>PA=PVC>PE>MG	ALUMINIUM	83%
15	AL>Acier>PVC>PA=PE>MG	ALUMINIUM	66%
16	AL>Acier>PVC>PA=PE>MG	ALUMINIUM	66%
17	AL>Acier>PVC>PA=PE>MG	ALUMINIUM	66%
18	AL>Acier>PA=PVC>PE>MG	ALUMINIUM	83%
19	BRONZE		
20	AL>Acier>PVC>PA=PE>MG	ALUMINIUM	66%
21	AL>Acier>PVC>PA=PE>MG	ALUMINIUM	66%
22	AL>Acier>PVC>PA=PE>MG	ALUMINIUM	66%
23	AL>Acier>PA=PVC>PE>MG	ALUMINIUM	83%
24	AL>Acier>PVC>PA=PE>MG	ALUMINIUM	66%
25	AL>Acier>PVC>PA=PE>MG	ALUMINIUM	66%
26	AL>Acier>PA=PVC>PE>MG	ALUMINIUM	83%
27	AL>PVC>Acier=MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
28	AL>PVC>Acier=MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
29	AL>PVC>Acier=MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
Divergence d'attribution des matériaux classés en 1 ^{ère} position par rapport au produit connu			21%

II.2. Étude de cas 8

Étude de cas 8 - Maintenance			
Composant	Classement des matériaux	Matériau classé en 1 ^{ère} position	Divergence du classement par rapport au composant 1
1	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	ALUMINIUM	Référence
2	AL=Acier>PA=PVC>MG>PE	ALUMINIUM	83%
3	AL=Acier>PA=PVC>MG>PE	ALUMINIUM	83%
4	ACIER		
5	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	ALUMINIUM	0%
6	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	ALUMINIUM	0%
7	ACIER		
8	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	ALUMINIUM	0%
9	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
10	BRONZE		
11	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
12	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	ALUMINIUM	0%
13	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	ALUMINIUM	0%
14	AL=Acier>PA=PVC>MG>PE	ALUMINIUM	83%
15	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
16	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
17	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
18	AL=Acier>PA=PVC>MG>PE	ALUMINIUM	83%
19	BRONZE		
20	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
21	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
22	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
23	AL=Acier>PA=PVC>MG>PE	ALUMINIUM	83%
24	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
25	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
26	AL=Acier>PA=PVC>MG>PE	ALUMINIUM	83%
27	AL>PVC>Acier=MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
28	AL>PVC>Acier=MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
29	AL>PVC>Acier=MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
Divergence d'attribution des matériaux classés en 1 ^{ère} position par rapport au produit connu			21%

II.3. Étude de cas 9

Étude de cas 9 - Refabrication			
Composant	Classement des matériaux	Matériau classé en 1 ^{ère} position	Divergence du classement par rapport au composant 1
1	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	ALUMINIUM	Référence
2	AL>Acier>MG>PVC>PA>PE	ALUMINIUM	83%
3	AL>Acier>MG>PVC>PA>PE	ALUMINIUM	83%
4	ACIER		
5	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	ALUMINIUM	0%
6	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	ALUMINIUM	0%
7	ACIER		
8	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
9	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
10	BRONZE		
11	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
12	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	ALUMINIUM	0%
13	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	ALUMINIUM	0%
14	AL>Acier>MG>PVC>PA>PE	ALUMINIUM	83%
15	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
16	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
17	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
18	AL>Acier>MG>PVC>PA>PE	ALUMINIUM	83%
19	BRONZE		
20	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
21	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
22	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
23	AL>Acier>MG>PVC>PA>PE	ALUMINIUM	83%
24	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
25	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
26	AL>Acier>MG>PVC>PA>PE	ALUMINIUM	83%
27	AL>PVC>Acier=MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
28	AL>PVC>Acier=MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
29	AL>PVC>Acier=MG>PA=PE	ALUMINIUM	83%
Divergence d'attribution des matériaux classés en 1 ^{ère} position par rapport au produit connu			21%

II.4. Étude de cas 10

Étude de cas 10 – Recyclage avec désassemblage			
Composant	Classement des matériaux	Matériau classé en 1 ^{ère} position	Divergence du classement par rapport au composant 1
1	Acier>MG>AL>PA=PVC=PE	ACIER	Référence
2	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
3	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
4	ACIER		
5	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
6	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
7	ACIER		
8	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
9	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
10	BRONZE		
11	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
12	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
13	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
14	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
15	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
16	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
17	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
18	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
19	BRONZE		
20	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
21	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
22	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
23	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
24	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
25	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
26	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
27	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
28	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
29	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
Divergence d'attribution des matériaux classés en 1 ^{ère} position par rapport au produit connu			38%

II.5. Étude de cas 11

Étude de cas 11 – Recyclage sans désassemblage			
Composant	Classement des matériaux	Matériau classé en 1 ^{ère} position	Divergence du classement par rapport au composant 1
1	Acier>MG>AL>PA=PVC=PE	ACIER	Référence
2	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
3	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
4	ACIER		
5	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
6	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
7	ACIER		
8	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
9	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
10	BRONZE		
11	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
12	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
13	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
14	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
15	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
16	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
17	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
18	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
19	BRONZE		
20	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
21	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
22	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
23	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
24	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
25	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
26	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
27	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
28	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
29	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	ACIER	17%
Divergence d'attribution des matériaux classés en 1 ^{ère} position par rapport au produit connu			38%

II.6. Étude de cas 12

Étude de cas 12 – Élimination			
Composant	Classement des matériaux	Matériau classé en 1 ^{ère} position	Divergence du classement par rapport au composant 1
1	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	Référence
2	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	0%
3	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	0%
4	ACIER		
5	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	0%
6	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	0%
7	ACIER		
8	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	0%
9	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	0%
10	BRONZE		
11	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	0%
12	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	0%
13	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	0%
14	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	0%
15	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	0%
16	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	0%
17	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	0%
18	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	0%
19	BRONZE		
20	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	0%
21	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	0%
22	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	0%
23	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	0%
24	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	0%
25	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	0%
26	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	0%
27	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	0%
28	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	0%
29	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	ACIER	0%
Divergence d'attribution des matériaux classés en 1 ^{ère} position par rapport au produit connu			38%

II.7. Récapitulatifs des études de cas sur le ferme-porte

Attribution des matériaux avec ECMSPEOL	
Fin de vie	Divergence d'attribution des matériaux par rapport au produit connu
Réutilisation	21%
Maintenance	21%
Refabrication	21%
Recyclage avec désassemblage	38%
Recyclage sans désassemblage	38%
Élimination	38%

Récapitulatif des résultats				
Composant	Fin de vie	Classement des matériaux	Divergence des classements pour le même composant	Moyenne de divergence par composant
1	Réutilisation	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	Référence	50%
	Maintenance	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	0%	
	Refabrication	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	0%	
	Recyclage avec D.	Acier>MG>AL>PA=PVC=PE	100%	
	Recyclage sans D.	Acier>MG>AL>PA=PVC=PE	100%	
	Élimination	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	100%	
2	Réutilisation	AL>Acier>PA=PVC>PE>MG	Référence	69%
	Maintenance	AL=Acier>PA=PVC>MG>PE	50%	
	Refabrication	AL>Acier>MG>PVC>PA>PE	66%	
	Recyclage avec D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Recyclage sans D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Élimination	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	100%	
3	Réutilisation	AL>Acier>PA=PVC>PE>MG	Référence	69%
	Maintenance	AL=Acier>PA=PVC>MG>PE	50%	
	Refabrication	AL>Acier>MG>PVC>PA>PE	66%	
	Recyclage avec D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Recyclage sans D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Élimination	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	100%	
4	ACIER			
5	Réutilisation	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	Référence	50%
	Maintenance	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	0%	
	Refabrication	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	0%	

	Recyclage avec D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Recyclage sans D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Élimination	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	100%	
6	Réutilisation	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	Référence	50%
	Maintenance	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	0%	
	Refabrication	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	0%	
	Recyclage avec D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Recyclage sans D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Élimination	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	100%	
7				
8	Réutilisation	AL>Acier>PVC>PA=PE>MG	Référence	64%
	Maintenance	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	33%	
	Refabrication	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	50%	
	Recyclage avec D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Recyclage sans D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Élimination	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	100%	
9	Réutilisation	AL>Acier>PVC>PA=PE>MG	Référence	66%
	Maintenance	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	50%	
	Refabrication	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	50%	
	Recyclage avec D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Recyclage sans D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Élimination	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	100%	
10	BRONZE			
11	Réutilisation	AL>Acier>PVC>PA=PE>MG	Référence	66%
	Maintenance	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	50%	
	Refabrication	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	50%	
	Recyclage avec D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Recyclage sans D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Élimination	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	100%	
12	Réutilisation	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	Référence	50%
	Maintenance	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	0%	
	Refabrication	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	0%	
	Recyclage avec D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Recyclage sans D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Élimination	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	100%	
13	Réutilisation	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	Référence	50%
	Maintenance	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	0%	
	Refabrication	AL>PA=PVC>PE>Acier=MG	0%	
	Recyclage avec D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Recyclage sans D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Élimination	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	100%	

14	Réutilisation	AL>Acier>PA=PVC>PE>MG	Référence	69%
	Maintenance	AL=Acier>PA=PVC>MG>PE	50%	
	Refabrication	AL>Acier>MG>PVC>PA>PE	66%	
	Recyclage avec D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Recyclage sans D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Élimination	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	100%	
15	Réutilisation	AL>Acier>PVC>PA=PE>MG	Référence	66%
	Maintenance	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	50%	
	Refabrication	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	50%	
	Recyclage avec D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Recyclage sans D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Élimination	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	100%	
16	Réutilisation	AL>Acier>PVC>PA=PE>MG	Référence	66%
	Maintenance	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	50%	
	Refabrication	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	50%	
	Recyclage avec D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Recyclage sans D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Élimination	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	100%	
17	Réutilisation	AL>Acier>PVC>PA=PE>MG	Référence	66%
	Maintenance	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	50%	
	Refabrication	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	50%	
	Recyclage avec D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Recyclage sans D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Élimination	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	100%	
18	Réutilisation	AL>Acier>PA=PVC>PE>MG	Référence	69%
	Maintenance	AL=Acier>PA=PVC>MG>PE	50%	
	Refabrication	AL>Acier>MG>PVC>PA>PE	66%	
	Recyclage avec D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Recyclage sans D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Élimination	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	100%	
19	BRONZE			
20	Réutilisation	AL>Acier>PVC>PA=PE>MG	Référence	69%
	Maintenance	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	50%	
	Refabrication	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	66%	
	Recyclage avec D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Recyclage sans D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Élimination	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	100%	
21	Réutilisation	AL>Acier>PVC>PA=PE>MG	Référence	69%

	Maintenance	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	50%	
	Refabrication	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	66%	
	Recyclage avec D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Recyclage sans D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Élimination	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	100%	
22	Réutilisation	AL>Acier>PVC>PA=PE>MG	Référence	69%
	Maintenance	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	50%	
	Refabrication	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	66%	
	Recyclage avec D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Recyclage sans D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Élimination	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	100%	
23	Réutilisation	AL>Acier>PA=PVC>PE>MG	Référence	69%
	Maintenance	AL=Acier>PA=PVC>MG>PE	50%	
	Refabrication	AL>Acier>MG>PVC>PA>PE	66%	
	Recyclage avec D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Recyclage sans D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Élimination	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	100%	
24	Réutilisation	AL>Acier>PVC>PA=PE>MG	Référence	69%
	Maintenance	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	50%	
	Refabrication	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	66%	
	Recyclage avec D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Recyclage sans D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Élimination	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	100%	
25	Réutilisation	AL>Acier>PVC>PA=PE>MG	Référence	69%
	Maintenance	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	50%	
	Refabrication	AL>Acier>PVC>MG>PA=PE	66%	
	Recyclage avec D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Recyclage sans D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Élimination	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	100%	
26	Réutilisation	AL>Acier>PA=PVC>PE>MG	Référence	69%
	Maintenance	AL=Acier>PA=PVC>MG>PE	50%	
	Refabrication	AL>Acier>MG>PVC>PA>PE	66%	
	Recyclage avec D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Recyclage sans D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	100%	
	Élimination	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	100%	
27	Réutilisation	AL>PVC>Acier=MG>PA=PE	Référence	39%
	Maintenance	AL>PVC>Acier=MG>PA=PE	0%	
	Refabrication	AL>PVC>Acier=MG>PA=PE	0%	
	Recyclage avec D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	66%	
	Recyclage sans D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	66%	
	Élimination	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	100%	
28	Réutilisation	AL>PVC>Acier=MG>PA=PE	Référence	39%
	Maintenance	AL>PVC>Acier=MG>PA=PE	0%	

	Refabrication	AL>PVC>Acier=MG>PA=PE	0%	
	Recyclage avec D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	66%	
	Recyclage sans D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	66%	
	Élimination	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	100%	
29	Réutilisation	AL>PVC>Acier=MG>PA=PE	Référence	39%
	Maintenance	AL>PVC>Acier=MG>PA=PE	0%	
	Refabrication	AL>PVC>Acier=MG>PA=PE	0%	
	Recyclage avec D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	66%	
	Recyclage sans D.	Acier>MG>AL>PVC>PA=PE	66%	
	Élimination	Acier=MG>AL=PA=PVC=PE	100%	