



HAL
open science

Contribution to integrate constraints of dismantling and recycling in the first phases of design of products

Nizar Haoues

► **To cite this version:**

Nizar Haoues. Contribution to integrate constraints of dismantling and recycling in the first phases of design of products. Humanities and Social Sciences. Arts et Métiers ParisTech, 2006. English. NNT : 2006ENAM0014 . pastel-00001888

HAL Id: pastel-00001888

<https://pastel.hal.science/pastel-00001888>

Submitted on 7 Sep 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'ordre : 2006 - 14

Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Institut Conception, Mécanique et Environnement

Chambéry

THESE

Présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR

DE

L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE

D'ARTS ET METIERS

Spécialité : GENIE INDUSTRIEL

PAR

Nizar HAOUES

CONTRIBUTION À L'INTÉGRATION DES CONTRAINTES DE DÉSASSEMBLAGE ET DE RECYCLAGE DÈS LES PREMIÈRES PHASES DE CONCEPTION DE PRODUITS

Soutenue le 06 juin 2006, devant le jury d'examen :

M.	D.	FROELICH	P.U., E.N.S.A.M, Chambéry	Directeur de thèse
M.	D.	BRISSAUD	P.U., I.N.P.G, Grenoble	Co-directeur de thèse
Mme.	P.	ZWOLINSKI	M.d.C, U.J.F, Grenoble	Examineur
M.	D.	MILLET	P.U., Supméca, Toulon	Rapporteur
M.	P.	TRUCHOT	P.U., I.N.P.L, Nancy	Rapporteur
M.	A.	AOUSSAT	P.U., E.N.S.A.M, Paris	Président
M.	M.	SARRAZIN	Directeur R&D TEFAL Pesage	Membre invité
M.	H.	BREZET	P.U., TU - D.E.L.F.T, Pays-Pas	Membre invité

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

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

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire sont le résultat d'une recherche qui s'est déroulée au sein du Laboratoire MAPIE de L'ENSAM de Chambéry en collaboration avec le laboratoire 3S de l'INPG de Grenoble. Les expérimentations ont été réalisées dans le cadre du projet Concevoir propre labellisé et financé par la Région Rhône-Alpes et le Groupe TEFAL.

Je tiens à remercier tout d'abord M. Daniel FROELICH pour m'avoir accueilli en thèse ; sa disponibilité, sa bonne humeur et ces compétences en matière de valorisation des produits en fin de vie m'ont permis de mener ces travaux à leur terme. Mme Peggy ZWOLINSKI et M. Daniel BRISSAUD ensuite ; Leurs précieux conseils et leur patience, m'ont accompagné tout au long de cette étude,

Je remercie également toutes les personnes qui ont accepté de participer à mon jury de thèse : M. Patrick TRUCHOT, M. Dominique MILLET, M. Améziiane AOUSSAT, M. Michel SARRAZIN et M. Han BREZET

J'adresse également mes remerciements à tous les membres du laboratoire MAPIE - ENSAM Chambéry et 3S Grenoble, doctorants et secrétaires, pour leur patience et leur bonne humeur, qui ont su faire régner dans le laboratoire une atmosphère studieuse et chaleureuse.

Enfin je tiens à remercier ma famille, ma belle-famille et ma femme dont les encouragements et le soutien ont été indispensables à l'aboutissement de mes études.

Table des matières

Remerciements

Introduction	1
Chapitre 1 La valorisation en fin de vie, une nouvelle préoccupation environnementale	9
1.1 Introduction	11
1.2 Évolutions législatives concernant le traitement des produits en fin de vie	11
1.3 Métabolisme industriel	13
1.4 L'évolution des modèles industriels	15
1.4.1 Les modèles industriels du 21ème siècle	17
1.4.2 Système Feedback du produit	19
1.4.3 Développement du modèle de valorisation de produits	20
1.4.4 Perspectives d'application d'un modèle de valorisation	23
1.4.5 Bilan	23
1.5 Cadre du projet de recherche	24
1.5.1 Projet concevoir propre	24
1.5.2 Contexte de la thèse	25
1.5.3 Apport des trois partenaires au sein de notre projet	26
1.5.4 Bilan	28
1.6 Problématique générale de recherche	29

1.6.1	Modèle global de valorisation	29
1.6.2	Intégration du désassemblage dans le processus de conception	33
1.6.3	Positionnement de notre thèse : Articulation entre l'axe de recherche de L'ENSAM Chambéry et celui du laboratoire 3S	37
1.6.4	Domaine d'application et d'implémentation	38
1.6.5	Bilan	39
1.7	Conclusion	39

Chapitre 2 État de l'art des méthodes et outils de conception pour le désassemblage **41**

2.1	Introduction	43
2.2	Désassemblage	44
2.2.1	Définition	44
2.2.2	Mode de désassemblage	45
2.2.3	Modèle de désassemblage pour le recyclage	46
2.2.4	Bilan	48
2.3	Sciences de la conception	49
2.3.1	Définition de la conception	49
2.3.2	Brève description des modèles de conception	49
2.4	Conception pour le désassemblage	50
2.4.1	Conformité des produits aux exigences de fin de vie	51
2.4.1.1	Conformité du produit aux exigences législatives	52
2.4.1.2	Le Recyclage Noble : une approche adéquate pour le traitement des produits en fin de vie	53
2.4.2	Problème de l'intégration des contraintes de la fin de vie du produit dans le processus de la conception	55
2.4.2.1	Méthodes basées sur des recommandations	57
2.4.2.2	Méthodes basées sur l'évaluation	58
2.4.3	Les phases du processus de la conception	62

2.4.3.1	Élaboration du cahier des charges "planning and clarifying the task"	65
2.4.3.2	Conception de principe " <i>Conceptual design</i> "	65
2.4.3.3	Conception d'ensemble " <i>Embodiment design</i> "	66
2.4.3.4	Conception détaillée " <i>Detail design</i> "	66
2.4.4	Bilan et positionnement	66
2.5	Classification des types de conception	67
2.5.1	Conception routinière ou prédéfinie	68
2.5.2	Conception innovante	68
2.5.3	Conception créative	69
2.5.4	Bilan et positionnement	71
2.6	Problématique spécifique de la thèse	72
2.7	Conclusion	74

Chapitre 3 Observation du processus de conception *Etude de terrain* 75

3.1	Introduction	76
3.2	Conception pour le désassemblage chez TEFAL : Etude du terrain	77
3.2.1	Démarche de conception pour le recyclage chez TEFAL	78
3.2.2	Analyse de quelques aspects du processus de conception pour le recyclage de TEFAL	80
3.2.3	Bilan	90
3.3	Reconstruction : formalisation de la phase conceptuelle de la conception	90
3.3.1	L'analyse fonctionnelle pour la définition du produit	90
3.3.2	Caractérisation du produit	93
3.3.2.1	Functional Analysis System Technique FAST	95
3.3.2.2	Le Bloc Diagramme Fonctionnel BDF	98
3.3.3	Caractérisation du désassemblage du produit en cours de conception	102

3.3.3.1	Application de l'outil DFA à l'évaluation du désassemblage	103
3.3.3.2	Application de la méthode MTM à l'évaluation du désassemblage	104
3.3.3.3	Bilan : résultats	105
3.4	Conclusion	106
Chapitre 4 Modèle minimal pour l'étude du désassemblage		109
4.1	Introduction	110
4.2	Justification du modèle minimal	110
4.2.1	Exploitation des formalismes fonctionnels dans le modèle minimal	111
4.2.2	Interaction de type fonctionnel	113
4.2.3	Interaction de type technique	113
4.2.4	Rapport entre interaction fonctionnelle et interaction technique : Discussion	116
4.2.5	La relation entre le désassemblage pour le recyclage et les types d'interaction	117
4.2.6	Bilan	118
4.3	Modèle minimal	119
4.3.1	Mise en place du modèle minimal	119
4.3.2	Les éléments du modèle minimal	120
4.3.2.1	Cahier des charges environnementales	120
4.3.2.2	Les données minimales	120
4.4	Vue structure support à la définition d'une séquence optimale de désassemblage	123
4.4.1	Structure optimale d'un produit	126
4.4.2	Définition de la structure	127
4.4.3	Séquence optimale	130

4.4.4	Bilan	132
4.5	Conclusion	133

Chapitre 5 Mise en place d'indicateurs en vue de l'optimisation du désassemblage **135**

5.1	Introduction	137
5.2	Présentation globale de la démarche	138
5.3	Les indicateurs	139
5.4	Agrégation d'indicateurs	140
5.4.1	Les méthodes ELECTRE	141
5.4.2	Les méthodes PROMETHEE	143
5.4.2.1	Etablir la fonction de préférence	143
5.4.2.2	Degré de préférence multicritères	144
5.4.2.3	Les flux de surclassement multicritères	144
5.4.3	Bilan	146
5.5	Le tableau de bord	147
5.5.1	Généralités	147
5.5.2	Méthodologie de construction	147
5.5.3	Bilan	149
5.6	Proposition d'un outil d'évaluation du désassemblage	149
5.6.1	Processus de prise de décision et indicateurs	151
5.6.2	Processus de conception et indicateurs	151
5.7	Indicateurs proposés	152
5.7.1	Spécificité d'un système d'indicateurs de désassemblage en phase conceptuelle	152
5.7.1.1	Indicateurs proposés	152
5.7.2	Modélisation des indicateurs	154
5.7.2.1	Indicateur de structure	154
5.7.2.2	Indicateur liaison	156

5.7.2.3	Indicateur des matériaux	159
5.8	Tableau de bord	160
5.9	Choix de solution	161
5.9.1	Définition des références	161
5.9.2	Agrégation	162
5.10	Conclusion	170
Chapitre 6 Illustration et application : aspirateur		173
6.1	Introduction	174
6.2	Construction du modèle minimal dans le cadre de la conception d'un aspirateur	174
6.2.1	Cahier des charges environnemental	174
6.2.2	Cahier des charges fonctionnel	176
6.2.3	Les données minimales	178
6.3	Structure et définition de la $\{Séquence_0\}$	180
6.3.1	Analyse conceptuelle de la structure	180
6.3.2	Séquence optimale	183
6.4	Evaluation des solutions de conception	186
6.4.1	Définition des références	186
6.4.2	Description des solutions	187
6.4.3	Tableau de bord	188
6.4.4	Surclassement des solutions	189
6.5	Conclusion	191
Conclusion		193
Références		201
ANNEXES		209

Table des figures

1	Représentation synoptique du mémoire de recherche	7
1.1	Les dimensions du développement durable [1]	12
1.2	Evolution des directives environnementales Européennes [2]	13
1.3	Modèle de flux linéaire	16
1.4	Modèle de flux cyclique	16
1.5	Illustration du rôle de la valorisation pour l'équilibre industriel	17
1.6	Modèle de flux à cycle fermé	18
1.7	Le modèle industriel du 21ème siècle [3]	19
1.8	Cycle de vie d'un produit [4]	21
1.9	Contexte du projet concevoir propre	25
1.10	Répartition des rôles des trois partenaires	27
1.11	Synoptique des deux approches de valorisation	30
1.12	Conception produit/ désassemblage pour le fin de vie : organisation séquentielle	34
1.13	Intégration conception du produit et du désassemblage en fin de vie	35
1.14	Processus itératifs de préconception du produit pour le désassemblage en fin de vie	35
1.15	Intégration désassemblage en fin de vie par rapport aux processus de conception produit	36
1.16	Les trois axes de recherche de notre thèse	38
2.1	Classification du désassemblage	45

2.2	Priorité du désassemblage en fonction du mode de valorisation	47
2.3	Conformité du produit aux contraintes de fin de vie	51
2.4	Priorité entre les différents modes de valorisation [5]	53
2.5	Détermination de la stratégie optimale entre le scénario de valorisation et le désassemblage [6]	55
2.6	Outils de DfD dans le processus de conception	61
2.7	Les phases du processus de conception [7]	64
2.8	Types de conception et nature de produits	68
2.9	Espace des solutions de conception routinière, innovante et créative [8]	69
2.10	Classification de type de la conception	70
2.11	Opportunité dans la phase de la conception de principe	73
3.1	Cycle de vie des produits TEFAL	81
3.2	Les constituants du pèse-personne à quatre capteurs	82
3.3	Outil d'évaluation du taux de recyclabilité des produits TEFAL	84
3.4	Séquence de désassemblage obtenu par TEFAL	89
3.5	Décomposition générique d'un produit	91
3.6	BDF et FAST pour la modélisation fonctionnelle	93
3.7	Les principales fonctions du produit	94
3.8	FAST concernant la fonction "peser" actuellement développée	96
3.9	Identification du BDS	98
3.10	Développement du formalisme BDF pour la fonction <i>peser</i>	101
3.11	Protocole d'expérimentation	103
3.12	Interface DFA	104
3.13	Evaluation par la méthode MTM	105
3.14	Les aspects environnementaux à prendre en compte dans la conception du pèse-personne	106
4.1	Traduction fonction/géométrie dans DfD	112
4.2	Interaction de type fonctionnelle	113
4.3	Interaction de type physique	114

4.4	Effet de choix de matière sur la séparation des interactions	116
4.5	BDS pour la CpD	119
4.6	Raisonnement pour la définition des données minimales	122
4.7	Matrice d'interaction pour le pèse-personne	125
4.8	Regroupement des interactions de type spatial	127
4.9	Matrice de précedence	131
4.10	Séquence optimale	132
5.1	Adéquation entre les choix de conception et les indicateurs de désas- semblage	137
5.2	Démarche d'évaluation	138
5.3	Exemple d'agrégation des indicateurs	141
5.4	Bilan de la démarche multi-critère	146
5.5	L'intégration de l'outil dans le processus de conception	152
5.6	Formulation mathématique de l'indicateur structure	154
5.7	Exemple d'application de I_S	155
5.8	Exemple d'application de I_S dans le cas du désassemblage total . . .	156
5.9	Formulation mathématique de l'indicateur liaison	157
5.10	Exemple d'application de I_L	158
5.11	Formulation mathématique de l'indicateur des matériaux	160
5.12	Analyse de choix de matériaux et de leurs effets sur les composants adjacents	165
5.13	Graphe de classification des solutions	169
5.14	Processus de choix	170
6.1	Frontières de l'aspirateur	177
6.2	BDS Aspirateur	178
6.3	Schéma de principe de l'aspirateur	179
6.4	Matrice d'interaction	180
6.5	Regroupement des interactions de type spatial	181
6.6	Illustration minimale de l'aspirateur	183

Table des figures

6.7	Matrice de précédence	184
6.8	Matrice de précédence de S_2	185
6.9	Séquence optimale	185
6.10	Graphe de classification de solution	191
6.11	La solution retenue et développée par les concepteurs	192
1	Démarche de conception pour le désassemblage	198
1	Nomenclature "Aspirateur 1ère solution"	215
2	Séquence de désassemblage "Aspirateur 1ère solution"	216
3	Nomenclature "Aspirateur 2ème solution"	217
4	Séquence de désassemblage "Aspirateur 2ème solution"	219
5	Séquence de désassemblage "Aspirateur 3ème solution"	221
6	Séquence de désassemblage "Aspirateur 4ème solution"	223

Introduction

La valorisation des Produits en Fin de Vie (PFV) est un sujet en pleine croissance. Particulièrement, dans les environnements industriels où la réduction des impacts environnementaux et l'optimisation des scénarios de fin de vie, constituent un enjeu de pérennité et compétitivité dans les marchés actuels.

Plusieurs lois concernant les produits en fin de vie ont été récemment adoptées par le parlement Européen. Parmi ces lois on distingue trois directives importantes : la directive concernant les **Produits Electriques et Electroniques en Fin de Vie PEEFV** récemment adoptée (EU Directive 2002/96/CE), la directive concernant les Véhicules Hors d'Usage (VHU) adoptée le 18 septembre 2000 (EU Directive 2000/53/CE) et la directive concernant les substances dangereuses RoHs (EU Directive 2002/95/EC). L'objectif de ces directives est de promouvoir un équilibre entre la croissance de la quantité des produits mis sur le marché et la qualité environnementale, plus particulièrement leur traitement en fin de vie. La maîtrise du rapport production - traitement du produit en fin de vie devient alors un objectif social, politique et scientifique. Cet objectif entre dans le cadre du concept de "*développement durable*"¹. "Ce concept correspond à une forme de progrès répondant aux besoins du présent sans compromettre l'aptitude des générations futures à répondre aux leurs [9]".

Les directives citées ci-dessus exigent des constructeurs que leurs produits atteignent un taux massique minimum de valorisation qui varie suivant la catégorie de produit. En effet, dès l'année 2006, 85% de la masse totale du produit EEE doit être valorisable. Actuellement, le taux réel du recyclage est encore loin des objectifs fixés par la législation. Il est généralement compris entre 50 et 60 % de la masse totale du produit. Face à ces exigences de plus en plus strictes vis à vis des taux de valorisation, les recycleurs sont dans l'obligation de désassembler le produit suivant les différents modes de valorisation envisagés.

¹Développement durable : (*sustainable development*) a été défini lors du Sommet de la Terre de Rio (juin 1992)

Avec le renforcement des pressions juridiques en matière de traitement des produits en fin de vie, les entreprises se trouvent obligées de s'engager dans une démarche environnementale. Aujourd'hui, les entreprises sont obligées de connaître, avant la mise en fabrication du produit, les impacts environnementaux et les différents scénarios de valorisation de tout produit. La phase " valorisation " s'intègre de plus en plus dans la vie des entreprises tant au niveau stratégique qu'économique. De nos jours, toute entreprise soucieuse de perdurer, se doit de prendre en compte l'impact de ses activités sur l'environnement. Cependant, le traitement des produits en fin de vie, concerne uniquement le taux de masse de matières récupérables. Malheureusement, cet indicateur ne traduit pas la réalité des résultats obtenus ni la qualité des matériaux sortant d'un processus de recyclage classique (dépollution, broyage, tri). Cet indicateur ne peut être valable que dans le cas d'un désassemblage total en amont du processus classique de recyclage.

La transformation des produits en fin de vie par la réutilisation des composants et la récupération de la matière secondaire et de l'énergie, constituent d'une part, un moyen de limitation des impacts environnementaux et d'autre part une stratégie de développement économique et social. Pour atteindre ce challenge, plusieurs recherches [10] [11] ont montré la nécessité de décomposer les produits en amont de chaque processus de valorisation. Cette décomposition a pour but de récupérer les composants suivant les options de valorisation allouées à chaque partie du produit. Face à l'importance de cette problématique et aux nouvelles tendances politiques en matière de développement durable, plusieurs organismes de recherche se sont intéressés au développement des outils et des méthodes afin de faciliter l'intégration de la politique de développement durable par les industriels. Toutefois, le problème de désassemblage, obligatoire pour la dépollution au début de tout processus de valorisation, reste un problème propre aux filières de recyclage : conception des chaînes de désassemblage, détermination de la séquence optimale, évaluation en terme de rentabilité et de désassemblage. Ainsi, depuis la multiplication des mesures réglementaires, le producteur est devenu le premier responsable. La contrainte de valorisation est devenue une des problématiques incontournables au niveau de la conception des nouveaux produits. Parmi les contraintes auxquelles les industriels sont confrontés, on peut citer la directive DEEE votée par le Parlement Européen en 2003. *Cette directive impose aux fabricants de vérifier le démontage de leur produit et d'établir des relevés de démontage qui seront mis à la disposition des tris sur demande.*

Contexte

On estime que pour augmenter le taux de valorisation d'un produit il faut intégrer les critères de valorisation dès la phase de conception. Toutefois de nombreuses évaluations du désassemblage du produit se font en phase avancée de la conception, essentiellement par l'évaluation des prototypes ou au mieux par l'évaluation des modèles géométrique de CAO ² [12]. Par conséquent, ces travaux suivent une approche corrective des solutions de conception avancée qui se traduit par la reconception d'un ou de plusieurs sous-ensembles de produit. Une approche préventive intégrant les critères de désassemblabilité et de recyclabilité dès les phases amont de la conception, permettrait de réduire le nombre de modifications et semble plus efficace. Cette approche constitue l'hypothèse fondatrice de notre démarche de recherche. L'objectif du présent travail, est de consolider la démarche de conception pour développer des produits faciles à désassembler avec un minimum de modifications, tout en réduisant les cycles de re-conception pour l'amélioration de la désassemblabilité ³ et de la recyclabilité ⁴. Ceci revient à réfléchir sur le repositionnement de l'approche de la Conception pour le Désassemblage (CpD) au niveau de la phase conceptuelle du produit. Par conséquent, la prise en compte des contraintes de fin de vie doit se faire dès cette phase conceptuelle. Notamment par l'évaluation et l'investigation des potentiels de valorisation et du désassemblage des différents concepts du produit. Pour mettre en œuvre cette méthode nous allons adopter une démarche itérative. Cette dernière est basée sur l'évaluation des performances de démontabilité et de la recyclabilité vis à vis des contraintes et les exigences des réseaux de valorisation des produits. L'intégration de désassemblage devient donc un des paramètres stratégiques dans l'évolution du projet de conception.

Le désassemblage des produits en fin de vie est la seule voie de recherche qui nous permet d'atteindre l'objectif du " *Recyclage Noble* " d'une part. D'autre part, il favorise l'amélioration du taux du recyclage. Le désassemblage permet aussi d'implémenter d'autres scénarios de valorisation, par exemple : la réutilisation des composants ou des sous-ensembles, le remanufacturing, la remise à neuf des produits, la récupération des métaux précieux, etc.

La prise en compte de la thématique " *désassemblage pour le recyclage* " n'est cependant pas des plus simples. Elle fait ainsi appel à de nouvelles connaissances et compétences d'autant plus difficiles à appréhender qu'elles sont liées à de fortes incertitudes sur des contraintes multiples et d'ordres différents : les réglementations, les

²CAO : Conception Assistée par Ordinateur.

³Aptitude d'un produit à être désassemblé suivant les scénarios de fin de vie.

⁴Aptitude d'un produit à être valorisé en fin de vie.

technologies, les nouvelles règles de valorisation, les coûts. Donc, pour parvenir à un "Recyclage Noble", dont les principes sont parfois difficiles à cerner, les concepteurs ont besoin d'objectifs concrets et d'une démarche qui met en commun les compétences des différents acteurs pour atteindre les objectifs du respect environnemental.

Pour parvenir à améliorer la désassemblabilité des produits en fin de vie, nous nous intéresserons à la " Conception pour le Désassemblage pour le Recyclage " au niveau de la phase conceptuelle du développement du produit.

Objectif de la recherche

Cette thèse porte sur l'intégration des contraintes de désassemblage pour la fin de vie au plus tôt dans le processus de la conception du produit. Elle s'intitule " Contribution à l'intégration des contraintes de désassemblage et de recyclage dès les premières phases de conception de produits".

Elle a pour objet de proposer des méthodes et des outils qui permettent la prise en compte du désassemblage des PFV le plus en amont possible dans le processus de développement du produit, de façon à ce que le choix de conception dépende de la fin de vie. Notre sujet de thèse concerne en particulier le choix de la stratégie de désassemblage et du traitement en fin de vie en phase de la conception préliminaire, ceci à partir de la spécification du besoin jusqu'à la génération et la validation des concepts. Par des paramètres conceptuels du produit et des interactions entre les facteurs législatifs, techniques et de valorisation, la gestion des PFV peut être mieux contrôlée dans la phase de développement du produit.

L'objectif de cette recherche est donc de fournir un modèle minimal d'évaluation du désassemblage, en terme de démarche, méthode et outil, utilisé en amont du processus de la conception.

Organisation du manuscrit de thèse

Cette thèse s'articule autour de six chapitres. Nous tenons à souligner que cette séparation reflète le déroulement chronologique du projet de recherche. Comme nous le verrons, les différents chapitres ont une corrélation directe pour aboutir à l'approche de " conception pour le recyclage ".

Le premier chapitre, intitulé *La valorisation en fin de vie, une nouvelle préoccupation environnementale* a pour objectif de positionner le travail de recherche. Nous décrivons le contexte mouvant dans lequel se trouve l'entreprise. Ceci nous conduira

à identifier les difficultés et les contraintes et par conséquent les besoins de l'entreprise pour faire face à la problématique environnementale et en particulier à justifier la recyclabilité de ses produits. Nous intégrons cet aspect dans la notion de développement durable en définissant le rôle de l'entreprise dans la responsabilisation des acteurs de production et sur les impacts environnementaux de leurs produits. Ensuite, nous caractériserons les différents scénarios de valorisation en établissant l'interaction entre mode de désassemblage et scénario de valorisation. A la fin de ce chapitre, nous développerons notre problématique de recherche.

Le deuxième chapitre a pour titre : *État de l'art des méthodes et outils de conception pour le désassemblage*. À partir d'une synthèse bibliographique concernant les outils d'évaluation du désassemblage et du recyclage nous remarquons que, ces outils ne sont pas adaptés aux domaines de conception caractérisés par la complexité de ces contraintes d'où la nécessité de repositionner la problématique du désassemblage pour le recyclage dans le processus de conception. Le repositionnement consiste à aborder cette problématique au plus tôt dans le processus de conception. Notre problématique se situe plus particulièrement dans la phase de développement de nouveaux concepts, en amont du processus global de conception. Nous représentons le processus de conception en quatre étapes qui nous ont permis de positionner les outils et méthodes d'évaluation et d'intégration du désassemblage pour le recyclage. C'est dans ce contexte et en s'appuyant sur une recherche bibliographique que s'identifie notre problématique. Dans un premier temps, nous identifions le manque méthodologique d'intégration des contraintes de fin de vie dans le processus de conception. Dans un second temps, le besoin de repositionnement des méthodes et outils d'évaluation du désassemblage, afin de les rendre applicables dans la phase de définition conceptuelle du produit. A la fin, la problématique finale est énoncée.

Dans le troisième chapitre, *Observation du processus de conception : Étude de terrain*, nous décrivons comment, à travers les pratiques industrielles de conception "TEFAL", le repositionnement de ces outils est possible. Dans un premier temps, nous décrivons le cadre de collaboration avec TEFAL, en particulier le contexte dans lequel les réunions et les travaux d'évaluation se sont déroulés. Ensuite, afin de déterminer les modèles adaptés pour l'intégration des contraintes de désassemblage pour le recyclage, une analyse a été effectuée conjointement avec les acteurs de TEFAL sur l'application des outils d'évaluation.

Lors du quatrième chapitre, *Mise en place d'indicateurs en vue de l'optimisation du désassemblage*, nous présentons un modèle ainsi qu'une méthode d'intégration du désassemblage au plus tôt dans le processus de conception. Pour cela nous présentons un modèle fondé sur la validation d'interaction entre des données fonctionnelles

d'un concept produit et les investigations du désassemblage et de valorisation qui peuvent être abordées à ce stade de la conception. Puis sur la base de ce modèle nous développerons une méthode d'application basée sur des données fonctionnelles, environnementales et de valorisation des PFV.

Le cinquième chapitre, *Outil d'aide à la conception pour le désassemblage*, consiste au développement des indicateurs d'évaluation du désassemblage pour la valorisation. La définition de ces indicateurs dépend de l'état d'avancement du projet de conception. Nous décrivons aussi, comment ces indicateurs seront définis et appliqués dans la phase de préconception jusqu'à une phase de conception détaillée. L'application de ces indicateurs nous permettra alors d'identifier les performances de valorisation d'un produit tout au long de son processus de développement.

Le sixième chapitre, s'intitule *Illustration et application : aspirateur*, mis à part la conclusion générale, c'est la dernière partie de ce document. Nous étudions la conception de l'aspirateur en appliquant le modèle minimal de désassemblage.

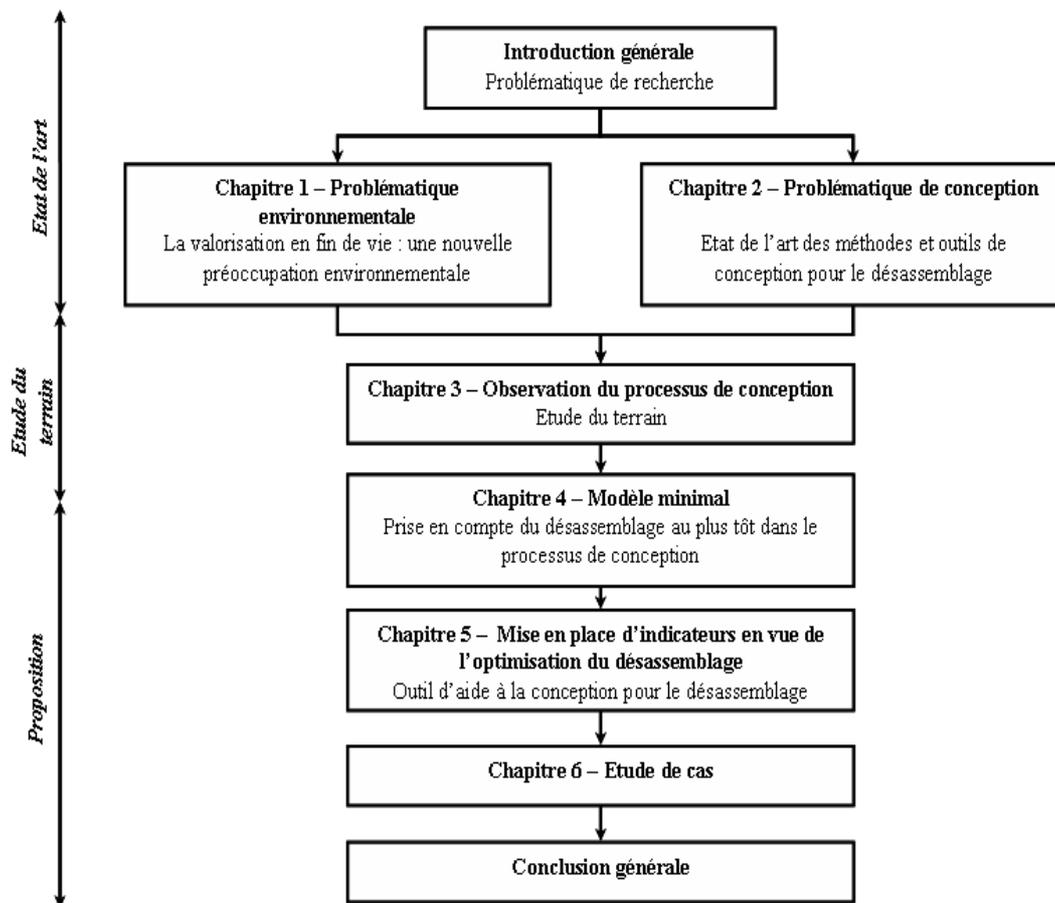


FIG. 1: Représentation synoptique du mémoire de recherche

Chapitre 1

La valorisation en fin de vie, une nouvelle préoccupation environnementale

Sommaire

1.1	Introduction	11
1.2	Évolutions législatives concernant le traitement des produits en fin de vie	11
1.3	Métabolisme industriel	13
1.4	L'évolution des modèles industriels	15
1.4.1	Les modèles industriels du 21ème siècle	17
1.4.2	Système Feedback du produit	19
1.4.3	Développement du modèle de valorisation de produits	20
1.4.4	Perspectives d'application d'un modèle de valorisation	23
1.4.5	Bilan	23
1.5	Cadre du projet de recherche	24
1.5.1	Projet concevoir propre	24
1.5.2	Contexte de la thèse	25
1.5.3	Apport des trois partenaires au sein de notre projet	26
1.5.4	Bilan	28
1.6	Problématique générale de recherche	29
1.6.1	Modèle global de valorisation	29
1.6.2	Intégration du désassemblage dans le processus de conception	33
1.6.3	Positionnement de notre thèse : Articulation entre l'axe de recherche de L'ENSAM Chambéry et celui du laboratoire 3S	37
1.6.4	Domaine d'application et d'implémentation	38

1.6.5 Bilan	39
1.7 Conclusion	39

1.1 Introduction

Depuis le début du 20ème siècle, marqué par un essor industriel rapide et intensif, les technologies n'ont cessé d'évoluer et de se complexifier. Ceci a entraîné une production de masse pour un maximum de profit économique sans aucune préoccupation des conséquences sur l'environnement et sans respect pour l'équilibre de la nature.

Pendant cette période, les ressources naturelles ont été considérées comme inépuisables. Il n'était pas primordial de se soucier des impacts de l'industrie massive sur l'environnement. Cependant, la croissance de la population, qui a atteint six milliards à la fin de l'année 2000 et qui dépassera les dix milliards dans l'année 2030 et la frénésie de la consommation des pays industrialisés, implique une augmentation exponentielle de la consommation des ressources naturelles (matières premières et énergies). Ce mode de consommation se développe allègrement ne cessant de déséquilibrer la nature. En 1987, la Commission Brundtland énonce le principe de la nécessaire mise en place au niveau mondial d'un mode de développement qui " *satisfasse les besoins des générations actuelles sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs* " [13]. La convergence vers un développement plus durable vise à réaliser un compromis entre les exigences environnementales, sociales et économiques. La notion de développement durable est née et devient, à partir des années 1990, un objectif politique.

La Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement définit le développement durable en une stratégie d'activité grâce à laquelle une entreprise dégage ou protège un avantage concurrentiel à l'intérieur d'un domaine d'activité donné [14].

Dans une activité d'entreprise, le développement durable signifie l'adoption des stratégies concurrentielles et des activités qui regroupent les besoins des différents acteurs de l'entreprise tout en protégeant les ressources naturelles et en assurant l'évolution humaine.

1.2 Évolutions législatives concernant le traitement des produits en fin de vie

Afin de limiter les impacts environnementaux et de prolonger la durée de vie du produit, les législateurs ont imposé plusieurs lois et directives. Parmi les pays précurseurs du développement des lois concernant la valorisation des Equipements

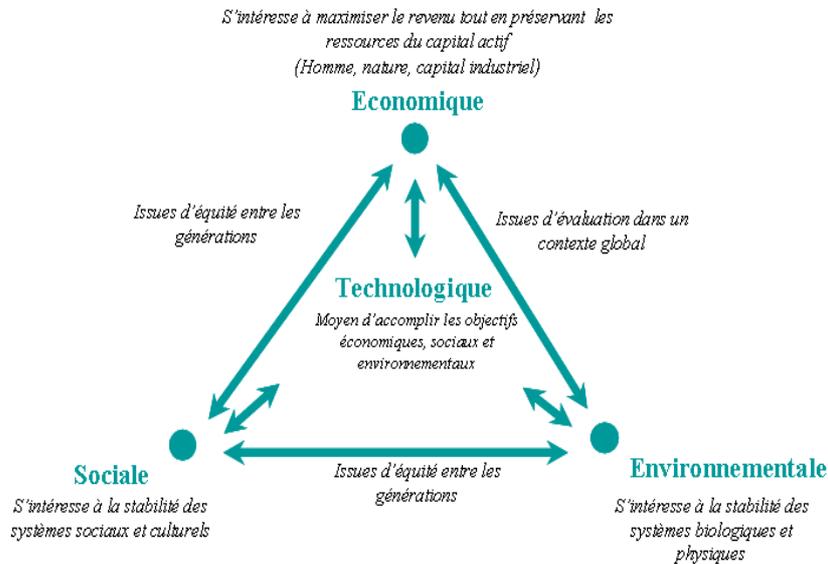


FIG. 1.1: Les dimensions du développement durable [1]

Electriciques et Electroniques (EEE), le Japon a imposé en Avril 2001 une directive sur la valorisation des PFV. Un an et demi plus tard, le parlement européen se concentre sur la problématique, et prend conscience du potentiel économique, environnemental et social de ces déchets. Plusieurs directives ont été développées et planifiées avec comme objectif d'imposer la responsabilité du traitement des produits en fin de vie aux producteurs. Parmi ces directives européennes, on trouve la directive DEEE et la RoHs. Ces directives ont été classées lois indispensables pour toute conception de nouveaux produits. La Figure 1.2 résume l'évolution législative des DEEE en Europe.

Un des points les plus importants de la DEEE, est qu'elle exige un taux de valorisation qui varie entre 70% et 80% selon la catégorie du produit, avec un taux de réutilisation et de recyclage qui doit être au minimum de 50 à 70% de la masse totale du produit. En plus des taux de valorisation, la directive RoHs interdit une liste de substances et de matériaux dangereux tels que le Plomb et le Cadmium qui sont fréquemment utilisés dans la fabrication des EEE.

La valorisation des DEEE reste toujours un domaine d'exploration industriel. Toutefois, les méthodes organisationnelles restent spécifiques et les outils de planification restent toujours difficiles à appliquer dans le champ industriel. Néanmoins, faces aux contraintes environnementales, les tendances industrielles ne cessent de

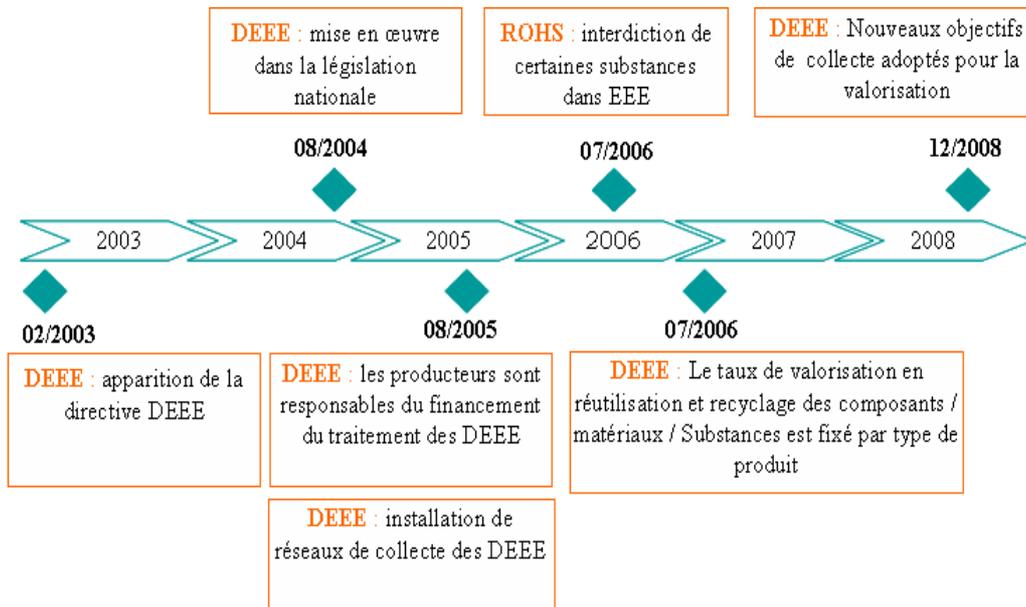


FIG. 1.2: Evolution des directives environnementales Européennes [2]

montrer que, par une organisation structurée et systématique du cycle de vie du produit, les directives des DEEE peuvent être respectées.

1.3 Métabolisme industriel

La définition biologique du métabolisme est la suivante : l'ensemble des réactions couplées se produisant dans les cellules de l'organisme. Il permet soit d'ingérer les matériaux riches en énergie, soit de synthétiser les constituants nécessaires à l'entretien de la structure et au bon fonctionnement des cellules. Il implique également l'excrétion des déchets générés, composés essentiellement de matériaux dégradés.

Par analogie à la définition biologique, le métabolisme industriel peut être défini comme un processus physique de transformation des matériaux, de l'énergie et des valeurs ajoutées par la main d'œuvre, en un produit fini auquel s'ajoute des déchets générés dans des conditions normales du processus de production.

Ce concept peut être également appliqué à d'autres entités à organisation automatique, telles que les entreprises de fabrication. Une entreprise de fabrication est le synonyme économique d'une organisation vivante. Cependant, quelques différences règnent entre une organisation vivante et une entreprise. Par exemple, les organisations biologiques se reproduisent. Au contraire, les entreprises fabriquent

des produits ou des services. Cependant, les entreprises peuvent facilement changer d'un type de produits à un autre selon les besoins du marché. En revanche les organisations vivantes sont fortement spécialisées et ne peuvent changer leurs comportements que sur une longue période. Le cycle de vie des différents matériaux dans une organisation vivante est fermé, tandis que la plupart des cycles industriels sont ouverts. En d'autres termes, un système industriel ne réutilise pas ses déchets. Donc le processus de fabrication commence par des matériaux de haute qualité (matières premières extraites de la terre) et les renvoie à la nature sous forme de déchets (déchets : fabrication, utilisation et fin de vie) [15].

L'ultime objectif du métabolisme industriel est de réaliser des améliorations à travers tous les processus industriels, en les adaptant davantage aux modèles métaboliques utilisés par l'écosystème. Pour cette raison, la gestion de l'interface entre l'industrie et l'environnement devrait être plus facile, et les demandes énergétiques devraient être réduites. Ceci permet d'instaurer des processus industriels en harmonie avec leur environnement. Actuellement ce challenge est un objectif à long terme, cependant, le métabolisme industriel est considéré comme une approche importante dans la fabrication des produits, plus respectueuse de l'environnement [16]. Froesch et Gallopoulos ont étudié le rapport entre l'écologie biologique et celle des activités industrielles :

Dans un écosystème biologique, la plupart des organismes ont besoin, pour se développer, de la lumière du soleil, de l'eau et de l'air. Vivant ou mort, chaque entité produite génère ses propres déchets. Ses déchets sont à leur tour consommés par d'autres organismes, dont certains peuvent transformer les déchets en minerais employés par les producteurs primaires, et d'autres peuvent se consommer entre eux dans un réseau complexe. Par analogie au cycle de l'écosystème, chaque processus industriel doit être vu comme une composante en corrélation avec un réseau global. Cette analogie n'est pas parfaite, toutefois, plusieurs améliorations peuvent être apportées aux modèles industriels en imitant les meilleurs dispositifs du système biologique [17].

Les approches qui peuvent être employées pour réaliser ces objectifs sont :

1. Optimisation de la consommation des matériaux, de l'énergie, réduction des déchets et la revalorisation des déchets en matière première réutilisée pour la fabrication d'autres produits (fermer la boucle de fabrication).
2. Révélation de la capacité assimilative de l'écosystème et le développement des indicateurs pour mesurer les impacts environnementaux des processus in-

dustriels, (Asservir les flux des ressources entrants et sortants d'un processus industriel avec l'écosystème).

3. Création des interactions métaboliques dans les processus industriels.
4. Identification du bilan global d'utilisation d'énergie.
5. Formulation d'un point de vue à long terme lors de l'analyse du développement industriel.

L'objectif par le métabolisme industriel est d'équilibrer le flux de circulation des matériaux et d'énergies entrants et sortants, ceci de leur extraction jusqu'à leur réinsertion (valorisation) dans le cycle de flux des matériaux. Finalement, pour instaurer un flux de matières en boucle fermée, les systèmes industriels doivent fonctionner analogiquement au système biologique, avec des temps de cycle compatibles entre eux [18].

Ceci nous permet de dire que l'objectif du métabolisme industriel est d'observer le modèle total de flux énergie/matériau, découlant de l'extraction initiale de la matière jusqu'à son élimination. La problématique du métabolisme industriel, est de déterminer comment restructurer un système industriel global afin de le rendre compatible avec le cycle de l'écosystème? Parmi les résultats de ces recherches on cite, la méthode d'Analyse de Cycle de Vie [19], les outils d'Eco-conception [20][21], les modèles de valorisation des PFV [22], la logistique de récupération des déchets et des PFV [23].

Afin de réfléchir à un modèle industriel favorable au respect de l'environnement, il est utile de considérer en premier la situation écologique actuelle des systèmes de production industriels [24].

1.4 L'évolution des modèles industriels

L'évolution écologique des systèmes de productions industriels peut être structurée suivant trois types :

Type I : dans ce cas, le modèle industriel est linéaire, le flux de la matière ne va que dans un seul sens, le cycle de vie du produit ne prend pas en compte la phase de valorisation des matériaux et des composants. Ce modèle peut être traduit par la Figure 1.3.

Type II : dans ce cas, le modèle tient compte de la relation entre le produit et les gisements de matières vierges ; pour maîtriser cette relation, des processus de récupération, des chutes et des déchets industriels ont été mis en œuvre.

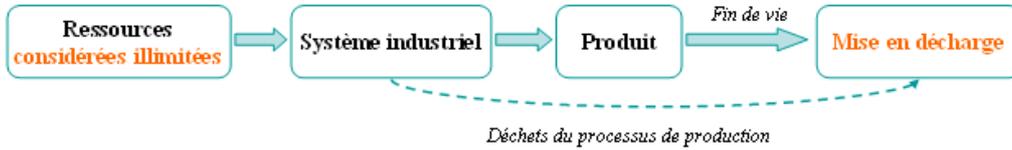


FIG. 1.3: Modèle de flux linéaire

Toutefois, bien que la préoccupation de contrôler la consommation en matières vierges à l'entrée du processus de production, les déchets des PFV n'ont cessé d'augmenter. Schématiquement cette étape est modélisée par la Figure 1.4.

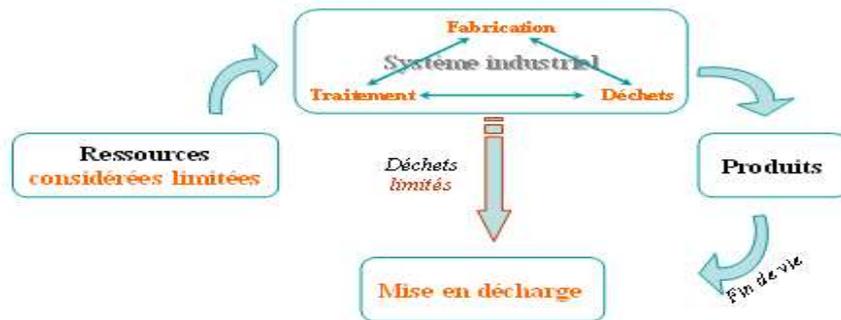


FIG. 1.4: Modèle de flux cyclique

Type III : il a fait son apparition suite à l'émergence des contraintes économiques, environnementales et législatives imposées à l'activité industrielle. En effet, face à l'augmentation de la demande des matières premières vierges et à la diminution de leurs gisements, les prix des matières premières vierges ont augmenté. Toutefois, les industriels se trouvent confrontés à un déséquilibre entre leurs besoins croissants en matières premières, de plus en plus chères et de plus en plus limitées, et le développement des produits adaptés économiquement et fonctionnellement aux besoins des consommateurs (moindre coût, minimum d'impacts environnementaux etc.). Plusieurs projets, [25] [26] [27], ont montré que le modèle adéquat à cette problématique est celui de l'écosystème biologique. En effet, les déchets des produits en fin de vie deviennent à leur tour une source d'alimentation des processus industriels en énergie et en matières premières. La valorisation des produits en fin de vie donc est devenue indis-

pensable au sein du métabolisme industriel. Dans la Figure 1.5, nous illustrons le rôle que peut jouer la valorisation des produits pour atteindre l'équilibre industriel.

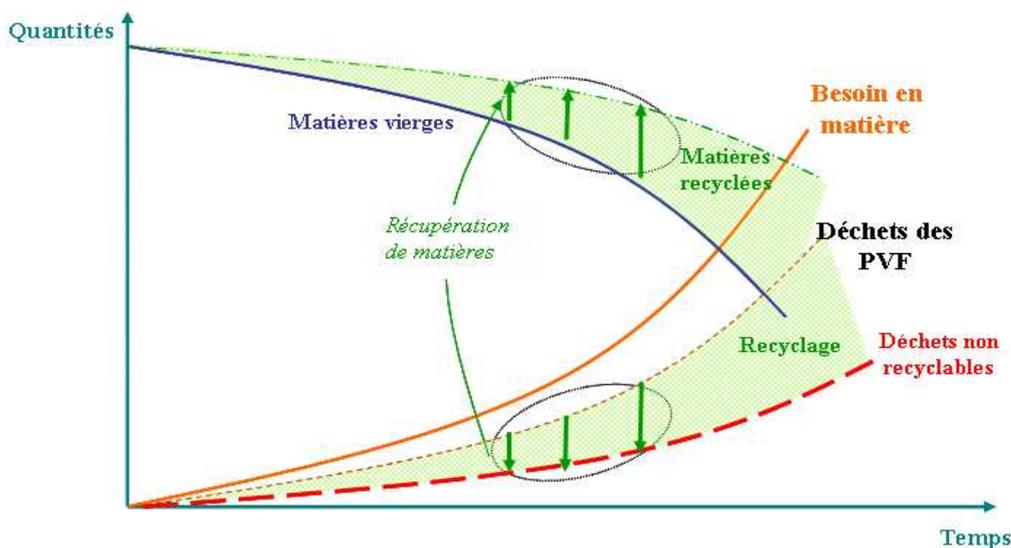


FIG. 1.5: Illustration du rôle de la valorisation pour l'équilibre industriel

Ce modèle industriel est caractérisé par un cycle fermé dont la matière vierge est considérée limitée et la compensation de la différence entre l'offre et la demande est obtenue par la récupération des matériaux des PFV. Le système industriel dans ce cas, est modélisé par un cycle fermé de flux de matière, comme le montre la Figure 1.6.

1.4.1 Les modèles industriels du 21ème siècle

Actuellement, la plupart des systèmes industriels fonctionnent sur le modèle de type II, caractérisé par l'exploitation non contrôlée des ressources naturelles et l'accumulation sans traitement des produits en fin de vie. Par conséquent, ce modèle a engendré la limitation des ressources en matières premières et l'augmentation des déchets qui devenaient de plus en plus néfastes pour l'environnement. Un processus de compensation est devenu pertinent entre les flux entrants et les flux sortants des processus industriels. Autrement dit, les flux sortants doivent devenir en partie des flux entrants du processus. Nous avons cité précédemment le type I, caractérisé par sa linéarité, ce qui exige un approvisionnement infini de ressources d'énergie et de matières premières. Toutefois, les gisements disponibles ne sont pas capables de fournir un tel approvisionnement sur notre échelle temporelle d'extraction et

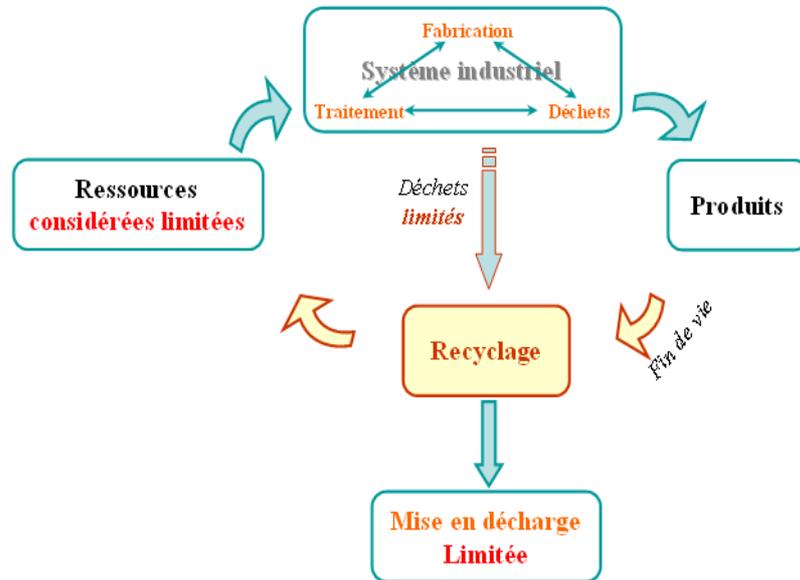


FIG. 1.6: Modèle de flux à cycle fermé

d'utilisation. Le cycle biologique de l'écosystème se déroule en boucle fermée. Par conséquent, tout produit industriel doit être développé de façon analogue au cycle biologique (Type II).

Hawken [28] écrit : "n'importe quel modèle industriel écologique doit non seulement imiter le cycle biologique de l'écosystème en considérant les déchets comme source de matière pour d'autres processus, en optimisant leur consommation d'énergie et en réduisant leurs impacts environnementaux, mais il doit également avoir clairement en place un système de "feedback" qui permet de calibrer constamment les flux entrants et sortants. Cependant, au lieu de suivre le paradigme cyclique, la plupart des entreprises actuelles suivent le modèle linéaire. Ces entreprises, par leurs natures, reçoivent et donnent des ressources illimitées dans le but de maximiser leurs profits sans se préoccuper des conséquences environnementales qui en découlent".

Au lieu d'exploiter sans interruption les ressources vierges (matières, énergies fossiles, etc) et donc d'augmenter les quantités de déchets, les entreprises doivent concevoir des produits et des systèmes de production de sorte que les déchets et les produits en fin de vie puissent être réintroduits dans le cycle industriel. Ceci

engage les organismes externes (fournisseurs, sous-traitants) à suivre cette pratique de réintroduction des déchets [3]. La Figure 1.7 schématise, selon Anderson, le modèle industriel du 21ème siècle que nous venons de décrire.

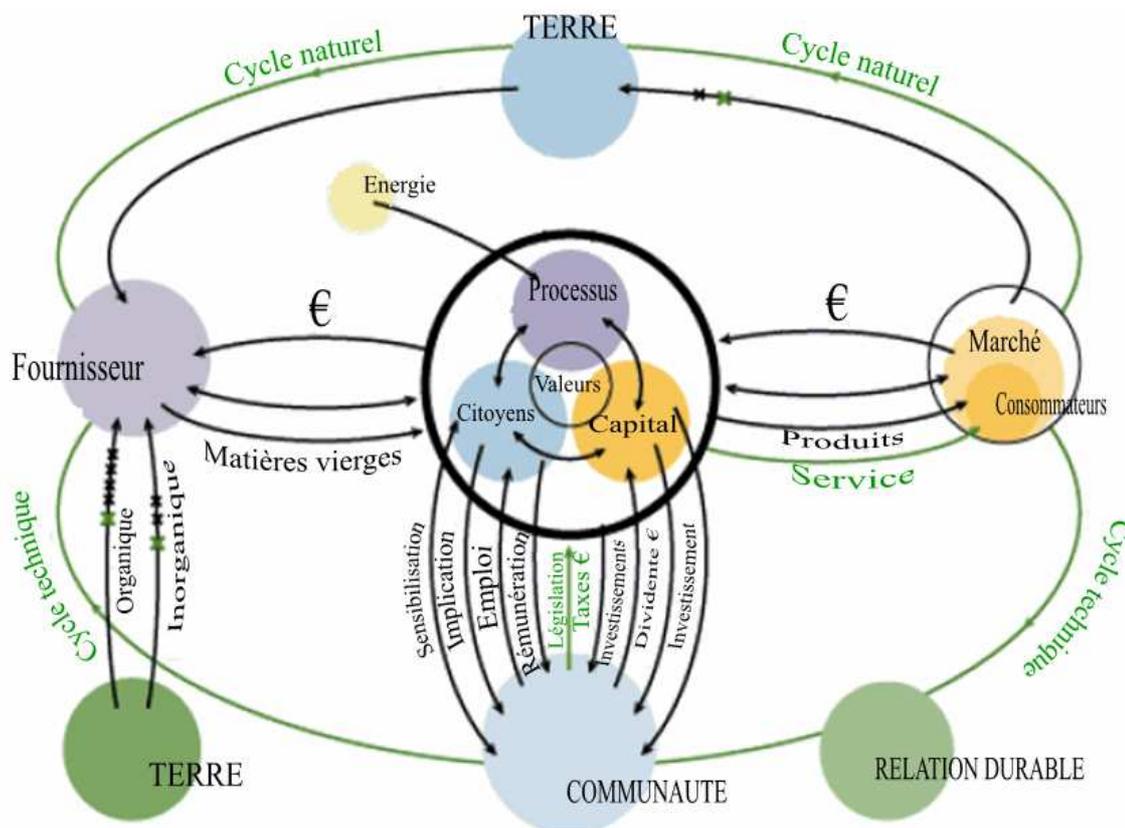


FIG. 1.7: Le modèle industriel du 21ème siècle [3]

1.4.2 Système Feedback du produit

Le système Feedback du produit est un concept qui découle de l'évolution de l'économie industrielle vers une économie de services. Ce système est fondé sur l'hypothèse que les consommateurs loueront simplement le produit au producteur, qui conçoit le produit sur une base de service. En effet, une fois que le produit a rempli sa fonction et doit être remplacé, le consommateur le renvoie au producteur qui prend la responsabilité de désassembler le produit et de le revaloriser.

Dans le cadre du développement durable, trois dimensions sont prises en compte dans un système de Feedback :

- *Dimension économique* : réduire les coûts des matières, de l'énergie et de la mise en décharge.
- *Dimension environnementale* : réduire la consommation des ressources naturelles, d'énergie et notamment la quantité des polluants.
- *Dimension sociale* : créer de nouveaux secteurs d'emploi et augmenter le rapport entre producteurs et consommateurs.

Le système Feedback du produit est un modèle typique du type III, caractérisé par un cycle fermé de flux de matières. Ce système est obtenu par analogie au cycle de l'écosystème en considérant " *les déchets comme des ressources* ", d'où tout flux sortant d'un processus doit finalement se retrouver dans un processus de valorisation.

Ce modèle de valorisation du produit est une nouvelle stratégie qui a été adoptée par les entreprises qui visent une politique de développement durable. C'est une approche produit orientée vers la protection environnementale et vers l'accomplissement des fonctionnalités des produits plutôt que vers les produits eux-mêmes. Ce modèle encourage également la valorisation par la réutilisation, plutôt que le recyclage des matières. En d'autres termes, la valeur des produits est étroitement attribuée à leurs performances réelles d'utilisation.

Le concept de cette approche consiste à fermer la boucle des matériaux et des composants usagés en les réintroduisant dans les processus de fabrication des nouveaux produits. Comme illustré dans la Figure 1.8 : le modèle de cycle de vie du produit passe d'un cycle linéaire (type I) à un cycle cyclique (type III). En effet, le cycle de type I débute par la conception du produit selon un cahier des charges des besoins des consommateurs ; dans ce cycle les matières premières sont transformées et fabriquées en produits qui traduisent les attentes des consommateurs en termes de besoins. La phase finale de ce cycle se trouve à la fin de vie du produit. Toutefois, dans le cycle de vie en boucle fermée, les facteurs environnementaux (la recyclabilité des matériaux, la réutilisation des composants et la facilité de l'assemblage et du désassemblage) sont intégrés dès le processus de conception. Par exemple, le choix des matériaux doit prendre en compte le facteur quantité et toxicité des matériaux. La phase finale de ce cycle est caractérisée par le désassemblage du produit et la réintroduction des composants et des matériaux constitutifs dans le processus de valorisation : c'est le concept du métabolisme.

1.4.3 Développement du modèle de valorisation de produits

Le système de valorisation de produit repose sur la responsabilité des producteurs dans la valorisation de leurs produits. Par conséquent, le consommateur achèterait

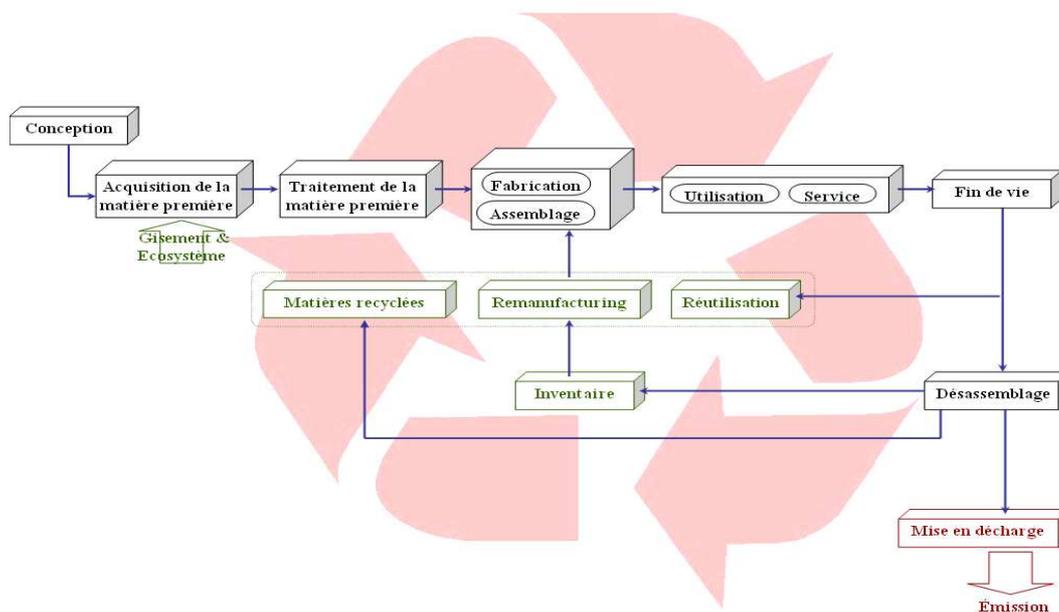


FIG. 1.8: Cycle de vie d'un produit [4]

le service fourni par le produit et non pas le produit. Quand le produit doit être remplacé, le consommateur le renvoie au fabricant qui a la responsabilité de valoriser le produit (désassemblage, remanufacturing, réutilisation etc.). Michael Braungart et Justus Engelfried [29], ont présenté un système de produits ingénieux, qui intègre l'idée de base d'un système de valorisation de produit. Dans ce système de valorisation on identifie trois types de produits :

Produits de consommation : tous produits achetés pour être consommés et appropriés à un seul usage après lequel ces produits deviennent des déchets. Dans un tel système, les produits doivent être biodégradables et non toxiques.

Produits de service : produits qui sont utilisés pour leurs fonctions, exemple le lave-linge. Dans ce type, les produits peuvent être simplement loués au producteur, qui fournit un service plutôt qu'un produit. La fin de vie du produit est prise en charge par les producteurs.

Produits polluants : ces produits ne peuvent pas être utilisés sans impact sur l'environnement. Ces produits devraient être évités ou remplacés par des produits biodégradables et non toxiques.

Remarque : Les produits de consommation et de service peuvent caractériser tous les types courants des déchets.

Le système de valorisation de produit vise à transformer le modèle industriel en un modèle coopératif entre fournisseurs, producteurs et consommateurs. De ce fait, ce modèle vise à responsabiliser les producteurs pour atteindre le concept de développement durable. La responsabilisation des producteurs est mise en application par des dispositifs législatifs, économiques et environnementaux. Cette responsabilité a particulièrement évolué dans le cadre de la politique de développement durable et notamment dans la législation Européenne, par exemple la directive DEEE. Cette directive précise clairement la responsabilité des producteurs dans la valorisation de leurs produits lors de leur fin de vie. Avec ces nouvelles directives, la responsabilité est devenue partagée entre le gouvernement, les consommateurs et tous les acteurs de développement du produit. Toutefois, le producteur reste l'acteur principal et primordial dans l'intégration des contraintes législatives (gouvernement) dans ses stratégies et dans l'assurance des contacts avec les consommateurs afin d'avoir un retour de l'information. Pour cela, des moyens ont été mis en œuvre par ces trois acteurs.

Les moyens mis en œuvre par les producteurs

- ↔ Eco concevoir des produits :
 - Choisir des matériaux recyclables ;
 - Minimiser la diversité des matériaux choisis ;
 - Réduire l'utilisation au minimum des ressources non renouvelables ;
 - Éliminer et/ou réduire l'utilisation des substances et des matériaux dangereux.
- ↔ Conception des produits dans une vision de réutilisation et de remanufacturing.
 - Augmenter le niveau de modularité du produit ;
 - Réduire la quantité de produits et de matériaux incinérés et mis en décharge,.
- ↔ La conception de produits faciles à désassembler et à réassembler
- ↔ La vente de la fonctionnalité du produit plutôt que le produit lui-même
- ↔ La prise en compte des filières existantes de valorisation en fin de vie

Les moyens mis en œuvre par les consommateurs

- ↔ Acheter des produits écologiques
- ↔ Soutenir les systèmes de valorisation

Les moyens mis en œuvre par les gouvernement

- ↔ Acheter des produits avec un minimum d'impacts environnementaux
- ↔ Réduire les obstacles politiques pour le développement des systèmes de valorisation

1.4.4 Perspectives d'application d'un modèle de valorisation

Il existe plusieurs perspectives dans l'application et la mise en œuvre d'un modèle de valorisation. Ce modèle réduit l'extraction des matériaux vierges en récupérant les matériaux des produits en fin de vie. En outre, il réduit au minimum le coût des pièces de rechange en réutilisant les pièces qui sont encore en état de service. Ceci entraîne une réduction de la consommation d'énergie et des impacts environnementaux. Il est à souligner également que les quantités de déchets deviennent de plus en plus une problématique préoccupante dans la politique de préservation environnementale, étant donné que les espaces d'enfouissement sont de plus en plus limités et imposés par des taxations de plus en plus élevées. Par conséquent, un système de valorisation est l'une des solutions les plus importantes dans la problématique des produits en fin de vie. En effet, avec la préoccupation globale concernant l'environnement, plusieurs entreprises ont exploité cette contrainte comme un avantage de compétitivité dans leurs stratégies de vente. D'ailleurs, la contrainte environnementale est devenue un argument de vente des produits classés sous un label " produits écologiques ". En achetant ces produits, les consommateurs ont le sentiment qu'ils accomplissent un geste pour protéger l'environnement. Au cours de cette dernière décennie, plusieurs activités industrielles ont émergé sous un marketing de la protection de l'environnement. Parmi ces activités, les réseaux de remanufacturing qui ne cessent de se développer (exemple Emmaüs, Envie etc). En conclusion, en Europe, l'obligation du respect des directives DEEE impose à chaque état membre de développer et d'imposer à ses entreprises un modèle de valorisation.

1.4.5 Bilan

- *L'évolution des modèles industriels est imposée par le déséquilibre entre l'offre et la demande ;*
- *L'adéquation entre les systèmes industriels et l'écosystème est indispensable ;*
- *La pérennité des systèmes industriels dépend des systèmes de Feedback des PFV ;*
- *L'anticipation des impacts environnementaux est une responsabilité des producteurs ;*
- *L'évolution d'une démarche environnementale volontaire vers une politique de développement durable est une obligation législative (Directive Européenne).*

1.5 Cadre du projet de recherche

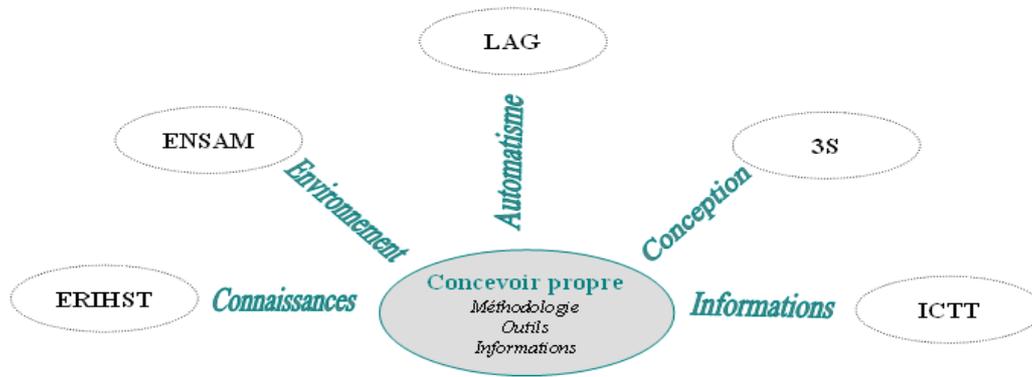
Afin de valider les objectifs du projet, nous nous sommes engagés à définir un espace de travail collaboratif dans lequel nous allons mener notre étude. Cette section a pour objet de définir le cadre de notre travail de recherche en décrivant les rôles de chaque partenaire et leurs intérêts par rapport à la thèse.

1.5.1 Projet concevoir propre

Le projet "Concevoir Propre" nous a offert un champ d'investigation très intéressant. Ce projet, caractérisé par sa pluridisciplinarité, nous a montré que la problématique de la valorisation des PFV peut prendre différentes formes. Les partenaires ont des points de vue différents qui traduisent essentiellement leurs domaines de compétence. Les partenaires du projet ont cherché dans un premier temps à trouver les espaces communs de leurs points de vue. Pour nous, le projet "concevoir propre" nous a permis d'établir une vue multidisciplinaire et d'identifier les apports de notre recherche dans le cadre de la "conception propre".

La démarche du projet "Concevoir propre" consiste à caractériser un modèle pour appréhender le processus de cycle de vie du produit, et ceci, de la phase de conception jusqu'à la phase de valorisation. En effet, l'objectif est de couvrir le cycle de vie du produit dans sa totalité, de collecter les informations utiles sur le produit, d'observer les acteurs dans toutes les étapes de ce cycle et d'identifier les informations pertinentes pour une stratégie de conception propre. De cette façon, les partenaires ont voulu anticiper sur toutes les interventions au niveau du produit et du processus en les rendant les plus appropriées possibles. Cette démarche a été étudiée en particulier par rapport à la dimension recyclage qui doit être prévue dès la conception. Le projet s'est intéressé au concept du *Recyclage noble* qui se caractérise par la réutilisation "en état" du produit, des sous-ensembles et des composants ou des éléments de celui-ci en tenant compte de leurs durées de vie intrinsèques.

Ce projet a été développé par cinq laboratoires qui ont chacun contribué par leurs compétences à la mise en place d'une démarche de conception riche en connaissances sur le cycle de vie du produit. Les connaissances sur les filières et les modes de valorisation des PFV ont été plus particulièrement mises en évidence, afin de les mettre à la disposition des concepteurs, et de tous les acteurs du cycle de vie du produit. La Figure 1.9 schématise la contribution de chaque laboratoire dans le projet "Concevoir propre".



Compétences des partenaires

ICTT : contexte informationnel - modélisation, approche multi agent, TIC - support de l'activité de conception et de formation, collaboration Homme Machine.

LAG : contexte automatique : démontage semi-automatique, planification du processus de démontage, testabilité, exploitation du retour d'expérience.

ERIHST : comportement de l'homme au travail, transmission des connaissances contextualisée.

3S : L'apport du laboratoire 3S réside dans la dimension conception du projet.

ENSAM : la mise au point de méthodologies pour intégrer et contrôler les problématiques environnementales dès la conception des produits

FIG. 1.9: Contexte du projet concevoir propre

1.5.2 Contexte de la thèse

Une des problématiques du projet "Concevoir propre" consistait en la mise en évidence des contraintes de fin de vie pour leur intégration en conception. Cette thématique a plus particulièrement réuni les laboratoires MAPIE de l'ENSAM Chambéry et 3S de l'INPG Grenoble. La problématique industrielle initiale étant ciblée sur les contraintes législatives environnementales et sur ses besoins en outils et méthodes, notre terrain privilégié de travail a porté sur l'ensemble des activités de conception de "TEFAL pesage", et par conséquent sur la méthode pour l'intégration des contraintes environnementales.

Cette opération a permis de mener un travail de recherche de terrain propice à l'émergence de solutions et à leur confrontation à un contexte industriel. Elle a également permis de constituer et faire vivre une coopération entre trois mondes différents, que sont un laboratoire d'Éco-conception, un laboratoire de Conception

Intégrée (CI), et une entreprise industrielle, aux activités, sensibilités et intérêts différents, parfois divergents. La rencontre entre trois entités aux compétences différentes mais complémentaires, a amené une répartition presque naturelle des travaux entre les partenaires.

Ainsi, les compétences développées par le laboratoire MAPIE de l'ENSAM de Chambéry au cours des nombreux travaux de recherche réalisés en son sein depuis plusieurs années, lui ont permis d'apporter les connaissances sur les filières de recyclage et sur l'analyse environnementale aux concepteurs. En plus, les expertises du pôle CI du laboratoire 3S en matière de conception intégrée ont permis d'effectuer une analyse sur les outils existants qui s'intègrent dans une approche de " *conception pour le recyclage* ". Par ailleurs, le contexte industriel de TEFAL, nous a permis d'être plongés dans un environnement de travail réel pour juger et analyser les besoins et les solutions apportées pour la conception des produits valorisables.

Notre implication dans ce projet, dont la thématique débordait du seul cadre de nos travaux, nous a permis d'avoir une vision plus large que le seul contexte de nos partenaires. Ainsi, la participation d'autres laboratoires (Figure 1.9), de par leurs différents domaines de compétences, a été très bénéfique pour notre projet. De plus, la contribution de plusieurs industriels et recycleurs aux activités variées a amené une multitude de compétences complémentaires dont les bénéfices retirés par chacun ont été conséquents.

1.5.3 Apport des trois partenaires au sein de notre projet

Comme nous l'avons vu au cours de la section précédente, notre travail de recherche s'intègre au sein d'une large problématique, dans laquelle nous étions acteur du développement d'une méthodologie de désassemblage pour aboutir à la notion de *Recyclage noble* définis par ce projet.

Les partenaires directs de notre projet de recherche sont au nombre de trois : le laboratoire de L'ENSAM Chambéry, le pôle CI du laboratoire 3S et TEFAL pesage. Ces trois partenaires collaborent afin de nous apporter leurs contributions sur les cinq aspects suivants (Figure 1.10) :

Aspect de Conception : Le pôle CI du laboratoire 3S, a élargi, par l'expérience au sein du projet " *Concevoir propre* ", le champ d'application de la méthodologie de la conception intégrée vers l'anticipation des contraintes de recyclage et

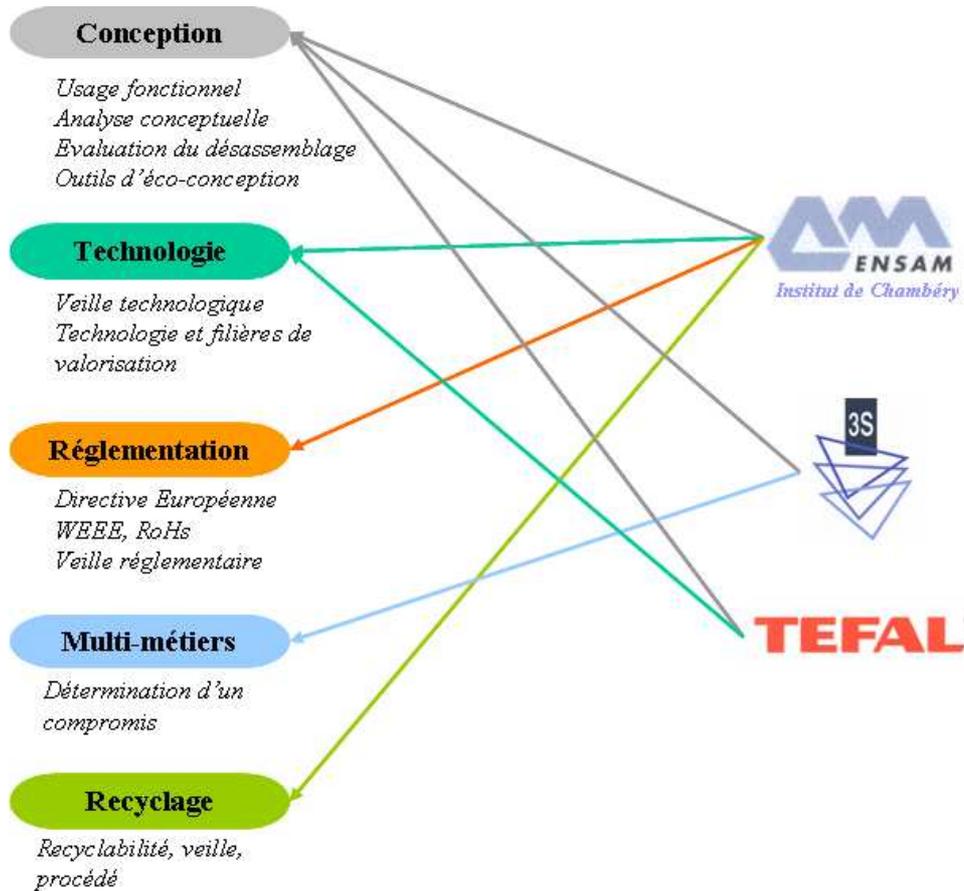


FIG. 1.10: Répartition des rôles des trois partenaires

de la problématique de désassemblage lors de la fin de vie des produits. L'anticipation des futures contraintes législatives dans le processus de la conception a été notre apport principal au sein du laboratoire 3S.

Aspect Technologique : Dans le cadre de la thèse, TEFAL a amené principalement l'apport technologique. TEFAL propose des solutions technologiques et l'ENSAM expertise le côté environnemental de leurs propositions. Grâce à la vision innovatrice de TEFAL dans le secteur électroménager, ce projet a offert des éléments prospectifs sur l'analyse environnementale de la technologie au cours de sa phase d'utilisation et de sa phase de valorisation en fin de vie.

Aspect Réglementaire : Rappelons que l'une des problématiques la plus pesante sur les entreprises est le respect des taux de valorisation imposés par la législation. En effet, nous avons commencé ce projet par une veille réglementaire à partir de laquelle a été défini pour TEFAL les critères pertinents pour qu'un produit soit recyclable avec un minimum d'impacts environnementaux.

Plusieurs réunions ont été organisées avec TEFAL pour définir les objectifs à atteindre et les moyens pour y arriver. Cet aspect a été aussi un moyen d'évaluation de l'état actuel des produits TEFAL. Dans le cadre de ce projet, TEFAL s'est appuyé sur les compétences de l'ENSAM de Chambéry.

Aspect Multi-métiers : Rappelons que notre projet de recherche s'intègre au sein d'un projet régional "*Concevoir propre*" caractérisé par la participation de plusieurs acteurs aux différentes compétences. Grâce au laboratoire 3S, compétent sur les aspects multi-acteurs et multi-métiers, nous avons coordonné et piloté la collaboration avec les différents partenaires. Nos principaux moyens de travail collaboratif ont été des réunions plénières et partielles avec le projet "*Concevoir propre*" et le partenaire industriel TEFAL.

Aspect Recyclage : L'intégration de cet aspect pour le désassemblage, a été notre apport au sein de l'ENSAM. Le point de départ était la thèse de Fabrice Mathieux dans laquelle est proposée une modélisation des filières de recyclage par la voie du broyage [11]. Un des objectifs de notre thèse est de compléter le modèle de valorisation de l'ENSAM en étudiant et analysant le recyclage par la voie du désassemblage. Plusieurs réunions de travail d'analyse ont été effectuées avec TEFAL et des acteurs de recyclage.

1.5.4 Bilan

Notre cadre de recherche s'inscrit dans une thématique pluridisciplinaire. Des connaissances et des compétences de différents domaines ont été regroupées pour la modélisation du cycle de vie global du produit. Par ce projet de recherche, le concept de recyclage noble a été développé. Ce concept a pour but d'augmenter la durée de vie d'un bien et de limiter ses impacts environnementaux, ceci par l'augmentation du potentiel de réutilisation des composants et de la remanufacturabilité⁵ du produit [31]. L'articulation de la thèse dans le cadre de ce projet se situe au niveau de l'intégration des contraintes de désassemblage dans le processus de conception tout en favorisant le concept de recyclage noble.

⁵La remanufacturabilité d'un produit consiste en la réinsertion d'un produit dans le cycle productif alors qu'il était arrivé à la fin de sa première vie. La thèse de Miguel Lopez présente dans ce cadre un outil d'intégration de contraintes de remanufacturabilité au cours de la phase de conception d'un produit [30].

1.6 Problématique générale de recherche

Le sujet de la présente recherche s'identifie dans le contexte imposé par la législation sur les produits en fin de vie : le producteur est responsable des impacts environnementaux des cycles de vie de ses produits ; il veille ainsi à ce que la valorisation limite l'impact global du cycle de vie du produit. Compte tenu des problèmes d'inadaptation des produits au contexte environnemental, les producteurs ont constaté la nécessité de prendre en compte ces contraintes dès la phase de la conception.

1.6.1 Modèle global de valorisation

Plusieurs produits en fin de vie ne sont pas valorisés. Les produits ont été au mieux broyés dans le but de récupérer les métaux ferreux et non ferreux, tout en considérant le reste comme déchet. Toutefois, la contamination des matières recyclées, le manque en ressources naturelles et en matières premières et la limitation des capacités de mise en décharge, contraignent les industriels à suivre des stratégies visant à augmenter le taux des composants et des matériaux qui peuvent être réutilisés.

L'expérience de transformation des épaves de voiture VHU⁶ et des appareils électroménagers par des précédés de broyages et de tris semi-automatiques [32], montre que ces procédés s'intéressent essentiellement à séparer le contenu métallique des PFV des autres matériaux qui les composent. La ferraille est finalement vendue aux sidérurgistes, les métaux non ferreux sont vendus à des affineurs, le reste est un mélange de différents matériaux (verre, matériaux composites plastiques, caoutchouc, tissus, ...) qui est mis en décharge en raison de la complexité et des coûts des procédés de séparation. Le procédé de broyage révèle plusieurs inconvénients (Figure 1.11), ils se traduisent par :

- Des recycleurs géographiquement centralisés impliquant des frais de transport élevés ;
- Des solvants utilisés dans les procédés de séparation, souvent nocifs pour l'environnement ;
- La complexité des procédés (métallurgiques, chimiques et bioconversion) ;
- Des matériaux dont les caractéristiques mécaniques ne sont pas équivalentes à celles des matériaux vierges : actuellement les matériaux recyclés sont généralement mélangés aux matériaux vierges. Ce mélange rend le niveau courant des impuretés acceptable.

⁶Véhicules Hors d'Usage

- La part des matériaux "non recyclables" ne cesse d'augmenter sous l'influence d'un recours croissant aux matériaux plastiques.

Le principal inconvénient des actuels procédés de valorisation est celui de broyer les produits avant de les décomposer. Le broyage augmente significativement l'entropie des matériaux, par conséquent, des procédés de séparation complexes doivent être investis pour la réduction de cette entropie.

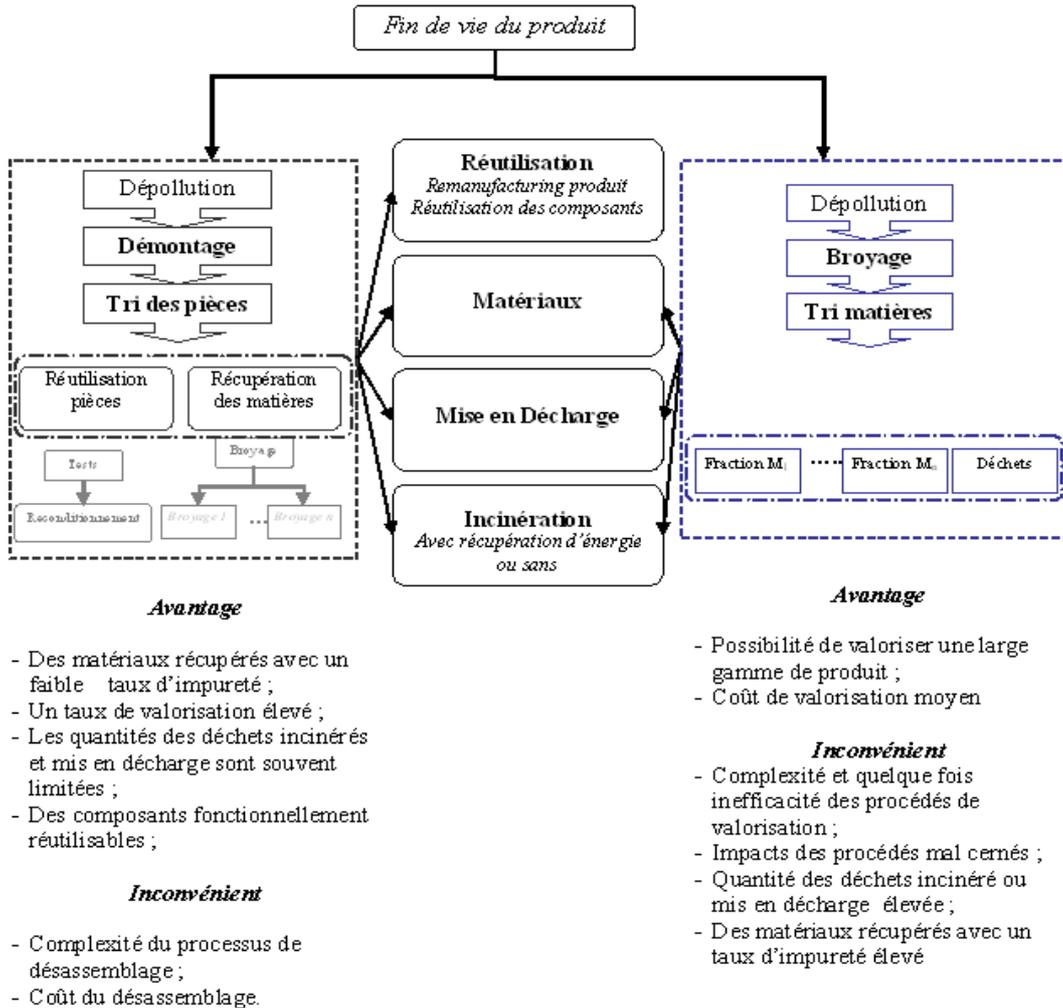


FIG. 1.11: Synoptique des deux approches de valorisation

Dans toute réglementation sur les déchets, il faut donner une définition contrôlable à la notion de déchet pour réduire les contestations et les interprétations possibles de la réglementation. Une première question se pose : le but d'une réglementation sur les DEEE étant de réduire la mise en décharge, comment mesurer les flux effectifs de DEEE mis en décharge ?

Une réponse, a priori simple, pourrait être de contrôler les quantités générées à la sortie des broyeurs, puisque celles-ci finissent généralement en décharge. En fait, il ne s'agit pas d'une solution si simple que cela et ce pour plusieurs raisons :

En premier lieu, il n'existe pas de broyeurs spécifiques à chaque type de DEEE ; en effet, ceux-ci broient, des produits contenant des métaux : petit électroménager, produits électroniques, ... Il est par conséquent très difficile d'évaluer la part des déchets par famille de produit [33]. En second lieu, les expériences lancées par les broyeurs prouvent que pour un produit donné, la quantité de résidus en fin de procédé varie en fonction des conditions d'expérimentation [32] : type de broyeur (à marteaux ou autres), procédé de séparation,... [32]. Ce qui signifie qu'un même produit dans des contextes différents ne générera pas la même quantité de résidus de broyage.

Dans ces conditions instables, une solution de référence pourrait être d'analyser a priori la composition des produits et d'évaluer la recyclabilité du produit en fonction d'un certain nombre de filières de valorisation envisagées. Mais là aussi, cette solution impose de préciser un protocole de contrôle : en fonction de quels critères admettra-t-on qu'une pièce est recyclable ou valorisable (les matériaux ? la démontabilité ? les deux ?) ?

Démontage ou broyage ?

Comme nous l'avons signalé plus tôt, réduire la mise en décharge peut être obtenu en suivant deux voies de valorisation : soit en démontant certaines pièces en vue de leur recyclage avant passage au broyeur, ce que nous appellerons filière de démontage-recyclage (I) ou bien en incinérant les résidus générés par le procédé de valorisable par broyage (II). Mais entre ces deux filières-types, tout un ensemble de solutions peut être envisagé, et en fait le recours à des stratégies "pures" (I ou II exclusivement) semble peu probable à moyen terme :

Aux dires des spécialistes, une stratégie pure de valorisation énergétique n'est pas encore au point techniquement. De plus, certains gouvernements (Allemagne) restent hostiles à ce type de valorisation, de même que les populations, à l'installation de nouveaux incinérateurs dans leur voisinage.

D'un autre côté, une stratégie pure de démontage-recyclage des véhicules n'est guère plus réaliste : tout d'abord, certains matériaux ne sont pas encore recyclables

et il ne servirait à rien de les démonter aujourd'hui sans garantie de débouchés. C'est le cas de beaucoup de matériaux composites complexes comme les plastiques thermodurs, les peintures avec solvants, les colles et mastics, ... Les matériaux dont le recyclage est à peu près maîtrisé sont : les thermoplastiques (polypropylène surtout et ABS), les verres non techniques, le plomb (batterie).

Outre ces raisons techniques, une raison plus structurelle limite l'ampleur du démontage : les rendements décroissants du démontage. En effet, on peut analyser l'activité de démontage à l'aide de la métaphore de la mine : si les pièces extérieures, le plus souvent de grande taille, sont généralement facilement accessibles et démontables, ce n'est plus le cas au fur et à mesure que l'on progresse vers l'intérieur du produit. Une fois les bons filons exploités, le rendement du démontage des pièces supplémentaires (exprimé en kilos par minute) devient très fortement décroissant si bien que la rentabilité du démontage se trouve compromise.

Au total, ces deux stratégies "*pures*" paraissent trop risquées ; en revanche, rien n'empêche de recourir à des stratégies "*mixtes*", c'est à dire combinant les deux modes de valorisation. En suivant un raisonnement économique, cette solution semble a priori plus efficace : en effet, tant que le coût marginal net du démontage reste inférieur à celui de l'incinération il est intéressant de démonter ; au delà, l'incinération devient plus intéressante dans la mesure où des opérations préalables de dépollution auront été effectuées.

Cette analyse semble largement confirmée par les faits puisqu'on constate que d'une part la plupart des ateliers de démontage pilotes ne pratiquent qu'un démontage très partiel des DEEE et que parallèlement il faut poursuivre à améliorer les procédés de broyage et de tri.

De cette analyse, une question émerge : étant donné les incertitudes techniques et économiques du traitement des DEEE, des progrès hypothétiques au niveau des seules filières suffiront-ils pour atteindre les objectifs législatifs de valorisation ?

Plusieurs recherches montrent que la problématique de la valorisation des DEEE ne se traitent pas seulement au niveau des filières. En effet, les objectifs de valorisation ne peuvent être facilement atteints si le produit n'a pas été conçu dans cette perspective.

Conception et recyclage

Dans ces conditions, une conception plus recyclable des DEEE devient un enjeu stratégique pour les producteurs. Une stratégie prudente pour eux consisterait donc à agir simultanément sur les filières et sur la conception afin de faciliter le traitement des produits en fin de vie.

Cette logique d'innovation simultanée à la fois sur les produits et les processus est assez peu commune dans l'industrie et elle requiert une coordination dynamique complexe entre les deux activités : ne connaissant pas l'organisation future des filières, les concepteurs sont obligés d'élaborer des stratégies de conception dans le flou tandis que ne connaissant pas la composition en matériaux des futurs produits et donc des gisements futurs, les filières doivent anticiper sur les marchés à développer.

C'est une telle logique que nous voyons à l'oeuvre chez TEFAL (notre partenaire industriel) et chez les sous-traitants où des processus d'apprentissages complexes se déploient. Nous avons remarqué que le recyclage concernait essentiellement certains dirigeants et des experts en R et D ; désormais bien d'autres acteurs se trouvent impliqués dans le processus et de nouvelles règles commencent à émerger, à la définition desquelles nous participons chez TEFAL, que nous allons décrire plus en détail.

1.6.2 Intégration du désassemblage dans le processus de conception

Dans cette section, nous expliquerons notre contribution à l'intégration du désassemblage dans le processus de conception.

Pour maîtriser le cycle de vie des produits, le concurrent engineering est de plus en plus adopté par l'entreprise. Cette approche propose d'intégrer l'ensemble des activités du cycle de vie d'un produit dès la conception. Elle englobe de façon décloisonnée toutes les activités, allant de la conception de produit jusqu'à sa valorisation en fin de vie.

L'activité de la conception, comme processus, est définie en un ensemble de phases durant lesquelles le produit est conçu progressivement [7]. Ces phases vont de l'identification du besoin client jusqu'aux spécifications détaillées. Pour notre part, nous nous intéressons aux phases de préconception dans le but d'élargir les champs d'investigation, d'évaluation et de choix de meilleures solutions. Le critère le plus utilisé pour évaluer les différentes solutions de préconception est le rapport Qualité/Coût total du produit, auquel nous ajoutons les critères environnementaux.

La maîtrise des contraintes environnementales implique l'optimisation du traitement des produits en fin de vie. Cependant, le choix d'un scénario de valorisation reste fortement dépendant des caractéristiques techniques et des matériaux constitutifs du produit. Le respect des exigences de valorisation nécessite alors la décomposition du produit en composants ou en sous-ensembles valorisables. Une opération de désassemblage en amont des filières de valorisation est donc nécessaire. Pour intégrer ces nouvelles contraintes (désassemblage et valorisation) les décisions stratégiques de choix des solutions devront non seulement être basées sur des critères de conception

mais aussi sur des spécificités du désassemblage. Ceci demande un travail collaboratif entre les concepteurs et les experts de valorisation et de désassemblage.

La mise en place d'une telle démarche (*concurrent engineering*) consiste à rompre avec la structure séquentielle linéaire en organisant un chevauchement de phases. Cette démarche doit également s'attacher davantage à décrire les interactions entre les différentes tâches de conception. La Figure 1.12 représente un schéma d'organisation séquentielle des tâches de conception de produits et de conception pour le désassemblage.

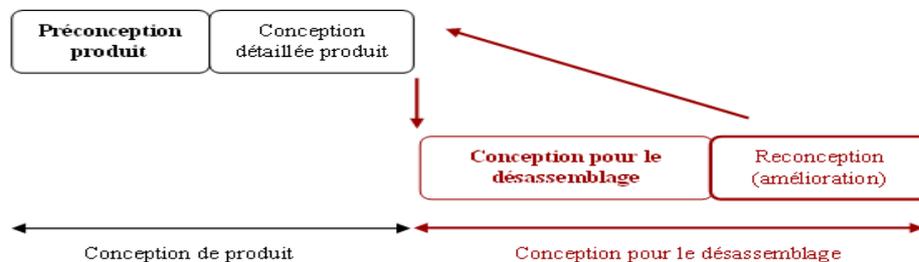


FIG. 1.12: Conception produit/ désassemblage pour le fin de vie : organisation séquentielle

La démarche de concurrent engineering ne remet pas seulement en cause le schéma d'organisation séquentielle, mais également le cloisonnement entre les tâches. Nous proposons de faire chevaucher le processus de conception et l'approche de conception pour le désassemblage. La Figure 1.13 schématise le processus de conception de produits et d'intervention des études de désassemblage pour la valorisation. Nous considérons que les stratégies de désassemblage doivent être définies avant la phase de conception détaillée du produit (définition de la structure, des liaisons et choix des matières).

L'approche de concurrent engineering implique la participation des différentes compétences aux processus de conception. Lorsqu'il est question de remonter en amont les métiers de l'aval nous comprenons qu'il s'agit de les prendre en compte dès la phase de préconception (ou conceptuelle) du produit. Des connaissances sur le recyclage et le désassemblage doivent être capitalisées avant les projets de conception. Cela permet de réduire le nombre de modifications susceptibles d'engendrer un nombre important d'itérations entre la définition du produit et les solutions proposées.



FIG. 1.13: Intégration conception du produit et du désassemblage en fin de vie

Rappelons que le désassemblage pour le recyclage résulte d'une nécessité environnementale et législative. Dans la phase de conception, cette nécessité se traduit par l'évaluation, l'orientation et l'amélioration des solutions de conception de produits. Cette dépendance entre la préconception de produit et le scénario de valorisation du produit nécessite plusieurs coordinations entre les différentes compétences. Une organisation itérative semble nécessaire pour la phase préconception (Figure 1.14).

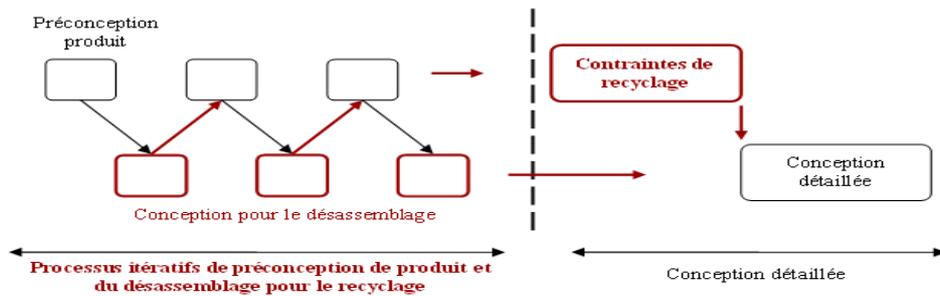


FIG. 1.14: Processus itératifs de préconception du produit pour le désassemblage en fin de vie

Le caractère itératif des processus de préconception permet alors de schématiser le chevauchement des deux activités de préconception, comme cela est présenté dans la partie gauche de la Figure 1.15 ci-après. Le même principe d'organisation

doit pouvoir s'appliquer au processus de conception détaillée et aux stratégies de valorisation, mais ne sera pas abordé en détail dans ce travail.

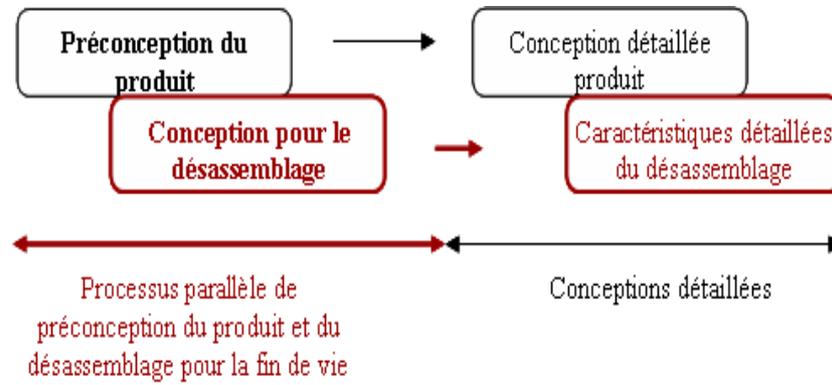


FIG. 1.15: Intégration désassemblage en fin de vie par rapport aux processus de conception produit

1.6.3 Positionnement de notre thèse : Articulation entre l'axe de recherche de L'ENSAM Chambéry et celui du laboratoire 3S

L'objectif de recherche de l'ENSAM de Chambéry est de développer des modèles environnementaux de produits, des outils d'analyse et de procédés de valorisation pour les mettre à la disposition des concepteurs. Ces modèles sont développés dans le contexte d'éco-conception⁷. L'intégration de ces modèles contribue à la prise en compte des différentes connaissances environnementales dans un processus classique de conception. Ces modèles sont souvent imprégnés des problèmes auxquels sont confrontés les industriels.

Cette recherche mobilise plusieurs acteurs de différentes compétences (filères de recyclage, procédés de tri, procédés de démantèlements, analyse environnementale, législation, matériaux, conception) qui doivent en permanence apprendre à travailler ensemble et confronter leurs points de vue, quelquefois contradictoires, puis faire un retour à la conception et proposer des recommandations pour la conception de nouveaux produits. Le laboratoire de l'ENSAM de Chambéry a donc entrepris une démarche de recherche centrée à la fois sur la modélisation environnementale des procédés de recyclage de produit et sur le processus de conception. La recherche s'appuie sur l'intégration des contraintes environnementales, dans le but d'optimiser les impacts environnementaux et de développer des modèles et outils d'écoconception. C'est dans cette optique que le laboratoire 3S apporte ses compétences. A la fois en matière de modélisation de la conception mais aussi en ce qui concerne l'étape d'intégration des contraintes environnementales. Notre thèse de recherche s'appuie sur trois axes schématisés par la figure 1.16 suivante :

La présente recherche de thèse est centrée sur ces trois axes, elle a pour but d'apporter une contribution à deux questions : *"l'intégration du désassemblage pour le recyclage au plus tôt dans le processus de la conception"* et *"le développement des indicateurs d'émergence d'un produit dans une optique de désassemblage"*.

⁷L'éco-conception est une démarche préventive qui se caractérise par la prise en compte des critères environnementaux dès la phase de conception/re-conception d'un produit. Ces critères concernent généralement l'ensemble des phases du cycle de vie du produit à savoir sa production, sa distribution, son utilisation et sa fin de vie. L'objectif de cette démarche est d'améliorer la qualité écologique du produit, c'est-à-dire réduire ses impacts négatifs sur l'environnement tout au long de son cycle de vie, tout en conservant sa qualité d'usage [34]

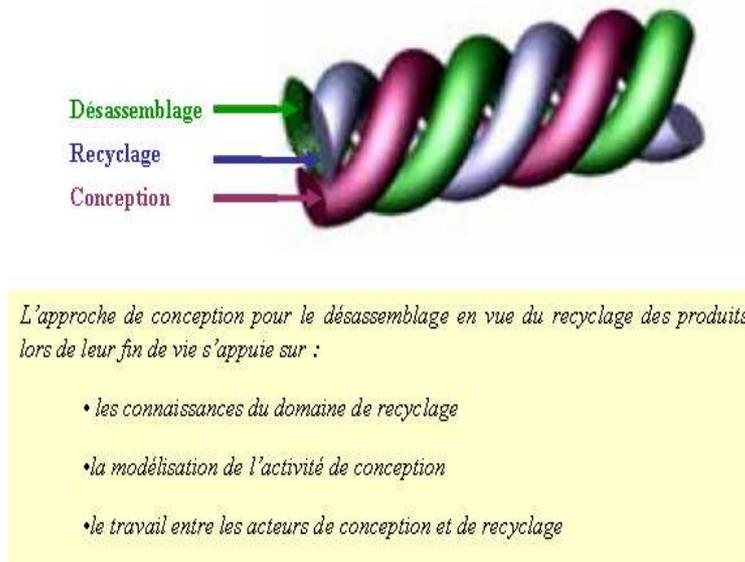


FIG. 1.16: Les trois axes de recherche de notre thèse

1.6.4 Domaine d'application et d'implémentation

Ce travail est soutenu par une problématique industrielle de conception des produits électroménagers et de leur respect des contraintes législatives. Dans ce qui suit, nous présenterons les différentes caractéristiques d'un produit électroménager.

Les produits électroménagers sont définis pour répondre à des besoins client très diversifiés. Ceci implique que l'entreprise conçoive plusieurs variantes du produit pour un même besoin, donc une famille de produits. Chaque variante définit une nomenclature de composants fonctionnels pouvant être standards pour une même famille de produit. Toutefois deux variantes de produits ayant la même nomenclature peuvent être différenciées par l'agencement des composants. Il est alors important dans le cadre de notre recherche sur le désassemblage des produits en fin de vie, de prendre en compte, d'une part, l'agencement et le positionnement des différents composants dans l'espace et d'autre part, leur composition en matière et les interactions fonctionnelles qui doivent exister entre les différents composants du produit.

Les différents choix à effectuer pendant un processus de préconception sont restreints par une multitude de contraintes à satisfaire. Les contraintes sont fonctionnelles, technologiques et de valorisation en fin de vie. D'autres contraintes relatives aux différentes phases du cycle de vie du produit peuvent intervenir dans la phase

de conception telles que les contraintes de fabrication, l'assemblage et les impacts environnementaux.

D'autres produits industriels peuvent correspondre à ces caractéristiques. En général, ce sont des produits industriels de grande consommation qui supportent une forte diversité et qui sont caractérisés par un cycle de renouvellement rapide. Nous pouvons citer par exemple les ordinateurs, les voitures, les produits multimédia.

1.6.5 Bilan

La démarche de conception qui nous intéresse pour l'intégration des problèmes de désassemblage est le concurrent engineering. Cette démarche permet de repositionner les différentes disciplines par rapport à la problématique de valorisation.

Dans ce document de thèse, les problèmes liés au désassemblage FdV seront traités en vue de fournir une démarche intégrant des méthodes et des outils adaptés aux contextes industriels. Nous estimons que ce sujet joue un rôle primordial dans l'amélioration des scénarios de traitement des PFV, où le développement des filières de valorisation dépend des caractéristiques des produits à valoriser.

1.7 Conclusion

Comment faire face aux problèmes de valorisation des PFV non intégrés jusqu'à maintenant dans la phase de conception ? Voici une question que se posent de nombreux industriels.

Nous souhaitons apporter un élément de réponse à cette vaste question. En effet, nous pensons que la mise en place d'une démarche intégrative dans le processus de conception permet de répondre aux besoins et aux contraintes auxquels les industriels sont confrontés. Toutefois, une telle démarche doit garantir la réactivité, la flexibilité et l'adaptabilité des industriels aux évolutions en matière de transformation des stratégies et des objectifs.

Dans ce premier chapitre, afin de comprendre les effets et l'importance des aspects environnementaux sur l'organisation industrielle nous avons cerné le contexte de nos travaux de recherche ; un domaine en pleine expansion depuis le début de 21ème siècle.

Dans la première partie, nous avons résumé l'évolution législative concernant le traitement des PFV. Nous nous sommes aussi intéressés à l'évolution des systèmes de production face à ces contraintes.

Ensuite, nous avons donné le cadre de notre sujet de recherche, en montrant la complémentarité de notre travail au sein du projet "Concevoir propre". Nous avons alors défini notre champ de recherche, caractérisé par sa pluridisciplinarité et par la multitude de compétences dont il faut tenir compte.

La conception pour le désassemblage fait appel en particulier à la connaissance des filières de valorisation et à d'autres disciplines du domaine de la conception. C'est un champ d'application de l'interdisciplinarité dans lequel l'expert valorisation joue un rôle de plus en plus important pour le succès des résultats de conception.

Nous souhaitons apporter, non seulement de nouvelles connaissances dans le domaine de la conception, mais aussi proposer une démarche d'intégration des contraintes de valorisation des PFV et plus particulièrement le désassemblage, qui ont été, jusqu'à maintenant, négligées par les acteurs de conception. Nous voulons par cette recherche contribuer aux avancées scientifiques pour répondre aux objectifs du développement durable.

Chapitre 2

État de l’art des méthodes et outils de conception pour le désassemblage

Sommaire

2.1	Introduction	43
2.2	Désassemblage	44
2.2.1	Définition	44
2.2.2	Mode de désassemblage	45
2.2.3	Modèle de désassemblage pour le recyclage	46
2.2.4	Bilan	48
2.3	Sciences de la conception	49
2.3.1	Définition de la conception	49
2.3.2	Brève description des modèles de conception	49
2.4	Conception pour le désassemblage	50
2.4.1	Conformité des produits aux exigences de fin de vie	51
2.4.1.1	Conformité du produit aux exigences législatives	52
2.4.1.2	Le Recyclage Noble : une approche adéquate pour le traitement des produits en fin de vie	53
2.4.2	Problème de l’intégration des contraintes de la fin de vie du produit dans le processus de la conception	55
2.4.2.1	Méthodes basées sur des recommandations	57
2.4.2.2	Méthodes basées sur l’évaluation	58
2.4.3	Les phases du processus de la conception	62
2.4.3.1	Élaboration du cahier des charges ”planning and clarifying the task”	65

2.4.3.2	Conception de principe " <i>Conceptual design</i> "	65
2.4.3.3	Conception d'ensemble " <i>Embodiment design</i> "	66
2.4.3.4	Conception détaillée " <i>Detail design</i> "	66
2.4.4	Bilan et positionnement	66
2.5	Classification des types de conception	67
2.5.1	Conception routinière ou prédéfinie	68
2.5.2	Conception innovante	68
2.5.3	Conception créative	69
2.5.4	Bilan et positionnement	71
2.6	Problématique spécifique de la thèse	72
2.7	Conclusion	74

2.1 Introduction

Le désassemblage en vue de valorisation des produits en fin de vie doit évoluer par rapport aux nouvelles règles législatives ; par la multiplication des scénarios de valorisation, par le développement d'un processus de désassemblage en amont du processus classique de recyclage et par le développement des procédés de séparation. Le sujet du désassemblage est actuellement un domaine d'exploration et de recherche [35]. Ces recherches, montrent que, malgré tous les moyens développés (outils, chaîne de désassemblage, etc...) les objectifs restent cernables si les produits n'ont pas été conçus dans cette perspective [36]. Ce contexte exige d'orienter une conception centrée sur le besoin des industriels et des consommateurs vers une conception plus respectueuse des exigences législatives des produits en fin de vie.

L'activité de conception est une étape déterminante et décisive dans le désassemblage et le traitement du produit lors de sa fin de vie. Elle constitue la phase initiale, durant laquelle toutes les spécifications du produit vont être définies de façon à remplir les performances exprimées dans le cahier des charges en intégrant les contraintes de fin de vie. Habituellement, la première étape du processus de conception d'un produit consiste, à partir d'un cahier des charges, à générer un ensemble de solutions de conception qui paraissent a priori satisfaisantes. Cette étape est celle de la préconception. Sur la base d'un ou de plusieurs critères, le concepteur évalue chaque solution. La meilleure solution retenue sera ensuite étudiée finement dans la phase de conception détaillée.

Dans ce contexte, on veut intégrer le désassemblage en fin de vie de plus en plus tôt dans le processus de conception. Ceci sera réalisable par la sensibilisation des acteurs de la conception à l'importance de cette nouvelle contrainte et par rapport à l'enjeu concurrentiel.

Une question se pose alors :

” Comment le désassemblage pour la valorisation en fin de vie en tant qu'étape principale du processus du recyclage, peut-il être intégré dès les premières phases du processus de conception ? ”

Notre problématique repose sur ce contexte et concerne essentiellement la méthodologie et les outils qui pourraient aider le concepteur (*non expert dans le domaine de l'environnement*) à évaluer la fin de vie des préconcepts et à proposer des solutions technologiques qui tiennent compte des exigences du traitement en fin de vie.

Pour répondre à notre problématique, nous faisons deux propositions complémentaires. La première proposition, concerne la méthode d'intégration des contraintes de

désassemblage des produits en fin de vie au plus tôt dans le processus de conception. La deuxième proposition porte sur le modèle conceptuel de désassemblage, dans lequel nous suggérons de valider le désassemblage au plus tôt dans un processus de conception.

Ces deux propositions constituent le support de notre approche de la conception pour le désassemblage qui tient compte du processus réel de la conception.

2.2 Désassemblage

2.2.1 Définition

On définit le désassemblage par le processus de récupération systématique des constituants⁸ cibles d'un produit. Cependant, les recherches sur le désassemblage ont donné différentes définitions suivant l'objectif attendu.

Selon A.Gungor et S.Gupta, le démontage est défini comme un processus systématique qui favorise une récupération sélective des composants et/ou sous-ensembles réutilisables, recyclables ou polluants du produit [37]. Un tel processus de désassemblage permet d'obtenir une matière secondaire avec un minimum d'impureté. Afin d'y parvenir, il est nécessaire d'envisager une séparation des matériaux. Différentes stratégies de démontage sont évaluées et la meilleure parmi elles est par la suite retenue. Brennan et al définissent le désassemblage comme "la récupération systématique des composants et/ou des sous-ensemble recyclables. Afin de récupérer la plus grande valeur d'un produit en fin de vie, Brennan s'est intéressé dans son modèle au désassemblage non destructif [38]. Une autre définition qui nous paraît intéressante est celle de Kriwet [39]. Il définit le désassemblage comme étant un processus de décomposition d'un produit en sous-ensembles et composants tout en gardant leurs caractéristiques d'origine.

***Remarque** il existe une similitude dans les définitions du désassemblage. Tous précisent que le désassemblage est un processus de séparation du produit en composants et/ou en sous-ensembles suivant leurs scénarios de fin de vie*

⁸Un constituant est soit un composant élémentaire, soit un sous-ensemble de composants.

2.2.2 Mode de désassemblage

Le désassemblage peut être classé en plusieurs groupes. D'après notre recherche bibliographique, on identifie six classes de désassemblage, résumées dans la Figure 2.1.

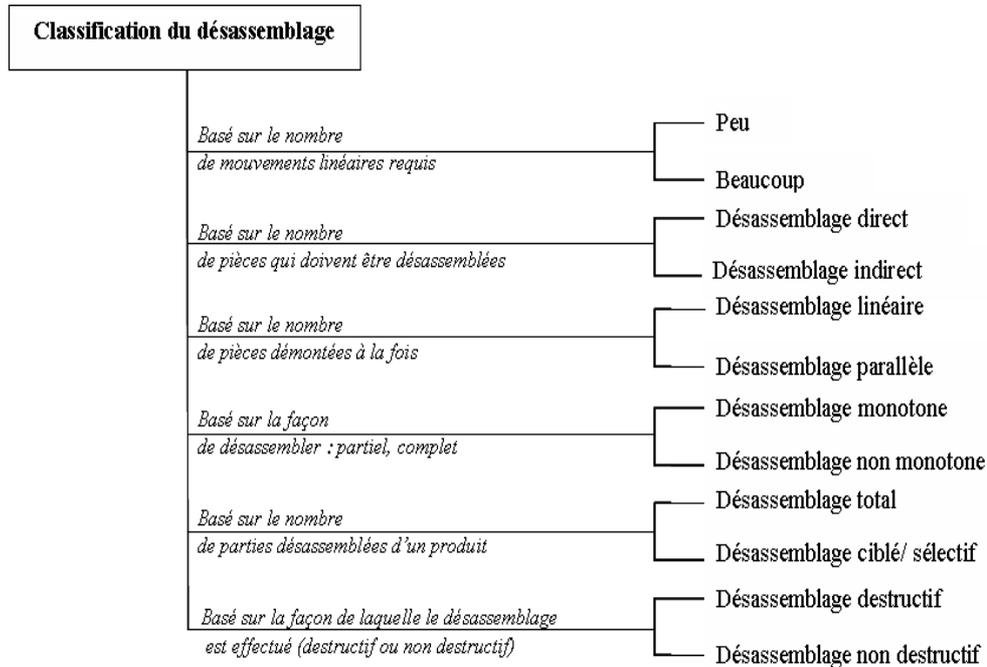


FIG. 2.1: Classification du désassemblage

Désassemblage linéaire et parallèle : Le désassemblage est dit linéaire si un seul constituant final est désassemblé à la fois. Le désassemblage est dit parallèle si plusieurs constituants finaux sont désassemblés en même temps [40].

Désassemblage direct et indirect : On appelle désassemblage direct, toute opération de récupération de partie n'entraînant pas le désassemblage des autres parties. Dans le cas contraire, le composant est indirectement désassemblable [5].

Désassemblage monotone et non monotone : Dans le désassemblage monotone, le composant est complètement récupéré du produit. Inversement, le désassemblage non monotone nécessite un désassemblage partiel d'un ou plusieurs composants [40].

Désassemblage total/sélectif : Le désassemblage d'un produit peut être différencié qu'il soit total ou partiel [41]. Le désassemblage total a pour but d'obtenir

tous les composants élémentaires du système. En réalité, le désassemblage total est impossible, en fait cette notion correspond à une approche purement théorique. Cette approche n'a été utilisée que dans le cadre de l'assemblage pour la génération des gammes d'assemblage. Le désassemblage sélectif a pour objectif la décomposition du produit en regroupant les composants élémentaires sans nécessairement chercher à récupérer les composants élémentaires. Ce type de désassemblage, généralement utilisé lors de la valorisation de produits manufacturés, est à rapprocher du désassemblage total. Ils ont, en effet, une problématique commune, celle de décomposer l'ensemble du produit en constituants finaux afin de réaliser les objectifs suivants :

- Entretien et réparation ;
- Récupération des sous-ensembles comme pièces de rechanges ;
- Diminution des impuretés dans la matière obtenue par la séparation des composants dont les matériaux peuvent contaminer les caractéristiques techniques des matières obtenues ;
- Se conformer aux règlements qui prescrivent le déplacement des pièces, des matériaux et des substances définis pour des raisons environnementales (récupération des piles des produits électroniques par exemple).

Le désassemblage destructif et non destructif : Le désassemblage des produits en fin de vie peut être obtenu à partir d'un désassemblage destructif ou non destructif [36]. Le désassemblage destructif signifie que seuls quelques composants sont détruits lors du processus de désassemblage ce qui cause un changement de la structure géométrique. Dans ce cas de désassemblage, les composants récupérés ne sont pas réutilisables, seule la matière peut être recyclée. Le désassemblage destructif est appelé aussi démantèlement [42]. Dans le désassemblage non destructif, le produit est démonté sans endommager les composants, c'est-à-dire que la forme physique des composants est conservée. Ces composants peuvent être réutilisés après reconditionnement. Le désassemblage destructif et non destructif dépendent de l'irréversibilité ou de la réversibilité des liaisons à séparer.

2.2.3 Modèle de désassemblage pour le recyclage

Dans le contexte du cycle économique, la récupération des produits et des matériaux demande une synchronisation et une coopération entre les producteurs créateurs du produit et les compagnies de recyclage.

Au cours de notre étude bibliographique, nous avons dégagé cinq scénarios de fin de vie : la dépollution, la réutilisation et le remanufacturing, le recyclage des matériaux, l'incinération et la mise en décharge. La priorité de désassemblage dépend du scénario de fin de vie du produit et/ou de ses composants (Figure 2.2). Nous illustrons un sens de priorité de désassemblage des composants, cette ordre de priorité est défini selon les contraintes environnementales, législatives et économiques. Toutefois pour faciliter l'interprétation de ces scénarios de fin de vie par les acteurs de conception nous avons traduit ces scénarios suivant des contraintes législatives, des contraintes de désassemblage, des contraintes de conception et des contraintes économiques. Ces contraintes sont classées par ordre d'influence les unes par rapport aux autres.

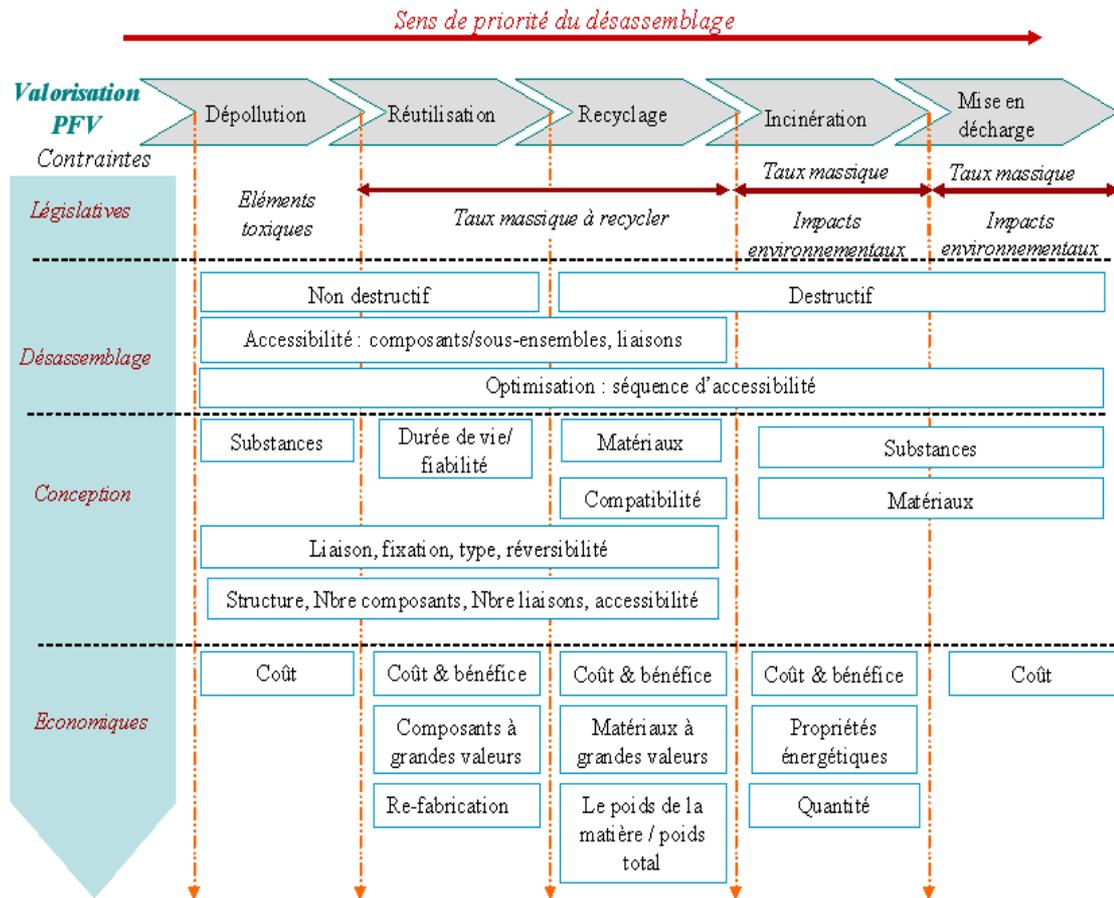


FIG. 2.2: Priorité du désassemblage en fonction du mode de valorisation

Les contraintes législatives permettent d'évaluer la conformité avec la législation environnementale. Elles exigent la dépollution des produits à chaque début du processus de valorisation et la minimisation des quantités de déchets mises

en décharge. Ces contraintes expriment certains taux potentiels des modes de valorisation du produit en fin de vie. La réduction de la quantité de mise en décharge peut aussi bien être atteinte par la réutilisation des pièces détachées, que par le recyclage des matériaux ou l'incinération.

Les contraintes de désassemblage qualifient essentiellement la minimisation du temps de l'opération du désassemblage. Le temps opératoire du désassemblage dépend du mode du désassemblage (destructif ou non destructif) et de la séquence d'accessibilité. Ces contraintes ont une influence directe sur les critères économiques.

Les contraintes de conception se traduisent par l'influence des scénarios de valorisation sur les choix de conception (Durée de vie/fiabilité, matériaux, liaisons, etc.), qui sont difficilement manipulables. En effet, ces contraintes sont dans la plupart des cas contradictoires avec les contraintes classiques de la conception (technique, consommateur et économique).

Les contraintes économiques consistent en la maximisation du bénéfice marginal des scénarios de valorisation et en la minimisation des coûts engendrés par les scénarios d'élimination. Les bénéfices peuvent être atteints par la réutilisation des composants ou des produits, la récupération de matières ou l'incinération. Comme on peut le remarquer, les coûts sont associés essentiellement aux processus de récupération des composants ou des matériaux (désassemblage, broyage, tri), à la dépollution et aux quantités qui sont mises en décharge (taxes).

2.2.4 Bilan

Comme nous l'avons exposé dans cette section, les travaux de désassemblage visent à améliorer le désassemblage des produits suivant le scénario de valorisation en fin de vie. Ces travaux montrent également la nécessité du désassemblage pour valider les différents critères présentés dans la Figure 2.2. Plusieurs recherches ont mis l'accent sur l'intégration du désassemblage dans le processus de la conception.

Ces recherches s'intègrent dans l'approche de la conception pour le désassemblage plus connues sous le terme Design for Disassembly DfD. Cette approche vise à montrer comment l'intégration des contraintes de désassemblage permet d'améliorer le traitement des produits en fin de vie.

2.3 Sciences de la conception

2.3.1 Définition de la conception

Un produit est un bien fabriqué par l'entreprise : résultat d'une activité créatrice s'exerçant sur les matières [Office de la langue française, 2002]. D'une façon générale, tous les produits sont classés comme biens de consommation destinés au consommateur final, biens d'équipement ou biens intermédiaires destinés à produire d'autres biens. Par conséquent, on estime que la définition du produit recouvre tous les biens qui visent à satisfaire des besoins du consommateur tout en respectant les contraintes qui lui sont imposées. Un produit est donc le résultat d'émergence d'un projet de conception. Toutefois, la conception d'un produit consiste plus précisément en l'élaboration de quatre aspects : l'aspect fonctionnel, législatif, socioculturel et l'aspect économique de la réalisation. La mise en œuvre des aspects d'un produit passe par la détermination de ses caractéristiques techniques, ses attributs, ainsi que la manière de l'obtenir.

La conception d'un produit contient donc une notion de transformation de l'abstrait au concret, d'une idée à un produit, d'un problème à une solution, du fonctionnel au structurel [7].

2.3.2 Brève description des modèles de conception

En se basant sur le modèle de Lorenz [43], on peut identifier trois approches autour desquelles la conception se développe. Le tableau 2.1 résume ces trois approches :

<i>Conception</i>		
Approche industrielle	Approche technique	Approche marketing
Prise en compte des visions marketing	Étude technique	Étude de marché
Contexte législatif	Analyse technique	Analyse de marché
Contexte socioculturel	Évaluation : recyclage, désassemblage etc.	Aspect économique
Contexte environnemental	Procédés de fabrication	Logistique

TAB. 2.1: Les trois principales optiques de la conception d'un produit

A partir des différentes méthodes de conception de produit comme celles de Herbert A. Simon [44], Pahl et Beiz [7], Vladimir Hubka [45], Tichkiewitch [46], Karl

T. Ulrich [47], il devient possible de comprendre le mécanisme de cette transformation et un modèle de mécanisme de conception de produit se construit. Dans un processus de conception, il est nécessaire d'avoir trois types d'activités. Les deux premières activités relèvent d'une activité centrée sur le produit [48] : ce sont la caractérisation de l'environnement du produit, la résolution du problème d'induction de structure pour la définition de la problématique de conception de produit, et la caractérisation des attributs du produit. La caractérisation de l'environnement du futur produit nécessite une approche marketing et fait donc appel à des disciplines comme le marketing ou la veille (technologique, commerciale, législative,), généralement assez bien représentées dans l'entreprise et pourvues de méthodes et outils permettant cette définition par circonvolution du produit : bref marketing, étude de marché, benchmarking. Ces métiers ont la responsabilité, aux yeux de l'organisation de l'entreprise ou de l'équipe projet, de détecter, de formuler et de valider les besoins directs ou indirects des clients et des nouveaux champs concurrentiels (écoproduit, recyclage). En ce qui concerne la caractérisation des attributs du futur produit, ce sont des disciplines comme le design, l'ingénierie technique, les contraintes de recyclage et de désassemblage qui intègrent la vision technique du produit. Ces métiers réfèrent eux aussi à des méthodes, des outils d'analyse et de synthèse pour la définition par concrétion du produit : rough, maquette d'aspect, dessin technique, calcul de résistance des matériaux, maquette fonctionnelle, tests de qualification technique, scénario d'utilisation, simulation de valorisation en fin de vie. Le troisième type relève, lui, d'une activité centrée sur le projet de conception ; autrement dit, c'est la planification des actions de conception pour la caractérisation de l'environnement du produit et de ses attributs, de même que les outils d'analyse de conformité de la solution en regard de la problématique.

Ces trois types d'activité sont présents tout au long de la conception du produit. La planification du projet intervient avant même le démarrage des activités pluridisciplinaires. Elles doivent être liées de manière indissociable pour un fonctionnement correct du projet de conception.

2.4 Conception pour le désassemblage

Les approches actuelles de conception pour le désassemblage restent limitées aux outils d'évaluation et à quelques applications d'optimisation (séquences, temps, etc.) . Toutefois, les problèmes d'intégration et d'utilisation de ces outils dans un processus réel de conception ont été négligés. Ces approches révèlent :

- Des limites d'adaptation face à l'évolution des contraintes législatives DEEE, VHU,
- Des problèmes d'intégration des outils d'évaluation de désassemblage pour la valorisation dans le processus de la conception.

L'inadaptation des outils et méthodes de désassemblage et le manque de compétences des acteurs, révèlent le dysfonctionnement de ces approches.

2.4.1 Conformité des produits aux exigences de fin de vie

La pression des règles législatives a généré une certaine inadaptation des produits qui ont été conçus sans prendre en compte les contraintes environnementales. Nous considérons qu'un produit est non conforme aux contraintes de fin de vie s'il n'existe pas de filière de valorisation d'une part et d'autre part, s'il ne respecte pas les règles législatives (Figure 2.3).

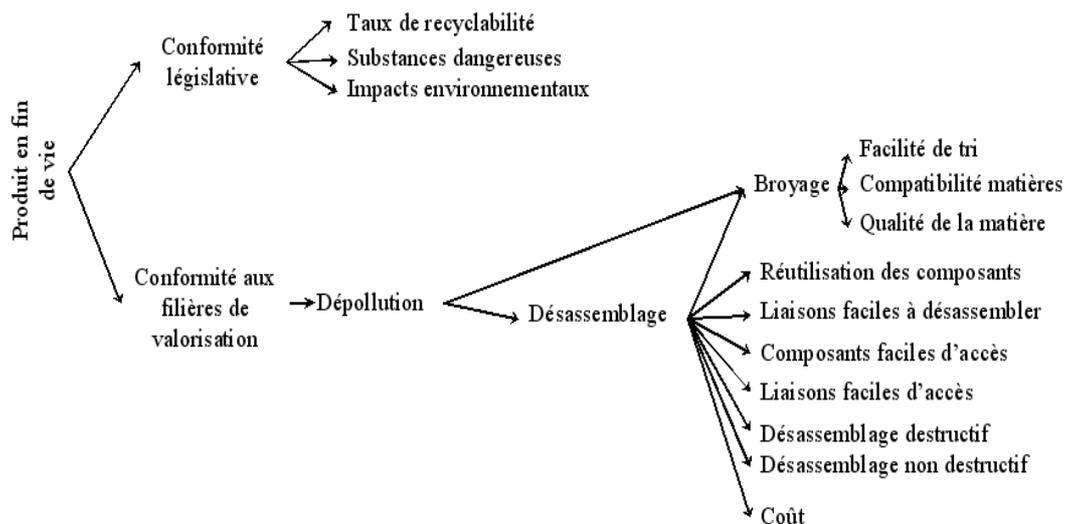


FIG. 2.3: Conformité du produit aux contraintes de fin de vie

En effet, un produit non-conforme aux contraintes de fin de vie peut comporter d'une part des composants qui n'ont pas de scénario de valorisation (réutilisation des composants, récupération de la matière ou valorisation énergétique) et d'une autre part, un taux massique valorisable du produit inférieur à celui fixé par la législation.

2.4.1.1 Conformité du produit aux exigences législatives

Afin de faire face aux flux croissants de produits en fin de vie, dans la plupart des cas difficilement valorisables, le législateur (la commission européenne) a dû mettre de plus en plus de contraintes exigeant le traitement des produits en fin de vie. Elles ont conduit au développement de plusieurs filières de valorisation, par exemple le recyclage des plastiques, métaux ferreux et non ferreux et les procédés de séparation des matières. Malheureusement, ces filières de recyclage ne se sont intéressées qu'aux produits économiquement intéressants [32] [49]. Mais les produits en fin de vie sans grande valeur économique n'ont pas cessé de s'accumuler sans aucun traitement. Pour ces raisons, les législateurs ont confié aux producteurs la responsabilité de valoriser leurs produits. De ce fait, les producteurs ont l'obligation de concevoir des produits dont le taux massique de valorisation est supérieur à celui exigé par la législation tout en interdisant les substances considérées dangereuses par la directive RoHs. Pour adapter le produit aux contraintes de fin de vie le législateur doit suivre une stratégie intégrative en amont de la phase de mise en fabrication du produit.

Législation	Critères	Niveau d'adaptabilité
DEEE	<ul style="list-style-type: none"> - Taux de Valorisation (<i>TV</i>) - Taux de Réutilisation (<i>TR</i>) - Taux de Récupération de Matières (<i>TRM</i>) - Taux d'Incinération (<i>TI</i>) - Taux de Mise en Décharge (<i>TMD</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> - TV >80% de la masse totale du produit - TRM > 75% - TI > 15% - TMD < 20%
RoHs	Substances dangereuses interdites	<ul style="list-style-type: none"> - Pb avant l'année 2006 (soudure électronique) - PBDE, PBB avant l'année 2006 (retardateur de flamme des composants en plastiques) - Cadmium avant l'année 2006 (batteries et coloration des composants en plastiques) - etc.

TAB. 2.2: Conformité d'un produit aux critères législatifs de la DEEE (Directive 2002/96/CE)

Le tableau précédent (Tableau 2.2) présente les critères de conformité d'un produit selon la législation DEEE. On peut s'apercevoir que la conformité du produit

dépend essentiellement du critère massique valorisable et de l'existence des substances dangereuses.

2.4.1.2 Le Recyclage Noble : une approche adéquate pour le traitement des produits en fin de vie

Gerner [50] a défini le recyclage noble comme une approche qui a pour vocation d'encourager la production écologique. Son but est de récupérer la valeur maximale de fin de vie d'un produit en tenant compte de ses valeurs fonctionnelles, énergétiques et en terme de matières secondaires (Figure 2.4). Cette approche est basée sur une évaluation du recyclage suivant des critères économiques et écologiques du produit en fin de vie.

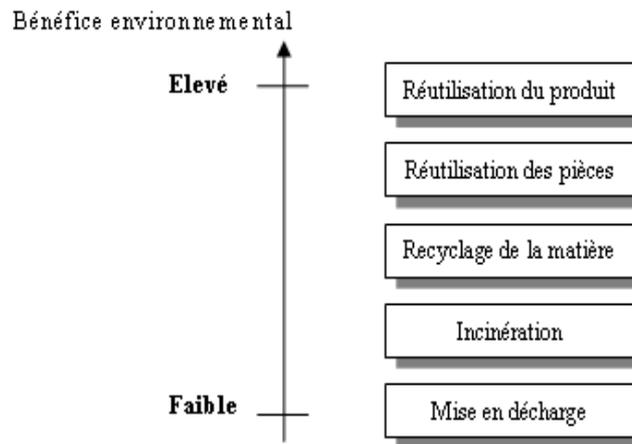


FIG. 2.4: Priorité entre les différents modes de valorisation [5]

Dans le cadre du projet "*Concevoir propre*" nous nous sommes intéressés au recyclage noble pour la diversité des scénarios et l'apport économique qu'il offre.

Dans le monde industriel, l'approche la plus utilisée actuellement est celle qui envoie les produits en fin de vie directement vers des procédés automatiques de broyage. Ces procédés de broyage sont composés essentiellement de deux étapes principales, la première étape est le broyage du produit en fractions et la deuxième étape consiste en la séparation des différents matériaux [32]. Plusieurs procédés de tri ont été développés; on cite essentiellement le tri par flottaison, le tri magnétique, le tri optique etc. Malgré tous ces procédés de séparations, les fractions des matières premières séparées sont souvent polluées par des micro-particules et des poussières métalliques

nocives impactant les caractéristiques mécaniques de la matière récupérée [51]. De plus le broyage ne permet pas de récupérer la valeur fonctionnelle des produits ni de leurs composants. En effet, la valorisation fonctionnelle (réutilisation et remanufacturabilité du produit), nécessite une opération de désassemblage qui augmente la durée de vie du produit ou de ses composants. Ceci est visible dans le domaine de l'industrie automobile où le Service Après Vente qui remplace les composants ou les parties défectueuses du véhicule par des composants ou des parties d'occasion. La valorisation des produits en fin de vie peut également se faire après désassemblage, non seulement dans le but de récupérer les valeurs fonctionnelles du produit (remanufacturing, réutilisation), mais aussi d'obtenir une matière première avec un minimum d'impureté. D'un point de vue économique, l'option du désassemblage peut être coûteuse pour les recycleurs si le produit n'a pas été conçu dans une optique de désassemblage. Ce point de vue a été étudié par Feldmann et al [6]. Cependant du point de vue du recyclage des matières, les coûts et les bénéfices diffèrent suivant les fractions de matières à récupérer. Ce point de vue a été soigneusement étudié dans la thèse de Mathieux, [11]. Les coûts du désassemblage doivent être justifiés par l'avantage économique du recyclage, c'est à dire que le rapport entre les coûts des installations de valorisation, les coût du processus et les valeurs économiques générées par le produit en fin de vie s'équilibrent. Afin de déterminer la stratégie optimale entre le désassemblage et le mode de valorisation, toutes les combinaisons de désassemblage doivent être comparées. A cet effet Lee et al [52] ont développé une méthode afin de calculer la valeur économique des composants et des produits en fin de vie. Leurs méthode intègre tous les paramètres économiques de processus de valorisation : le coût total de traitement et le bénéfice généré par ce mode de valorisation.

Dans la Figure suivante (Figure 2.5) Feldmann et al [6] montrent le rôle joué par les divers facteurs économiques dans la détermination d'une stratégie optimale de valorisation et de désassemblage.

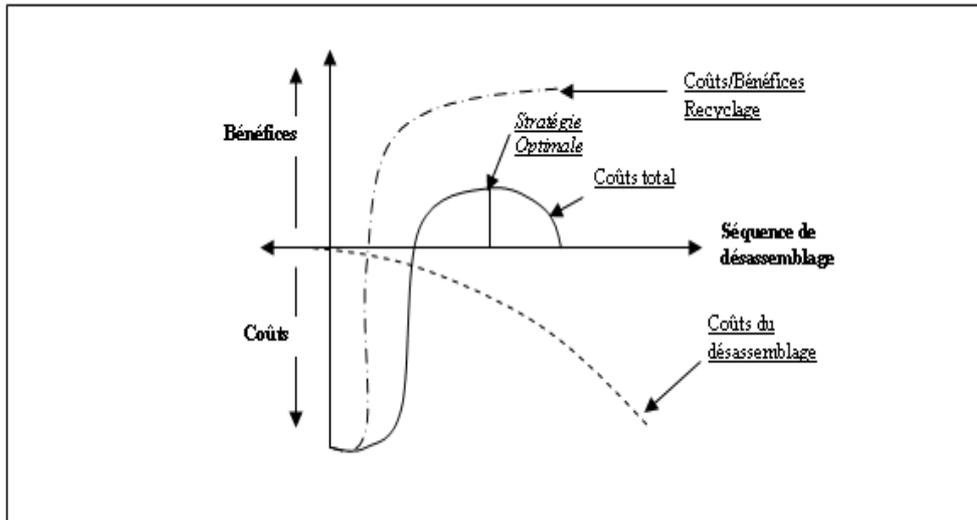


FIG. 2.5: Détermination de la stratégie optimale entre le scénario de valorisation et le désassemblage [6]

On estime un produit conforme au concept du recyclage noble si et seulement si, les produits peuvent être désassemblés suivant leurs scénarios de valorisation et ce en favorisant les scénarios dont le bénéfice environnemental est élevé (Figure 2.4). Dans le Tableau 2.3 suivant nous illustrons l'adéquation d'un produit ou d'un composant pour la valorisation en fin de vie.

Comme nous l'avons démontré dans le paragraphe précédent, l'approche du recyclage noble a été basée essentiellement sur le désassemblage afin de favoriser la réutilisation des composants.

2.4.2 Problème de l'intégration des contraintes de la fin de vie du produit dans le processus de la conception

La valorisation des produits en fin de vie peut être augmentée par une optimisation du processus de désassemblage et par la conception des produits respectant les contraintes de fin de vie. Par conséquent, il est indispensable de réfléchir comment le désassemblage pour le recyclage peut être pris en compte au cours de la conception.

Dans la littérature, l'objectif des algorithmes d'évaluation est de déterminer à quel point un produit est apte à être désassemblé. La facilité du désassemblage est mesurée en coût de l'opération [36] ou en difficulté d'accessibilité aux composants à récupérer et aux fixations à séparer.

<i>Contraintes</i>	<i>Critères</i>		<i>Niveau d'adaptabilité</i>
Valorisation	Dépollution	Substances (RoHs)	Filières de traitements
	Réutilisation	Fiabilité Réparabilité	Vc = € Vr < (Vc = €)
	Recyclage	Composition en matières	<ul style="list-style-type: none"> - Matières recyclables - Matières recyclées - Compatibilité des matières (particulièrement pour les composants en plastiques)
		Séparation de matières	<ul style="list-style-type: none"> - Séparabilité des matières - Séparation magnétique (matériaux ferreux) - Séparation par induction (métaux non ferreux) - Séparation optique (couleur de la matière) - Séparation par densimétrie - Coûts
Incinération	Impacts environnementaux	<ul style="list-style-type: none"> - Émission dans l'air (+) - Résidus d'incinération (+) - Quantité d'énergie (-) 	

TAB. 2.3: Conformité du produit au concept de " Recyclage Noble "

On a identifié d'autres approches qui suivent la démarche de la génération des séquences de désassemblage des composants valorisable [53]. Après l'évaluation du processus de désassemblage, des suggestions d'amélioration sont générées automatiquement. Elles portent sur un changement de matières de certains composants et fixations ainsi que sur la réduction du nombre de composants par intégration fonctionnelle. Face à ces évaluations, il est possible de changer la structure du produit : les polluants et les composants qui présentent une valeur élevée en fin de vie devraient être placés de manière à être facilement accessibles.

La conception pour le désassemblage se traduit par l'utilisation de directives et d'outils d'aide à la conception. Deux méthodes de conception pour le désassemblage peuvent être différenciées :

- Les méthodes basées sur des recommandations,
- Les méthodes basées sur l'évaluation.

2.4.2.1 Méthodes basées sur des recommandations

Ces méthodes se basent sur la formulation des critères utilisés par les concepteurs. Des guides de recommandations fournissent des directives aux concepteurs lors de l'élaboration du produit. Jovane [36] et Dowie [10] présentent les règles de conception les plus courantes. Ces règles sont essentiellement appliquées pour l'optimisation des points suivants :

Règle 1 : Faciliter le désassemblage

- Minimiser le nombre de fixations ;
- Utiliser des fixations faciles à enlever ;
- Minimiser la variété des fixations utilisées.

Règle 2 : Moins d'opérations de désassemblage

- Réduire le nombre des composants dans un produit ;
- Limiter les variétés de matières premières utilisées ;
- Dans le cas où la limitation de matières est impossible, utiliser des matières compatibles qui pourront être recyclées ensemble ;
- Regrouper les composants à démonter en sous-assemblages ;
- Faciliter l'accès aux composants susceptibles d'être récupérés.

Règle 3 : Réduire les variétés

Pour réduire le coût de désassemblage, il faut réduire les variétés des composants utilisés. Les règles suivantes peuvent être suivies :

- Utiliser des composants standard (les mêmes composants doivent être utilisés dans la conception d'une famille de produits) ;
- Utiliser des fixations standard.

Le but principal de cette optimisation est la minimisation du nombre d'opérations lors du processus de conception. En effet, il est possible de prévoir, au cours de la conception, les composants ou les sous-ensembles qui seront désassemblés. Par

conséquent, la structure du produit doit être développée autour des spécifications du désassemblage de ces composants.

2.4.2.2 Méthodes basées sur l'évaluation

Il s'agit de développer des méthodes d'évaluation et des outils informatiques afin de soutenir la conception des produits en vue de leur désassemblage. Ces outils permettent d'évaluer les impacts de la conception sur le désassemblage et la valorisation des produits. Ils permettent aussi d'identifier les points critiques et de développer des recommandations en vue d'améliorer la désassemblabilité du produit.

Dans les années 90, les constructeurs automobiles comprennent très vite l'importance de l'évaluation combinée du démontage, du broyage et du tri pour la valorisation des produits. Ils définissent ainsi des méthodes permettant de calculer les taux de recyclabilité des pièces, des fonctions et des produits. Ces évaluations sont réalisées selon des critères massiques et elles permettent aux équipes de conception de positionner les pièces et produits par rapport aux objectifs de conception et aux objectifs réglementaires. L'outil **AVF** utilisé dans la méthode développée par Coppens et complétée par Tonnelier pour PSA présente des caractéristiques proches [54] [55] [56].

H. Srinivasan [57] propose une structure d'outil d'aide à la conception. Cet outil doit permettre de déterminer l'efficacité de la conception en vue du désassemblage en tenant compte :

- De données concernant la valorisation (impact des matériaux sur l'environnement, modes de valorisation envisageables,)
- De données concernant la structure du produit (ensemble des composants, structure hiérarchique des composants,).
- Des différents modes de désassemblage envisageables (destructif/non destructif; parallèle/linéaire).

Le premier objectif de l'outil est d'évaluer la désassemblabilité du produit. Les paramètres d'évaluation possibles sont les temps opératoires, le taux de difficulté des opérations, le nombre de changements d'outils.

A partir de la désassemblabilité du produit, un taux de valorisation, qui représente l'efficacité de la conception du point de vue du désassemblage, est déterminé. Suivant le taux obtenu, la structure du produit doit être plus ou moins modifiée. Ces modifications peuvent être réalisées à partir d'un ensemble de règles.

E. Kroll et al [58] proposent une méthode pour évaluer l'aptitude du produit à être facilement désassemblé. La désassemblabilité du produit est évaluée à partir d'un tableau regroupant (1) les composants du produit, (2) les opérations de désassemblage, et (3) les outils. Ces paramètres permettent de noter les difficultés associées à chaque opération.

Pour faciliter le travail, un catalogue d'opérations et d'outils est proposé. La méthode permet alors d'évaluer les difficultés de désassemblage à travers différents paramètres comme les temps opératoires, l'accessibilité, etc. En fonction des résultats, il est possible de proposer des modifications au produit.

Kondo et al [59] montrent une méthode d'évaluation du désassemblage pour le recyclage. Cette méthode a permis de mettre au point un support d'outil, qui permet d'évaluer le désassemblage à partir des données conventionnelles de CAO. Les données de CAO consistent en trois types d'informations : la structure du produit ; la nomenclature des composants (nom, poids, matière, fonction, degré de toxicité) et les détails des liaisons entre les pièces (type de liaison et direction, nombre de liaisons). Le désassemblage est modélisé sous forme d'un arbre, qui permet d'avoir une idée sur le degré de complexité du produit. L'évaluation du désassemblage est basée sur le paramètre " temps " .

Selon C. Rose [60], les données de fin de vie doivent être prises en compte au moment de la conception du produit. Les auteurs proposent alors un outil permettant de prévoir les stratégies de fin de vie et d'évaluer les impacts des décisions des concepteurs sur les stratégies de valorisation. Cet outil s'attache plus à étudier le produit du point de vue de la valorisation que du désassemblage.

Plusieurs outils informatiques d'évaluation du désassemblage pour les produits en fin de vie ont été mis au point. Dans le tableau 2.4, nous avons regroupé les outils de la conception pour le désassemblage, en identifiant pour chaque outil les critères d'évaluation. D'après ce tableau, les différents outils sont essentiellement ciblés pour la génération et l'optimisation des séquences de désassemblage et/ou pour l'évaluation économique du désassemblage. Ces outils sont intéressants dans l'étude du désassemblage, mais le premier problème de ces outils est leur intégration dans la démarche de conception. En réalité ces outils perdent vite de leur importance et sont perçus comme des outils supplémentaires à la conception.

<i>Outils</i>	<i>Laboratoire</i>	<i>Caractéristiques</i>
AMETIDE (A Method for Time Disassembly Estimation)[61]	CGDM (Consortium on Green Design and Manufacturing USA) RENAULT (F) Laboratoire 3S (F)	<ul style="list-style-type: none"> - Optimisation des séquences de désassemblage - Graphe des pénalités en fonction de l'accessibilité des pièces, l'aptitude au contrôle - Plan de macro (process) et micro (produit) désassemblage.
ReGrEd/DisPlay [62]	FAPS (Institute for Manufacturing Automation and Production Systems, D) Institute for Engineering Design, University of Erlangen-Nürnberg (D)	<p>Simulation et calcul des process de désassemblage</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le module de recycling graph Editor (ReGrEd) modélise la structure du produit avec des informations sur le désassemblage et le recyclage - Le module DisPlay calcule le désassemblage optimal (degré, coût)
ReStar [63]	Carnegie Mellon University (USA)	<ul style="list-style-type: none"> - Optimisation du désassemblage des produits par l'évaluation du rapport gains économiques/ coûts de l'opération. - Étude du degré de désassemblage adéquat. - A chaque étape, choix de traitement (réutilisation, recyclage,)
ATROID (Assessment Tool for Recycling Oriented Design) [64]	Technical University of Braunschweig (D) Manufacturing Technology Center (South Korea)	<p>Outil composé de 5 modules :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Niveau de désassemblage du produit - Évaluation par rapport à 30 critères caractérisant le produit et classés en 6 groupes (Structure, Techniques de Fixation, Désassemblage - outils, nombre d'opérations, :, utilisation ultérieure). L'évaluation prenant en compte les différents paramètres ayant une influence sur chaque critère, est relativement complexe (via une formule mathématique adéquate) ; elle aboutit à des valeurs de 0 à 100, comparables pour chaque critère. - Coûts de désassemblage - Temps de désassemblage (permet d'estimer les coûts en fonction du temps nécessaire, de choisir l'outil le plus rapide, de trouver des connexions aisées à désassembler,) - Séquence de désassemblage (ordre de démontage à suivre) : un graphe et une matrice des priorités de démontage peuvent être élaborés.

TAB. 2.4: Logiciels de Design for Disassembly (DfD)[21]

D'après le Tableau 2.4 ci-dessus on remarque que les logiciels les plus connus de DfD (Design for Disassembly) et DfR (Design for Recycling) sont utilisés, non pas au cours de la conception mais en fin de conception pour modéliser les scénarios de désassemblage des produits. Les entreprises pionnières qui utilisent de tels logiciels depuis plusieurs années montrent que leur premier objectif n'était pas lié à la préoccupation environnementale mais tout simplement à l'optimisation de la structure de leurs produits pour faciliter les opérations de réparation ou de maintenance. En réalité, cet objectif rejoint l'environnement puisqu'une réparation facile assurera une plus grande durabilité du produit.

Suite à l'état de l'art, nous constatons qu'il existe différentes approches pour l'évaluation du désassemblage. Ces outils et méthodes d'évaluation sont essentiellement développés pour étudier et analyser la conception détaillée d'un produit (Figure 2.6). De ce fait, l'intégration du désassemblage pour la valorisation porte sur la phase finale de la conception, les outils de désassemblage sont utilisés pour un objectif d'amélioration de la conception actuelle.

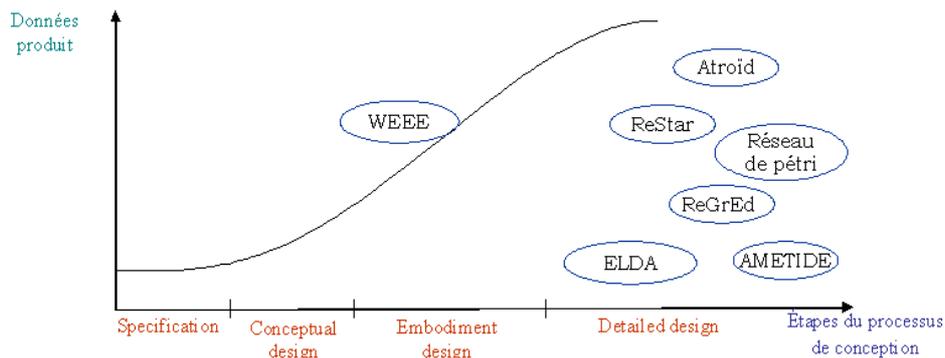


FIG. 2.6: Outils de DfD dans le processus de conception

Plusieurs entreprises estiment qu'un outil distinct perd rapidement de sa valeur puisqu'il doit être utilisé en parallèle avec des outils classiques de CAO. Les logiciels sont donc bien souvent perçus comme des outils supplémentaires au panel déjà impressionnant d'outils de tous types manipulés dans les entreprises. Leur complexité et parfois leur langage inadapté au métier de la conception (nomenclatures différentes, par exemple) les transforment rapidement en outils inutiles.

Les outils d'évaluation de la valorisation en fin de vie sont aujourd'hui peu intégrés lors de la conception de produit car, comme l'affirme Furuhjelm, "*ces aspects sont intangibles et difficiles à comprendre par une équipe de conception*" [65] : il est donc urgent de traduire la recyclabilité en critères concrets et manipulables par les

concepteurs. De nombreux auteurs s'accordent sur la nécessité de développer des outils d'évaluation de la désassemblabilité, en particulier quantitatifs. De telles évaluations doivent néanmoins rester suffisamment simples pour être compréhensibles par l'équipe de conception [66] et suffisamment complètes pour permettre de suivre les performances du produit pendant les revues de conception [11].

Une autre critique que l'on peut émettre à l'encontre de certains logiciels de désassemblage est liée à leur approche trop souvent déconnectée de la réalité économique et industrielle des filières de fin de vie et des contraintes techniques dues aux problèmes d'usure des produits au cours de leur vie, qui n'ont pas été pris en compte au cours de la modélisation des nouveaux produits. Parmi les méthodes d'évaluation, seule celle élaborée par Coppens et Tonnelier est développée afin de pouvoir s'intégrer dans le processus de conception existant dans l'entreprise, en l'occurrence PSA [66].

D'autres grands logiciels se basent uniquement sur l'architecture du produit empruntant une approche géométrique de démontage, où l'on procède à une simulation virtuelle de démontage sans tenir compte des réelles difficultés de démontage d'un produit usagé. Par exemple, la dégradation de certaines liaisons (oxydation, déformation,) augmente la complexité de séparation de deux composants.

Il existe une multitude d'outils d'évaluation du désassemblage pour le recyclage qui peuvent être des outils d'aide à la décision, en matière de recyclage et d'environnement, au cours de la conception du produit. Mais d'autres méthodes peuvent faciliter l'intégration de ces outils au cours de la conception du produit, comme les méthodes organisationnelles : Analyse de la valeur, Ingénierie Concourante, qui sont des méthodes indispensables aux travaux de conception qui intègrent plusieurs contraintes (économiques, techniques, environnementales).

2.4.3 Les phases du processus de la conception

Depuis les années 1960, plusieurs modèles de processus de conception ont été développés. Les modèles comprennent des étapes qui permettent le développement du produit final. Les différences entre les modèles du processus de conception d'un produit sont identifiées à partir des activités incorporées dans chaque phase de conception. Cependant, les contenus des modèles sont plus au moins semblables. Pahl et Beitz, proposent un ensemble exhaustif de tâches génériques de conception [7]. Cet ensemble est décomposé en quatre grandes phases, chacune correspond à un niveau de concrétisation du produit (Figure 2.7) :

- Élaboration du cahier des charges (*Planning and clarifying the task*),

- Formalisation et spécification des principes (*Conceptual design*),
- Conception d'ensemble (*Embodiment design*),
- Conception détaillée (*Detail design*),

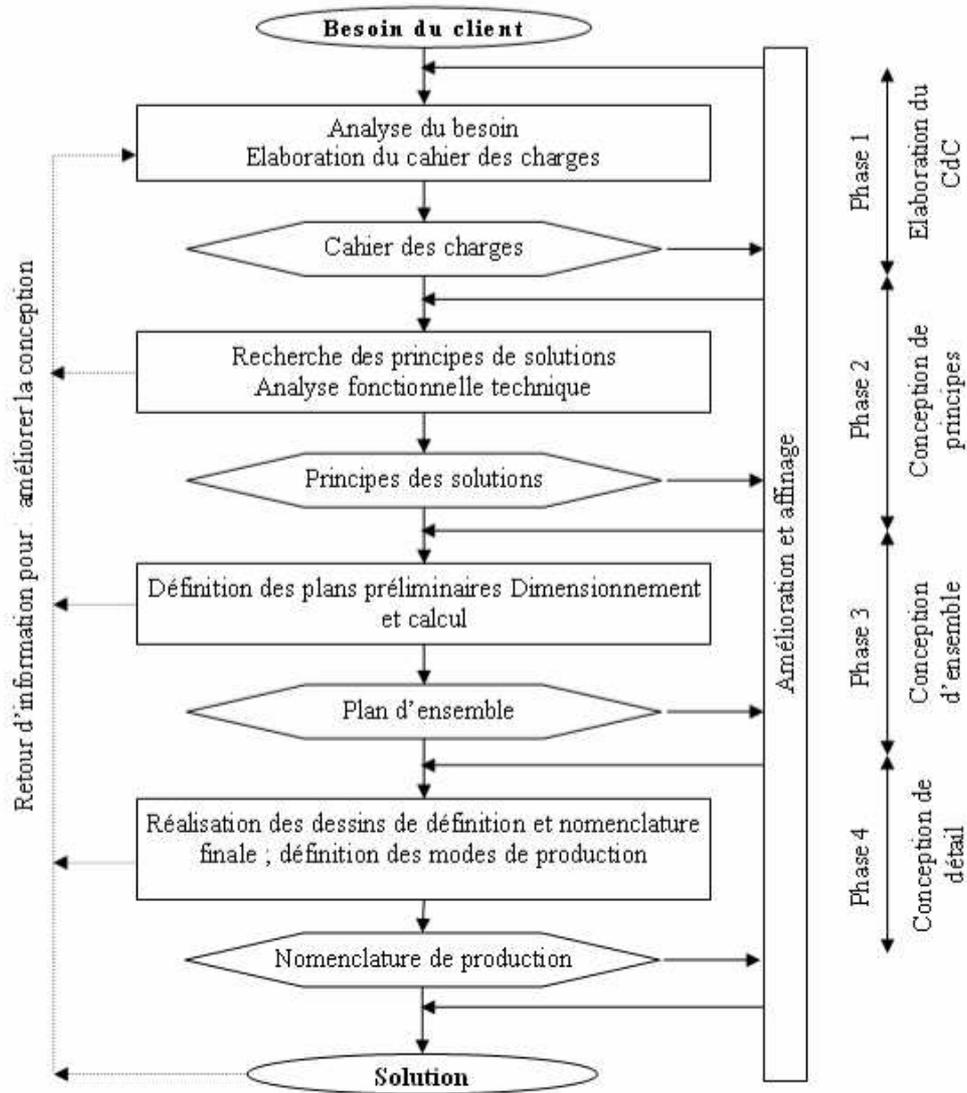


FIG. 2.7: Les phases du processus de conception [7]

L'aspect itératif et dynamique du processus de conception montre que le déroulement des différentes phases n'est pas séquentiel [7]. La conception est une activité fortement itérative. Par exemple, même à un stade avancé du processus de conception, une simple modification du besoin client peut remettre en cause certains choix et calculs déjà validés pendant la phase de spécification des principes.

2.4.3.1 Élaboration du cahier des charges "planning and clarifying the task"

La phase d'élaboration du cahier des charges représente la phase initiale du processus de développement d'un produit. Durant cette phase, dite aussi phase fonctionnelle [67], la tâche du concepteur consiste d'une part, à récolter et analyser les besoins des clients ou du marché et d'autre part, à identifier les différentes contraintes à prendre en compte tout au long du développement de la conception. Ceci inclut des décisions stratégiques, telles que le type de produit à développer et les procédés de fabrication disponibles, les normes et les directives à prendre en compte, le degré de participation des fournisseur dans le développement du produit. Le résultat final de cette phase est une spécification initiale du produit exprimée sous forme d'une liste de fonctions et de caractéristiques que doit remplir le produit, un ensemble de contraintes et éventuellement des objectifs de coût, de délai de mise sur le marché et de respect de l'environnement.

2.4.3.2 Conception de principe "Conceptual design"

Cette étape permet d'affiner le contenu de la première phase, ce qui revient à structurer, hiérarchiser et caractériser les différents besoins fonctionnels exprimés. Durant cette phase conceptuelle, le concepteur va chercher et évaluer des principes physiques envisageables et des pistes de solutions qui correspondent aux besoins fonctionnels identifiés auparavant. Ces principes de solutions correspondent, le plus souvent, à un ensemble de fonctions techniques ou à des schémas et concepts techniques.

C'est au terme de cette phase que naissent les premières représentations graphiques et maquettes du produit. Durant cette phase, le concepteur peut être amené à proposer et développer sa propre solution soit quand elle n'existe pas, soit pour des raisons d'innovation.

2.4.3.3 Conception d'ensemble "*Embodiment design*"

Durant cette phase, les concepts associés au produit sont développés par la définition de la description technique complète et de la structure finale du produit. Le concepteur élabore la structure physique du produit par le choix, le dimensionnement et l'agencement d'un ensemble de composants. La solution produite se raffine concrètement par des représentations et des vues géométriques d'ensemble de plus en plus évoluées, par une nomenclature de composants et par une évaluation des coûts. Les concepteurs évaluent souvent plusieurs solutions possibles de structure et d'agencement (architectures) parmi lesquelles sera choisie la plus satisfaisante, suivant des critères économiques et techniques. Enfin, cette variante fera l'objet d'une conception détaillée.

2.4.3.4 Conception détaillée "*Detail design*"

Elle représente la phase finale du processus de conception. Le concepteur définit complètement et en détail chaque composant sélectionné et validé en spécifiant ses dimensions, ses caractéristiques physiques (matériaux), ses schémas et plans détaillés, son coût et une description de son processus d'industrialisation (fabrication, assemblage, distribution). Au terme de cette phase, le produit est entièrement décrit de telle sorte que les informations générées puissent être exploitées par tous les acteurs. Sa définition finale comprend toutes les informations relatives au produit (schémas d'ensemble, plans des composants et pièces, nomenclature détaillée, agencement des composants et évaluation économique) et celles qui décrivent ses modes d'industrialisation (technologie de fabrication, gammes et outils).

Au terme de tout processus de conception, il est souvent question d'une phase de vérification et de validation des résultats. Elle permet en effet de vérifier si le produit répond bien aux spécifications du cahier des charges. Cette phase se traduit souvent par la réalisation d'un prototype physique [8]. Il est utilisé pour valider la solution avec le client et éventuellement réaliser certains essais. Néanmoins, cette pratique tend à disparaître du fait des coûts et des délais qu'elle engendre. Avec le développement de la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et de la simulation numérique, le maquetage physique est remplacé par le maquetage numérique.

2.4.4 Bilan et positionnement

Selon Brown [68], le point de départ de l'activité de conception peut se situer à n'importe quel niveau d'abstraction du produit (idée, conception du principe), et le point final peut se trouver à n'importe quel niveau

de spécification du produit. La complexité et la durée du processus de conception dépendent de l'écart entre les deux niveaux d'abstraction et de spécification. Ainsi, un processus complet de conception, où toutes les phases détaillées précédemment sont à développer, représente le cas extrême.

Les problèmes de conception sont souvent classifiés suivant la présence ou non d'une ou plusieurs des phases décrites précédemment.

Bien que cette décomposition résulte principalement des différents travaux menés sur des processus de conception issus de l'ingénierie mécanique, elle reste de mise pour décrire les processus de conception dans d'autres domaines, en particulier le nôtre, traitant de la conception des produits électroménagers (mécanique, électrique et l'électronique).

Dans le cadre de notre étude, nous n'allons pas spécifier toutes les phases du processus de conception. Nous nous intéressons particulièrement à ce que nous appelons le processus de préconception qui regroupe les trois premières phases pour traiter à la fois le désassemblage pour la fin de vie et aider le concepteur dans ses choix technologiques.

2.5 Classification des types de conception

Dans la plupart des travaux menés sur le thème de la conception de produits, les auteurs ont proposé une typologie des problèmes de conception [69].

Une classification retenue par beaucoup d'auteurs et générique à la plupart des domaines d'application de la conception fait ressortir deux grandes classes :

- la conception prédéfinie (routinière), et
- la conception nouvelle (non routinière).

La conception nouvelle se décompose en deux grandes sous-classes :

- la conception innovante,
- la conception créative.

Cette typologie est adoptée par beaucoup d'auteurs parce qu'elle met en avant le degré de complétude de la connaissance relative au produit et au processus de conception. La Figure 2.8 montre ces types de conception avec les types de produits associés.

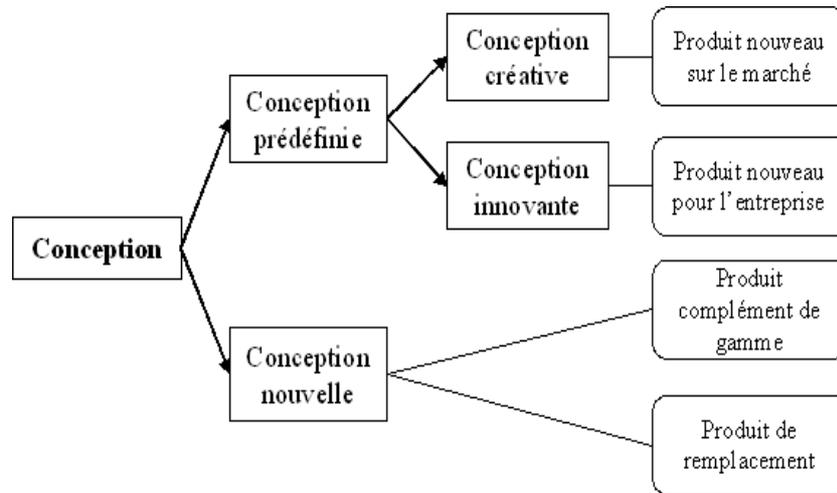


FIG. 2.8: Types de conception et nature de produits

2.5.1 Conception routinière ou prédéfinie

Toutes les connaissances à mettre en oeuvre sont totalement disponibles et identifiées. De plus, les stratégies de conception sont globalement connues à l'avance par le concepteur. Dans ce cas, le rôle du concepteur consiste à justifier ses choix, à retenir ou non telle ou telle solution, et dans d'autres cas, à améliorer ou à modifier des solutions antérieures qui vérifient un ensemble de contraintes prédéfinies. La conception routinière ne permet qu'une instanciation ou modification des valeurs des paramètres qui caractérisent le produit. La conception routinière, appelée également reconception, représente environ 80 % des activités de conception mécanique [70] [71].

Dans ce cadre, bien que le concepteur connaisse l'espace des solutions potentielles (les caractéristiques et les attributs à instancier sont connus à l'avance), la recherche d'une solution spécifique peut s'avérer complexe et coûteuse du fait de la taille de l'espace des solutions ou du fait de la difficulté de mesurer les conséquences d'un choix ou d'une modification. La représentation de la Figure 2.9 proposée par [8] montre graphiquement l'espace des conceptions routinières par rapport à l'espace de toutes les solutions possibles.

2.5.2 Conception innovante

La conception innovante porte sur un produit connu. L'expression du besoin, les technologies à utiliser sont souvent connues à l'avance et sont clairement définies

mais les stratégies de conception restent à identifier [72]. La connaissance d'une innovation sur un produit correspond généralement à un besoin non encore satisfait exprimé par des clients.

Durant un projet d'innovation, le concepteur possède plus d'autonomie d'intervention et un espace de recherche de solutions plus large (Figure 2.9). Mais pour explorer cet espace, les concepteurs s'engagent dans une activité importante de recherche et de développement avec tous les risques que cela suppose. Le résultat d'une conception innovante est un produit familier à l'utilisateur mais avec un aspect nouveau résultant des nouvelles valeurs des attributs et des caractéristiques [8].

2.5.3 Conception créative

La conception créative porte sur un produit inconnu. Elle intervient quand il n'existe aucune solution produit a priori et que toutes les connaissances relatives au produit et au processus de conception sont à spécifier. Le concepteur prend en charge également la réalisation du cahier des charges. Il intervient dans la définition des nouvelles fonctions et des nouveaux paramètres du nouveau produit. Les projets de conception créative favorisent l'émergence de nouvelles idées et de nouvelles technologies [73]. Par conséquent, la création de nouveaux produits nécessite beaucoup d'intuition et d'imagination. Néanmoins, l'espace de recherche des solutions n'est pas très contraint. C'est un prolongement de l'espace des solutions potentielles en relâchant par exemple certaines contraintes (Figure 2.9) [8].

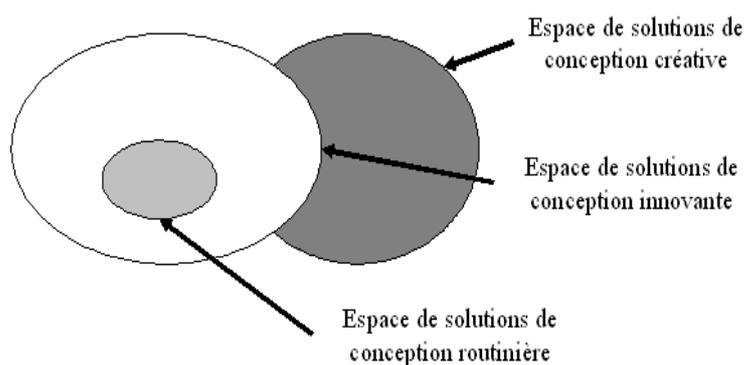


FIG. 2.9: Espace des solutions de conception routinière, innovante et créative [8]

Pour illustrer l'intégration de ces différentes classes de problèmes de conception selon le niveau de connaissances disponibles, [74] proposent un schéma global de conception (Figure 2.10). Un processus de conception créatif devient innovant lorsque

les fonctions du produit ont été définies et ce processus devient routinier lorsque les choix de principes technologiques ont été effectués.

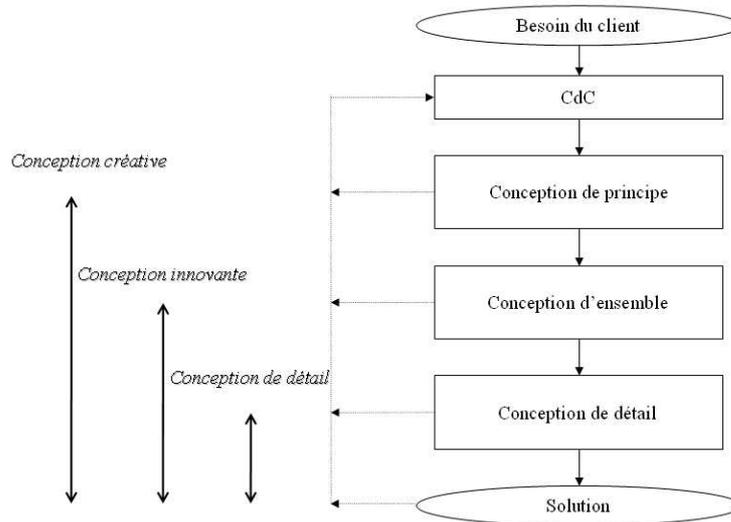


FIG. 2.10: Classification de type de la conception

D'autres typologies moins partagées existent également dans la littérature. Dans leur approche systématique de conception, [7] ont développé une typologie selon le contexte de conception. La conception nouvelle correspond à des tâches de conception pour lesquelles de nouveaux principes sont recherchés et de nouvelles solutions sont développées. La conception adaptée exploite les principes et les solutions déjà établis et l'effort de conception consiste à adapter ces principes et solutions aux nouvelles contraintes et aux nouveaux besoins spécifiques. La conception par variantes consiste, à partir d'une conception existante, à définir un produit par de simples variations des dimensions ou des agencements des composants. [75] [67] proposent des typologies plus détaillées des problèmes de conception. En effet, ils considèrent certaines phases du processus comme des classes de problèmes de conception. Les différentes classes sont identifiées sur plusieurs axes : le niveau de connaissance disponible ou le niveau d'abstraction du produit et de spécification. Les auteurs parlent alors de conception préliminaire, conceptuelle, fonctionnelle, innovante, créative, routinière, d'ensemble, paramétrique, détaillée, non-routinière, de configuration et de reconception.

2.5.4 Bilan et positionnement

Contrairement à la conception créative et innovante, l'amélioration de la désassemblabilité dans un processus routinier engendre une propagation de modifications. Par rapport à cette classification, nous nous intéressons à la conception innovante. Comme nous l'avons précisé précédemment, nous nous intéressons à la phase de préconception là où le concepteur a le plus d'autonomie d'intervention et un espace de recherche de solutions plus large. Il est à noter également que, dans cette phase, l'ensemble des contraintes peuvent être facilement prises en compte. Le processus de conception s'appuie sur la génération et l'adaptation des connaissances aux besoins attendus par le produit. Ces connaissances sont ainsi capables de définir une famille de produits répondant aux mêmes besoins.

2.6 Problématique spécifique de la thèse

Très souvent, dans le cadre du développement durable, les entreprises engagent de plus en plus tôt des experts environnementaux aux côtés d'acteurs de marketing. Leurs travaux consistent à donner, dans la phase de préconception, les informations décisives sur les législations environnementales et les nouvelles tendances du marché. Les experts environnementaux identifient les critères d'évaluation pour le traitement en fin de vie et imposent les contraintes qui cernent le cadre des nouveaux concepts à développer. Ensuite, les concepteurs et l'expert recyclage concrétisent les concepts au niveau des attributs (structure, matières, liaisons, etc.).

La phase préconception est cruciale, en particulier, lors de la conception créative et innovante ou lors de la reconception complète d'un produit existant. Cette phase est généralement caractérisée par un manque d'informations et de formalisme de représentation d'une idée floue à un concept concret. Wang et al [76] estiment que la phase de préconception est la plus importante tâche dans le cycle de développement du produit, mais elle est la plus difficile à réaliser. Les connaissances sur les besoins et les contraintes de la conception sont souvent imprécises et incomplètes. L'interdisciplinarité de la phase de préconception demande souvent la collaboration entre les différents acteurs. Ces derniers représentent l'ensemble du cycle de vie du produit (concepteurs, clients, SAV, recycleurs, etc.). Cette phase peut avoir des conséquences sur la fin de vie du produit si l'expertise de valorisation n'a pas été engagée. En effet, l'impact de la prise de décision au cours de cette phase est très important pour la maturation d'un projet de conception. Comme le montre la Figure 2.11, la plus grande opportunité pour un produit, subsiste dans la phase préliminaire de sa conception. Le concept généré au cours de cette phase affecte le choix et la définition des attributs du produit (géométrie, matériaux et liaisons). Dans la conception détaillée, il est difficile, voire même impossible, de rattraper ou de corriger les défauts d'un mauvais concept formulé dans la phase de préconception [7].

Actuellement, les initiatives d'intégration des contraintes de fin de vie ne sont pas formalisées de manière à aider le concepteur à proposer des attributs conformes aux exigences de fin de vie. Nous constatons aussi qu'il y a une rupture entre la phase de la conceptualisation et celle de la concrétisation. Toutefois dans le cadre de notre recherche, ce lien est très important pour que le produit soit conforme aux règles législatives et au concept du " *Recyclage Noble* ". Dans une approche de conception pour le désassemblage on estime que l'intégration du désassemblage demande la formalisation d'un lien entre les données recueillies en amont (législatives fin de vie, économiques, techniques, etc.) et les solutions en terme d'attributs produit. Etant donné aussi que le travail de la conception est un processus de travail pluridisci-

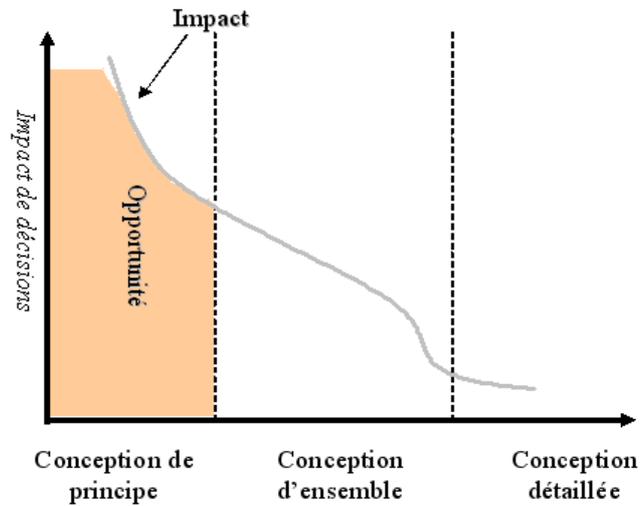


FIG. 2.11: Opportunité dans la phase de la conception de principe

plinaire, des méthodes et des outils sont nécessaires pour faciliter le dialogue et la communication interdisciplinaire. Par conséquent, le premier problème d'évaluation du désassemblage à la phase de conceptualisation, réside dans le manque de modes de représentations, exploitables par le concepteur en tant qu'émetteur de message dans la phase de conceptualisation.

Comment le désassemblage pour la valorisation peut-il se modéliser dans la phase de préconception ? Quelle démarche et modèle faut-il développer ? Ces deux questions nous poussent à étudier premièrement, le mode de représentation de désassemblage d'un produit dans sa phase de préconception et deuxièmement, le repositionnement de la problématique du désassemblage en fin de vie dans la démarche de conception. Le mode de représentation dans la phase de préconception est, selon Donald A. Schön [77] une représentation graphique (image) ou autre (plan, programme, matrice) du concept avant que le résultat final de la conception globale ou du projet de développement soit défini.

Notre problématique est de proposer une démarche de préconception de produit dans le cadre d'une approche de conception pour le désassemblage. La démarche de préconception doit se fonder sur un processus de pensée [78] : identification du besoin, analyse, synthèse et validation. Si le résultat de la synthèse de cette phase est une liste de concepts, ils devraient être validés sur des critères de désassemblage et de valorisation avant de passer à la définition détaillée de la conception.

2.7 Conclusion

L'intervention du désassemblage pour le recyclage n'est constituée que de tests globaux du désassemblage sur un produit quasiment fini, ceci pour améliorer certains paramètres lors d'un processus de reconception du produit. Bien évidemment cette intervention tardive ne peut apporter une contribution suffisante pour améliorer la désassemblabilité et la recyclabilité d'un produit lorsqu'il atteint la phase de fin de vie, car à ce stade là, il reste peu de possibilités de modifications. Par conséquent, toute modification de la conception du produit à ce stade est coûteuse.

Il est clair que l'intégration des contraintes de désassemblage devrait être portée plus en amont pour que cette activité rende le produit vraiment démontable et recyclable. L'espace de l'intégration des contraintes de fin de vie dans le processus de la conception s'élargit : ces contraintes peuvent être intégrées avant que le produit soit 100% spécifié. Les méthodes et outils de DfD ne vont plus se limiter à tester pour détecter les points faibles sur un produit fini. La démarche commence par l'élaboration d'un cahier des charges spécifiant les exigences de traitement du produit en fin de vie dans le but d'aider les concepteurs dans leurs choix. Le concepteur développe donc son produit et l'évalue d'une manière itérative, jusqu'à ce que le produit satisfasse un certain optimum entre les contraintes de désassemblage et les contraintes classiques de la conception. Un nouveau besoin d'outil apparaît dans la conception pour le désassemblage : une méthodologie qui permet l'intégration du désassemblage et la fin de vie du produit encore plus tôt dans la phase de développement de préconcepts.

Dans ce contexte, l'anticipation des problèmes de fin de vie du produit devient prépondérante. Le concepteur doit proposer de nouveaux concepts (structures, liaisons, matières) conformes aux législations et au concept de recyclage noble. L'approche d'intégration du désassemblage prend donc une dimension innovante dans laquelle la spécification du concept produit du point de vue recyclage est abordée dès la phase de préconception.

Chapitre 3

Observation du processus de conception *Etude de terrain*

Sommaire

3.1	Introduction	76
3.2	Conception pour le désassemblage chez TEFAL : Etude du terrain	77
3.2.1	Démarche de conception pour le recyclage chez TEFAL	78
3.2.2	Analyse de quelques aspects du processus de conception pour le recyclage de TEFAL	80
3.2.3	Bilan	90
3.3	Reconstruction : formalisation de la phase conceptuelle de la conception	90
3.3.1	L'analyse fonctionnelle pour la définition du produit	90
3.3.2	Caractérisation du produit	93
3.3.2.1	Functional Analysis System Technique FAST	95
3.3.2.2	Le Bloc Diagramme Fonctionnel BDF	98
3.3.3	Caractérisation du désassemblage du produit en cours de conception	102
3.3.3.1	Application de l'outil DFA à l'évaluation du désas- semblage	103
3.3.3.2	Application de la méthode MTM à l'évaluation du désassemblage	104
3.3.3.3	Bilan : résultats	105
3.4	Conclusion	106

3.1 Introduction

L'approche de conception pour le désassemblage vise à l'amélioration de la recyclabilité des nouveaux produits au cours de leur développement. Cependant, les outils actuels de conception pour le désassemblage, dans lesquels s'insèrent les contraintes de valorisation, tendent vers l'identification des points faibles de la fin de vie d'un produit et ce, sans prendre en compte l'environnement réel d'un projet de conception. A la lumière des approches relatives à l'environnement de conception et des méthodes d'évaluation mise en œuvre par les outils du désassemblage, le constat est sans appel : aucun outil actuel de désassemblage pour la fin de vie ne peut s'intégrer d'une façon correcte et efficace dans le processus de conception. Un paradoxe est donc établi entre des outils recommandant des modifications sur un produit possédant une définition détaillée, qui implique un processus de re-conception, et des méthodes de conception visant à diminuer la durée et les coûts du développement.

La méthodologie d'évaluation du désassemblage avec les outils actuels est encore en cours de développement et de validation dans certains laboratoires de recherche. Afin de mesurer l'intérêt de cette méthodologie, nous avons travaillé en collaboration avec TEFAL. Le travail a été organisé sous forme de réunions au sein desquelles nous avons joué le rôle d'expert du désassemblage pour la valorisation.

Répondre aux questions industrielles sur le désassemblage, compte tenu des scénarios de valorisation, nous amène à réfléchir aux moyens et méthodes pour y parvenir. Cela implique la définition d'une démarche de travail, à la fois logique et continue, servant de guide pour définir une réponse adéquate aux besoins et attentes de l'industrie.

Nous avons abordé le problème suivant deux axes directeurs. Le premier axe a consisté à préciser le besoin industriel à travers des réunions de travail. Plusieurs questions pertinentes ont été posées et ont conduit à proposer une démarche de construction d'un modèle d'intégration du désassemblage dans le processus industriel de conception. Le deuxième axe a consisté à identifier les outils d'aide à la conception qui pouvaient être exploités dans une approche de conception pour le désassemblage. Ceci nous a amené à définir les différents attributs d'un modèle de données minimales utilisables dès le niveau conceptuel de la conception.

3.2 Conception pour le désassemblage chez TEFAL : Etude du terrain

Au cours du chapitre précédent nous avons conclu que l'évaluation du désassemblage au cours du processus de la conception a pour objectif d'identifier les voix d'amélioration de la valorisation du produit. Ces voix d'amélioration se traduisent à travers la minimisation du coût et la maximisation du taux de la matière récupérée. Cependant, actuellement, la méthode et l'outil d'évaluation utilisés chez TEFAL n'abordent pas la contrainte de la recyclabilité des produits avant que la plupart des paramètres de la conception soient définis, en effet :

- La méthode suivie par TEFAL est basée sur l'amélioration par la re-conception des produits existants. Ces améliorations dépendent essentiellement des expériences et des connaissances non formalisées des concepteurs.
- La démarche actuelle de TEFAL peut être intéressante seulement si le nombre de modifications reste restreint. En effet, l'implémentation de ces modifications peut engendrer la remise en question totale du produit.

L'amélioration du désassemblage dans le processus de la conception dépend des paramètres de la conception et des règles stratégiques issues de difficultés rencontrées par les chaînes de démantèlement des produits en fin de vie [59]. En effet, il existe une forte relation entre le choix d'une solution de conception et l'aptitude du produit à être désassemblé. Pour améliorer les caractéristiques de désassemblage d'un produit, nous pensons qu'il est important d'identifier les étapes dans lesquelles nous sommes capables d'influer sur les paramètres de conception pour atteindre l'objectif du désassemblage facile. Notre challenge est donc de définir un modèle des données minimales pour le désassemblage. En effet, ce modèle sera ensuite enrichi au fur et à mesure de l'évolution de la conception jusqu'à la solution finale.

Dans la section suivante, nous présenterons la méthodologie que nous avons menée pour identifier les données minimales (le modèle minimal) et la phase à partir de laquelle le concepteur peut implémenter le modèle dans sa démarche de conception.

3.2.1 Démarche de conception pour le recyclage chez TEFAL

Chez TEFAL, le rôle d'identification du besoin actuel du marché est tenu par le service marketing. Leur objectif est de donner des informations précises sur la population visée ainsi que les nouvelles tendances du marché auquel le produit va s'adresser. L'acteur de conception et le service marketing identifient alors à partir d'un produit déjà existant les spécifications du nouveau produit à développer. A ce stade, ces dernières peuvent être générées par un travail de groupe. Ensuite, les concepteurs concrétisent les spécifications en proposant un prototype qui sera l'objet d'analyses, d'évaluations et d'éventuelles modifications.

Dans ce type de pratique nous constatons une rupture entre la phase de spécification et celle de concrétisation du produit (*phase de conception détaillée*). Dans ce cadre de conception pour le désassemblage des PFV, une question se pose : *comment assurer que les attributs du produit correspondent aux spécifications établies par le marketing et aux contraintes de valorisation en fin de vie ?* Cette phase de concrétisation est la clé d'adaptation des solutions technologiques aux spécifications fonctionnelles et aux traitements en fin de vie. Cette phase requiert donc une bonne communication entre les acteurs.

Dans le cas du développement des appareils qui respectent les lois de l'environnement, c'est-à-dire lorsque le facteur de valorisation du produit est décisif sur l'entreprise (exemple taxation de valorisation que les entreprises peuvent être obligées de payer pour chaque produit mis sur le marché), la participation de l'expert pour la valorisation en fin de vie doit se pratiquer le plus en amont possible du processus de conception. Cela exige de faire le lien entre les données recueillies en amont (données fonctionnelles, concepts, législation, etc.) et les solutions retenues au niveau du produit. D'autre part, un travail en collaboration doit être mené entre l'expert de valorisation et les autres acteurs de la conception.

Comme cela a été souligné, le processus de TEFAL n'a pas de formalisme pour garder une traçabilité des données des différentes phases de conception. Le travail de conception collectif et pluridisciplinaire n'est possible qu'après la définition détaillée du produit (composants, matériaux, fixations etc.) et se traduit alors plus en une phase d'évaluation collective du produit. Pour animer le travail collectif avec les experts de valorisation, il est nécessaire d'utiliser des méthodes et des outils que nous présenterons dans la section 3.2.2, ceci afin de faciliter le dialogue et la communication entre les acteurs ayant des objectifs différents et souvent contradictoires.

Nous nous apercevons que dans la pratique actuelle de TEFAL, les résultats d'étude de besoin et d'analyse ne sont pas formalisés de manière à aider l'acteur

recyclage et le concepteur à définir des attributs conformes aux résultats obtenus par l'évaluation. Nous suggérons que quand l'expert recyclage participe activement à la phase conceptuelle de la conception, il puisse communiquer avec les autres acteurs tout en s'appuyant sur des données concrètes. Pourtant, cette phase est caractérisée par un manque de moyen de formalisation. Dans la littérature, ces moyens sont plus connus sous le nom de représentations intermédiaires et servent de support de travail collaboratif entre les différents acteurs.

Le mode de formalisation avec lequel TEFAL a l'habitude de travailler est le prototype. Le prototype est " *un des premiers appareils d'un type déterminé et qui servira de modèle aux appareils de même type qu'on construira par la suite* " [Site granddictionnaire.com][79].

Le prototype de TEFAL existe sous forme de maquette physique avec toutes ses caractéristiques techniques. Cette maquette présente des avantages : elle fournit des données compréhensibles par tous les acteurs de conception y compris par l'expert recyclage. Il est donc en adéquation avec les activités traditionnelles de l'intégration des contraintes de désassemblage des PFV.

Dans la phase conceptuelle des produits innovateurs, en raison du manque de données, le prototype ne peut pas être constitué. A ce stade il s'agit d'une communication entre les concepteurs et les acteurs du marketing et non entre les concepteurs et les experts du recyclage. Toutefois, intégrer le désassemblage en phase conceptuelle nécessite un minimum de données. Notre question est donc : *quels formalismes en phase de conception conceptuelle permettront à l'expert recyclage d'intervenir et de communiquer avec les autres acteurs de conception ?*

Dans le domaine de la conception, nous distinguons plusieurs méthodes de représentation intermédiaire. Ces représentations facilitent la transcription de l'évolution de la définition de conception et favorisent la communication entre les différents acteurs. A travers ce type de représentation, les acteurs peuvent établir un ensemble de nouveaux concepts sans préciser les attributs produits, mais plutôt en décrivant des liens entre ce qui est envisagé par les concepteurs et l'expert recyclage, et ce qui va être nouveau dans le concept.

Ensuite, nous pensons qu'une représentation intermédiaire du produit peut être considérée comme une source de données minimales pour l'évaluation du désassemblage et du recyclage. Nous parlons ici de la traduction de l'analyse fonctionnelle en alternative de désassemblage. Une modélisation fonctionnelle peut être définie suivant le rôle de l'acteur :

- *Système* : les caractéristiques techniques requises pour réaliser la fonction principale,
- *Technique* : les solutions technologiques sélectionnées suivant les caractéristiques techniques requises,
- *Désassemblage* : les composants à désassembler ainsi que les liaisons à séparer,
- *Valorisation* : la durée de vie du produit et le taux de la masse totale du produit qui peut être valorisable (composants potentiellement valorisables : réutilisables, récupération de la matière, récupération énergétique.)

Ce type de collaboration précoce basé sur des représentations intermédiaires n'existe pas encore pour l'expert de recyclage.

En effet, comme nous l'avons signalé auparavant, l'intervention de l'expert recyclage au plus tôt dans le processus de conception nécessite la définition de l'ensemble des données minimales pouvant être exploitées pour des investigations concernant le désassemblage en vue du recyclage. Pour définir cet ensemble et pour identifier le niveau auquel les premiers choix concernant le désassemblage pourraient être faits, nous avons mené des études analytiques sur des produits existants. La démarche de cette étude se résume en une reconstruction du processus de développement du produit en utilisant les outils d'analyse fonctionnelle. A côté de ces outils nous avons essayé de tirer une définition du désassemblage et de la valorisation. Une validation du niveau d'intégration des contraintes de valorisation a été effectuée à chaque niveau d'abstraction.

3.2.2 Analyse de quelques aspects du processus de conception pour le recyclage de TEFAL

Le groupe TEFAL fabrique toute une gamme de petits appareils électroménagers et d'accessoires de cuisine. L'unité "TEFAL pesage" fabrique des balances ainsi que, à partir des compétences construites par son personnel, des produits intégrant de l'électronique notamment pour la puériculture. Confrontés aux nouvelles directives européennes (DEEE), les acteurs de TEFAL ont mis au point un système de management environnemental dans le processus de conception et de production de leurs nouveaux produits. Ce système a permis de passer d'un modèle centré sur les besoins du client à un modèle plus large qui tient compte des soucis environnementaux (Figure 3.1).

3.2. Conception pour le désassemblage chez TEFAL : Etude du terrain

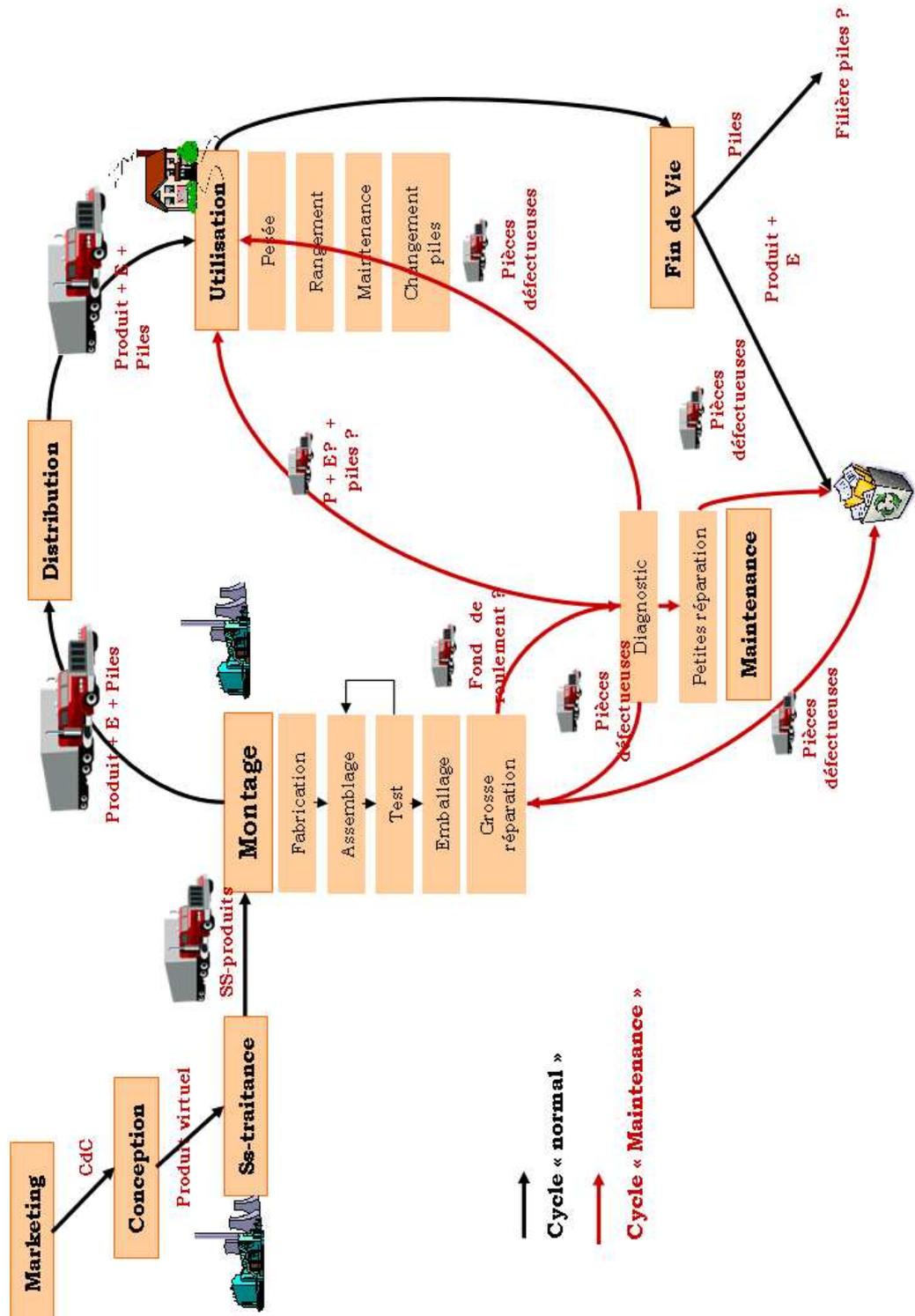


FIG. 3.1: Cycle de vie des produits TEFAL

Le produit qui nous concerne dans notre expérimentation est un pèse personne à affichage digital (Figure 3.2). Cette configuration de produit, constituée de 4 capteurs fixés sur une base rigide, a été réalisée en accord avec les designers qui souhaitaient élargir la base du plateau de pesée. En effet, l'ancien concept, constitué d'un unique capteur central, ne permettait pas de conserver une bonne fiabilité des mesures. Aujourd'hui, ce concept à 4 capteurs n'est pas remis en cause, mais l'équipe de développement souhaite l'optimiser tout en anticipant les directives des futures normes sur l'environnement. Cependant, l'entreprise a eu besoin de connaissances et d'expertises sur les filières de valorisation et sur la signification de la directive. Pour cela, l'équipe de conception TEFAL fut convaincue par l'engagement des experts environnementaux dans le processus de développement. C'est ce rôle que nous avons tenu au cours de nos différentes interventions chez TEFAL, qui avaient également comme objectif de comprendre leur mode de fonctionnement afin de proposer une démarche et un modèle pouvant favoriser la prise en compte de la fin de vie de leurs produits.

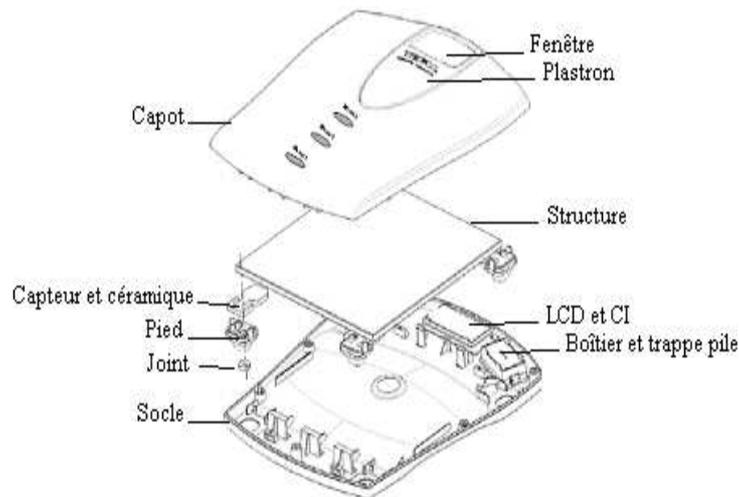


FIG. 3.2: Les constituants du pèse-personne à quatre capteurs

L'approche menée pour le développement de la démarche et du modèle de désassemblage est une approche terrain, elle s'attache à prendre en compte l'ensemble des contraintes industrielles et des attentes législatives des PFV. Dans cette perspective, une étude des besoins et des attentes législatives (DEEE) spécifiques au contexte industriel a été menée, pour laquelle un travail collaboratif a été organisé avec des acteurs industriels. Ceci nous a permis d'observer la réelle situation de fonctionnement des activités de conception et d'identifier, dans un environnement

industriel, les points essentiels sur lesquels nous pouvons agir dans l'objectif de faciliter le désassemblage au cours de la conception. Ce travail a été organisé sous forme de réunions avec le groupe TEFAL et plus particulièrement avec le département "TEFAL pesage". L'objectif de ces réunions était d'améliorer la désassemblabilité et la recyclabilité de leurs produits. Ces réunions ont été suivies par :

- Le responsable R&D, le responsable qualité (qui a reçu une formation en environnement), le projeteur et ponctuellement les responsables de la production, des essais, etc.. A noter que dans le cadre de ce projet, interviennent essentiellement des ingénieurs produits, sans contribution directe d'acteurs du marketing.
- Deux experts en environnement et trois experts dans le domaine de la conception intégrée, qui ont pour objectif de produire des méthodes et des outils d'aide à la conception en prenant en compte des contraintes propres à l'environnement.

Il s'agit donc d'une organisation de conception classique pour cette entreprise, à laquelle s'est ajoutée une compétence environnementale. A noter que la formation du responsable qualité pour la prise en compte de l'environnement de l'entreprise témoigne d'une réelle volonté d'intégration durable de l'environnement dans l'entreprise.

Dans un premier temps, le groupe des experts extérieurs à l'entreprise a cherché à collecter un maximum d'informations afin de comprendre les choix de conception actuels au niveau du produit et de son processus de fabrication. Trois rencontres ont ainsi été organisées afin d'identifier les contraintes issues des fournisseurs, des essais, de la fabrication, de la distribution. Il s'agissait également ici d'identifier les outils et méthodes de travail actuels dans l'entreprise.

Dans un deuxième temps, trois réunions orientées "environnement" ont été organisées alors qu'en parallèle les concepteurs de chez Tefal faisaient évoluer le produit. Une première réunion a permis d'évaluer le premier prototype proposé par les concepteurs avec l'ensemble des membres du groupe projet. Lors de cette réunion, le groupe projet a pu utiliser un outil interne à l'entreprise afin d'évaluer le taux de recyclabilité du produit et mettre en avant les priorités d'étude. L'outil développé par un étudiant en environnement de l'ENSAM Chambéry [80]. Cet outil qui permet de s'intéresser à différents aspects liés à la fin de vie des produits (dépollution, qualité de broyage, désassemblage, valorisation), se présente sous la forme d'une fiche au format Excel (Figure 3.3).

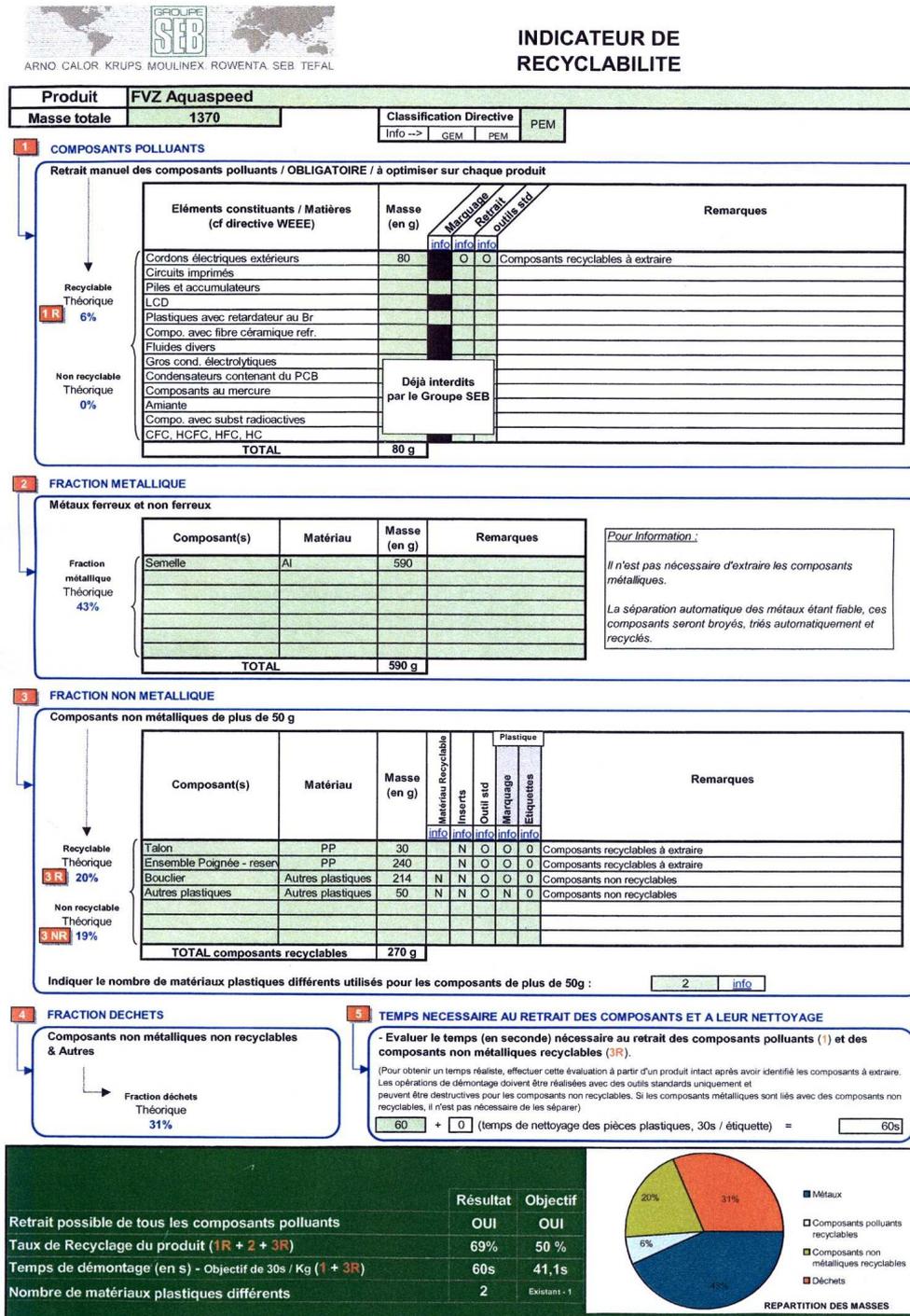


FIG. 3.3: Outil d'évaluation du taux de recyclabilité des produits TEFAL

L'outil propose une évaluation basée sur la connaissance du produit fini, il est donc utilisé dans les phases d'études détaillées du projet de conception. Les données de base sont la nomenclature du produit, la matière et la masse des pièces. Une fois ces éléments saisis, il s'agit de renseigner les niveaux de plusieurs critères qui, dans l'outil initial, ont été définis de la manière suivante :

- *L'Indice de Dépollution (ID)* : critère d'aptitude du produit à être dépollué
- *La Qualité du Broyé (QB)* : critère qualité de broyage qui permet d'évaluer le produit en fonction de la compatibilité de ses matériaux et de leur séparabilité,
- *Le Taux de Désassemblage (TD)* : critère pour évaluer la capacité de chaque composant à être désassemblé à partir d'un indice exprimant, le temps mis pour le désassembler et la méthode de désassemblage utilisée,
- *Le Taux de Valorisation (TV)* : critère pour évaluer la capacité d'un composant à être valorisé suivant différents scénarios de fin de vie,
- *Le marquage (M)* : critère indique si le composant comporte un symbole spécifique précisant sa composition.

Chaque critère est exprimé sur une échelle de notation préétablie, sous forme de fiche, afin que chaque acteur de conception puisse y faire référence pour donner une note à chacun de ces critères. Une fois les différentes notations saisies, un algorithme de calcul mis en place dans l'outil permet de calculer le taux de matériaux recyclable par rapport au produit. Ce taux de recyclage obtenu permet alors de se situer par rapport à la future norme qui préconise un taux global du produit recyclable de 80%.

Les deux réunions suivantes avaient pour objectif d'évaluer les prototypes mis en place jusqu'à l'obtention d'une solution acceptable par l'ensemble du groupe projet. Nous avons alors pu constater que l'évolution du produit s'est construite de manière itérative : les concepteurs font évoluer le produit dans un registre " Design For Environment " et le groupe de travail évalue ponctuellement. Nous mettons alors en évidence le rôle essentiel de l'expert environnement au sein du projet et la nécessité de sa réelle intégration au sein du groupe.

L'intérêt de cet outil est qu'il représente un support de travail, autour duquel les différents acteurs de conception et les experts environnementaux évaluent et étudient les choix de conception et leur conformité aux contraintes de valorisation des produits en fin de vie. La représentation proposée a permis aux différents membres du groupe de s'approprier les différents critères, d'être un support de médiation,

d'anticipation et de questionnement. Les acteurs ont ainsi été amenés à coopérer, c'est à dire à agir ensemble dans le but commun d'évaluer le produit mais aussi ses processus de fabrication et de dé-fabrication, les filières de recyclage existantes ou celles à envisager (Tableau 3.1). Cette coopération leur a aussi permis d'intégrer dans leur raisonnement les besoins et les contraintes propres à la prise en compte de l'environnement.

Par exemple, au moment de la discussion sur le taux de valorisation, s'est posée la question de la récupération de pièces, pour leur réutilisation, par le service après vente. Cette question a renvoyé sur l'examen des solutions techniques actuelles du produit, pour analyser si elles permettent ces possibilités ou s'il faut envisager des évolutions. Mais elle a également fait rebondir le groupe sur les niveaux proposés pour le critère TV qui ne prend pas en compte cet aspect réutilisation. C'est ainsi que la réunion a également très vite concerné les évolutions à mettre en place au niveau de l'outil qui s'est avéré trop réducteur dans l'usage.

Un autre exemple concerne les composants bien spécifiques, tels que les circuits électroniques. La question de la valorisation a conduit à interroger les experts environnement qui ont dû, ne possédant pas toutes les connaissances nécessaires au moment de l'émergence de la question, se renseigner sur les normes et pratiques actuelles dans le domaine.

Ainsi de nombreuses discussions se sont engagées :

- D'une part parce que le produit n'était pas complètement défini (formes, matières, etc.), tout comme ses moyens de fabrication et de dé-fabrication
- D'autre part car le groupe manquait de connaissance sur des aspects pointus de l'environnement.

Le tableau 3.1 synthétise les différents points abordés dans cette réunion.

3.2. Conception pour le désassemblage chez TEFAL : Etude du terrain

Donnée / critères examinés	Réflexions sur l'évolution de l'outil	Evolution produit et process	Question sur environnement et filières recyclage
Pièces		Les nommer Penser à l'emballage Diminuer le nb de pièces et de liaisons	Emballage Piles Réutilisation
Matières et masses	Prise en compte des peintures	Mise en forme de l'aggloméré Collage verre-acier	Peintures soudures
Dépollution	Intégrer la difficulté technique dans le niveau	Soudure au plomb Piles	Norme / écran LCD
Broyage	Distinguer plus finement les plastiques		Possibilités actuelles
Taux de Désassemblage TD	Intégrer la difficulté technique, l'accessibilité, la nature des liaisons, dans le niveau	Décoller des pièces par jet d'eau	Dépollution : Techniques possibles Résultats
Taux de Valorisation TV	Intégrer la réutilisation dans le niveau	SAV désassemblage	Circuits électroniques Qui traite les déchets ? Coût de traitement des petits EEE
Masse	Peu précis	Comment ? Taille position	Utilisation de l'information ? Qui approvisionne la matière ? Qui traite les déchets ?

TAB. 3.1: Les points abordés au cours de notre travail avec TEFAL

Une réunion finale orientée "désassemblage" a été organisée avec l'expert assemblage. Ce dernier nous a présenté une séquence de désassemblage permettant d'atteindre un taux de récupération de 80% de la masse du produit. Il en a estimé le temps nécessaire en faisant appel à son propre registre de compétence concernant les process qui seront associés. En effet, de par son expertise et sa connaissance des process de l'entreprise, il est en effet très facile pour lui d'estimer les temps futurs probables liés au désassemblage, en procédant par analogie avec des produits existants. La Figure 3.4 présente les résultats obtenus par l'expert.

Dans le cas du produit étudié, il s'est avéré que l'on ne pouvait obtenir un taux de recyclabilité suffisant. En effet, étant donné que le composant "structure", qui représente 43% de la masse du produit, doit être incinéré, il ne reste pas suffisamment de composants à valoriser. Le problème de conception a finalement été reformulé par l'équipe de la manière suivante : "mettre en place une structure suffisamment rigide et à faible coût, satisfaisant les critères de recyclabilité et de désassemblabilité". On montre ici qu'il se crée un couplage entre évolution sur des critères techniques et économiques d'une part et valorisation et de désassemblage d'autre part. Finalement, lors des deux dernières réunions, le groupe de travail s'est focalisé sur la mise en place d'un nouveau matériau pour le composant "support" et sur le problème de fixation des capteurs sur ce support.

Cependant, à la fin de l'évaluation, même si les résultats recommandent certaines modifications, le groupe projet décide de lancer la fabrication du produit et de repousser les modifications pour une éventuelle re-conception. *Pourquoi les modifications n'ont pas été prises en compte ?*

Tout simplement parce que le projet semblait trop avancé pour faire marche arrière et que cette boucle de remise en cause aurait fortement pénalisé la date prévue de mise sur le marché du nouveau produit. Afin de ne pas renouveler ce type de schéma, ou finalement la contrainte environnementale a été complètement effacée, il nous faut répondre à deux questions :

- *Quelle est la démarche à suivre pour appliquer une approche de conception en vue du désassemblage et du recyclage ?*
- *Quels outils sont à utiliser ?*

Pour y répondre, il est nécessaire de retracer le processus de conception effective afin de comprendre et d'identifier les phases dans lesquelles nous pouvons démontrer qu'une évaluation de désassemblage pourrait être effectuée. Cette évaluation pourrait être obtenue en traduisant les caractéristiques propres à la conception dans chaque niveau d'abstraction.

Eco-conception et valorisation produit SENSE en fin de vie

C-ANTOINE le 16/12/2003

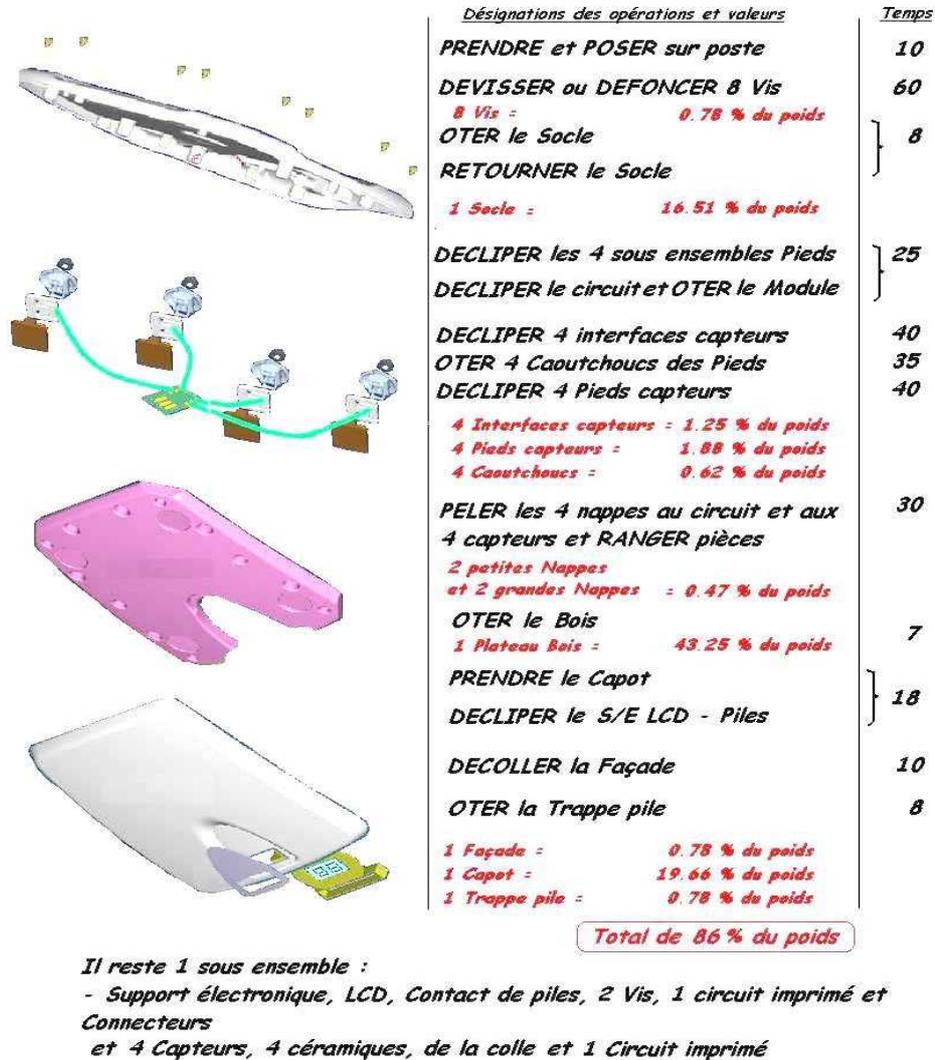


FIG. 3.4: Séquence de désassemblage obtenu par TEFAL

Ces questions n'ont pas une réponse simple et générale pour les acteurs de conception qui sont pourtant au cœur de cette problématique. En effet, comme le souligne [81], d'une part, les acteurs n'ont qu'une perception limitée des différents champs d'action pour développer des produits recyclables et d'autre part, leur processus de conception n'est que partiellement formalisé et la façon dont leurs critères de conception se sont peu à peu constitués pour les guider dans leurs choix de solution. Enfin, même s'ils sont conscients de l'importance des contraintes de fin de vie sur l'avenir

de leurs produits, ils ne possèdent pas de méthode de travail pour intégrer réellement ces contraintes en tant que paramètres de choix des solutions de conception. Il convient donc, de rentrer plus finement dans les détails de leurs produits en les analysant et en identifiant les différentes caractéristiques de désassemblage.

3.2.3 Bilan

Dans un premier temps nous avons étudié la démarche suivie par TEFAL pour développer des produits plus respectueux des nouvelles règles environnementales. Ensuite, nous avons brièvement présenté notre collaboration avec les concepteurs de TEFAL pour identifier leurs besoins. Nous avons alors décrit l'outil et les différents critères d'évaluation du recyclage utilisés par l'équipe de conception.

L'analyse de la démarche et des outils, utilisés dans un processus de conception industriel pour maîtriser la recyclabilité du produit, a montré que l'amélioration du produit en fin de processus de conception peut mettre en question la conception globale du produit.

Dans ce contexte industriel de conception pour le recyclage, nous identifions un manque de méthodes concernant la prise en compte du désassemblage des produits en fin de vie que nous avons traduit sous forme de questions visant à proposer des perspectives d'action au plus tôt dans le processus de conception.

3.3 Reconstruction : formalisation de la phase conceptuelle de la conception

Notre but, suite à l'étude de cas illustré dans la section précédente, a été de reconstruire le processus de la conception des produits TEFAL et d'observer la méthode d'intégration des contraintes environnementales ainsi que ses limites d'efficacité. Pour mener cette étude nous nous sommes appuyés sur les outils d'analyse fonctionnelle, ceci afin d'avoir une traçabilité des différentes caractéristiques identifiées au cours du processus de conception.

3.3.1 L'analyse fonctionnelle pour la définition du produit

Un produit industriel est avant tout destiné à un utilisateur pour ses fonctions tout en respectant les contraintes imposées. Ces fonctions traduisent un ensemble de

services et d'actions que peut fournir un produit. Par contre, les contraintes imposées guident le champ de solutions pour converger vers une solution optimale. Face à la complexité des projets de conception, la fonction principale du produit est souvent décomposée en sous-fonctions et en interactions entre ces dernières. La Figure 3.5 suivante représente une décomposition générique d'un produit à différents niveaux d'abstraction.

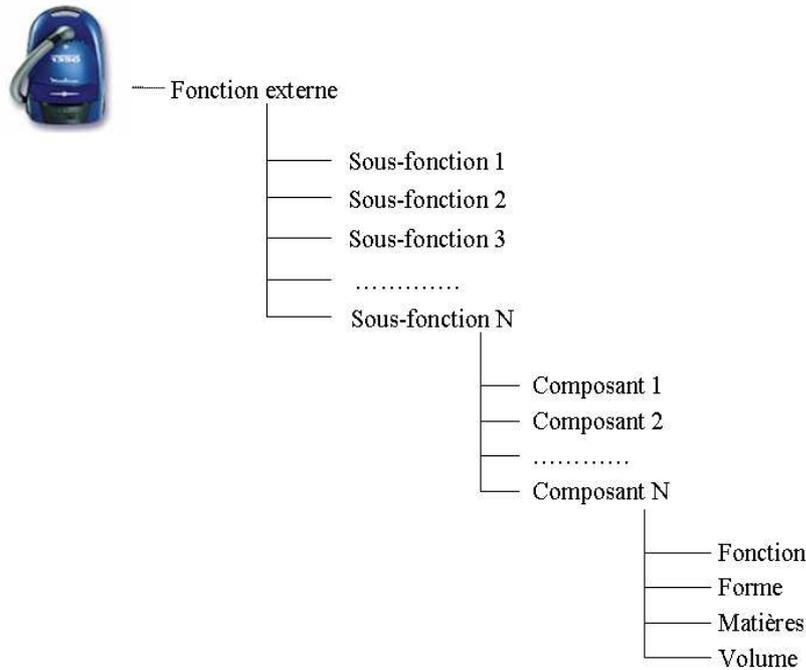


FIG. 3.5: Décomposition générique d'un produit

Comme le précise Umeda [82], les fonctions considérées comme un concept dérivant des intentions du concepteur, n'ont pas de définition claire, précise, et surtout objective. Toutefois, il est facile d'admettre, que les fonctions constituent le concept fondamental dans le choix des caractéristiques du produit à concevoir.

Les interactions représentent les échanges de flux entre deux fonctions, sous-fonctions ou composants fonctionnels, ceci afin qu'il y ait une liaison entre les différents éléments d'un système. Ces interactions représentent des informations indispensables pour le choix des solutions technologiques, qui assure la continuité du flux fonctionnelle. Ainsi, une des phases de l'analyse fonctionnelle consiste à la traduction des fonctions de service en fonctions techniques. On cherche donc à décomposer le produit sous forme de fonctions techniques, et l'on s'assure que l'ensemble de ces fonctions mises en lien permet de satisfaire les fonctions externes et donc les besoins.

Les méthodes d'analyse fonctionnelle permettent donc, de faire évoluer une description abstraite du client vers des entités fonctionnelles de plus en plus précises, or il arrive qu'un concepteur se trompe ou ne sache pas trouver la meilleure solution sans en essayer plusieurs, surtout pour un problème aussi complexe que la conception de produits soumis à des contraintes de désassemblage et de valorisation lors de leur fin de vie. Dans notre cadre de recherche, un formalisme de représentation fonctionnelle est indispensable afin que le concepteur évalue au plus tôt ces alternatives et confirme le respect de ses choix en lien avec les critères de valorisation en fin de vie.

Comme nous l'avons montré dans le chapitre 2, la conception passe d'une description fonctionnelle vers une définition technologique et géométrique. Pour cette raison, des outils de modélisation et d'évaluation sont donc indispensables à chaque niveau de définition du projet de conception. A ces niveaux, les possibilités d'amélioration sont plus faciles et moins onéreuses ; cela justifie l'existence de nombreux outils de modélisation dont certains sont évoqués dans le chapitre 2.

Aublin définit dans [83] le service du produit, comme "*toutes spécifications relatives au fonctionnement, à l'usage de ce dernier mais également aux motivations de l'utilisateur*". C'est pour cela que la fonction "*plaire*" est aussi une fonction à prendre en compte dans la conception des produits électroménagers par exemple. Tout type de fonction doit être satisfait même si les fonctions contraintes "*ne constituent pas la raison d'être du produit*".

Les fonctions de services sont classifiées comme suit :

- *Les fonctions principales* qui expriment les services rendus par le produit pour répondre aux besoins des utilisateurs. Elles traduisent le besoin pour lequel le produit a été conçu.
- *Les fonctions contraintes* qui traduisent des exigences d'adaptation du produit au milieu extérieur. Par exemple dans notre recherche, des fonctions imposées par des normes et des directives concernant la désassemblabilité et la recyclabilité du produit lors de sa fin de vie doivent être obligatoirement validées avant l'industrialisation du produit.
- *Les fonctions techniques* traduisent les actions internes au produit. Elles sont choisies par le concepteur pour assurer les fonctions principales ou de contrainte.

L'analyse fonctionnelle conduit donc, dans une première étape à traduire les besoins des utilisateurs en cahier des charges. Par la suite, le rôle des concepteurs est de concrétiser ce cahier de charge en un produit caractérisé par ses fonctions, sa forme et ses contraintes d'utilisation. Pour favoriser ce passage, plusieurs outils ont été développés. Nous retenons essentiellement le FAST et le BDF comme forma-

lisme⁹ d'investigation des différentes perspectives de désassemblabilité (Figure 3.6). Ce sont des représentations intermédiaires du produit sur lesquelles des alternatives de solutions peuvent être développées et des choix de conception peuvent être validés.

Plusieurs outils ont été développés pour assister cette démarche. Nous retenons essentiellement le FAST et le BDF comme notre formalisme d'investigation des différentes perspectives de désassemblabilité.

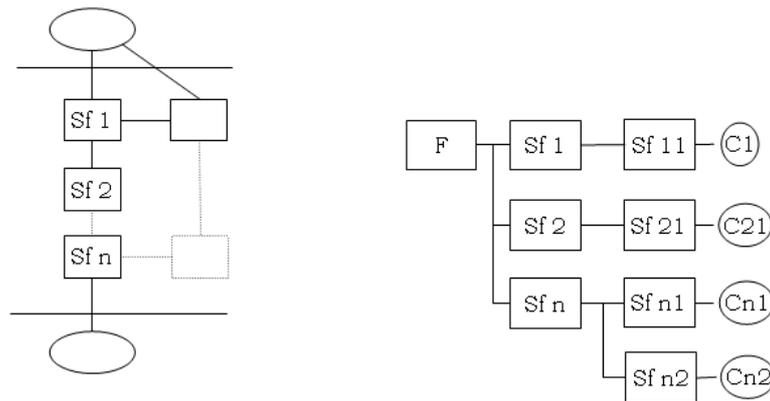


FIG. 3.6: BDF et FAST pour la modélisation fonctionnelle

Le désassemblage pour la fin de vie s'intègre au niveau du passage d'un modèle fonctionnel à un modèle géométrique; ces deux modèles sont redondants dans la mesure où le deuxième est déduit du premier tout en respectant les contraintes imposées.

3.3.2 Caractérisation du produit

Le point de vue externe du produit

D'un point de vue externe, le produit est considéré comme une boîte noire limitée par des frontières imposées par son environnement externe. Les concepteurs, à cette phase, recensent les différents éléments qui peuvent avoir une influence dans le cycle de vie du produit. Ce point de vue sert d'abord à formaliser les besoins attendus du produit et, ensuite, à identifier les critères d'appréciation pour chaque fonction et contraintes. Dans la Figure 3.7, on cite l'exemple du pèse-personne, où nous avons identifié deux fonctions externes : la fonction *peser* et la fonction *plaire*.

⁹Formalisme utilisé en représentation des connaissances et des systèmes de base de données dans lequel les entités n'existent qu'à travers les relations qu'elles entretiennent avec les autres entités

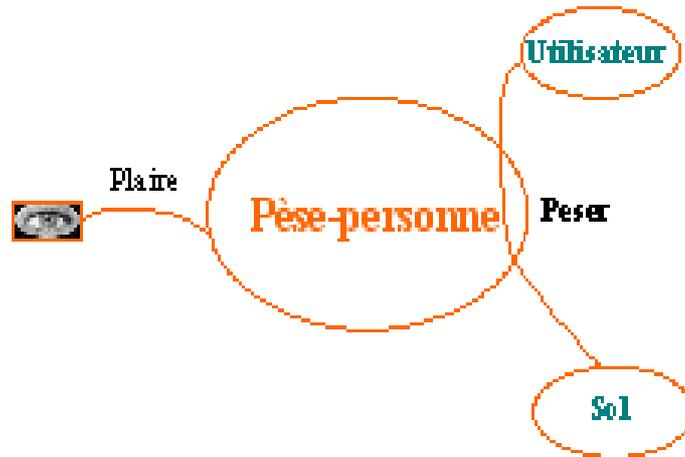


FIG. 3.7: Les principales fonctions du produit

Pour les contraintes de fin de vie, nous avons identifié les contraintes suivantes : les directives DEEE et la recyclabilité. Ces contraintes doivent être expliquées et définies afin que les concepteurs puissent en tenir compte dans leurs processus de développement. Ainsi, nous avons analysé les contraintes et formulé les critères associés dans le but de les employer au même niveau que les spécifications fonctionnelles. Dans le tableau suivant nous résumons les contraintes et les critères de fin de vie pour la conception des pèse-personnes.

o Les directives relatives aux équipements électriques et électroniques (EEE) :

Le Parlement européen et le conseil de l'union européenne ont annoncé le 18 décembre 2003, que les taux de valorisation des EEE en fin de vie doivent être supérieurs à 50% et à 80% de la masse totale du produit. Cette directive prend effet à partir du mois de septembre 2005. L'objectif de ces directives est d'inciter les compagnies et les bureaux d'études à développer des méthodes et des outils afin de développer les solutions de conception les plus appropriées. Les producteurs sont donc les premiers responsables de la fin de vie de leurs produits et ceci en favorisant le désassemblage et la réutilisation des composants dans leurs services après-vente par exemple.

o La recyclabilité :

D'un point de vue externe, nous pouvons caractériser la recyclabilité tout en fournissant les informations sur les différents scénarios de fin de vie. Au cours de notre étude, quatre scénarios seront considérés : la réutilisation, la récupération de la matière, la récupération de l'énergie et la mise en décharge. Le choix des op-

tions de valorisation dépend des contraintes imposées par l'environnement extérieur (contraintes législatives, technologiques et environnementales).

Point de vue interne du produit

D'un point de vue interne, le produit est un ensemble de fonctions techniques de façon à ce que le produit fournisse le service exigé par son environnement externe. Pour modéliser ce point de vue nous avons utilisé le FAST et le Bloc Diagramme Fonctionnel BDF qui donnent des formalismes schématiques de la composition interne du produit : différents composants, les interactions, le flux fonctionnel, les boucles de conception etc.:

3.3.2.1 Functional Analysis System Technique FAST

Le FAST (Function Analysis System Technics) est un moyen de corréler les fonctions de service, les fonctions techniques et les solutions techniques (Cf. FAST concernant la fonction " peser " : Permettre à un utilisateur de se peser par rapport au sol). La Figure 6 : Fast concernant la fonction "peser" actuellement développée illustre un cas d'analyse mené chez TEFAL pour la fonction " *peser* ".

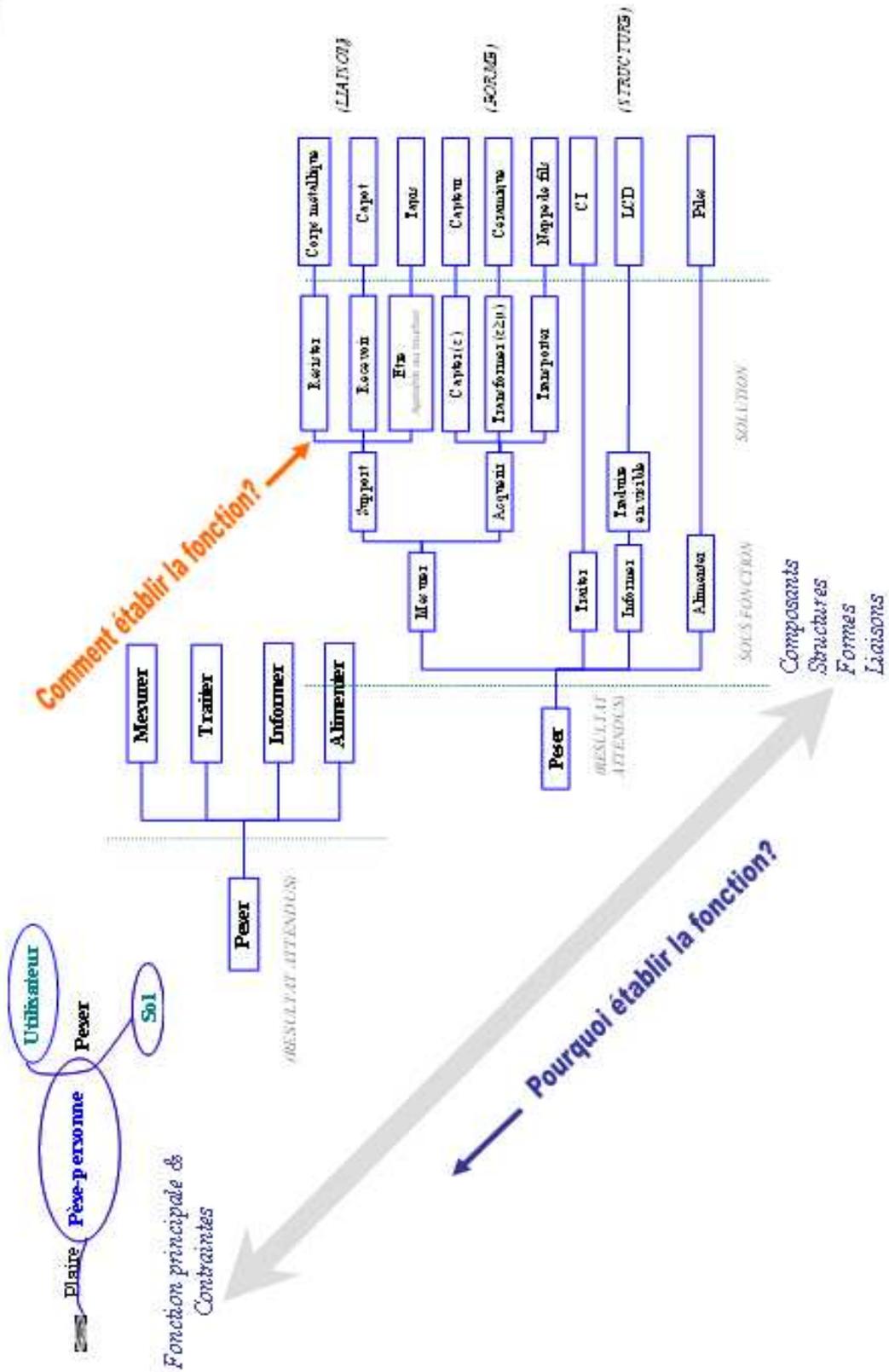


FIG. 3.8: FAST concernant la fonction "peser" actuellement développée

Une des importantes contributions du FAST dans un projet de conception, est sa méthode synergique de développement, de décomposition et de compréhension de la fonction à établir. Le développement du FAST nécessite un travail collaboratif entre les différents acteurs de conception. En effet, il inclut différents acteurs métiers dans le but d'augmenter la capacité de prise de décision et de choix de solution.

Le processus de modélisation par le FAST se base sur une suite de questions dans le but d'identifier les frontières et la fonction principale du produit à concevoir. Ces questions sont :

- *Comment réaliser une fonction principale ?*
- *Pourquoi cette fonction est réalisée ?*
- *Pourquoi la solution est-elle indispensable ?*

Le rôle de ces questions est d'analyser la fonction du système tout en respectant ses frontières. La structure de base du FAST est composée essentiellement par des fonctions qui sont à leur tour décomposées en solutions comme le montre la Figure 6. Pour développer un modèle FAST il existe plusieurs méthodes. On cite particulièrement le "*brainstorming*"¹⁰, qui est une méthode de génération du maximum d'idées et de réflexions pour réaliser la fonction principale. Ces idées et ces réflexions sont bornées par deux questions. La première est une question liée à la décomposition et au développement (*comment ?*). Par contre la deuxième question est utilisée pour la justification des réflexions et des solutions proposées (*pourquoi ?*).

Cet outil est très intéressant pour le développement d'une approche de CpD, car par cet outil, différentes solutions peuvent être définies dès la phase conceptuelle de la conception. Le résultat de cet outil est donc de définir pour chaque sous-fonction le ou les composants principaux. Ces composants faisant par la suite l'objet d'animation d'un travail collaboratif de CpD entre les différents acteurs. En effet, une fois que les composants sont définis, l'expert recyclage peut fournir une estimation sur la recyclabilité du produit. Cette estimation passe par l'identification de la contribution élémentaire de chaque composant dans le taux de valorisation du produit.

¹⁰Technique de réflexion, de création et de recherche collective, qui est fondée sur la mise en commun des idées et des suggestions des membres d'un groupe, sans opposition ni critique à l'égard des idées ou suggestions exprimées. Cette technique trouve son application dans le champ de la conception originale, ainsi que pour l'amélioration ou la recherche de solutions aux problèmes les plus divers (techniques, législatifs, commerciaux, d'organisation etc.). Le but est de tirer d'un groupe de personnes le maximum d'idées et de suggestions dans un minimum de temps en cherchant à stimuler l'imagination créative des participants par la libre association d'idées, dans la spontanéité la plus complète. Le tri et la critique des suggestion se font ultérieurement [79].

Cet outil ne gère pas les interactions entre les composants, il reste, toutefois, très intéressant pour l'investigation des solutions. Pour gérer les interactions on propose d'utiliser un deuxième formalisme le Bloc Diagramme Fonctionnel le BDF.

3.3.2.2 Le Bloc Diagramme Fonctionnel BDF

Le "Bloc Diagramme Fonctionnel", permet de recenser l'ensemble des fonctions techniques mises en œuvre dans le produit et ceci pour chaque étape du cycle de vie. La définition fonctionnelle est représentée par une architecture de blocs et d'interactions. Les blocs constituent les composants du système ou de la fonction et les interactions constituent les contacts et les flux fonctionnels entre les composants.

Lors de notre intervention chez TEFAL, nous avons réalisé les BDF de plusieurs produits. Très rapidement, il s'est avéré que pour chaque famille de produits il existait une représentation simplifiée du BDF, à partir de laquelle plusieurs solutions de conception pouvaient être envisagées. (Figure 3.9).

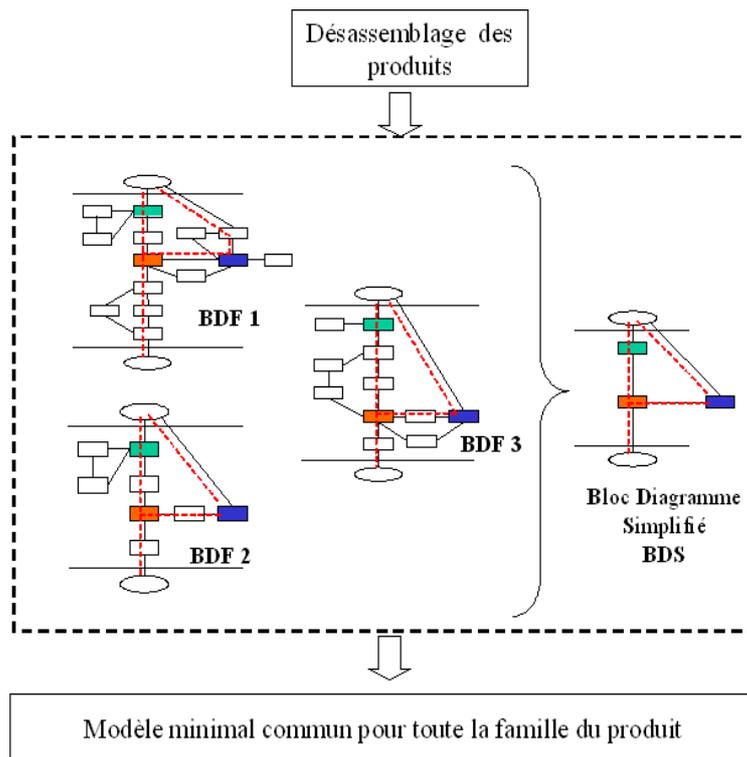


FIG. 3.9: Identification du BDS

On définit le Bloc Diagramme Simplifié BDS en un diagramme commun à une famille de produits, développé à partir d'un même cahier des charges. Dans cette sec-

tion nous allons illustrer les différentes étapes que nous avons suivies pour déterminer le BDS d'une famille de pèse-personne de chez TEFAL et nous allons démontrer l'utilité de ce diagramme dans une démarche de conception pour le désassemblage (CpD).

Pour identifier le BDS, la démarche d'étude a été menée comme suit :

- Mettre en évidence les composants traversés par des flux fonctionnels,
- Identifier les composants communs pour définir les composants principaux, qui sont ceux juste nécessaires à la réalisation des fonctions principales du produit.

Cette première représentation simplifiée du produit fournit au concepteur une idée sur :

- la disposition des composants les uns par rapport aux autres,
- Les interactions entre les principaux composants.

A partir de ces informations une première ébauche sur la structure et la gamme de désassemblage du produit peut être proposée. Cette gamme de désassemblage est constituée essentiellement par les composants nécessaires pour accomplir la fonction requise par le CdC tout en ignorant pour l'instant tout composant optionnel (qui n'est pas traversé par un flux fonctionnel). Cette ébauche de gamme de désassemblage représentera ainsi un support autour duquel le produit sera développé. De ce fait, les composants optionnels ou les solutions technologiques pouvant être greffés au produit, devront tenir compte de cette gamme.

Nous allons adopter ce type de représentation pour sa richesse d'informations à différents niveaux fonctionnels et technologiques (Figure 3.10). En effet, à partir d'une telle présentation, nous sommes capables de suivre l'architecture fonctionnelle et technologique du produit à différents niveaux d'abstractions. Les données à identifier sont :

- Les milieux extérieurs au produit (ici, l'utilisateur, son jugement, et le sol) et les frontières associées,
- Les composants traversés par un flux fonctionnel (capot, socle, capteur, pied, CI, etc.) ou non (trappe pile, support CI, Vis, etc.) représenté dans des rectangles,
- Les contacts entre les composants (trait noirs),
- Les flux fonctionnels : pour accomplir la fonction "peser", on a identifié quatre "sous-flux" fonctionnels (mesurer, traiter, informer et alimenter),

En plus des données présentées ci-dessus, il existe des données implicites qui sont identifiées généralement suivant la compétence de l'acteur de conception. Par exemple, dans une analyse pour le désassemblage, le graphe de liaisons peut être

vu à partir du BDF. En effet, à partir de cette vision et même en l'absence de structure, l'expert environnement peut commencer son travail d'évaluation et de recommandation.

3.3. Reconstruction : formalisation de la phase conceptuelle de la conception

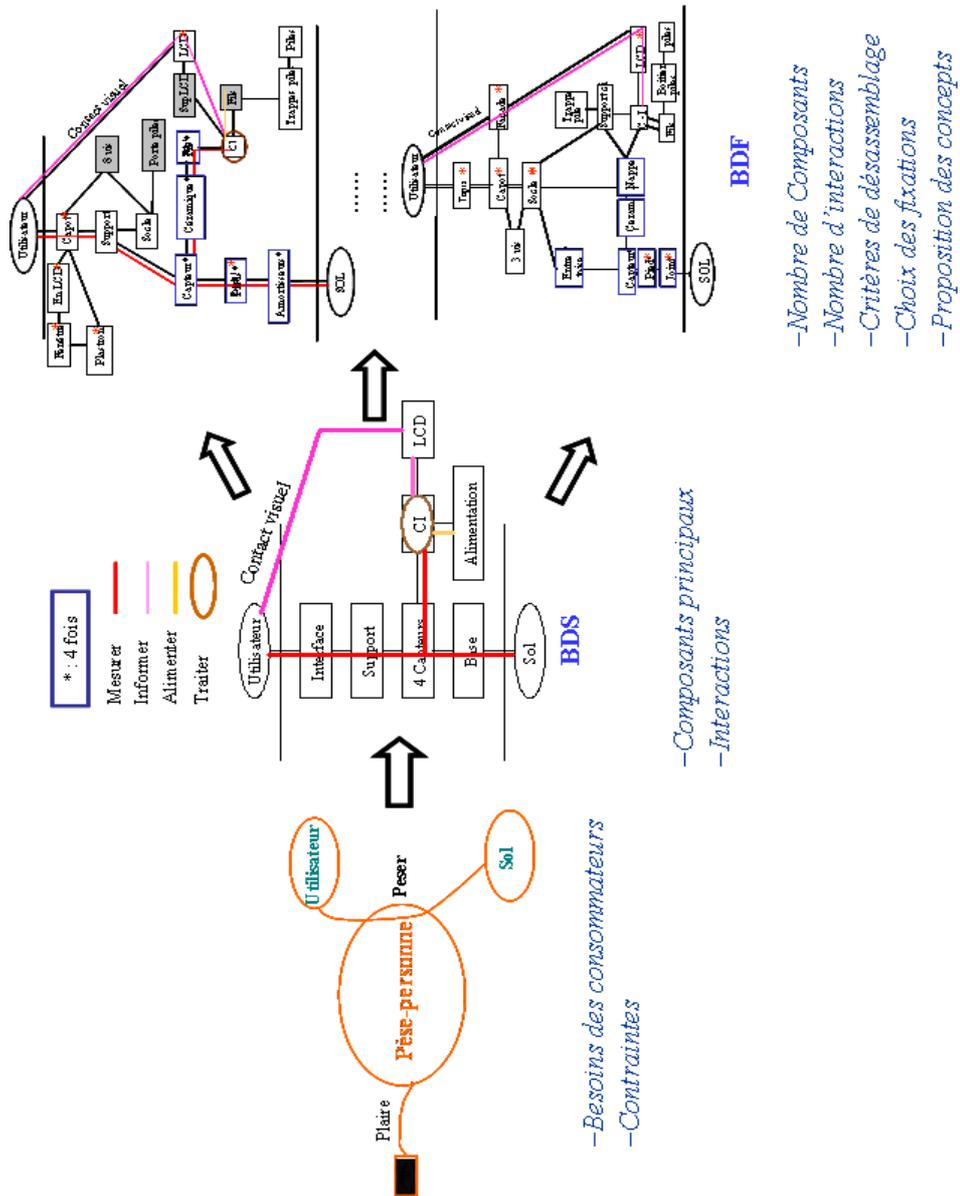


FIG. 3.10: Développement du formalisme BDF pour la fonction peser

Toutefois comme le FAST, le BDF ne gère pas la géométrie des composants, la structure et l'encombrement [84]. Il reste néanmoins très intéressant dans le cadre de notre recherche (intégration du désassemblage des PFV au plus tôt du processus de la conception), puisqu'il donne une première idée sur les relations rendues "obligatoires" entre les principaux composants d'un produit, du point de vue de la fonctionnalité globale. A ce niveau conceptuel de conception, ce formalisme fournit des informations qui peuvent être exploitables pour l'analyse du désassemblage. Ces informations présentées dans la figure 3.10 se résument en composants et interactions fonctionnelles.

3.3.3 Caractérisation du désassemblage du produit en cours de conception

Les sections précédentes de ce chapitre nous ont permis de retracer le processus de développement, la démarche d'évaluation de la recyclabilité et la méthode mise en œuvre par notre partenaire industriel pour la prise en compte des contraintes de fin de vie. On remarque que le désassemblage a été implicite tout au long de leur démarche. Nous avons donc tenté d'utiliser des outils dédiés à l'évaluation du désassemblage, afin de voir s'il était possible d'intervenir avant la création d'un prototype (Cf expert du désassemblage). Nous avons retenu l'outil DFA (Design For Assembly) et la méthode MTM (Method-Time-Measurement)¹¹ parmi les outils existants qui ne sont pas nécessairement destinés au désassemblage mais plutôt à l'assemblage.

Nous avons alors adopté la démarche d'évaluation décrite par la figure 3.11 pour plusieurs pèse-personnes dans l'entreprise.

¹¹MTM est l'abréviation pour "Methods Time Measurement" ou "Méthode de Mesure du Temps". Le MTM est un procédé qui analyse tous les mouvements de base qu'une opération manuelle ou un mode opératoire demandent pour leur réalisation et qui assigne à chaque mouvement élémentaire un temps standard prédéterminé qui dépend à la fois de la nature du mouvement et des conditions dans lesquelles il doit être accompli. Comme le fait apparaître cette définition, le MTM ne s'applique qu'aux opérations manuelles dans lesquelles le temps n'est pas influencé par la fabrication elle-même. Les temps utilisés dans les tables de MTM sont exprimées en cent-millièmes d'heures ou *cmh*. Le *cmh* est encore appelé *unité T.M.U.* (Time Measurement Unit). Sa valeur est la suivante par rapport aux diverses unités usuelles de mesure des temps : $1 \text{ cmh} = 0,00001 \text{ h} = 0,0006 \text{ mn} = 0,036 \text{ s}$ soit $1 \text{ seconde} = 27,8 \text{ cmh}$.

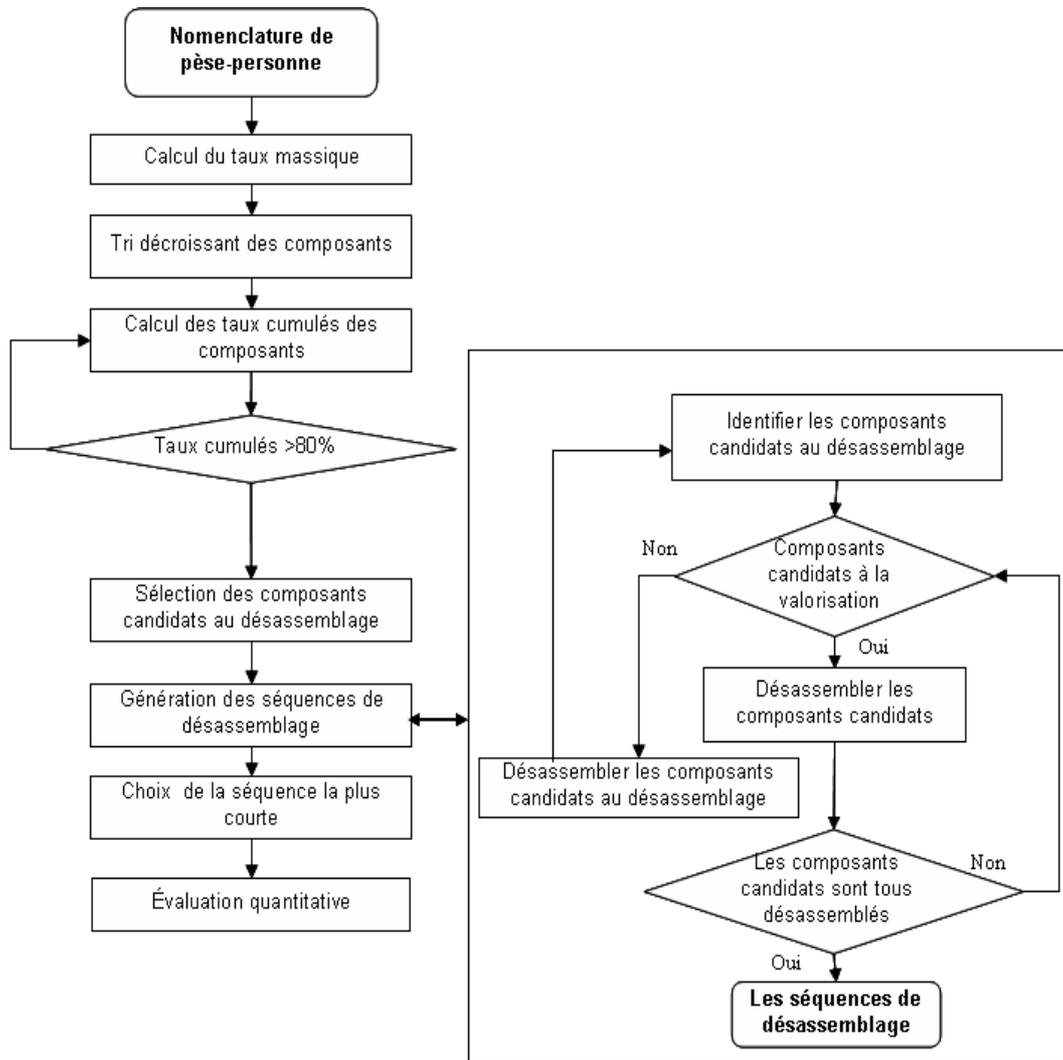


FIG. 3.11: Protocole d'expérimentation

3.3.3.1 Application de l'outil DFA à l'évaluation du désassemblage

Pour exploiter cet outil, il a fallu faire le lien entre les entités de modélisation fournies par DFA et les techniques de désassemblage nécessaires à un processus de valorisation. En effet, seul le désassemblage non destructif peut être pris en compte, c'est à dire que nous avons émis l'hypothèse que le désassemblage est le processus inverse de l'assemblage. Toutefois cet outil reste intéressant dans le cadre d'une première explicitation pour notre partenaire industriel. En effet, il offre une interface qui permet de modéliser plusieurs projets à la fois et de fournir une comparaison

entre eux. La Figure 3.12 montre les deux principales interfaces pour la modélisation d'une séquence.

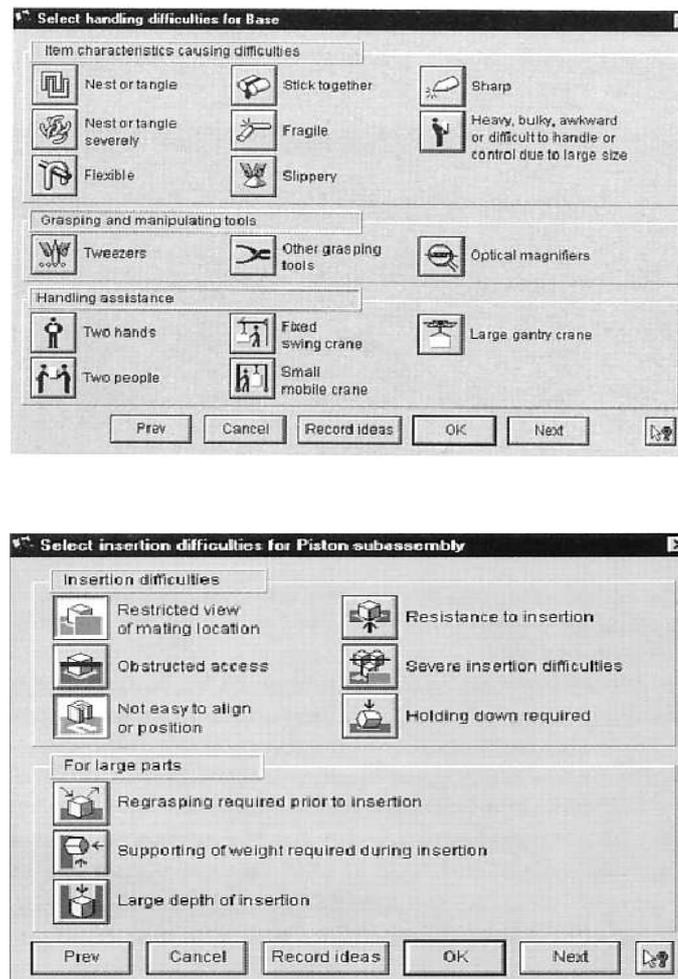


FIG. 3.12: Interface DFA

Le résultat obtenu est un temps de désassemblage global (produit) et élémentaire (composant). Ce résultat permet d'identifier les composants ou les liaisons qui doivent être améliorés.

3.3.3.2 Application de la méthode MTM à l'évaluation du désassemblage

Pour appliquer cette méthode, nous avons tout d'abord défini les opérations nécessaires pour une séquence de désassemblage. Ensuite, un temps de désassemblage

3.3. Reconstruction : formalisation de la phase conceptuelle de la conception

a été calculé pour chacune des opérations. En effet, cette méthode, au contraire de l'évaluation par DFA, nous a permis de prendre en compte le désassemblage destructif et la possibilité de fournir une estimation assez fine du temps de désassemblage sans avoir recours à un expert. La Figure 3.13, illustre l'application de la méthode sur le cas d'un pèse personne.

Composants candidates pour le désassemblage : {1;5;16}						
N° op	Description	opération	Temps (s)	Outils	Sous-ensemble récupérer	Commentaire
1	récupération de 1	Atteindre outil	1,5	Tournevis plat	{1;2;3;4;5;6;7;8;9;10;11;12;13;14;15;16;19}	Dévissage cette opération est répétée trois fois
2	dévissage	Saisir	0,5			
3		Mouvoir	24			
4		Positionner	8			
5		Tourner	24			
6	déclipsage	mouvoir	3	Tournevis plat	{1;2;3;4} {5;6;7;8;9;10;11;12;13;14;15;16;19}	
7		postionner	1			
8		desengager	3			
9	déclipsage	mouvoir	3	Tournevis plat	{1} {2} {3} {4}	{2} {3} {4} Temps (1)= 72
10		postionner	1			
11		desengager	3			
13	récupération 5	mouvoir	3	Tournevis	{5;6;7;8;9;10;11;12;13;14;15;16;19}	
14	déclipsage de Cl	postionner	1			
15		desengager	3	Tournevis	{5;12} {6;7;8;9;10;11;13;14;15;16;19}	
16	déclipsage de stru	mouvoir	3			
17		postionner	1			
18		desengager	3			
19	décollage de struct	mouvoir	3		{5} {12}	{5}
20		postionner	1			
21		desengager	3			
22	récupération 16		120			Temps(5)= 93 Jet d'eau
Temps de désassemblage (sec)			213	Les outils de désassemblage utilisée : <i>Tournevis plat, Pince coupante et marteau</i>		

FIG. 3.13: Evaluation par la méthode MTM

3.3.3.3 Bilan : résultats

Au terme de l'analyse que nous avons menée, nous obtenons des temps de désassemblage équivalents à ceux avancés par l'expert. Toutefois, cette analyse peut être proposée dès la phase conceptuelle car ces outil peuvent être appliqués sur des définitions conceptuelles. Il suffit d'exploiter les données proposées par DFA et MTM pour effectuer une modélisation de désassemblage avant de se lancer dans la définition détaillée du produit et ceci est faisable par les concepteurs qui ne sont pas nécessairement experts en désassemblage.

3.4 Conclusion

Au cours de notre reconstruction du processus de développement du produit, nous avons remarqué qu'il est difficile pour les acteurs de conception, de tenir compte du désassemblage pour la fin de vie avant la phase de conception détaillée, même s'il existe dans l'équipe projet un expert en environnement.

En effet, avec la participation de l'expert environnement au plus tôt dans le processus de conception, de nombreux aspects environnementaux ont été identifiés au début du projet. Des objectifs de désassemblage ont été définis, mais ils n'ont pas été intégrés dans le modèle détaillé du produit. Ceci explique que les concepteurs n'ont pas d'outils ni de méthodes pour évaluer le désassemblage sur les modèles qui ne sont pas suffisamment définis. Dans la Figure 3.14 nous illustrons l'étape à laquelle nous positionnons notre modèle.

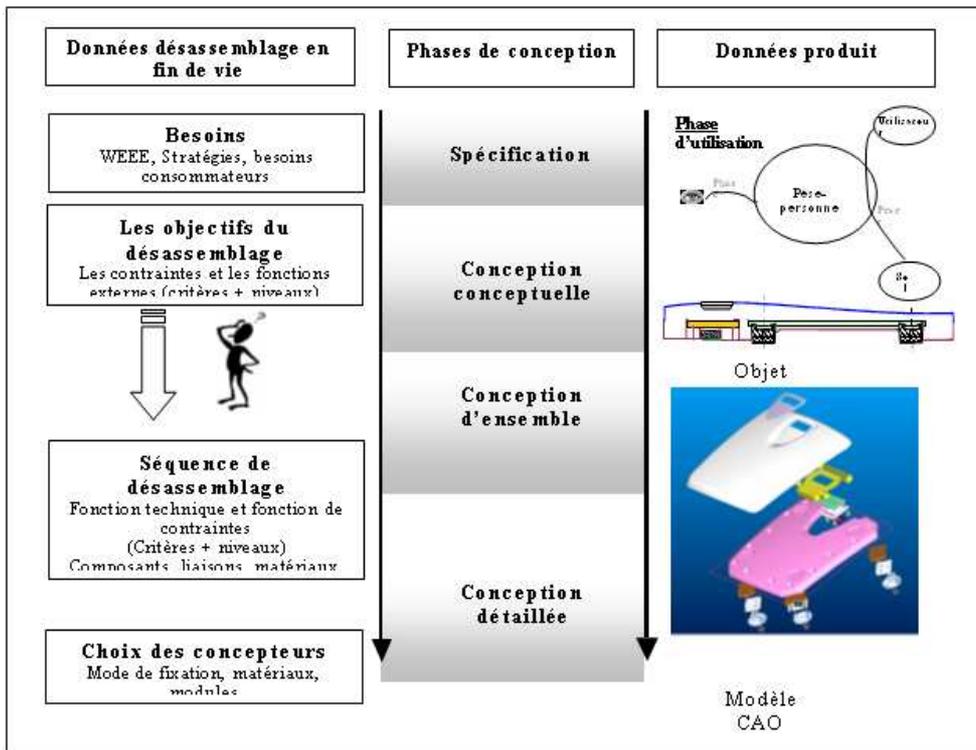


FIG. 3.14: Les aspects environnementaux à prendre en compte dans la conception du pèse-personne

La figure 3.14 montre que dans la première phase de conception, nous sommes en possession de plusieurs données sur le désassemblage en fin

de vie. A partir de ces données, nous proposons un modèle de données minimales pour penser au désassemblage au plus tôt dans le processus de conception. Le but est de donner aux concepteurs une idée sur la future séquence de désassemblage afin de l'optimiser. Cette évaluation doit être réalisée dans la phase conceptuelle de la conception, à un stade où le développement du produit n'est pas trop avancé. Il sera alors possible d'orienter la conception vers une séquence optimale de désassemblage tout en tenant compte des scénarios de valorisation et du taux de valorisation à atteindre.

La démarche de recherche décrite au cours de cette section nous a permis d'identifier les différents problèmes de la démarche de conception appliquée par les industriels, en vue du recyclage. Nous avons identifié leurs besoins dans les phases avancées du processus de conception. Pour cette raison, nous avons démontré que plusieurs données sont très représentatives des contraintes de désassemblage pour la valorisation et, qu'elles peuvent être identifiées dans la phase conceptuelle de la conception. Nous considérons que ces données sont les données minimales à partir desquelles nous sommes capables d'entamer des investigations sur le désassemblage pour la valorisation. Elle constituent le "modèle minimal pour l'étude du désassemblage" que nous allons présenter dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Modèle minimal pour l'étude du désassemblage

Sommaire

4.1	Introduction	110
4.2	Justification du modèle minimal	110
4.2.1	Exploitation des formalismes fonctionnels dans le modèle minimal	111
4.2.2	Interaction de type fonctionnel	113
4.2.3	Interaction de type technique	113
4.2.4	Rapport entre interaction fonctionnelle et interaction technique : Discussion	116
4.2.5	La relation entre le désassemblage pour le recyclage et les types d'interaction	117
4.2.6	Bilan	118
4.3	Modèle minimal	119
4.3.1	Mise en place du modèle minimal	119
4.3.2	Les éléments du modèle minimal	120
4.3.2.1	Cahier des charges environnementales	120
4.3.2.2	Les données minimales	120
4.4	Vue structure support à la définition d'une séquence optimale de désassemblage	123
4.4.1	Structure optimale d'un produit	126
4.4.2	Définition de la structure	127
4.4.3	Séquence optimale	130
4.4.4	Bilan	132
4.5	Conclusion	133

4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons montré les manques existant dans l'organisation d'une démarche de conception de produit recyclable. Pour accomplir ces manques méthodologiques et organisationnels, il est indispensable d'aborder la problématique de valorisation au plus tôt dans le processus de conception. Le repositionnement des contraintes de valorisation par rapport au processus de conception et l'adaptation des méthodes de travail peuvent aider les concepteurs dans leurs approches de CpD et dans la définition des différents concepts au plus tôt dans le processus de conception.

Dans ce chapitre nous proposons, dans une première partie, une définition d'un modèle minimal constitué de données minimales à partir desquelles on peut étudier la désassemblabilité au plus tôt dans le processus de conception. Dans la deuxième partie, nous présentons une méthode de construction de la séquence optimale de désassemblage qui servira par la suite comme référence dans la phase de conception avancée.

A la fin de ce chapitre nous expliquerons la démarche d'application du modèle proposé et nous identifierons les apports de ce modèle dans une démarche de conception innovatrice.

4.2 Justification du modèle minimal

Il est difficile pour un concepteur d'aboutir au meilleur compromis entre les différentes contraintes sans être amené à expérimenter plusieurs solutions. Ceci est particulièrement vrai dans notre cas, où il s'agit de prendre en compte les contraintes de désassemblage et de valorisation. Il lui faut donc formaliser son problème en s'appuyant sur des méthodes de partage d'informations avec les acteurs de conception. Toutefois, pour animer le travail au sein d'une équipe de conception, il faut un minimum d'informations concernant le produit à concevoir. Le modèle minimal que nous proposons a pour objectif de définir les données minimales à partir desquelles les différents acteurs de conception peuvent échanger et analyser les tendances des concepts du point de vue désassemblage.

4.2.1 Exploitation des formalismes fonctionnels dans le modèle minimal

Les outils actuels de CpD, donnent une part trop importante aux modèles géométriques. Ils considèrent ces derniers comme le modèle central indispensable pour toute analyse de désassemblabilité et de recyclabilité. Toutefois, pour avoir des résultats favorables au désassemblage, la définition du modèle géométrique doit tenir compte des contraintes de valorisation et de désassemblage. Ceci permet d'assurer une cohérence globale entre les différentes contraintes [85]. C'est dans ce cadre que notre modèle minimal doit agir, en analysant la désassemblabilité avant toute définition détaillée du modèle géométrique. Les formalismes à cette phase de conception sont donc indispensables pour mettre en commun les contraintes imposées et les suggestions proposées par les acteurs de conception. La transition d'un modèle fonctionnel à un modèle géométrique se construit donc autour de ces formalismes.

Les fonctions de contraintes, qui sont généralement définies en même temps que les formalismes résument les différents critères de choix d'une solution de conception. Comme leurs noms l'indiquent, elles viennent contraindre le système en éliminant les solutions qui ne répondent pas aux attentes des acteurs de conception. En effet, c'est une démarche où la concrétisation des fonctions est guidée par les fonctions de contraintes. Dans cette étape les contraintes de désassemblage deviennent des critères de validation d'une solution de conception. Ces contraintes vont porter sur le développement de trois axes de définition d'un produit (Figure 4.1) :

1. La structure du produit et essentiellement l'organisation des composants les uns par rapport aux autres,
2. Les interactions entre les composants et le choix des types de fixation,
3. Les matériaux constitutifs des différentes parties du produit.

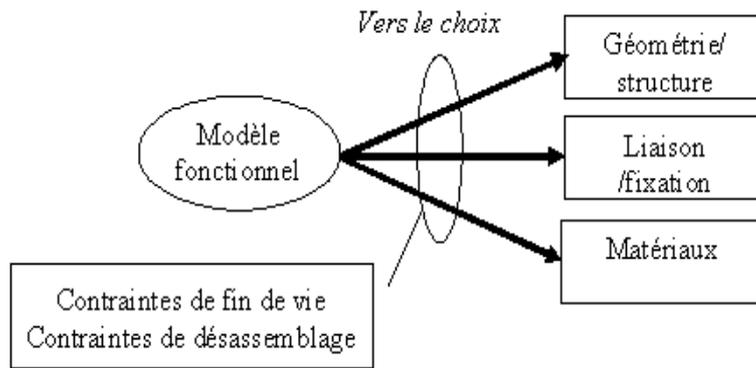


FIG. 4.1: Traduction fonction/géométrie dans DfD

Ces trois axes montrent qu'un modèle fonctionnel est un modèle implicite du produit dont la structure est une version explicite ou évoluée. Selon Ulrich, trois types de décisions techniques déterminent la structure du produit. Ces décisions peuvent être classifiées selon les niveaux d'abstraction suivants :

- Définition fonctionnelle ;
- Traduction des fonctions en composants fonctionnels ;
- Spécification des interfaces physiques de chaque composant.

La Figure 4.1 montre aussi que la structure est directement dépendante des interactions entre les composants fonctionnels. Nous en déduisons donc que la définition des interactions nécessite deux classes de caractérisation, la première classe est fonctionnelle (flux fonctionnels imposés par la fonction principale) et la deuxième classe est environnementale (la fonction contrainte imposée par la valorisation du produit lors de sa fin de vie).

Ainsi, lors de la mise en place d'un formalisme fonctionnel (BDF ou FAST), on identifie les données suivantes :

- Les composants répondant à la concrétisation des différentes sous-fonctions ;
- Les interactions liées aux flux fonctionnels : ces interactions sont utiles pour représenter l'architecture globale du produit. Elles fournissent une vue d'ensemble de l'architecture du produit ;
- Les interactions liées aux contacts, qui traduisent des choix de conception, le plus souvent du point de vue de l'assemblage du produit ;

Bien évidemment, les décisions techniques prises concernant les interactions entre composants restent le résultat de collaborations entre les concepteurs et l'expert du recyclage.

Dans la suite de cette section, nous montrerons comment à partir d'une description fonctionnelle des interactions, l'expert désassemblage peut agir dans la justification des choix des solutions techniques pour chaque type d'interaction. Ceci passera par la caractérisation des interactions et par les choix des modes de valorisation. Dans une démarche de définition d'un produit, on identifie deux types d'interactions :

- Interaction fonctionnelle
- Interaction technique

4.2.2 Interaction de type fonctionnel

Deux composants possédant une interaction fonctionnelle sont reliés par un flux d'énergie, d'effort ou d'information. Ce type d'interaction se relie clairement aux fonctions qui peuvent être exprimées comme entrées et sorties d'énergie, d'efforts ou d'information, il est neutre en ce qui concerne les solutions physiques particulières. Ce type d'interaction est identique à la description de la représentation fonctionnelle de Pahl et Beitz ou Ulrich et Eppinger (Figure 4.2).

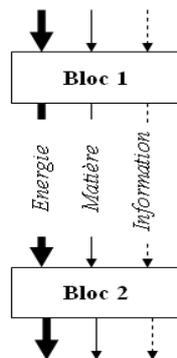


FIG. 4.2: Interaction de type fonctionnelle

4.2.3 Interaction de type technique

Une interaction technique existe entre deux blocs fonctionnels du BDF, si ces blocs doivent être réunis entre eux par une liaison physique (assemblé). Contrairement à l'interaction fonctionnelle, ce type d'interaction ne se rapporte pas directe-

ment à une fonction spécifique (matière, énergie ou information). Pour la justification d'un choix d'interaction technique, il est nécessaire de définir (Figure 4.3) :

- Les contraintes imposées sur l'interaction à définir ;
- Les effets d'un composant sur l'autre pour un type d'interaction ;
- La définition de l'interface de chaque composant pour concrétiser un type d'interactions.

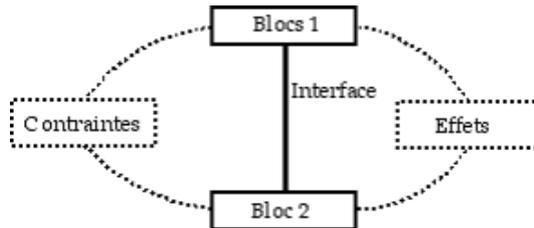


FIG. 4.3: Interaction de type physique

Contraintes d'interaction technique

Pour chaque interaction fonctionnelle le concepteur est capable d'identifier plusieurs interactions techniques. Cependant, le choix d'une interaction technique est soumis à des contraintes internes entre les blocs et à des contraintes externes (législation, normes etc.). En conséquence, la concrétisation des interactions fonctionnelles est choisie suivant des critères fonctionnels, techniques et de valorisation fin de vie. Dans une approche de conception pour le désassemblage les contraintes de valorisation en fin de vie imposent des contraintes de désassemblage sur quelques composants qui ont un poids non négligeable sur la désassemblabilité et la recyclabilité du produit. Pour mieux expliquer ce que nous venons de dire, nous présentons dans le Tableau 4.1 l'exemple de contraintes qui peuvent être imposées lors du choix d'une interaction technique entre les blocs d'un pèse-personne.

Effets d'interaction technique

Deux blocs sont en interaction technique si les caractéristiques de l'un ont un effet sur l'autre [86]. Du point de vue fonctionnel chaque bloc comporte des effets secondaires sur les paramètres de la conception : la chaleur, les vibrations, bruit etc. Par analogie, ce raisonnement est valable du point de vue valorisation en fin de vie. En effet, dans le cas de désassemblage en fin de vie les caractéristiques d'un bloc tel que la matière, le volume et la position, peut avoir des effets sur le choix technique des interactions. Ces effets sont plus visibles lors de l'optimisation d'un produit en vue de désassemblage. Dans ce cadre, on distingue trois types d'effets qui dépendent essentiellement de trois paramètres de conception. Ces effets sont :

<i>Bloc 1</i>	<i>Bloc 2</i>	<i>Interaction fonctionnelle</i>	<i>Interaction technique</i>	<i>Contraintes</i>
Interface	Support	Information : Force (Masse de l'utilisateur)	Appui plan	Compatibilité Réversibilité
Capteur	Traitement	Information : énergie (énergie électrique)	Fils électriques	Soudage sans Pb Regroupement des fils
Traitement	Alimentation	Énergie	Fils électriques	Soudage sans Pb Regroupement des fils

TAB. 4.1: Contraintes d'interaction technique

- L'effet du matériau sur le regroupement des composants et sur le choix du mode de valorisation ;
- L'effet de la structure sur l'accessibilité aux composants cibles
- L'effet des interactions sur le mode de valorisation, sur l'accessibilité aux composants cibles et sur le regroupement des composants.

Dans la Figure 4.4 nous illustrons les effets d'un matériau sur le désassemblage des deux composants

Interface dans le type d'interaction technique

Deux blocs fonctionnels sont en interaction technique s'il existe une interface entre eux. Cette interaction se rapporte non seulement à une liaison technique mais également à la réalisation technique d'une interaction fonctionnelle. Dans le Tableau 4.2 suivant nous illustrons quelques exemples d'interface entre les blocs de pèse-personne.

<i>Bloc</i>		<i>Interaction</i>		<i>Interface</i>	
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>Fonctionnelle</i>	<i>Technique</i>	<i>1</i>	<i>2</i>
Interface	Support	Information : Force (Masse de l'utilisateur)	Appui plan	Surface plane	Surface plane
Capteur	Traitement	Information : énergie (énergie électrique)	Conduction Fils électriques	Céramique	Circuit imprimé
Traitement	Alimentation	Énergie	Fils électriques	Cosse	Circuit imprimé

TAB. 4.2: Type des interactions techniques de pèse-personne

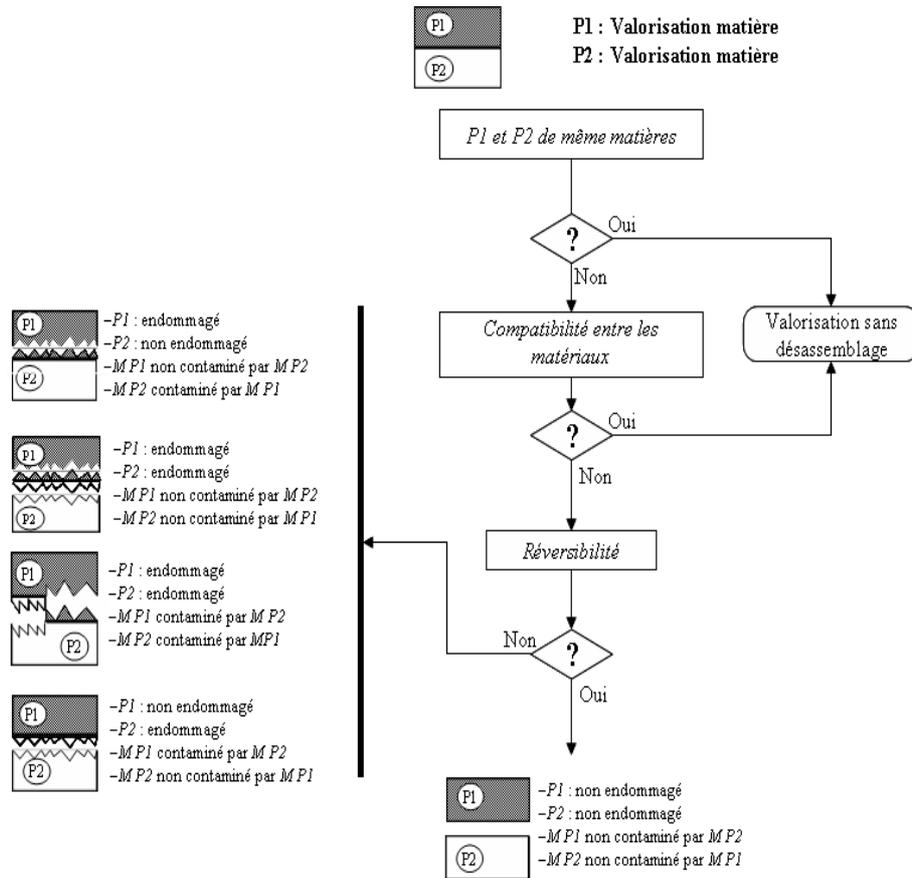


FIG. 4.4: Effet de choix de matière sur la séparation des interactions

4.2.4 Rapport entre interaction fonctionnelle et interaction technique : Discussion

L'interaction technique est directement dépendante de l'interaction fonctionnelle. En effet, s'il y a une interaction fonctionnelle entre deux blocs, il y a également des interfaces qui établissent la réalisation de l'interaction technique de flux fonctionnel. Réciproquement, une interaction technique entre deux blocs n'implique pas une interaction de type fonctionnel, c'est sur ces interactions que nous avons le plus de degrés de liberté dans les choix des fixations. Toutefois, deux blocs qui sont techniquement en liaison ne signifie pas une relation fonctionnelle entre les deux blocs (Exemple l'interaction entre le bloc "affichage" et le bloc "interface" du pèse-personne, cette interaction n'a ni échange d'énergie, ni matière, ni information).

Le constat de cette discussion : une interaction technique n'est pas nécessairement issue d'une interaction fonctionnelle. L'optimisation du désassemblage dans la conception est généralement centrée autour de ce constat.

4.2.5 La relation entre le désassemblage pour le recyclage et les types d'interaction

L'objet de cette section est de décrire la démarche de traduction des types d'interaction en caractéristiques de désassemblage pour le recyclage. Les acteurs de conception ont la tâche de définir tous les paramètres de conception détaillée qui satisferont l'ensemble des fonctions et des contraintes du produit. Cependant, l'expert recyclage a la tâche d'indiquer les paramètres nécessaires pour l'optimisation du désassemblage et du recyclage. Evidemment, si les acteurs de conception effectuent leurs travaux dans l'isolement et sans avoir la vision de l'expert recyclage, il est peu probable que leurs réalisations aient les caractéristiques adéquates pour la valorisation en fin de vie. La coordination entre les acteurs de conception et l'expert recyclage est nécessaire pendant tout le processus de développement.

Au cours de tout le processus de développement, il est nécessaire d'établir un protocole qui spécifie la coordination des décisions entre les acteurs de conception et l'expert de recyclage. Des objectifs et des règles de développement doivent être spécifiés dès la phase conceptuelle. Ces objectifs constitueront l'outil à travers lequel les acteurs de conception et de recyclage coordonnent leurs attentes par la conception. Pour cela, nous avons identifié trois ensembles de caractéristiques dans lesquelles les problèmes liés à la valorisation peuvent être étudiés. Ces trois ensembles de caractéristiques sont généralement liés à la structure du produit pour les problèmes d'accessibilité, aux fixations pour les problèmes de séparation et aux choix de matériaux pour les problèmes de recyclabilité [87]. Dans le Tableau 4.3 nous illustrons la relation entre ces caractéristiques et les problèmes de désassemblage pour le recyclage.

<i>Effet sur le désassemblage</i>			
Caractéristiques	Accessibilité	Séparabilité	Recyclabilité
Structures	+++		+++
Matières			+++
Interactions	+	++	+++

TAB. 4.3: Relation entre caractéristique de conception et désassemblage

Un constat peut être cité : les objectifs de recyclage en fin de vie dépendront des contraintes de désassemblage qui seront prises en compte dans le développement de la structure, des fixations et du choix des matériaux. La définition des caractéristiques de désassemblabilité d'un produit est détaillée à partir des blocs et des interactions du modèle fonctionnel BDF. La définition des blocs du point de vue désassemblage dépend de la caractéristique intrinsèque de chaque bloc et de l'interaction qui existe entre eux et vice versa.

4.2.6 Bilan

Dans un premier temps, nous avons brièvement présenté deux modèles d'analyse fonctionnelle, le FAST et le BDS, pour constater que les données manipulées étaient de très bas niveau. En réalité, ces données répondent à différentes fonctionnalités mais ce sont les acteurs de conception, qui réalisent une association entre les données fonctionnelles, les données techniques et les informations en terme de désassemblage et de valorisation (un fil électrique qui assure une conduction d'énergie, peut être par exemple assemblé par soudure ou par clips). Nous avons donc étudié les fondements de ces modèles et nous en avons tiré quatre caractéristiques :

- caractéristique associative : qui relie directement des fonctions de bas niveau avec des données techniques,*
- caractéristique déductive : qui propose de générer plus intelligemment les données techniques en décomposant les fonctions en sous fonctions élémentaires,*
- caractéristique productive : qui génère, à partir d'une représentation simplifiée BDS, un espace de solutions techniques.*

Nous nous intéressons à ces modèles pour leurs capacités de simplification du problème au moyen de la décomposition et pour leurs caractéristiques productives par le moyen de recensement de l'espace des solutions. L'identification des solutions les plus prometteuses sera étudiée dans le chapitre 5.

Nous proposons dans la section suivante de ce chapitre d'utiliser ces modèles pour pouvoir proposer aux concepteurs un ensemble satisfaisant de données pour une analyse de désassemblage et de valorisation de leurs futurs produits.

4.3 Modèle minimal

4.3.1 Mise en place du modèle minimal

Notre modèle minimal est issu d'une problématique industrielle et scientifique du domaine de la valorisation des produits en fin de vie. En effet par cette démarche, nous aidons les acteurs à formaliser et à exploiter leurs connaissances en ayant une caractérisation sur le désassemblage et la valorisation du produit à définir. Par ce modèle, différentes données peuvent être identifiées dès le début de la conception et différentes investigations sur le désassemblage peuvent être développées. Ces données, comme nous l'avons déjà montré, sont un ensemble de connaissances sur les scénarios de valorisation et sur l'expertise dans le domaine de la conception d'une famille de produits que les acteurs de la conception doivent d'une part adapter aux spécifications de leur projet et d'autre part respecter les contraintes de valorisation.

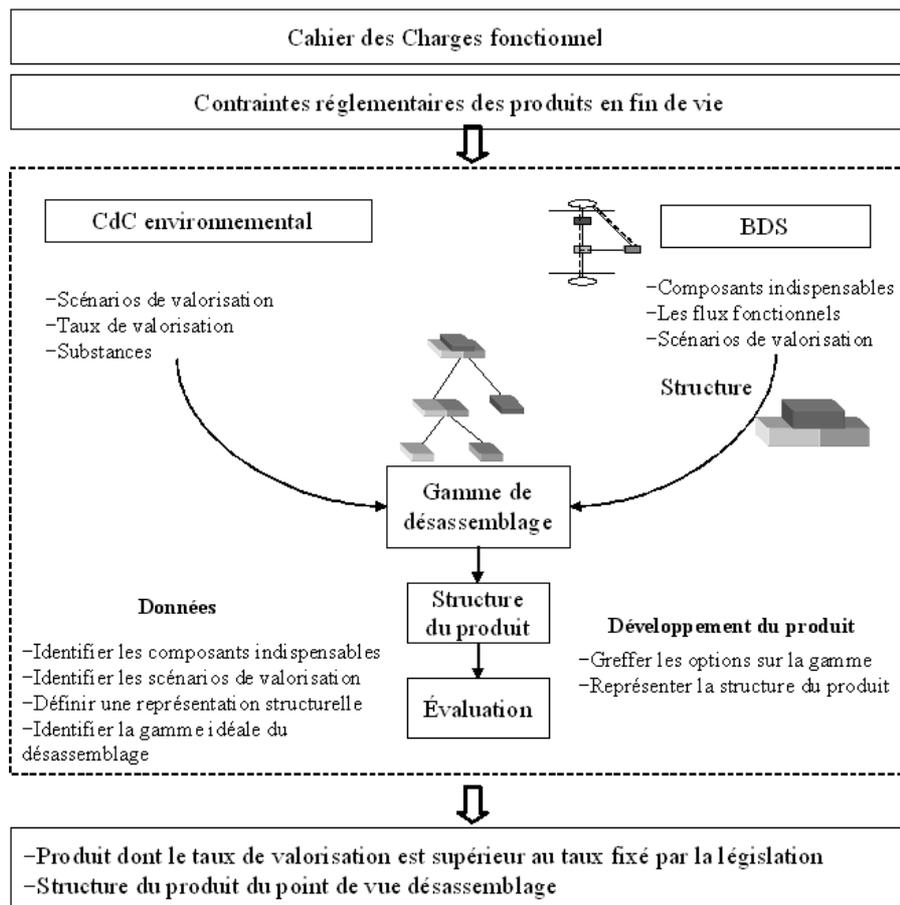


FIG. 4.5: BDS pour la CpD

4.3.2 Les éléments du modèle minimal

4.3.2.1 Cahier des charges environnementales

Cette phase est une synthèse des objectifs attendus par la conception : fonction d'usage et fonctions contraintes (contraintes de valorisation à respecter). Le cahier des charges est explicite, sa formalisation facilite la définition des critères liés aux modes de valorisation.

4.3.2.2 Les données minimales

Les données minimales permettent de spécifier le concept global du produit en terme de fonction, de technique et de recyclage. Les données fonctionnelles, technologiques et de recyclage sont conjointement impliquées dans le développement de la structure du produit. Les différentes alternatives structurelles sont développées à partir des principaux composants fonctionnels.

Les données minimales se résument comme suit :

1. Le graphe des liaisons issu du BDS (liaisons fonctionnelles)
2. Nombre de composants fonctionnels (principaux)
3. Nombre de liaisons fonctionnelles (flux fonctionnels)
4. Nombre de matériaux utilisés
5. Les scénarios de fin de vie potentiels pour chacun des composants
6. Les composants critiques pour l'indicateur de recyclabilité

Ces données demandent un certain niveau d'expertise dans le domaine de conception de chaque type du produit. Plusieurs estimations seront proposées et affinées au fur et à mesure du développement de la définition du produit. Comme nous l'avons cité, plusieurs données peuvent être identifiées.

Le Tableau 4.4 suivant résume les données minimales du pèse-personne qui peuvent être identifiées :

	Composants fonctionnels	Matériaux	Estimation massique	Scénarios de FV	Priorité de désassemblage	Composants retenus pour le désassemblage
A	Interface	Plastique Verre Bois	35%	Recyclage	3	✓
				Recyclage	3	
				Incinération	4	
B	Support	Tôles (Fe) Verre Aluminium Bois	45%	Recyclage	3	✓
				Recyclage	3	
				Recyclage	3	
				Incinération	4	
C	Capteurs	Fer	10%	Réutilisation (SAV)	2	
				Recyclage	3	
D	CI	Epoxy	5%	Filière de recyclage électronique	3	
E	LCD	Verre ; électronique	1%	Filière de recyclage électronique, polluant	1	✓
F	Piles	Polluants	1%	Filière recyclage piles	1	✓
G	Appuis	Plastique	3%	Recyclage	3	

TAB. 4.4: Les données minimales du pèse-personne

La priorité du désassemblage : c'est un ordre d'importance décroissant de récupération des composants

(1) : Dépollution, obligation de récupération avec certaines règles

(2) : Réutilisation,

(3) : Recyclage en matière,

(4) : Incinération,

(5) : Mise en décharge,

Le Tableau 4.4 est le résultat du raisonnement par la figure 4.6. La méthode détermine à partir d'une définition fonctionnelle, le modèle minimal constitué des principaux composants et de la caractérisation de leurs scénarios en fin de vie. La liste "composants potentiels à récupérer" est constituée des composants critiques pour atteindre notre objectif de taux de valorisation. Jusqu'à maintenant, nous avons les données et les choix nécessaires pour définir une stratégie de conception du produit.

Raisonnement pour la définition des données minimales

Procédure Définition modèle minimal (Données minimales)

```

Cp : Composants principaux
M : Matériau
S : Scénario de valorisation
Tleg : Taux de valorisation imposé par la législation
Pour (Chaque Cp ∈ de la liste composants) faire
    Choix de matériaux Si (Un seul choix de matière) Alors
        Définir scénario de valorisation ;
    Sinon
        Etablir la liste de matériaux ;
        Pour (chaque matériaux) faire
            (Choix scénario de valorisation)
            (priorité de désassemblage)
            Selon que
                Cp = Polluant : Cp(M) ← 1 ;
                Cp = Réutilisation : Cp(M) ← 2 ;
                Cp = Recyclage : Cp(M) ← 3 ;
                Cp = Incinération : Cp(M) ← 4 ;
                Cp = Autre : Cp(M) ← 5
            Fin Selon que
        Fin Pour
    Fin Si
    Proposer une estimation des masses des composants
    Identifier l'ensemble des composants à récupérer : (Cp=Polluant)+ (Σ M(Cp)) ≥ Tleg pour
    atteindre le taux législatif
Fin Pour
Résultat : liste des composants potentiels à récupérer
Fin
    
```

FIG. 4.6: Raisonnement pour la définition des données minimales

Un produit valorisable doit valider deux conditions :

1. Le taux de valorisation
2. La séquence de désassemblage pour atteindre ce taux de valorisation.

Comme nous l'avons déjà vu, le taux de valorisation peut être estimé par le modèle minimal, par contre la séquence de désassemblage nécessite un minimum d'information structurelle du produit. La section suivante sera centrée sur deux

points. Le premier, portera sur la définition structurelle obtenue à partir du modèle fonctionnel et le second sur l'élaboration d'une séquence optimale à laquelle les concepteurs doivent adhérer au cours de leurs développements.

4.4 Vue structure support à la définition d'une séquence optimale de désassemblage

Le modèle minimal est décrit en terme de composants fonctionnels, de relations fonctionnelles, de matériaux, de scénarios de FV et de composants retenus pour le désassemblage. La prochaine étape consiste à déterminer comment ces composants sont assemblés les uns aux autres. Pour développer cette étape, nous allons exploiter d'une part les données minimales et d'autre part l'expertise des concepteurs du produit. Pour cela nous nous intéressons aux interactions fonctionnelles entre les composants ; en effet, ces interactions nous permettent de comprendre et de discuter avec les concepteurs sur la disposition des composants pour assurer les fonctions du produit. Les données sur les interactions nous permettent donc de faire évoluer notre modèle minimal d'une description fonctionnelle vers une définition structurelle.

La description des interactions entre les éléments est composée essentiellement des connaissances courantes appartenant au domaine de conception du produit. Ces connaissances tiennent compte des données fonctionnelles et stratégiques (telles que des stratégies de fabrication et d'assemblage) et des contraintes de désassemblage imposées sur les éléments choisis pour la valorisation en fin de vie. Ces connaissances permettent de déduire des données pour le désassemblage qui seront modélisées en une séquence. Cette séquence doit évoluer parallèlement aux données de la conception.

Pour déduire une structure préliminaire, nous proposons d'exploiter deux types de données d'interactions. Ces deux types de données sont définis suivant deux critères :

- (1) l'association spatiale et l'agencement des différents volumes.
- (2) l'association des flux fonctionnels,

Les deux types d'interactions sont définis comme suit :

Structurellement : interaction de type spatiale, identifie des besoins d'adjacence ou d'alignement entre deux éléments du système.

Fonctionnellement : interaction de type fonctionnel, identifie des besoins de continuité du flux pour établir la fonction principale.

Les définitions des types d'interactions dépendent du contexte stratégique de la conception. En effet, dans notre contexte de désassemblage la notion d'adjacence du point de vue fonctionnel entre les éléments du système est importante.

Pour formaliser les données, nous proposons d'élaborer une matrice d'interaction qui sera définie en collaboration avec les acteurs de conception et en se basant sur une pondération des importances des différentes interactions. Dans le Tableau 4.5 nous présentons les pondérations des deux types d'interactions retenus.

<i>Spatiale</i>		
Indispensable	(2)	Adjacence physique est nécessaire pour la fonction
Recommandée	(1)	Adjacence physique est avantageuse mais pas nécessaire pour la fonction
Indifférente	(0)	Adjacence physique ne concerne aucune fonction
Non recommandée	(-1)	Adjacence physique a des effets négatifs mais n'affecte pas la fonction
Interdite	(-2)	Adjacence physique doit être interdite pour aboutir à la fonction
<i>Flux</i>		
Indispensable	(2)	Flux nécessaire pour la fonction
Recommandée	(1)	Flux avantageux mais pas nécessaire pour la fonction
Indifférente	(0)	Flux ne concerne aucune fonction
Non recommandée	(-1)	Flux cause des effets négatifs mais n'affecte pas la fonction
Interdite	(-2)	Flux doit être interdit pour aboutir à la fonction

TAB. 4.5: niveaux d'importance d'interaction

Les interactions entre les éléments d'un système n'ont pas toute le même niveau d'importance. D'ailleurs, des interactions sont jugées, par les concepteurs, comme recommandées, alors que d'autres sont nuisibles (*Interdit*). Une interaction peut être quantifiée suivant une échelle d'importance basée sur cinq niveaux (Tableau 4.5).

Pour l'exemple du pèse-personne, la pondération des interactions de type spatial est modifiée de la façon suivante : les composants électriques et électroniques auront une pondération d'interaction (**+1**) (Recommandée). Cette modification est nécessaire pour la raison suivante : bien que les fils électriques soient exigés pour réaliser la fonction, généralement ils sont flexibles et peuvent être positionnés autour d'autres composants. Néanmoins, il est souhaitable que ces composants soient regroupés ensemble afin de réduire au minimum la longueur des fils.

Pour la définition des interactions, on exige deux étapes :

1. Identifier, à partir du modèle minimal, les interactions de type flux et spatial, décrites dans le Tableau 4.5.

4.4. Vue structure support à la définition d'une séquence optimale de désassemblage

2. Définir, en collaboration avec les concepteurs, les niveaux d'importance de chaque type d'interaction en utilisant la quantification décrite dans le Tableau 4.5.

Une interaction entre deux éléments peut être représentée ainsi par un vecteur de deux points (spatial et flux). Le Tableau 4.6 montre comment nos estimations ont été appliquées à une interaction entre deux composants (Support et Capteur) d'un pèse-personne.

Support et capteur		
Fonction : (Support)	Le support, c'est le composant sur lequel l'utilisateur va se tenir pour se peser	
Fonction : (Capteur)	Le capteur transforme le poids de l'utilisateur en énergie électrique équivalente	
Interaction	Le support fournit le poids total aux capteurs qui le transformera en un signal électrique équivalent. Ces deux composants sont localisés en adjacence en raison des contraintes fonctionnelles.	
Niveau	Spatial : 2	Flux : 2

TAB. 4.6: Niveaux d'importance d'interaction entre les composants support et capteur

La pondération des interactions peut être obtenue par différents moyens dont le principal est l'implication des concepteurs ou d'autre experts dans le domaine. Les résultats sont transcrits dans une matrice dont les lignes et les colonnes correspondent aux composants fonctionnels (composants principaux). La Figure 4.7 montre la matrice d'interaction résumant les résultats des interactions des composants principaux d'un pèse-personne.

	A	B	C	D	E	F	G
Interface	A	¹ ₂					
Support	² ₁	B	² ₂				
4 capteurs	C	² ₂	C	² ₁			² ₂
Cl	D		² ₁	D	² ₁	² ₁	
LCD	E			² ₁	E		
Pile	F			² ₁		F	
Appuis	G		² ₂				G

Légende

Adjacent : F : Flux

Remarque Une absence de notation dans une cellule signifie l'absence d'interaction.

FIG. 4.7: Matrice d'interaction pour le pèse-personne

4.4.1 Structure optimale d'un produit

Une fois que les estimations sur les interactions sont établies, la prochaine étape consiste à regrouper les composants en sous-ensembles. Ces regroupements permettent non seulement de dessiner la structure du produit, mais aussi de faire évoluer la vision du désassemblage au fur et à mesure du développement des données du produit à concevoir. Les regroupements peuvent être facilement déduits à partir des pondérations des interactions définies dans la section précédente. Dans cette étape, la représentation matricielle du produit devient un outil collaboratif permettant aux concepteurs et aux experts de désassemblage et de valorisation de visualiser les sous-ensemble et de déduire la structure du produit. C'est ici que vont, par exemple, intervenir plus spécifiquement des critères liés à la fin de vie des produits qui pourront conduire à créer ou non certains sous-ensembles. Par cette matrice, nous pouvons symboliser, coordonner et modéliser le produit.

Les regroupements peuvent, de manière significative, avoir des impacts sur la désassemblabilité du produit. Les interactions définies dans l'étape précédente décrivent, au niveau du produit, les problèmes de conception que les concepteurs doivent résoudre avec l'expert de désassemblage. Par conséquent, la complexité de collaboration peut être réduite par le regroupement des composants dont les interactions se reproduisent d'une manière prédominante.

Quoique les interactions aient été mesurées pour chaque type, la pondération des interactions de type spatial est très importante pour la fonction du produit. Par exemple, une condition spatiale de voisinage peut avoir une pondération élevée parce qu'il est souvent difficile de surmonter les restrictions de voisinage qui sont *Indispensable* ou *Interdit* pour la fonction du produit. Les interactions de type spatial des composants électriques et électroniques peuvent très facilement surmonter les conditions de voisinage. L'importance relative de ces types d'interactions dépend fortement de la nature du produit à concevoir.

Ainsi, parti de notre modèle minimal, nous proposons une démarche de regroupement pour la définition d'une structure préliminaire et ainsi d'une séquence de désassemblage préliminaire. Deux étapes sont nécessaires pour aboutir à la première séquence de désassemblage :

1. La définition de la structure
2. L'identification de la séquence optimale

4.4.2 Définition de la structure

La définition de la structure est obtenue par regroupement des composants suivant leurs niveaux d'interaction spatiale et en accord avec le concepteur. Les interactions de même niveau sont regroupées. C'est pour cette raison qu'on a utilisé une représentation matricielle. L'algorithme de regroupement approprié doit ordonner les lignes et les colonnes de façon à regrouper les cellules d'interaction autour de la diagonale. Par cette matrice, nous avons capitalisé les données minimales présentées par les interactions et nous avons pu fournir un support de formalisation des informations implicites fournies par les concepteurs.

		A	B	G	C	D	E	F
Interface	A	A	2					
Support	B	2	B		2			
Appuis	G			G	2			
4 capteurs	C		2	2	C	1		
CI	D				1	D	1	1
LCD	E					1	E	
Pile	F					1		F

FIG. 4.8: Regroupement des interactions de type spatial

La matrice ci-dessus (Figure 4.8), montre une perspective de regroupement des interactions spatiales résultant des pondérations des interactions entre les composants du pèse-personne. Ce regroupement montre que notre conception contient du point de vue fonctionnel, deux groupes primordiaux pour l'accomplissement de la fonction de "pesage".

La matrice (Figure 4.8) nous permet d'identifier les regroupements suivants :

- **Groupe statique (G_S)** : C'est l'ensemble des composants qui doivent être disposés pour recevoir et capter le poids de l'utilisateur. Ce groupe comprend l'interface, le support, les capteurs et les appuis.
- **Groupe électrique (G_e)** : c'est l'ensemble des composants électroniques pour le traitement et l'affichage des informations à l'utilisateur. Ce groupe comporte le CI, le LCD et les piles.

Ces deux regroupements ont été définis suivant l'importance de l'adjacence entre les composants. Le sous-ensemble (G_s) est caractérisé par des interactions de type spatial "Indispensable", ceci signifie que l'adjacence géométrique entre ces composants est nécessaire. Par contre le sous-ensemble (G_e) regroupe les composants dont les interactions n'est pas *Indispensable* offre un grand degré de liberté de choix de conception. Les sous-ensembles peuvent faire à leur tour l'objet d'une analyse et d'un regroupement.

Dans le tableau 4.7 nous illustrons l'exploitation de la représentation matricielle pour la définition de la structure préliminaire.

Ensembles	Matrices	Graphe	Illustration structurelle																																																																
G_s et G_e	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>G_s</th> <th>G_e</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Groupe statique G_s</td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;">1</td> </tr> <tr> <td>Groupe électrique G_e</td> <td style="background-color: black;">1</td> <td style="background-color: black;"></td> </tr> </tbody> </table>		G_s	G_e	Groupe statique G_s		1	Groupe électrique G_e	1																																																										
	G_s	G_e																																																																	
Groupe statique G_s		1																																																																	
Groupe électrique G_e	1																																																																		
G_s	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>G</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Interface A</td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;"></td> </tr> <tr> <td>Support B</td> <td style="background-color: black;">2</td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;"></td> </tr> <tr> <td>4 capteurs C</td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;">2</td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;"></td> </tr> <tr> <td>Appuis G</td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;">2</td> <td style="background-color: black;"></td> </tr> </tbody> </table>		A	B	C	G	Interface A					Support B	2				4 capteurs C		2			Appuis G			2																																										
	A	B	C	G																																																															
Interface A																																																																			
Support B	2																																																																		
4 capteurs C		2																																																																	
Appuis G			2																																																																
G_e	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>D</th> <th>E</th> <th>F</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CI D</td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;">1</td> <td style="background-color: black;">1</td> </tr> <tr> <td>LCD E</td> <td style="background-color: black;">1</td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;"></td> </tr> <tr> <td>Piles F</td> <td style="background-color: black;">1</td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;"></td> </tr> </tbody> </table>		D	E	F	CI D		1	1	LCD E	1			Piles F	1																																																				
	D	E	F																																																																
CI D		1	1																																																																
LCD E	1																																																																		
Piles F	1																																																																		
Produit ($G_s + G_e$)	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A</th> <th>B</th> <th>G</th> <th>C</th> <th>D</th> <th>E</th> <th>F</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Interface A</td> <td style="background-color: black;">2</td> <td style="background-color: black;"></td> </tr> <tr> <td>Support B</td> <td style="background-color: black;">2</td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;">2</td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;"></td> </tr> <tr> <td>Appuis G</td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;">2</td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;"></td> </tr> <tr> <td>4 capteurs C</td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;">2</td> <td style="background-color: black;">2</td> <td style="background-color: black;">1</td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;"></td> </tr> <tr> <td>CI D</td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;">1</td> <td style="background-color: black;">1</td> <td style="background-color: black;">1</td> <td style="background-color: black;"></td> </tr> <tr> <td>LCD E</td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;">1</td> <td style="background-color: black;">1</td> <td style="background-color: black;">1</td> <td style="background-color: black;"></td> </tr> <tr> <td>Pile F</td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;"></td> <td style="background-color: black;">1</td> <td style="background-color: black;">1</td> <td style="background-color: black;">1</td> <td style="background-color: black;"></td> </tr> </tbody> </table>		A	B	G	C	D	E	F	Interface A	2							Support B	2		2					Appuis G			2					4 capteurs C		2	2	1				CI D				1	1	1		LCD E				1	1	1		Pile F				1	1	1			
	A	B	G	C	D	E	F																																																												
Interface A	2																																																																		
Support B	2		2																																																																
Appuis G			2																																																																
4 capteurs C		2	2	1																																																															
CI D				1	1	1																																																													
LCD E				1	1	1																																																													
Pile F				1	1	1																																																													

TAB. 4.7: Définition de la structure préliminaire du pèse-personne

Les regroupements nous permettent non seulement d'identifier les modules, mais aussi d'analyser et de coordonner les choix avec les concepteurs. Ainsi, il est plus aisé de formaliser la transition entre une définition fonctionnelle, caractérisée par des données quelquefois imprécises et floues, en une structure préliminaire autour de laquelle les acteurs peuvent échanger leurs perspectives de développement. Comme le montre le Tableau 4.7, pour déduire la structure, dans un premier temps les regroupements sont considérés comme étant des composants uniques du produit. A ce niveau nous déterminons une structure constituée des deux sous-ensembles G_s et G_e , la troisième colonne du tableau présente ce résultat d'un point de vue structurel. Ensuite, la structure de chacun des sous-ensembles est déduite de la même façon. La matrice du sous-ensemble G_e , montre que les composants ont au plus deux contacts dont les pondérations spatiales de ces différentes interactions est "Indispensable"(2). Ces pondérations signifient que la contrainte d'adjacence entre ces composants est nécessaire pour accomplir la fonction. L'assemblage des composants (Interface, Support, Capteurs et appuis) du sous-ensemble G_s est linéaire. Par contre, la matrice du sous-ensemble G_s est caractérisée par des interactions spatiales dont les pondérations sont (1) (*Recommandé*). Ces pondérations montrent que les contraintes d'adjacence ne sont pas indispensables pour la fonction. La structure de ce dernier sous-ensemble est un assemblage de deux composants LCD (E) et Piles (F) au CI (D), on peut déduire donc que les composants (E) et (F) sont en parallèles. Les contraintes d'adjacence sont exprimées par les flèches des graphes de la deuxième colonne du tableau. Ces flèches indiquent les sens des flux fonctionnels, c'est à dire qui est à l'origine du phénomène d'action/réaction au niveau de la fonction. La structure globale du produit est finalement obtenue par l'association des deux sous-ensembles. Dans la troisième colonne de ce tableau, on peut voir de quelle manière se traduisent ces différents graphes pour les concepteurs qui ont à établir une première ébauche du produit.

L'aperçu fourni par la représentation matricielle est un outil probant, c'est un moyen de restructurer les connaissances et ce, pendant la phase conceptuelle. Il s'agit de permettre aux concepteurs et à l'expert de désassemblage de déduire, à partir des interactions entre les composants fonctionnels, les modules du produit ainsi que sa structure et sa séquence de désassemblage préliminaire.

Cette analyse offre un aperçu de développement de la structure du produit. Cette démarche fournit des perspectives pour la résolution du problème de désassemblage : regroupement basé sur l'importance de la pondération des interactions de type spatial et sur un compromis entre les différents acteurs de la conception. Le croisement entre les contraintes fonctionnelles et le désassemblage pour la valorisation est de cette manière devenu possible.

4.4.3 Séquence optimale

A cette étape d'étude, nous avons défini la structure préliminaire du produit. A partir de cette structure, nous sommes capables de déterminer une séquence que nous jugeons optimale et que nous allons exploiter comme référence autour de laquelle les nouveaux composants seront assemblés.

Pour la génération d'une séquence de désassemblage, deux étapes sont nécessaires :

Choix d'une direction de désassemblage : généralement la direction de désassemblage est la même que celle d'assemblage.

Analyse d'interaction entre les composants : cette analyse consiste à déterminer, suivant la direction choisie, la matrice de précedence entre les composants. Autrement dit, il s'agit de déterminer pour chaque composant l'ensemble des composants qui doivent être récupérés pour atteindre ce dernier. Cette matrice est obtenue à partir de la matrice de modélisation de la structure préliminaire et de la direction de désassemblage choisie. Toutefois, nous sommes dans une phase où certaines données de précedence entre les composants ne sont pas encore définies, pour traduire la précedence entre les différents composants nous avons utilisé les notations suivantes :

1. *Note 0* : le composant j ne précède pas le composant i ,
2. *Note 1* : le composant j précède le composant i ,
3. *Note #* : Pas de contrainte de précedence c'est au concepteur de prendre la décision, cette notation peut prendre la note de 0 ou de 1 .

La figure 4.9 montre la matrice de précedence de notre étude de cas (*pèse-personne*).

4.4. Vue structure support à la définition d'une séquence optimale de désassemblage

	A	B	G	C	D	E	F	
Interface	A	0	0	0	#	#	#	0
Support	B	1	0	0	#	#	#	1
Appuis	G	1	1	1	#	#	#	3
4 Capteurs	C	1	1	0	#	#	#	2
CI	D	#	#	#	#	#	#	#
LCD	E	#	#	#	#	#	#	#
Pile	F	#	#	#	#	#	#	#
	3	2	0	1	#	#	#	

FIG. 4.9: Matrice de précédence

A partir de cette matrice nous pouvons en déduire, dans la dernière ligne et colonne, les niveaux d'accessibilité suivant les deux sens de la direction du désassemblage. Ces niveaux d'accessibilité sont caractérisés par le nombre de composants qui précèdent le composants à désassembler. Etant donné que la masse du pèse-personne est faible, nous considérons qu'il est raisonnable de pouvoir tourner le produit pour le désassembler. Donc le niveau de désassemblage d'un composant est la valeur minimale trouvée entre la ligne et la colonne. Par exemple, pour atteindre le composant G (Appuis), nous devons dans un cas désassembler l'interface, le support et les capteurs ("3" dans la dernière colonne). Dans l'autre cas, le composant est directement accessible ("0" dans la dernière ligne de la matrice). Pour le cas du pèse-personne, il existe finalement trois niveaux :

Niveaux d'accessibilité 0 : $N_0 = \{A, G, D, E, F\}$.

Niveaux d'accessibilité 1 : $N_1 = \{B\}$

Niveaux d'accessibilité 2 : $N_2 = \{C\}$

Sachant que, l'ensemble des composants à récupérer est :

- Polluants : Piles et LCD (E, F) ;
- Valorisation en matière : Interface et support (A, B) ;

Dans la génération de la séquence de désassemblage, nous allons tenir compte des ordres de priorité de désassemblage (voir figure 4.6). Par exemple, les composants susceptibles d'être considérés comme polluants seront privilégiés dans la génération de la séquence de désassemblage. La figure 4.10 présente la séquence de désassemblage obtenue.

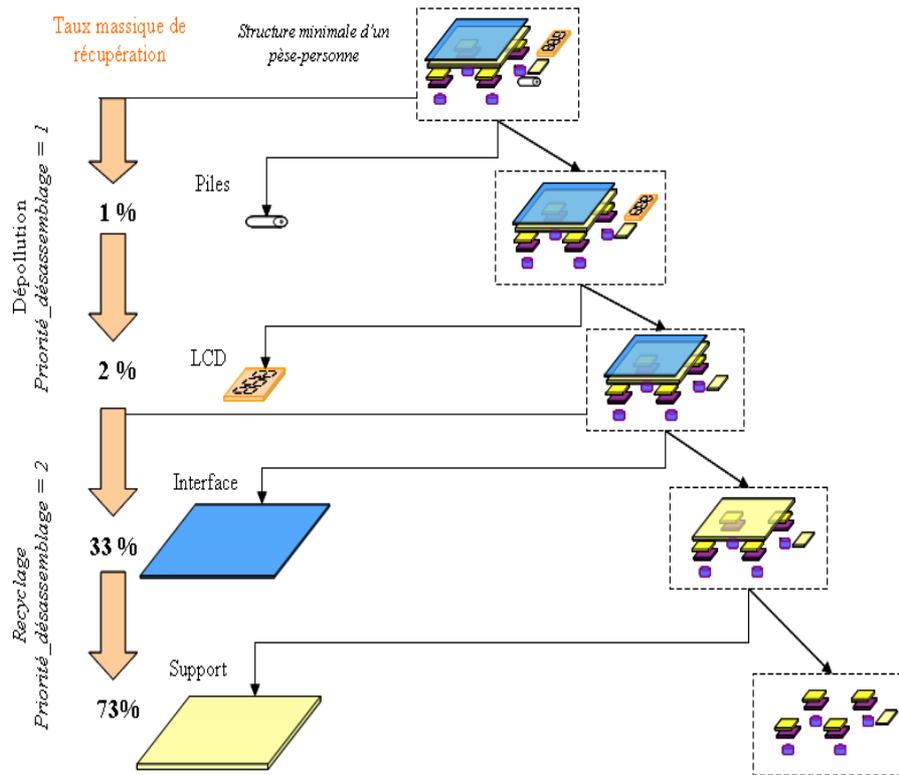


FIG. 4.10: Séquence optimale

4.4.4 Bilan

Dans cette section, nous avons présenté les fondements de notre modèle minimal ainsi que les différentes étapes pour sa modélisation. A l'inverse des méthodes et outils qui s'inscrivent dans une démarche de conception pour le désassemblage, notre modèle propose avant tout de définir **l'objectif** à atteindre et ensuite la recherche des solutions. La séquence optimale qui permet d'atteindre facilement les composants potentiels pour la valorisation constitue notre principal objectif.

4.5 Conclusion

Notre modèle minimal concerne la phase amont du processus de la conception, en particulier la phase conceptuelle ou préconcepts. A l'aide de notre modèle, la démarche de la CpD peut être supportée dans une phase où les paramètres du produit ne sont pas encore définis. Dans cette phase, le concepteur a beaucoup d'influence sur le résultat de la conception. Par notre modèle, nous incluons un CdC environnemental auquel les différents acteurs vont faire référence, un BDS pour chaque famille de produit et une représentation matricielle de la structure du produit à partir de laquelle les acteurs de conception et les experts de désassemblage peuvent coordonner leurs choix.

A partir du modèle de données minimales, une séquence de désassemblage préliminaire est définie. La définition de cette séquence, qui représentera notre objectif, se fait à l'aide d'une matrice de précédence entre les différents composants. Cette matrice, permet d'identifier les niveaux d'accessibilité ainsi que la séquence pour récupérer les composants sélectionnés pour la valorisation. Dans notre démarche, les données minimales représentent la base de proposition et d'investigation des solutions de conception. Cependant les objectifs sont représentés par la séquence de désassemblage. Pour assister les concepteurs dans leur démarche de développement tout en minimisant l'écart entre la séquence préliminaire et les séquences des alternatives de solutions de conception, nous proposons dans le prochain chapitre un outil d'évaluation et de visualisation des solutions suivant les choix effectués liés aux contraintes de désassemblage et de valorisation en fin de vie.

Chapitre 5

Mise en place d'indicateurs en vue de l'optimisation du désassemblage

Sommaire

5.1	Introduction	137
5.2	Présentation globale de la démarche	138
5.3	Les indicateurs	139
5.4	Agrégation d'indicateurs	140
5.4.1	Les méthodes ELECTRE	141
5.4.2	Les méthodes PROMETHEE	143
5.4.2.1	Etablir la fonction de préférence	143
5.4.2.2	Degré de préférence multicritères	144
5.4.2.3	Les flux de surclassement multicritères	144
5.4.3	Bilan	146
5.5	Le tableau de bord	147
5.5.1	Généralités	147
5.5.2	Méthodologie de construction	147
5.5.3	Bilan	149
5.6	Proposition d'un outil d'évaluation du désassemblage	149
5.6.1	Processus de prise de décision et indicateurs	151
5.6.2	Processus de conception et indicateurs	151
5.7	Indicateurs proposés	152
5.7.1	Spécificité d'un système d'indicateurs de désassemblage en phase conceptuelle	152
5.7.1.1	Indicateurs proposés	152

5.7.2	Modélisation des indicateurs	154
5.7.2.1	Indicateur de structure	154
5.7.2.2	Indicateur liaison	156
5.7.2.3	Indicateur des matériaux	159
5.8	Tableau de bord	160
5.9	Choix de solution	161
5.9.1	Définition des références	161
5.9.2	Agrégation	162
5.10	Conclusion	170

5.1 Introduction

Ce chapitre est dédié à la problématique d'évaluation des solutions de conception conformes aux règles législatives et au concept du recyclage noble. Un outil d'assistance à la conception est indispensable pour assurer la transition entre le modèle minimal et les différentes phases de conception du produit.

Comme le schématise la Figure 5.1, la transition est définie comme l'adéquation entre les choix de conception, régi par des règles propres à chaque métier, les indicateurs de désassemblage et les contraintes liées à la stratégie de valorisation définie au début du projet de conception.

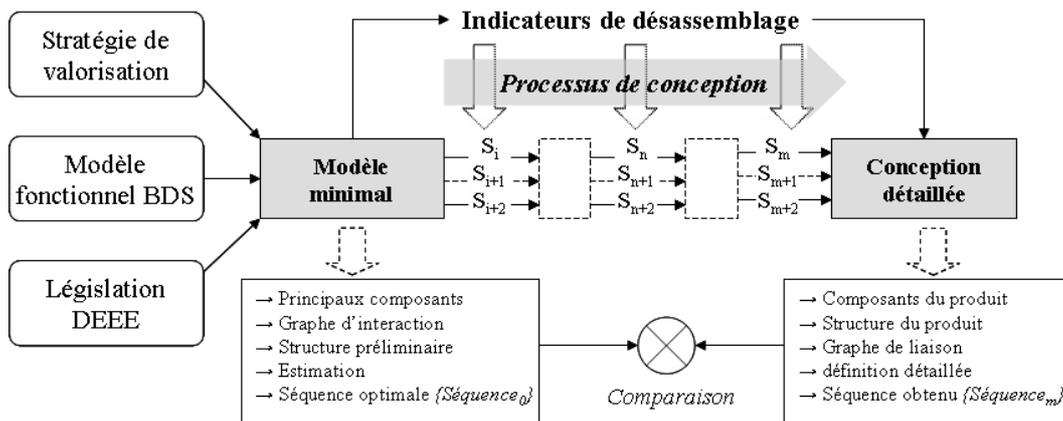


FIG. 5.1: Adéquation entre les choix de conception et les indicateurs de désassemblage

Dans un premier temps, nous définissons les indicateurs d'évaluation ainsi que le tableau de bord qui permet de présenter un panorama général sur l'évolution des données de la conception et sur l'état des différents indicateurs. Les techniques d'agrégation d'indicateurs sont abordées dans la première section de ce chapitre, que cette agrégation corresponde à la définition d'un indicateur unique à partir de tous les autres ou à la synthèse d'une ou plusieurs mesures en un indicateur plus facilement interprétable. Dans la deuxième partie du chapitre, les indicateurs ainsi que la méthode d'agrégation sont appliqués dans une démarche de choix d'une solution intégrant les contraintes de désassemblage pour la fin de vie. Cette première tentative de choix basée sur les trois composantes indispensables pour le désassemblage d'un composant ou d'un sous-ensemble. Ces composantes sont la structure pour exprimer

la difficulté d'accessibilité, les liaisons pour traduire la difficulté de séparation et le matériau qui représente le taux massique qui peut être valorisable.

5.2 Présentation globale de la démarche

Cette section traite des différents éléments que l'on propose d'utiliser afin de réaliser et d'appliquer un outil d'évaluation et de contrôle du désassemblage lors du processus de conception. Avec cet outil, nous voulons quantifier le désassemblage lors de la conception de nouveaux produits et proposer des voies d'amélioration. La figure ci-dessous 5.2 illustre la démarche globale de l'application de notre outil dans le processus de conception.

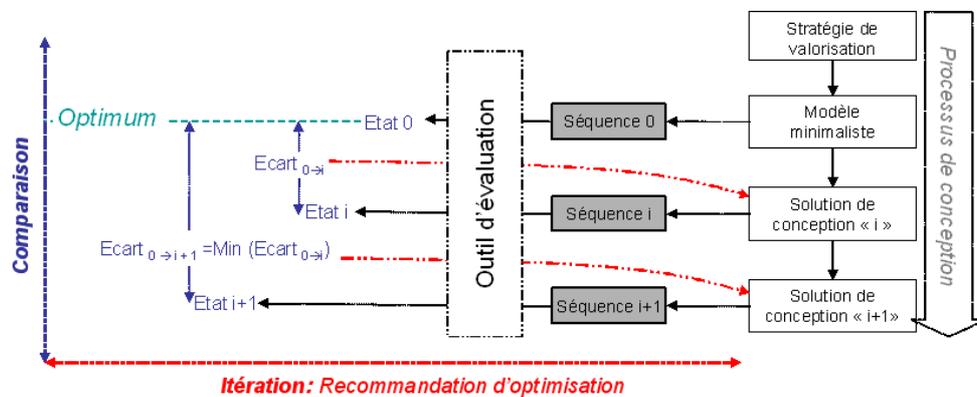


FIG. 5.2: Démarche d'évaluation

Cette démarche est basée sur un processus de comparaison et d'itération.

1. Comparaison : il s'agit de déterminer l'écart $\{Ecart_{0 \rightarrow i}\}$ entre l'optimum représenté par $\{Etat_0\}$ et la solution développée $\{Etat_i\}$
2. Itération : elle se traduit par un processus d'amélioration de la solution développée $\{Etat_i\}$ pour minimiser l'écart entre la solution obtenue et l'optimum retenu par les concepteurs. C'est une phase d'optimisation.

Par conséquent, l'écart entre la $\{Séquence_0\}$ et la $\{Séquence_i\}$ représente le niveau de performance du désassemblage de la solution développée. Lors d'un processus de conception innovant, les limites optimales sont dans la plupart des cas inconnues, c'est la raison pour laquelle nous avons choisi de définir (Cf. Chapitre 4) une séquence $\{Séquence_0\}$ qui représente la meilleure solution qu'on puisse avoir. Cette séquence est donc l'objectif à atteindre par les concepteurs, c'est une référence par rapport à laquelle les concepteurs comparent leurs solutions.

La génération des séquences de désassemblage dans un processus de conception nécessite souvent des outils d'expert. Toutefois, l'analyse de séquences reste difficile à mener dans la phase conceptuelle du développement de produit. Pour faciliter cette analyse, chaque séquence de désassemblage sera décrite par son état qui résume le bilan d'évaluation d'une séquence de désassemblage. Ce bilan d'évaluation est obtenu à partir des indicateurs que nous proposons ultérieurement. Pour présenter des séquences sous forme d'état, un tableau de bord, à partir duquel le concepteur interprète les résultats, est indispensable.

Dans la suite de cette section, nous définissons les indicateurs d'assistance, puis nous abordons les techniques d'agrégation ou de synthèse d'un ou plusieurs résultats en un indicateur plus facilement interprétable. On démontre aussi que les processus de comparaison et d'itération seront abordés par notre évaluation. Étant donné que les indicateurs sont les principaux composants des tableaux de bord, un panorama général sur ces derniers sera présenté.

5.3 Les indicateurs

De nombreuses définitions des indicateurs ont été données. La plus couramment admise de nos jours en France est celle donnée par l'AFGI¹²[88] :

*Un **indicateur** est une donnée quantifiée qui mesure l'efficacité et/ou l'efficience de tout ou partie d'un processus ou d'un système, par rapport à une norme, un plan ou un objectif, déterminé et accepté dans le cadre d'une stratégie.*

Cette définition met en avant plusieurs aspects importants des indicateurs dans notre recherche. La première notion mise en relief est l'aspect quantitatif de l'indicateur. C'est en effet avant tout une *mesure*. Une seconde notion sous-jacente de l'indicateur éclairée par cette définition est le rapport à *l'objectif*. Cet aspect de l'indicateur est considéré comme fondamental, car l'évaluation se fait toujours par comparaison à une référence. En effet le but principal d'une évaluation est de mesurer l'écart entre les résultats obtenus et les résultats souhaités, et de juger le caractère plus au moins acceptable de cet écart.

Dans notre démarche de recherche, l'indicateur est ainsi caractérisé par un objectif, une mesure d'efficacité et des variables d'action. L'objectif représente l'état espéré, la mesure l'état réel et la variable d'action l'un des leviers sur lesquels on peut agir en fonction de l'écart entre l'objectif et la mesure [89]. Ce triplet {objectif,

¹²Association Française de Gestion Industrielle

mesure, variables d'actions} participe activement au bon déroulement des actions menées par les concepteurs. L'objectif, défini par le modèle minimal, doit être approché par les concepteurs. Pour cela, il dispose de points d'action (ou leviers, variables, degrés de liberté) pour contrôler l'évolution du processus de conception. Ces points d'action portent essentiellement sur l'optimisation du désassemblage en agissant sur les variables : structure, liaisons et matériaux.

5.4 Agrégation d'indicateurs

La problématique de la décision multicritères se manifeste tout au long de notre recherche. Il existe plusieurs choix qui doivent être pris par les décideurs. Par exemple pour deux solutions techniques et face à la multitude d'indicateurs de conception et de valorisation en fin de vie, l'acteur doit être capable de choisir la solution la plus adéquate, c'est à dire celle qui réalise le meilleur compromis entre ces différents critères conflictuels [90].

Dans l'étape de l'évaluation, on ne peut pas dire que la solution choisie réponde parfaitement à tous nos critères, de désassemblage ou autres. En effet, il est souvent impossible de les satisfaire en même temps, dans la mesure où ils peuvent faire apparaître des contradictions. Les connaissances des acteurs, les points de vue des experts et le choix de la méthodologie de décision ont un rôle très important pour la sélection de la solution optimale.

Dans l'étape d'évaluation, les paramètres de désassemblage sont agrégés à un paramètre unique (Figure 5.3). Ce paramètre sert pour la comparaison entre deux ou plusieurs conceptions. Pour identifier le système qui est le moins défavorable aux contraintes de valorisation, il est nécessaire de mesurer le degré de prise en compte de ces contraintes. On a donc besoin d'une méthode qui nous permette d'obtenir une valeur unique qui agrège tous les indicateurs de désassemblage. Ici se pose le problème d'analyse multicritères et d'agrégation de ces critères.

Ces méthodes permettent de comparer les systèmes deux à deux et d'établir des relations de classement. Ces relations sont définies par Roy [91] comme suit :

Une relation de surclassement est une relation binaire S définie dans l'ensemble des systèmes, telle que $i S i'$ s'il y a suffisamment d'arguments pour admettre que i (système surclassant) est au moins aussi bon que i' (système sur-classé) et sans qu'il n'y ait de raison importante de refuser cette affirmation. Cette relation de surclassement S pourrait se traduire ici par : " est plus respectueux des contraintes de valorisation que ".

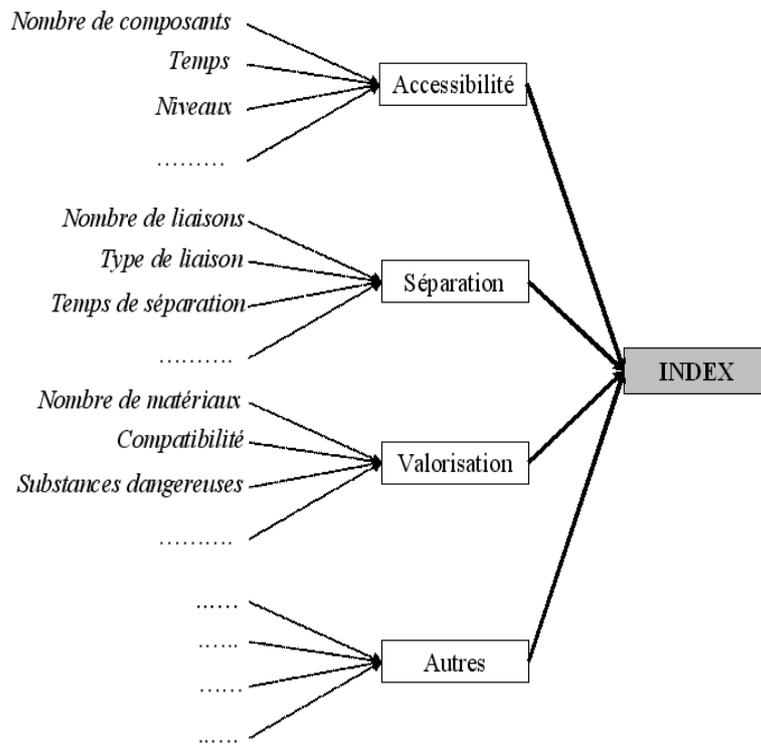


FIG. 5.3: Exemple d'agrégation des indicateurs

Une méthode de surclassement peut donc être scindée en deux étapes : la construction de la relation de surclassement et son exploitation en vue de la problématique choisie (problématique de choix, de tri ou de rangement)[91].

Il existe actuellement deux familles de méthodes de surclassement :

1. Une famille de méthodes ELECTRE qui contient les différentes évolutions sous le même nom, ELECTRE I jusqu'à ELECTRE IV. L'auteur de ces méthodes est le professeur B.Roy.
2. Une famille de méthodes PROMETHEE qui contient plusieurs évolutions sous le même nom.

5.4.1 Les méthodes ELECTRE

La relation de surclassement doit obéir à une condition de concordance qui permet de vérifier qu'une certaine majorité de critères se dégage en faveur de l'action de surclassement. On soumet en même temps cette relation à une condition de non-discordance, imposant le fait qu'il n'existe pas une trop forte pression, dans l'un des critères de la minorité, en faveur du surclassement inverse.

Ces méthodes diffèrent notamment par la façon de formaliser ces définitions. Dans notre cadre de CpD, la relation de surclassement S se traduit par l'expression : " est plus respectueuse des contraintes de fin de vie que ". Une solution de conception i sera plus respectueuse à la fin de vie au regard du critère k que la solution i' , si l'évaluation du critère k est plus petite pour le premier système (i), soit :

$$i S_k i' \text{ si } I^i(k) < I^{i'}(k)$$

Electre IS [91] détermine pour chaque couple de systèmes, un indice de concordance $C(i, i')$. Cet indice renseigne sur le pourcentage de critère k qui vérifie la relation S, en prenant en compte la pondération des critères (P_k). Il est calculé de la manière suivante :

$$C(i, i') = \frac{\sum_k P_k(i S_k i')}{\sum_k P_k}$$

Ensuite, on vérifie les deux conditions de concordance et de discordance pour comparer deux à deux, les systèmes au regard de tous les critères. Pour cette raison, des tests de concordance et de discordance sont réalisés au cours de l'étude.

Test de concordance

Le principe est tel qu'une solution est globalement meilleure qu'une autre si une majorité de critères vérifie la relation S, soit :

$$i S i' \text{ si } C(i, i') > c, c > 0,5$$

Donc, si l'indice de concordance est supérieur au seuil de concordance c , fixé par l'utilisateur, alors la condition de concordance sera acceptée. Dans le cas contraire, la proposition *i sera jugée plus respectueuse aux contraintes de valorisation i'* .

Test de discordance

Le principe est tel que si, pour un critère, l'écart d'évaluation de deux solutions est jugé trop important, alors la solution la plus défavorable sur le critère en question ne peut en aucun cas être déclarée meilleure et ceci quel que soit le résultat des autres critères. Ce principe se traduit mathématiquement par :

$$\text{Si } I^i(k) - I^{i'}(k) > v_k \text{ alors non } (i S i')$$

Avec v_k seuil veto fixé par les concepteurs qui permet d'exclure un système, si l'on juge que son évaluation pour un critère donné est inacceptable pour pouvoir garder ce système comme solution au problème multicritère posé.

5.4.2 Les méthodes PROMETHEE

Les méthodes PROMETHEE (Preference Ranking Organisation METHOD for Enrichment Evaluations) sont une des familles de méthodes de surclassement les plus connues et utilisées. L'objectif principal d'utilisation des méthodes PROMETHEE est d'être facilement compréhensible par le décideur. Cette méthode peut être étendue aux problèmes multi-décideurs. Ceci signifie que cette méthode d'aide multicritères est un outil potentiel d'aide à la résolution de conflits dans un environnement de résolution coopérative de problèmes, par exemple multi-acteurs. En effet, cette méthode fournit au décideur une représentation et une interprétation compréhensibles [90].

5.4.2.1 Etablir la fonction de préférence

Soit $A=\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ l'ensemble des solutions (ou alternatives) que le décideur va évaluer sur une famille de critères $F=\{f_1, f_2, \dots, f_m\}$.

La première étape des méthodes PROMETHEE consiste à associer à chaque critère f_j une fonction de préférence $P_j : A \times A \rightarrow [0,1]$. Cette fonction permet de modéliser les préférences du décideur sur le critère f_j . Lorsque le décideur compare deux alternatives a et b , $P_j(a,b)$ représente le degré de sa préférence pour a , en ne considérant que le critère f_j . Le couple (f_j, P_j) est appelé critère généralisé.

P_j c'est une fonction de la différence entre $f_j(a)$ et $f_j(b)$

$$P_j(a,b) = j(f_j(a) - f_j(b))$$

Où $j=(d)$ est une fonction monotone croissante qui s'annule pour $d < 0$.

- $P_j(a,b) = 0$ indifférence entre a et b si $f_j(a) = f_j(b)$
- $P_j(a,b) \sim 0$ préférence faible de a sur b si $f_j(a) > f_j(b)$
- $P_j(a,b) \sim 1$ préférence forte de a sur b si $f_j(a) \gg f_j(b)$
- $P_j(a,b) = 1$ préférence stricte de a sur b si $f_j(a) \gg \gg f_j(b)$

Afin d'orienter le décideur pour choisir une fonction de préférence adaptée à chaque critère, les auteurs des méthodes PROMETHEE ont proposé six types de fonctions qui semblent recouvrir la plupart des besoins rencontrés dans la réalité.

Chacun de ces six types proposés ne dépend plus que de deux paramètres :

- q_j : seuil d'indifférence, il représente le plus grand écart entre $f_j(a)$ et $f_j(b)$ en dessous duquel le décideur reste indifférent entre a et b .
- p_j : seuil de préférence, il représente le plus petit écart entre $f_j(a)$ et $f_j(b)$ au-dessus duquel le décideur éprouve une préférence stricte en faveur de a .
- j : seuil gaussien, il contrôle l'aplatissement de la fonction de préférence.

5.4.2.2 Degré de préférence multicritères

Pour chaque critère f_j , on lui associe un poids W_j et une fonction de préférence $P_j(j=1, \dots, m)$. Le poids W_i d'un critère représente l'importance relative accordée à celui-ci par le décideur, par rapport aux autres critères.

Le degré de préférence multicritère est la moyenne pondérée des fonctions de préférence P_j .

$$\Pi(a, b) = \frac{\sum_{i=1}^m w_i P_i(a, b)}{\sum_{i=1}^m w_i}$$

Ce degré de préférence représente le degré de préférence de a sur b , en considérant simultanément tous les critères. En comparant toutes les actions les unes par rapport aux autres, on obtient ainsi une matrice de degrés de préférence.

5.4.2.3 Les flux de surclassement multicritères

Cette démarche nous permet de classer nos systèmes suivant un ordre de préférence de valorisation en fin de vie. La méthode s'explique comme suit :

Pour tout $a \in A$, le flux entrant dans a représente la faiblesse de a par rapport aux autres actions de A . C'est le flux de surclassement négatif qui s'exprime par :

$$\Phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \in A} \pi(b, a)$$

Le flux sortant de a représente la dominance de a par rapport aux autres actions de A . C'est le flux de surclassement positif qui s'exprime par :

avec n : nombre d'actions

$$\Phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \in A} \pi(a, b)$$

Le flux net de a , c'est à dire le bilan des flux entrants et sortants s'exprime par :

$$\Phi(a) = \Phi^+(a) - \Phi^-(a)$$

La méthode PROMETHEE utilise l'information sur les flux pour fournir une aide à la décision. En effet à l'aide de ces différents flux de a , on construit avec PROMETHEE I un préordre partiel et avec PROMETHEE II un préordre total.

PROMETHEE I

– a est préféré à b si et seulement si

$$\Phi^+(a) > \Phi^+(b) \text{ et } \Phi^-(a) < \Phi^-(b)$$

$$\Phi^+(a) > \Phi^+(b) \text{ et } \Phi^-(a) = \Phi^-(b)$$

$$\Phi^+(a) = \Phi^+(b) \text{ et } \Phi^-(a) < \Phi^-(b)$$

– a est indifférent à b si et seulement si

$$\Phi^+(a) = \Phi^+(b) \text{ et } \Phi^-(a) = \Phi^-(b)$$

a et b sont incomparables dans les autres cas. La méthode PROMETHEE I est un surclassement partiel, toutes les actions ne peuvent pas être nécessairement comparées les unes aux autres. Il existe des incomparabilités.

PROMETHEE II

a est préféré à b si et seulement si $\Phi(a) > \Phi(b)$

a est indifférent à b si et seulement si $\Phi(a) = \Phi(b)$

PROMETHEE II est un classement complet : toutes les solutions sont classées de la meilleure à la pire et il n'y a pas d'incomparabilité. Ce classement est plus direct que le classement partiel de PROMETHEE I et plus facile à utiliser et à mettre en place. En revanche, il peut contenir des informations moins fiables, car on force la méthode à comparer toutes les actions, même lorsque la comparaison est difficile.

Les résultats obtenus de surclassement peuvent être regroupés dans une matrice ou schématisés sous forme de graphe.

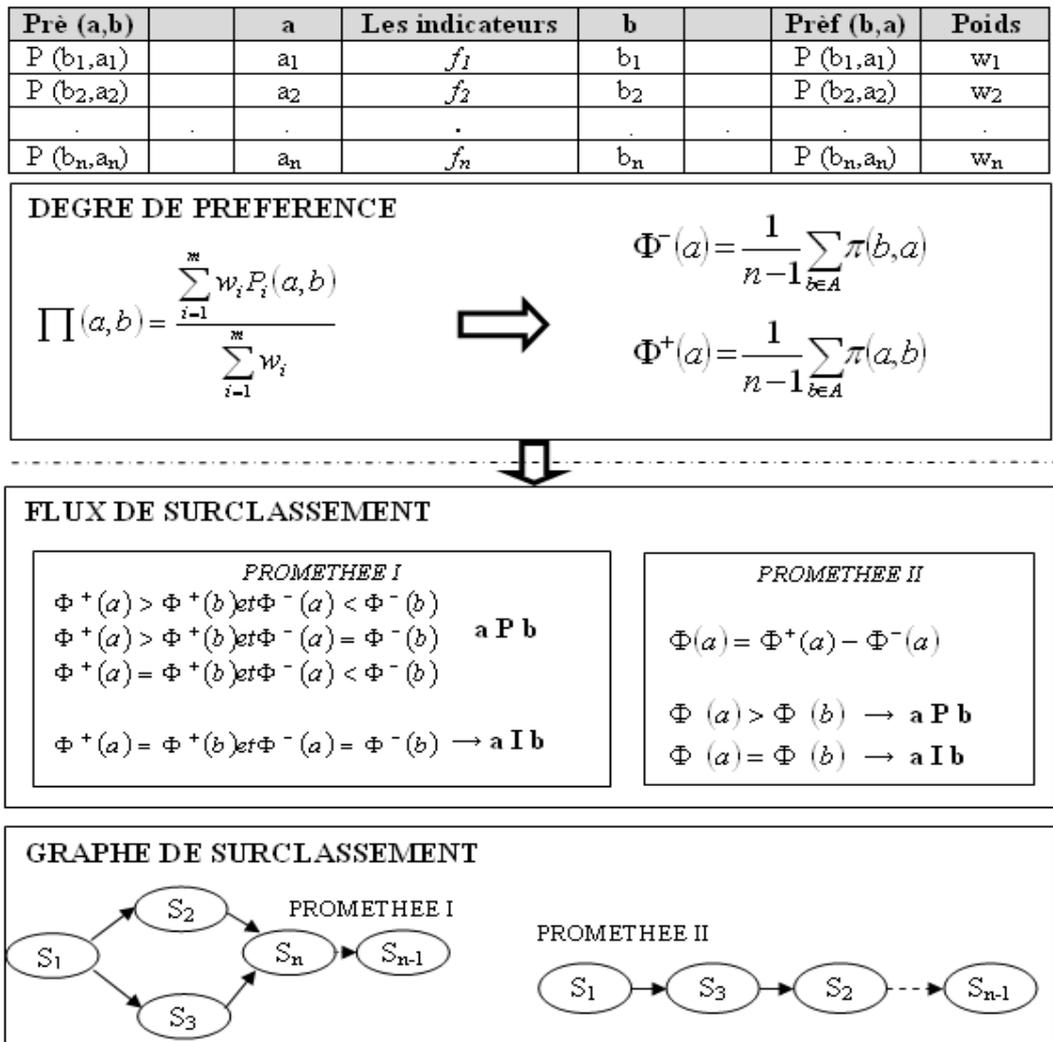


FIG. 5.4: Bilan de la démarche multi-critère

5.4.3 Bilan

L'agrégation d'indicateurs élémentaires peut correspondre à deux notions :

- appliquer à plusieurs objets différents, un même indicateur et dégager de cette application une information globale comme moyenne de valeurs,
 - appliquer différents indicateurs élémentaires sur les mêmes objets et synthétiser ces informations en une seule donnée propre à des objets,
- Il est bien entendu possible de croiser ces deux types d'agrégation, en appliquant à plusieurs objets la synthèse de plusieurs indicateurs élé-

mentaires ou en synthétisant plusieurs indicateurs appliqués à plusieurs objets.

Les indicateurs, qu'ils soient élémentaires ou agrégés, sont des outils d'aide à la décision importants dans le choix d'une solution de conception.

5.5 Le tableau de bord

5.5.1 Généralités

Un tableau de bord est un instrument de synthèse et de visualisation des indicateurs nécessaires à l'évaluation, suggérant des actions d'amélioration. Le tableau de bord correspond à une unité de pilotage quelconque d'un processus de conception. Les mesures effectuées à l'aide des différents indicateurs présents sur le tableau de bord permettent aux concepteurs d'évaluer leurs propositions. Ces décisions peuvent conduire à des actions diverses : actions correctrices, pas d'action, amélioration, innovation...

Les principales fonctions d'un tableau de bord sont :

- synthétiser les informations propres à l'utilisateur du tableau de bord,
- évaluer les résultats
- proposer des actions en fonction des résultats.

Le tableau de bord permet l'évaluation des différents indicateurs et le concepteur peut ainsi connaître l'état du système qu'il développe. C'est en fonction de cette connaissance que l'utilisateur peut prendre des décisions et agir sur le système ou non. Un tableau de bord étant un outil d'aide à la décision pour son utilisateur, une réactualisation régulière est souhaitable afin de rendre compte des effets des actions entreprises. La réactualisation du tableau de bord se fait généralement à chaque période si la décision est périodique ou plus fréquemment si des décisions doivent être prises à l'apparition d'un événement (nouvelle contrainte environnementale par exemple).

5.5.2 Méthodologie de construction

La construction d'un tableau de bord s'élabore en cinq étapes :

- étudier le système à évaluer, le modéliser,
- définir les objectifs assignés au système,

- recenser tous les indicateurs correspondant aux objectifs précédemment définis
- choisir les indicateurs les plus pertinents et les éventuelles agrégations,
- construire le tableau de bord.

Etude du système à évaluer et de son environnement

Cette première phase consiste à déterminer précisément le système sur lequel va porter l'évaluation et ses frontières exactes. On définit clairement ce qui appartient au système et à son environnement, d'où viennent et quels sont les objectifs à remplir, sur quoi agit le système. Cette première étape correspond à une phase de modélisation.

Dans notre étude, l'utilisation des tableaux de bord en tant qu'outil d'aide à l'intégration du désassemblage dès la phase conceptuelle, permet d'avoir un support de traçabilité des évolutions des paramètres de conception et de leurs influences sur la désassemblabilité et la recyclabilité du produit.

Définition des objectifs

Les objectifs sont déterminés en fonction de la stratégie globale de la conception. La définition des différents objectifs assignés à un projet de conception peut se révéler une opération délicate. Il faut en effet veiller à identifier des objectifs propres à la conception tout en fixant les performances d'amélioration du désassemblage. Par exemple, un objectif que peut atteindre la conception est de minimiser le nombre de composants du produit à concevoir. Cet objectif s'applique aussi pour le désassemblage.

Après avoir déterminé les objectifs assignés au système évalué, il faut alors les convertir en indicateurs.

Recensement des indicateurs

La phase suivante de la construction d'un tableau de bord est de recenser, en fonction des objectifs définis précédemment, les différents indicateurs susceptibles de figurer sur le tableau de bord. L'objectif est ce que l'on veut atteindre et l'indicateur est la mesure à effectuer pour pouvoir constater l'écart entre l'état souhaité et l'état réel. Cette phase est complétée par une étape de détermination des variables de décision à associer aux différents indicateurs.

On obtient une liste d'indicateurs susceptibles de figurer sur le tableau de bord, qu'il faut trier pour ne conserver que les plus pertinents.

Choix des indicateurs

L'étape suivante de la construction d'un tableau de bord est le tri des indicateurs :

- on sélectionne ceux que l'on souhaite porter sur le tableau de bord,

- on élimine les redondances,
- on décide de certaines agrégations.

Construction du tableau de bord

Lorsque tous les indicateurs qui vont composer le tableau de bord sont choisis, il faut construire le tableau de bord, c'est-à-dire déterminer de quelle manière vont être représentés les différents indicateurs.

5.5.3 Bilan

Nous avons envisagé suite à notre modèle minimal (voir chapitre 4), la réalisation d'un outil d'évaluation du désassemblage en utilisant un tableau de bord. Ce tableau de bord a pour but de guider les concepteurs, à partir de la phase conceptuelle, vers une solution acceptable, grâce aux informations données par le modèle minimal et aux contrôles données par les différents indicateurs composant le tableau de bord. Au cours de cette section, nous avons passé en revue les différents concepts et techniques nécessaires à notre outil. Nous avons dans un premier temps, présenté les étapes nécessaires à la mise en place du tableau de bord et nous avons donné les définitions théoriques des indicateurs. Ces indicateurs seront visualisés par un tableau de bord qu'il va nous falloir définir en fonction des besoins des concepteurs.

Nous proposerons donc dans la section suivante une définition des indicateurs spécifiques au désassemblage pour la valorisation. Le tableau de bord répondant aux besoins des concepteurs engagés dans une approche DfD sera alors finalement présenté.

5.6 Proposition d'un outil d'évaluation du désassemblage

Au cours du développement d'un nouveau produit, seules les spécifications et les contraintes peuvent être identifiées. Ceci est suffisant pour avoir une vision stratégique d'intégration des contraintes dans le processus global de conception. Toutefois, la quantité d'informations reste insuffisante pour aborder le problème dès la phase conceptuelle. Cependant, cette phase est caractérisée par un potentiel d'optimisation particulièrement élevé. L'outil que nous proposons est développé dans le but de conduire une intégration du désassemblage pour le recyclage à partir d'une définition conceptuelle pour aboutir à une définition détaillée. Cet outil est caractérisé par :

- *Flexibilité* : le processus d'évaluation est appliqué dans toutes les phases de la conception.
- *Itération* : la plupart des processus de développement sont basés sur des approximations successives. Ces approximations sont affinées au fur et à mesure du développement des données de conception. Chaque nouvelle solution est évaluée, analysée et puis détaillée ou rejetée si celle-ci n'est pas adéquate par rapport aux spécifications issues de notre modèle minimal présenté dans le chapitre 4.
- *Complexité* : un processus de développement est constitué de plusieurs phases qui sont interdépendantes. L'évolution des informations et des conditions mène à une augmentation du niveau de complexité. Ce niveau de complexité doit être contrôlé par notre modèle.
- *Organisation* : L'organisation du processus de conception doit encourager la planification du niveau conceptuel. Ceci permet de faciliter le contrôle de la complexité. Dans notre démarche, on considère que chaque phase de conception est le résultat de la phase précédente.

La réalisation de cet outil fait appel à une succession de choix de solutions. Chacun de ces choix est composé de plusieurs étapes. La première étape consiste à analyser le modèle minimal et à identifier les différentes causes de divergence par rapport aux objectifs. Cette étape a pour but de mieux cerner le problème de désassemblage et de proposer d'éventuelles règles et recommandations. On peut avoir différentes méthodes d'analyse :

- visualisation de toutes les données relatives à la désassemblabilité du produit à concevoir.
- utilisation d'outils plus complexes, orientés diagnostic, tels que des diagrammes d'Ishikawa¹³, des analyses AMDEC¹⁴.

La mise en oeuvre d'une analyse utilisant des méthodes assez complexes, n'est pas l'objet de notre travail. Cette phase a simplement pour but de renseigner les concepteurs sur les principales causes de dégradation de la désassemblabilité au cours du développement.

Une fois que l'analyse est effectuée, on cherche les solutions possibles. Ces solutions sont ensuite évaluées en fonction de critères afin de les classer suivant leurs niveaux de satisfaction. La meilleure solution est développée dans la dernière étape. Le

¹³Les diagrammes d'Ishikawa (du nom de son créateur japonais), dit aussi arêtes de poisson, sont des diagrammes où les différentes causes d'une erreur sont représentées d'une manière hiérarchique.

¹⁴Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité, normes AFNOR 60-510 et CEI 812-1985.

processus boucle alors sur la première phase, afin de déterminer si la solution choisie donne satisfaction, si de nouveaux problèmes sont apparus ou si des améliorations peuvent être apportées.

5.6.1 Processus de prise de décision et indicateurs

Les choix d'une solution peuvent être déclinés selon le processus précédemment décrit. En raison du caractère particulier du désassemblage, une assistance est nécessaire afin de guider le concepteur dans le processus de développement. Cette aide passe, selon nous, par l'utilisation des différents indicateurs qui traduisent les séquences de désassemblage et qui montrent les écarts entre l'état_i de la {Séquence_i} et l'état₀ de la {Séquence₀} défini comme objectif à atteindre. Cet objectif (Etat₀) est obtenu par l'évaluation du modèle minimal par les indicateurs. Les concepteurs sont informés via le tableau de bord sur la divergence par rapport aux références fixées par l'Etat₀.

5.6.2 Processus de conception et indicateurs

Dans l'approche de DfD présentée au chapitre 2, les outils de désassemblage et l'expert recyclage interviennent en phase finale de la conception pour fournir les règles et recommandations d'amélioration de la désassemblabilité et de la recyclabilité du produit conçu. Selon nous, l'outil doit aider les concepteurs dans leurs choix et leurs développements grâce à la visualisation des différents indicateurs sur des tableaux de bord. La place de ces indicateurs dans le choix d'une solution est présentée par la Figure 5.5. La boucle de retour présentée ici est différente de celle proposée par les outils dans le chapitre 2. En effet, l'intervention de notre outil au plus tôt dans le processus de conception nous a conduits à différencier trois étapes importantes dans lesquelles nos indicateurs sont appliqués : analyse, évaluation et agrégation.

L'outil proposé est composé de trois modules : évaluation (les indicateurs de désassemblage), agrégation (les approches multicritères) et visualisation (le tableau de bord). Le but de ces modules est bien entendu d'instaurer un outil cohérent avec les pratiques des concepteurs dans leurs choix de solutions et compatible avec la phase conceptuelle de la conception. C'est-à-dire que les concepteurs peuvent utiliser cet outil avant les boucles successives d'amélioration, pour ne pas avoir des solutions trop éloignées de l'optimum "désassemblage" défini au départ par la {Séquence₀}. Les rôles et les spécificités des indicateurs de désassemblage sont détaillés dans la partie suivante.

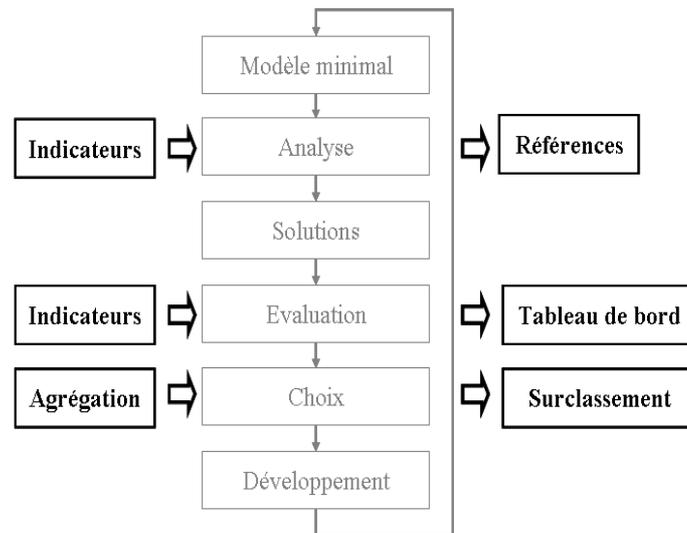


FIG. 5.5: L'intégration de l'outil dans le processus de conception

5.7 Indicateurs proposés

5.7.1 Spécificité d'un système d'indicateurs de désassemblage en phase conceptuelle

Cette approche a été présentée, sous une première forme, dans [92]. A titre de validation nous proposons une spécification de valorisation et de désassemblage en phase conceptuelle.

5.7.1.1 Indicateurs proposés

Pour qu'un composant soit désassemblé d'un produit en fin de vie, trois conditions doivent être vérifiées :

1. la valorisabilité : il s'agit de vérifier si le composant ou le sous-ensemble est potentiellement valorisable. Cette première condition dépend essentiellement du matériaux constitutif du composant,
2. l'accessibilité : c'est une condition qui dépend essentiellement de la structure du produit et de l'encombrement autour des composants valorisables,
3. la séparabilité : ici on vérifie si les liaisons du composant peuvent être séparées facilement. Cette condition dépend essentiellement des types de fixation du composant.

Pour faire un retour à la conception, nous proposons trois catégories d'indicateurs : Indicateur matériau, Indicateur structurel, Indicateur liaison, qui traduisent respectivement la condition de valorisabilité, accessibilité et séparabilité.

Ces trois indicateurs résument les objectifs de désassemblage et de recyclage. Quelques exemples d'objectifs parmi les plus courants sont présentés dans le Tableau 5.1.

<i>Indicateur</i>	<i>Objectifs</i>
<i>Structure</i>	<ul style="list-style-type: none"> – Minimiser le nombre total des composants du produit, – Minimiser le nombre de composants à désassembler pour atteindre un composant cible, – Maximiser les directions d'accessibilité aux composants cibles, – Minimiser le nombre de composants à récupérer pour atteindre le taux de valorisation imposé par la législation, – Minimiser le temps global d'accessibilité pour atteindre les composants cibles,
<i>Liaisons</i>	<ul style="list-style-type: none"> – Minimiser le nombre de liaisons à séparer pour récupérer les composants cibles, – Minimiser le nombre de liaisons irréversibles, – Minimiser le temps global de séparation pour atteindre les composants cibles,
<i>Matériaux</i>	<ul style="list-style-type: none"> – Minimiser la masse totale du produit, – Minimiser le nombre de matériaux constitutifs du produit, – Maximiser le taux de valorisation, – Minimiser le taux des substances polluantes dans le produit,

TAB. 5.1: Objectifs des indicateurs

5.7.2 Modélisation des indicateurs

5.7.2.1 Indicateur de structure

Cet indicateur est défini dans le but de fournir aux concepteurs une première appréciation des structures proposées. En terme de désassemblage, cette appréciation traduit l'évaluation de l'accessibilité qui est une fonction du nombre de composants à désassembler pour atteindre le composant cible [93]. L'hypothèse est la suivante :

Pour un produit de structure quelconque, l'accessibilité dépend du nombre de composants à désassembler et des niveaux d'accessibilité pour atteindre les composants cibles.

On définit l'indicateur de structure d'une solution de conception S_i comme un nombre réel appartenant à l'intervalle $[0,1]$. Ce nombre exprime la qualité avec laquelle la solution proposée satisfait la contrainte de fin de vie. Plus le nombre est proche de $\mathbf{0}$, moins la contrainte est satisfaite, et plus le nombre est proche de $\mathbf{1}$, plus la contrainte est satisfaite. Comme cet indicateur exprime essentiellement la difficulté de récupération d'un composant par rapport à ses contraintes de fin de vie, l'indicateur peut être calculé mathématiquement à l'aide de la formule définie dans la Figure 5.6. Celle-ci représente un rapport entre le nombre total de composants N_T et la complexité d'accessibilité. Cette complexité d'accessibilité est une fonction de nombre de composants à désassembler et leur niveau d'accessibilité.

$$I_s = \frac{N_T}{\left(\sum_{ni,j} N_{ni,j} \cdot NI_j \right) + N_T}$$

FIG. 5.6: Formulation mathématique de l'indicateur structure

N_T Nombre total des composants du produit

$N_{ni,j}$ Nombre de composants à désassembler dans le niveau ni pour atteindre les composants N_j avec $ni \in [0, N_T]$

NI_j Niveau d'accessibilité des composants $N_{ni,j}$

Durant les premières conceptions, cette formule devrait fournir une référence ou *valeur désirée* à laquelle seront comparées toutes les propositions de conception désignées par une *valeur réelle*. Il est possible que les paramètres d'évaluation ne soient pas connus. Dans ce cas, il est nécessaire de se baser dans un premier temps sur des estimations.

Cet indicateur est caractérisé par ses conditions aux limites. L'analyse de ces conditions est décrite ci-dessous :

$$NI_j = N_j \text{ Alors } I_s = \frac{N_j}{\sum_0^j ni + N_j}$$

$$NI_j = 0 \text{ Alors } I_s = 1$$

Exemple d'application :

Soit un produit composé de quatre composants dont un seul est valorisable. Ce produit peut être assemblé suivant trois configurations qui sont présentés dans la figure ci-dessous 5.7.

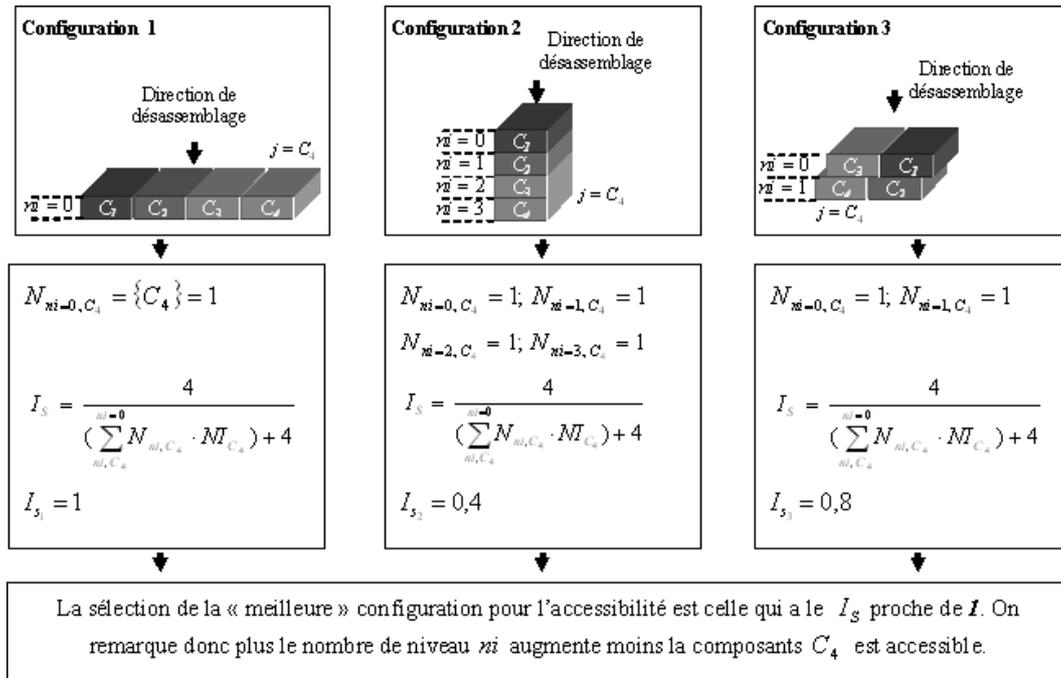


FIG. 5.7: Exemple d'application de I_s

Le résultat fourni par cet indicateur concerne le désassemblage d'un seul composant. Considérons maintenant que tous les composants constitutifs du produit sont valorisables et doivent être récupérés séparément. Dans ce cas, notre formule est toujours valable, mais le résultat I_s du composant C_4 ne sera pas le même. L'idée est de faire en sorte que les composants cibles précédant C_4 ne soient pas pris en compte dans son évaluation. La variable NI_j serait alors égale ni_j moins ni_{j-1} . Dans la figure suivante, on montre que dans les trois configurations, on a un très bon indicateur.

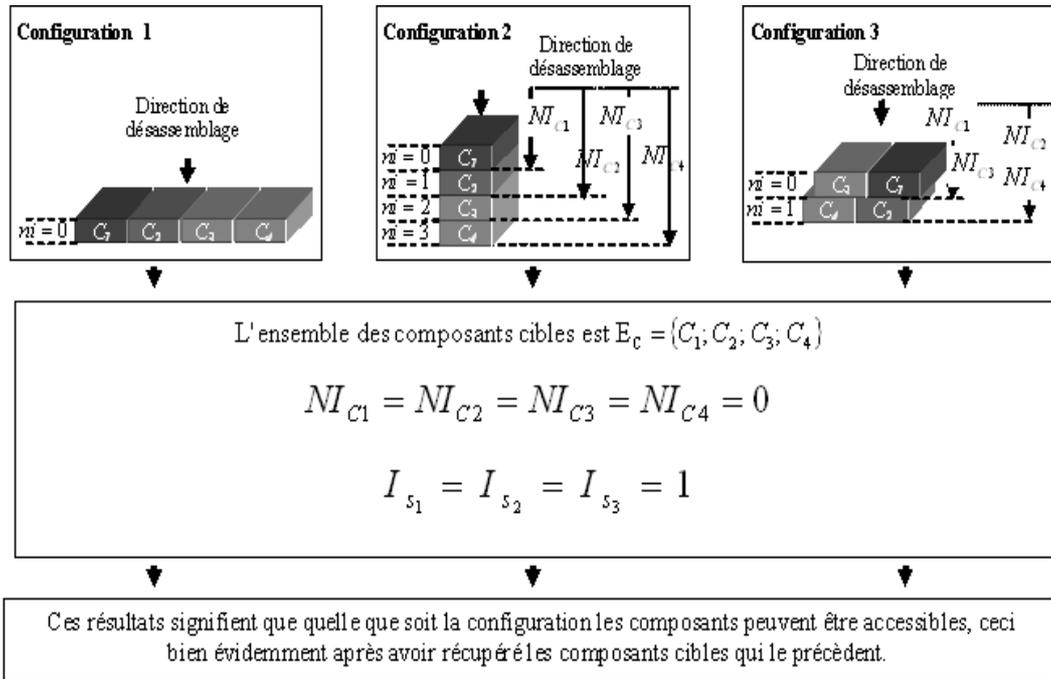


FIG. 5.8: Exemple d'application de I_S dans le cas du désassemblage total

5.7.2.2 Indicateur liaison

L'indicateur liaison correspond aux interactions existantes entre plusieurs composants. Cet indicateur est généralement exprimé en temps nécessaire pour séparer les composants une fois que le produit est entièrement défini. Les options de valorisation sont directement dépendantes des types de liaisons à séparer. Connaissant l'option de valorisation des composants, une caractérisation de la liaison peut être définie. Pour chaque couple de composants, nous avons choisi de caractériser la liaison de la manière suivante : $L = \{Réversibilité, \text{élément de fixation}\}$ et ceci en prenant en compte un ensemble d'attributs.

En fait, le temps de séparation dépend du nombre de composants à séparer, du nombre de liaisons et des types de liaison. On peut formuler l'hypothèse suivant :

Une liaison entre des composants est considérée, en terme de désassemblage, comme une entité homogène pour laquelle sont définis préalablement un type et un coefficient de difficulté de séparation.

Cet indicateur est un nombre réel appartenant à l'intervalle $[0,1]$. Comme l'indicateur structure, plus le nombre est proche de 0 , moins la contrainte est satisfaite, et plus le nombre est proche de 1 , plus la contrainte est satisfaite. Le modèle mathé-

matique de cet indicateur est définie par la Figure 5.9. Celle-ci représente un rapport entre le nombre de composants à récupérer N_j et la complexité de séparation, qui est une fonction du nombre de liaisons de même types et de leurs coefficients de difficulté de séparation.

$$I_L = \frac{N_j}{\sum_{n,j} NL_{n,j} \cdot \eta_{n,j} + 1}$$

FIG. 5.9: Formulation mathématique de l'indicateur liaison

N_j Nombre de composants à récupérer

$NL_{n,j}$ Nombre de liaisons à séparer

$\eta_{n,j}$ Coefficient de difficulté de séparation

Pour définir les coefficients de difficulté de séparation il faut s'appuyer sur les connaissances métier de l'entreprise. Les experts désassemblage doivent faire des propositions relatives aux coefficients de difficulté de séparation, en fonction des moyens disponibles dans l'entreprise. Un coordinateur réunit toutes ces propositions et transmet ensuite une synthèse sous forme de tableau (exemple Tableau 5.2) à chaque membre du groupe.

Liaisons	Coefficients
Contact	0
Clipsage, Goujonnage, Adhésion Insertion, Emmanchement	1
Vissage, Boulonnage, Rivetage Agrafage, Sertissage	2
Collage, Soudage, Ajustement serré Clinchage	3

TAB. 5.2: Exemples des coefficients de difficulté de séparation retenus pour quelques liaisons.

L'analyse de cet indicateur est effectuée suivant ses conditions aux limites.

Conditions aux limites

$NL_{n,j}$ tend vers ∞ Alors I_L tend vers 0

$\eta_{n,j}=0$ Alors $I_L = 1$

Exemple d'application :

Reprenons l'exemple d'application précédent, avec les liaisons suivantes : $L_{C1,C2} = \text{vissage}$; $L_{C2,C3} = \text{clipsage}$ et $L_{C3,C4} = \text{collage}$. Cela signifie que l'on exige le choix de ces fixations quelle que soit la configuration. Leurs coefficients de difficulté de séparation respectifs sont :

$$\eta_{vis} = 2;$$

$$\eta_{clipsage} = 1;$$

$$\eta_{collage} = 3.$$

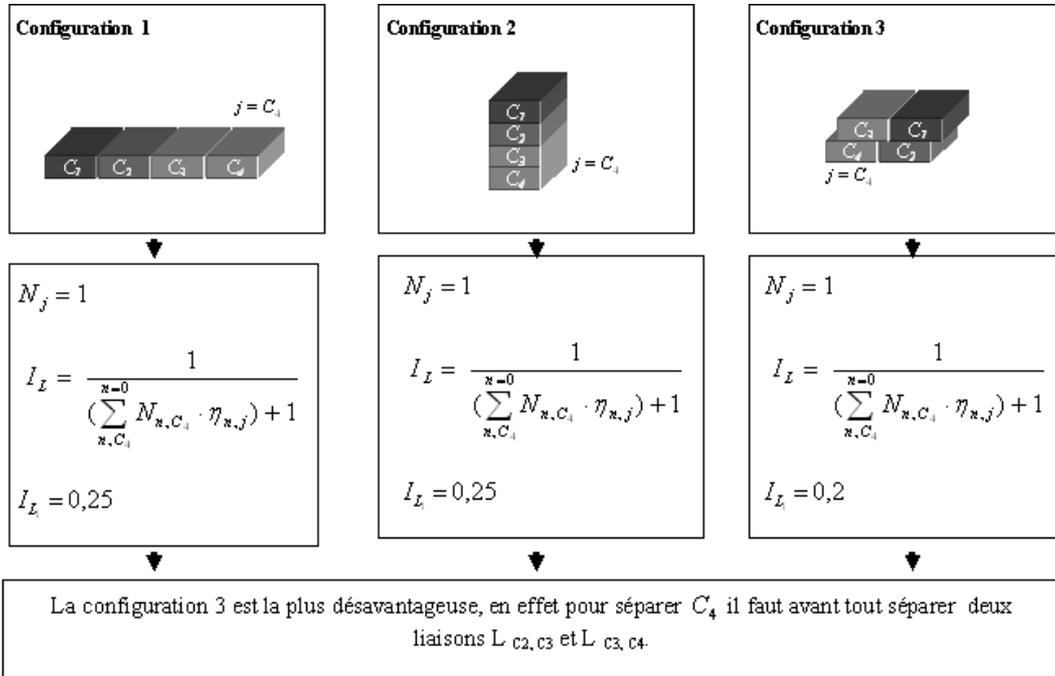


FIG. 5.10: Exemple d'application de I_L

Considérons que les quatre composants doivent être séparés. Dans ce cas, I_L dépend des trois liaisons choisies. Le résultat obtenu est identique pour les trois configurations ($I_L = 0,57$).

5.7.2.3 Indicateur des matériaux

Comme il a été évoqué tout au long des précédents chapitres, la directive DEEE sur la gestion des produits électriques et électroniques en fin de vie exige à l'horizon de 2006 un taux de valorisation de 80% au minimum pour les nouveaux produits. De ce fait, la {Séquence₀} devra impérativement respecter ce taux minimum de valorisation. Il s'agit bien d'une contrainte obligatoire en vue de la réglementation en vigueur. Par conséquent, un choix de matériaux peut facilement influencer la tendance de valorisation du produit. A ce stade, plusieurs règles d'optimisation du désassemblage peuvent être apportées lors du choix des matériaux. Parmi ces règles on cite :

- La relation entre le choix des matériaux et les filières de recyclage,
- Le regroupement des composants en sous-ensembles cohérents (même matériaux ou matériaux compatibles),

Pour la modélisation de cet indicateur, nous nous sommes basés sur l'hypothèse suivante :

Chaque composant élémentaire est considéré, en terme de valorisation, comme une entité homogène de matière pour laquelle est défini préalablement un taux de valorisation prévisionnel.

Ainsi nous avons attribué à chaque composant i une participation T_i au taux de valorisation. La formulation de notre indicateur correspond donc, à la somme des taux de valorisation élémentaire.

De la même manière que pour les deux premiers indicateurs, cet indicateur est représenté par un nombre réel de l'intervalle $[0,1]$. Ce nombre définit le taux de recyclabilité en matière. Autrement dit, plus le nombre est proche de **0**, moins les matériaux sont recyclables, et plus le nombre est proche de **1**, plus le produit est recyclable. Donc, dans le cas où le produit est composé de **0%** de matériaux recyclables l'indicateur I_m prendra la valeur **0** et dans la cas ou il est **100%** recyclable l'indicateur I_m prendra la valeur **1**.

Cet indicateur comme le montre la Figure 5.11 est un rapport entre la somme de la masse des matériaux recyclables M_i et la masse totale du produit M_T .

$$I_M = \frac{\sum_i M_i}{M_T}$$

FIG. 5.11: Formulation mathématique de l'indicateur des matériaux

Pour respecter la législation cet indicateur doit être supérieur ou égal à T_{legis} .

5.8 Tableau de bord

Le tableau de bord résume l'évolution des propriétés de conception et des indicateurs de désassemblabilité (Tableau 5.3).

<i>Produit</i>			
<i>Données sur le produit</i>		<i>Evaluation</i>	
<i>Progression de la conception</i>	<i>Etat</i>	<i>Indicateurs</i>	<i>Niveaux</i>
	Vérfié (+) Estimation (-) Inconnu (?)		
La fonction	+		
Les principaux composants	-	Structure (I_S)	0 — 0,5 — ▼ — 1
Le nombre des composants	?		
La masse	-	Liaisons (I_L)	0 — ▼ — 0,5 — 1
Les matériaux des composants	-		
Les liaisons	?	Matériaux (I_M)	0 — 0,5 — ▼ — 1
La précédence (les composants qui précèdent le composant cible)	?		

TAB. 5.3: Tableau de bord de désassemblabilité

La première colonne du tableau présente les propriétés nécessaires pour l'évaluation de chaque partie du produit. La deuxième colonne traduit l'état des connaissances sur ces propriétés. La propriété peut être non définie (?), définie validée (+) ou définie estimée (-). Ces propriétés montrent l'évolution des indicateurs au cours

de la conception et passent généralement d'un état non défini (?) à une estimation (-) puis à un état défini et validé (+). Ceci permet d'évaluer les marges de manoeuvre encore possibles au niveau de la conception. Les troisième et quatrième colonnes montrent trois indicateurs et leurs niveaux, afin de vérifier la désassemblabilité des composants. De cette façon on peut voir l'évolution du processus de développement du produit et les objectifs de valorisation. Cela fournit une description pour la phase suivante de la conception. Dans la dernière colonne sont également affichés les niveaux et les références (ou les seuils d'acceptation) de chaque indicateur. Ces références sont désignées par le symbole : (▼). Ces références sont définies dans la section suivante.

5.9 Choix de solution

Dans ce paragraphe, nous présentons une méthode qui permet de classer les solutions proposées par les concepteurs et de choisir la solution qui satisfait le mieux les contraintes définies dans le modèle minimal. Pour cela, nous définissons la notion de référence par rapport à laquelle les solutions proposées sont jugées. Ensuite nous présentons l'exploitation de l'approche d'agrégation pour la classification des solutions qui sont au delà des seuils.

5.9.1 Définition des références

Les références sont obtenues par le calcul des indicateurs I_S , I_L et I_M , en se basant sur les données du modèle minimal et sur la séquence S_0 .

Cette séquence S_0 étant minimale, du fait qu'on ne prend pas compte uniquement des principaux composants du produit en cours de développement, on va obtenir des valeurs de référence assez bonnes pour I_M , I_L et I_S . L'objectif dans la suite de la conception, sera de viser ces références, malgré la complexification du produit.

Application à l'exemple du pèse-personne

Reprenons les données minimales résumées par le Tableau 4.4 et la structure préliminaire du pèse-personne définie par le Tableau 4.7 du quatrième chapitre. A partir de ces données nous voulons trouver la référence acceptable pour chaque indicateur (structure, liaison et matériau). Cet intervalle est déterminé, comme le précise le modèle minimal, pour le désassemblage et la valorisation des composants suivants : *l'interface, le support et l'alimentation (polluant)*.

Pour le calcul de I_S référent :

Nous nous appuyons ici, sur la séquence de référence S_0 . Dans l'exemple du pèse-personne, au niveau 0, nous avons 3 composants. Au niveau 1, 1 composant. Ceci nous amène à un $I_S = 7/(7+1) = 0,875$

Pour le calcul de I_L référent :

Comme les liaisons ne sont pas définies au niveau du bloc diagramme simplifié, il s'agit ici de se placer dans une configuration très favorable, c'est à dire que le coefficient de liaison retenu est « 1 » quelle que soit la liaison. Dans l'exemple du pèse-personne, pour désassembler les 4 composants, il faut « casser » 4 liaisons, ce qui nous amène à un $I_L = 4/4+1 = 0,8$.

Pour le calcul de I_M référent :

Il suffit ici, de considérer les masses estimées des différents composants concernés. Dans l'exemple du pèse-personne, ceci nous amène à $I_M = I_{M,Piles} + I_{M,LCD} + I_{M,Interface} + I_{M,Support} = 0,82$

	I_S	I_L	I_M
<i>Pèse-personne</i>	<i>0,875</i>	<i>0,8</i>	<i>0,82</i>

TAB. 5.4: Les références des indicateurs de désassemblage pour le pèse-personne

Pour chaque indicateur, nous avons donc une référence obtenue à partir du modèle simplifié de la situation. Cette référence permet de faire une première appréciation des solutions de conception. Dans le cas où les indicateurs montrent des résultats conflictuels, c'est-à-dire qu'une même solution est jugée très satisfaisante certains indicateurs et moins sur d'autres, ceci nécessite une agrégation des résultats de chaque solution afin de pouvoir identifier la solution optimale. C'est cette démarche d'agrégation que nous allons traiter dans la section suivante.

5.9.2 Agrégation

Dans le paragraphe précédent, nous avons présenté une méthode pour estimer, indicateur par indicateur, les références acceptables du point de vue du désassem-

blage. Le but de ces références est de faire une première appréciation des solutions de conception. A partir de l'ensemble des solutions acceptables, les concepteurs devront choisir la solution qui satisfait le mieux les différentes attentes. Face à l'hétérogénéité des contraintes de conception et de valorisation des produits en fin de vie, une méthode d'agrégation des indicateurs est indispensable. Cette méthode permet de classer les solutions suivant un ordre de préférence. Pour des raisons de simplicité d'application, nous avons choisi la méthode PROMETHEE. Par cette méthode on peut appliquer à plusieurs solutions différentes, plusieurs indicateurs et dégager une classification de ces solutions.

Pour expliquer cette méthode, reprenons l'exemple du pèse-personne. Au cours de la conception de ce produit plusieurs solutions possibles ont été générées. Ensuite les concepteurs doivent dégager les avantages et les inconvénients économiques, environnementaux, de valorisation en fin de vie, etc. Cette problématique de choix, nous l'avons vécu avec l'équipe de conception dans leur choix du matériau du composant qui assurera la fonction *support* (Figure 3.10). Ce composant doit premièrement respecter les critères mécaniques (résistance, rigidité,) et économiques. Deuxièmement, étant donné qu'il représente 45% de la masse totale du pèse-personne, ce composant doit être recyclable. Ce composant est donc prépondérant pour atteindre le taux imposé par la DEEE.

Pour résoudre ce problème l'expérience s'est déroulée en trois phases.

1. Définition d'une liste des matériaux qui garantissent les caractéristiques mécaniques nécessaires (dureté, charge maximale à supporter, dimensions etc.)
2. Analyse de la recyclabilité des matériaux et de leurs effets sur les composants adjacents,
3. Application de la méthode d'agrégation pour la classification et le choix d'une solution.

Suite à cette expérience de choix de matériaux et aux réactions des acteurs de conceptions, trois alternatives de choix ont été envisagées. Chacune des alternatives a fait aussi l'objet de développement et d'analyse. Le développement a été essentiellement centré autour du choix technologique des fixations qui dépend du matériau constitutif du "*support*". Par contre, l'analyse s'est portée sur la désassemblabilité des solutions. Pour chacune des alternatives nous avons estimé un coût. L'ensemble des trois alternatives est alors présenté lors d'une réunion composée de concepteurs et d'expert de désassemblage :

Solution 1 : *Support* en Verre : ce choix nécessite une fixation par collage. Du point de vue structure, le support et le reste des composants sont enveloppés par le composant "*Interface*" qui sera composé de deux parties (partie supérieure et partie inférieure). La séparation des composants nécessite alors la destruction de la fixation collage. Un risque de contamination, entre le matériau du support et les matériaux des composants adjacents, est possible. Le coût de cette solution est de 3 euros.

Solution 2 : *Support* en tôle d'acier : dans ce cas le composant est obtenu par emboutissage et le vissage a été choisi comme fixation. Du point de vue structure, à la différence de la première solution, le support aura aussi la fonction interface de la partie inférieure. Les composants sont donc enveloppés par le composant "*Interface*" et le composant "*Support*". L'avantage de ce choix est que le désassemblage peut être effectué sans avoir recours à la destruction du composant ou de la fixation. Le coût estimé pour cette solution est de 5 euros.

Solution 3 : *Support* en Bois aggloméré : étant donné que la pièce est obtenue par moulage, les concepteurs proposent des empreintes pour assurer la fixation du support par un simple positionnement avec les composants adjacents. Le support et le reste des composants sont enveloppés par l'interface. La récupération du composant ne nécessite pas une opération de séparation entre le support et les composants adjacents. Cette solution est estimée à un coût de 4 euros.

<p>Solution 1 : Support en verre</p>	<p>Solution 2 : Support en Tôle acier</p>	<p>Solution 3 : Support en bois</p>

TAB. 5.5: Les trois alternatives de conception

La Figure 5.12 illustre l'analyse qui peut être effectuée entre deux composants du pèse-personne à partir du BDS défini dans le modèle minimal.

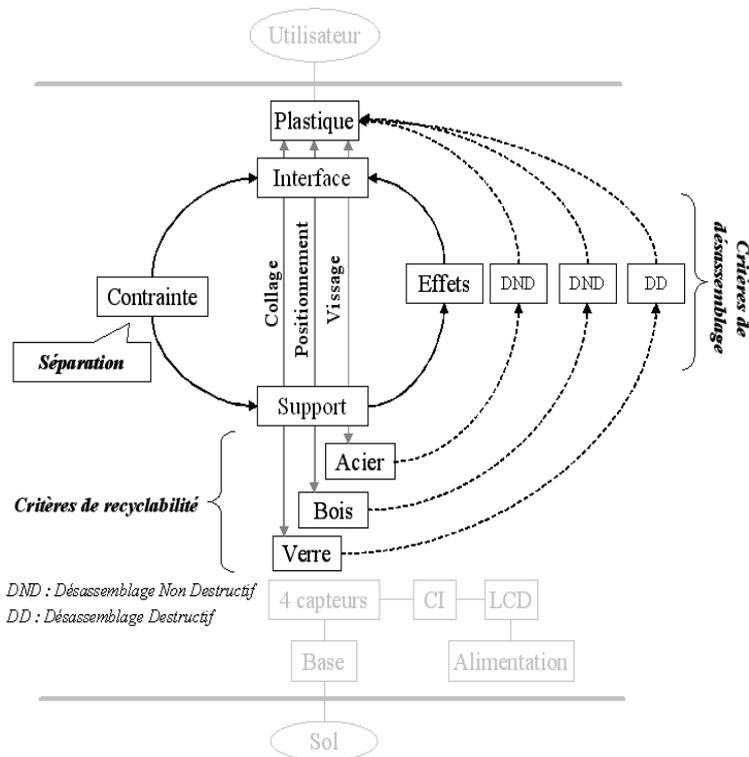


FIG. 5.12: Analyse de choix de matériaux et de leurs effets sur les composants adjacents

Dans une approche de DfD, un choix de matériau impose des contraintes sur le choix des modes de fixation ou de liaison entre deux composants. Ces contraintes peuvent être de type technologique, économique et de fin de vie.

Les contraintes de type technologique : pour expliquer nos propos, prenons l'exemple du *support en verre*. L'assemblage de ce support ne peut être effectué que par collage. Ce choix de matériau a été effectué pour des raisons techniques liées à la résistance du matériau du composant "*support*" par rapport à une charge imposée (le poids de l'utilisateur).

Les contraintes de type économique : ces contraintes se traduisent essentiellement par le temps opératoire nécessaire pour l'assemblage de deux composants. Le but est donc de minimiser ce temps.

Les contraintes de fin de vie : ces contraintes se traduisent par la nécessité de séparer le produit en composants et/ou sous-ensembles mono-matériau ou de matériaux compatibles.

Ces contraintes sont définies par des indicateurs qui permettent de fournir une appréciation des solutions proposées. Par conséquent, le choix d'une solution est un problème multi-critères. Dans notre exemple, nous allons nous intéresser uniquement aux indicateurs de désassemblabilité qui ont été définis dans les sections précédentes. Nous présentons ci-dessous une application de la démarche d'agrégation afin de surclasser les solutions de conception pour un pèse-personne, selon ces indicateurs. Cette démarche d'agrégation a été effectuée suivant trois étapes :

Première étape : évaluation des solutions

Pour cette évaluation, nous avons choisi quatre indicateurs : matériaux, structure, liaison et coût. L'intérêt ici, est de pouvoir par la suite définir d'autres indicateurs pour enrichir la démarche d'évaluation en phase avancée de conception. Les trois solutions proposées par les concepteurs ont été évaluées à partir des données minimales du pèse-personne (Données minimales définis dans le chapitre 4). Pour illustrer cette étape nous présentons l'évaluation de la solution 2 (*Support en Tôle d'acier*).

Indicateur structure :

$$I_s = \frac{N_T}{\left(\sum_{n,j} N_{ni,j} \cdot M_j \right) + N_T}$$

Avec

$N_T = 17$ correspond au nombre total des composants,

$N_{ni=0, \{Piles, LCD, Support, Interface\}} = 4$ qui correspond à $\{4 \text{ vis}\}$,

$N_{ni=1, \{Piles, LCD, Support, Interface\}} = 1$ correspond au composant $\{Interface\}$,

$N_{ni=2, \{Piles, LCD, Support, Interface\}} = 2$ correspond aux composants $\{Piles, LCD\}$,

$N_{ni=3, \{Piles, LCD, Support, Interface\}} = 1$ correspond au composant $\{Support\}$,

$$I_s = \frac{17}{(0 \times 4) + (1 \times 1) + (2 \times 2) + (1 \times 3) + 17} \Rightarrow I_s = 0,68$$

Indicateur liaison :

$$I_L = \frac{N_j}{\sum_{n,j} NL_{n,j} \cdot \eta_{n,j} + 1}$$

Avec

$N_j = 4$ correspond au nombre à récupérer,

$NL_{n,j} = 4$ fixations de type vissage,

$\eta_{n,j} = 2$, Coefficient de difficulté de séparation des fixation de type vissage,

$$I_L = \frac{4}{4 \times 2 + 1} \Rightarrow I_L = 0,44$$

Indicateur matériau :

$$I_M = \frac{\sum_i M_i}{M_T}$$

Avec : $I_{M,Piles} = 0,01$; $I_{M,LCD} = 0,01$; $I_{M,Interface} = 0,35$; $I_{M,Support} = 0,45$

$$I_M = 0,82$$

Le Tableau 5.6 résume l'ensemble des résultats obtenus par notre évaluation.

<i>Matériaux support</i>	I_S	I_L	I_M	<i>Coût</i>
<i>Verre</i>	<i>0,56</i>	<i>0,2</i>	<i>0,82</i>	<i>3</i>
<i>Acier</i>	<i>0,68</i>	<i>0,44</i>	<i>0,82</i>	<i>5</i>
<i>Bois</i>	<i>0,72</i>	<i>0,35</i>	<i>0,82</i>	<i>4</i>

TAB. 5.6: Bilan d'évaluation

Deuxième étape : Calcul de la fonction de préférence

L'essence de la méthode PROMETHEE consiste à comparer, pour chaque indicateur, chaque solutions de conception avec les autres solutions. Il faut dans ce cas définir pour chaque indicateur une préférence entre deux solutions. Par exemple, le *support* en acier est préféré à celui en bois pour I_S , le résultat est donc $Préf (Acier,Bois) = (1,0)$. Le Tableau 5.7 résume les résultats de comparaison entre ces deux solutions.

<i>Indicateurs</i>	<i>Bois</i>	<i>Acier</i>	<i>Préf (Bois,Acier)</i>
I_S	<i>0,72</i>	<i>0,68</i>	<i>1,0</i>
I_L	<i>0,35</i>	<i>0,44</i>	<i>0,1</i>
I_M	<i>0,82</i>	<i>0,82</i>	<i>0,0</i>
<i>Coût</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>1,0</i>

TAB. 5.7: Fonction de préférence

Troisième étape : Calcul des flux et surclassement des solutions

Chacune des solutions doit être comparée aux autres. Afin d'évaluer toutes les possibilités de comparaisons, nous allons calculer pour chaque solution le flux entrant, sortant et net. Ces flux dépendent de la fonction de préférence et des poids d'importance de chaque critère. Le calcul de ces flux se trouve dans l'annexe 1. Les résultats d'évaluation sont résumés dans le Tableau 5.8.

<i>Solutions</i>	<i>Flux entrant (Φ^-)</i>	<i>Flux sortant (Φ^+)</i>	<i>Flux net (Φ)</i>
<i>Verre</i>	<i>0,45</i>	<i>0,35</i>	<i>- 0,1</i>
<i>Bois</i>	<i>0,4</i>	<i>0,4</i>	<i>0</i>
<i>Acier</i>	<i>0,35</i>	<i>0,45</i>	<i>0,1</i>

TAB. 5.8: Les flux de surclassement

A partir de l'analyse précédente, nous allons ainsi classer les solutions suivant un ordre décroissant de préférence. Par cette méthode nous obtenons le surclassement suivant : le support en *acier* est surclassé par rapport à celui en *bois* et en *verre* et le support en *Bois* est surclassé par rapport à celui en *Verre*. Le détail de cette analyse est présentée en annexe 1.

La figure 5.13 montre le classement final des solutions.

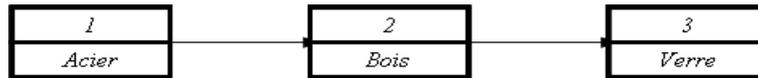


FIG. 5.13: Graphe de classification des solutions

Par cette application nous venons de montrer qu'une évaluation des choix de conception en phase conceptuelle est possible. Il faut aussi préciser que la démarche d'agrégation que nous venons d'adopter est suffisamment flexible pour qu'elle s'adapte à d'autres indicateurs de conception. En d'autres termes, lorsqu'une nouvelle contrainte apparaît, il est possible de l'intégrer dans la démarche sans pour autant remettre en question le modèle global. En plus, cette méthode nous permet d'agréger des indicateurs dont les unités ne sont pas équivalentes.

Pour effectuer une analyse multicritères, le temps principal est consacré à la modélisation des critères de préférence selon la méthode PROMETHEE. Comme nous l'avons indiqué au début de ce chapitre, le processus d'analyse multicritères constitue un processus itératif. Pour chaque indicateur, le concepteur peut choisir les différents modèles de préférence et attribuer un poids différent pour évaluer avec différents points de vue les solutions obtenues.

De cette manière, nous fournissons au concepteur une image de synthèse de ses préférences. Avec ces informations, le concepteur peut se concentrer sur la modélisation des préférences et l'exploitation de l'espace de recherche des solutions, basées toujours sur le modèle minimal.

5.10 Conclusion

Au début de ce chapitre, nous avons présenté les éléments théoriques, liés aux évaluations multicritères, que nous avons utilisés pour le développement d'un outil d'aide à la prise en compte des contraintes de désassemblage des produits en fin de vie. Nous avons retenu trois indicateurs de valorisation pour traduire les contraintes de désassemblage en fin de vie ; nous avons appliqué ensuite des méthodes d'agrégation d'indicateurs, ces méthodes proposent de surclasser les solutions de conception puis nous avons construit un tableau de bord qui permet d'afficher l'évolution de nos indicateurs au fur et à mesure de la définition du produit.

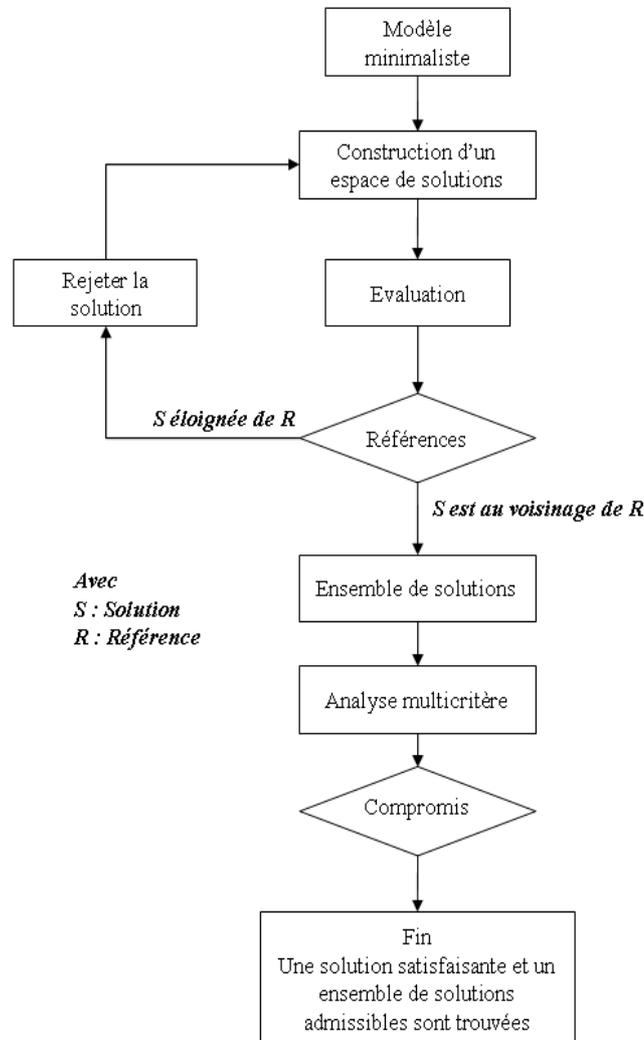


FIG. 5.14: Processus de choix

Globalement notre outil permet une intégration moins brutale des contraintes de valorisation. Les principales caractéristiques originales de notre outil sont présentées par la figure 5.14. La figure montre que, dès la phase conceptuelle, l'outil est capable de faire une première appréciation des solutions qui seront ensuite soit :

- Rejetées si elles sont **très éloignée de R** ,
- Comparées si elles sont **au voisinage de R** ,

Le résultat final de notre outil est de classer les solutions selon les objectifs définis dans le modèle minimal. Dans le chapitre suivant, nous proposons une mise en oeuvre sur une étude de cas pour valider notre démarche.

Chapitre 6

Illustration et application : aspirateur

Sommaire

6.1	Introduction	174
6.2	Construction du modèle minimal dans le cadre de la conception d'un aspirateur	174
6.2.1	Cahier des charges environnemental	174
6.2.2	Cahier des charges fonctionnel	176
6.2.3	Les données minimales	178
6.3	Structure et définition de la $\{Séquence_0\}$	180
6.3.1	Analyse conceptuelle de la structure	180
6.3.2	Séquence optimale	183
6.4	Evaluation des solutions de conception	186
6.4.1	Définition des références	186
6.4.2	Description des solutions	187
6.4.3	Tableau de bord	188
6.4.4	Surclassement des solutions	189
6.5	Conclusion	191

6.1 Introduction

Nous avons, dans les chapitres précédents, proposé une approche pour l'intégration des contraintes de désassemblage dans un processus de conception innovant. Cette approche se déroule en deux phases :

1. *Première phase* : analyse du produit à concevoir et définition du modèle minimal,
2. *Deuxième phase* : évaluation et orientation des choix des solutions de conception.

Nous allons, dans ce qui suit, illustrer notre approche sur un exemple concret. Le produit à concevoir que nous avons choisi est l'aspirateur qui fait partie des produits qui doivent respecter les directives DEEE.

6.2 Construction du modèle minimal dans le cadre de la conception d'un aspirateur

6.2.1 Cahier des charges environnemental

La conception des aspirateurs est confrontée aux nouvelles attentes du marché résultant de la nouvelle directive DEEE. Ces attentes ont fait l'objet d'un texte publié dans le journal officiel de l'Union Européenne¹⁵, qui met en évidence plusieurs critères à respecter.

Ces critères montrent l'importance de la prise en compte de la fin de vie dans la conception des aspirateurs. En effet, dans un premier temps, ils responsabilisent les producteurs en leur imposant la nécessité de démontrer la désassemblabilité de leurs produits et dans un second temps, ils fournissent quelques recommandations pour aboutir à un produit final de meilleures désassemblabilité et recyclabilité.

La directive spécifique aux aspirateurs présente quelques critères à intégrer directement au niveau du cahier des charges fonctionnel. Ces critères peuvent être classés en critères fonctionnels d'une part et environnementaux d'autre part.

¹⁵DÉCISION DE LA COMMISSION, du 11 février 2003 : établissement des critères écologiques pour l'attribution du label écologique communautaire aux aspirateurs. (notifiée sous le numéro C(2003)114)(2003/121/CE)

Les critères fonctionnels

Ces critères sont centrés sur les exigences des consommateurs en matières d'efficacité d'utilisation et de sécurité. Les critères les plus importants à considérer pour la réussite du projet sont :

1. Consommation d'énergie et efficacité de dépoussiérage,
2. Durabilité,
3. Niveau sonore,
4. Emissions de poussière,
5. Résistance au déplacement de la tête d'aspiration,
6. Mode d'emploi et information du consommateur.

Les critères environnementaux

Ces critères ont été récemment imposés par des directives sur la valorisation des produits en fin de vie. Ils précisent les nouvelles recommandations à prendre en compte lors de la conception des nouveaux produits.

- Taux de valorisation $> 70\%$
- Le fabricant doit vérifier le démontage du produit et établir un relevé qui sera mis à la disposition des tiers sur demande.
- Les éléments électriques doivent être assemblés mécaniquement de manière à faciliter le démontage et le recyclage.
- Les éléments métalliques doivent être aisément accessibles afin de faciliter le démontage et le recyclage.
- Les matériaux interdits sont les suivants : Plomb ; Mercure ; Cadmium ; Chrome hexavalent ; Polybromodiphényles (PBB) ; Polybromodiphényléthers (PBDE) ;
- Les éléments en matière plastique doivent être exempts d'inclusions métalliques inséparables.
- Les éléments en matière plastique d'un poids supérieur à 25 g doivent être exempts de substances retardatrices de flamme et doivent avoir un marquage permanent précisant le type de matière,
- Le fabricant doit offrir la possibilité de reprendre, aux fins de recyclage, le produit et tout composant remplacé, à l'exception des sacs à poussière et des filtres. Cette reprise doit être effectuée gratuitement, sauf si les autorités locales ou nationales ont fixé une redevance à cet effet.

Ces critères, viennent compléter le cahier des charges. Les intervalles d'acceptabilité de chaque critère sont présentés en détail dans le Tableau 6.1.

<i>Critères</i>	<i>Références</i>
<i>Consommation d'énergie et efficacité de dépoussiérage</i>	
Après cinq passages sur un tapis Wilton,	<ul style="list-style-type: none"> - l'efficacité de dépoussiérage $\geq 70\%$ - l'énergie consommée < 345 Wh
<i>Durabilité</i>	
Durée du vie du moteur	>550 heures
Durée du vie du suceur	>1000 rotations de tambour
Durée du vie du tuyau	>40000 oscillations
Durée du vie de l'interrupteur	>2500 fois
Durée du vie de l'aspirateur	> 2 ans
<i>Recyclabilité, reprise et recyclage</i>	
Substances interdites	Plomb, Mercure, Cadmium, Chrome hexavalent, Polybromodiphényles (PBB), Polybromodiphényléthers (PBDE),
Les éléments en matière plastique	doivent être exempts d'inclusions métalliques inséparables
Taux de valorisation	>70%
<i>Bruit</i>	
Niveau sonore (puissance acoustique)	<76 dBA
<i>Émissions de poussière</i>	
La quantité de poussière émise (Q)	$Q < 0,01$ mg/m ³
Les filtres à poussière	Remplaçable et/ou lavable (de couleur claire)
<i>Résistance au déplacement de la tête d'aspiration</i>	
La résistance au déplacement de la tête d'aspiration (R)	$R < 25$ N

TAB. 6.1: Les données minimales de l'aspirateur

6.2.2 Cahier des charges fonctionnel

En plus des contraintes de valorisation citées ci-dessus, la conception de l'aspirateur doit respecter les besoins de l'utilisateur. Il s'agit donc de mettre en place les fonctions de service à assurer par le produit pour satisfaire ces besoins. La création d'un diagramme pieuvre en phase d'usage de l'aspirateur, a permis d'identifier les milieux extérieurs au produit et de formuler les fonctions de services ainsi que les contraintes que doit satisfaire le produit (Figure 6.1).

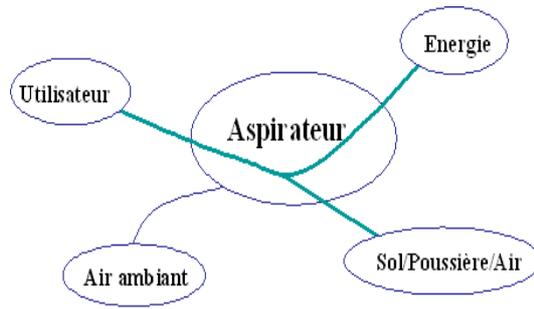


FIG. 6.1: Frontières de l'aspirateur

La modélisation de la fonction par le diagramme pieuvre nous permet d'identifier les fonctions d'interaction et d'adaptation.

Fonction d'interaction : *Permettre à un utilisateur d'aspirer la poussière en utilisant une source d'énergie et le flux d'air.*

- *S'adapter à l'utilisateur,*
- *S'adapter à la source d'énergie,*
- *S'adapter au sol.*

Fonction d'adaptations (FA) : *Limiter la pollution de l'air ambiant.*

La conception d'un produit doit faire face aussi à plusieurs contraintes. Ces contraintes jouent généralement un rôle décisif dans le positionnement du produit par rapport aux concurrents. Parmi ces contraintes on cite :

Contraintes

- *Coût,*
- *Design,*
- *Rangement de l'appareil,*
- *Nettoyage de l'appareil,*
- *Changement du sac,*
- *Normes,...*

Nous ne détaillerons pas ici l'ensemble de l'AF, dans la mesure où seules les fonctions mises en jeu vont nous servir pour la construction du modèle minimal. Cette étude doit cependant être menée pour compléter le cahier des charges.

6.2.3 Les données minimales

Suite à l'analyse fonctionnelle externe, les concepteurs ont fait des propositions concernant les principes utilisés dans le futur aspirateur. Ils ont donc choisi les composants principaux nécessaires afin de répondre à ces principes. Dans notre exemple, l'aspirateur retenu est assez classique :

- les éléments d'aspiration qui permettent de guider le flux d'air : les filtres, les tuyaux et le compartiment d'accumulation de la poussière,
- les connecteurs électriques tels que les câbles, les fils et les cosses,
- les actionneurs : la turbine et le moteur,
- les éléments électroniques : la carte électronique,
- la carrosserie : elle comprend tous les éléments du carter.

Les concepteurs ont ainsi pu construire le BDS (Figure 6.2).

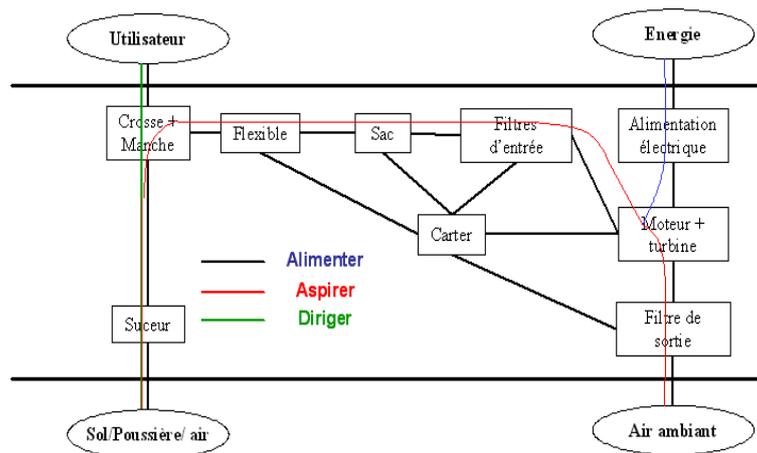


FIG. 6.2: BDS Aspirateur

Dans ce BDS, la fonction principale a été décomposée en trois sous-fonctions : Alimenter, Aspirer, Diriger. Le composant carter apparaît ici comme non essentiel à la réalisation de la fonction mais occupe une place centrale. Pour mieux comprendre le BDS nous proposons dans la Figure 6.3 un schéma de principe de l'aspirateur. Ce schéma est une esquisse conceptuelle autour de laquelle les concepteurs, à l'aide des outils que nous avons proposé, vont traduire une définition fonctionnelle en une définition structurelle.

6.2. Construction du modèle minimal dans le cadre de la conception d'un aspirateur

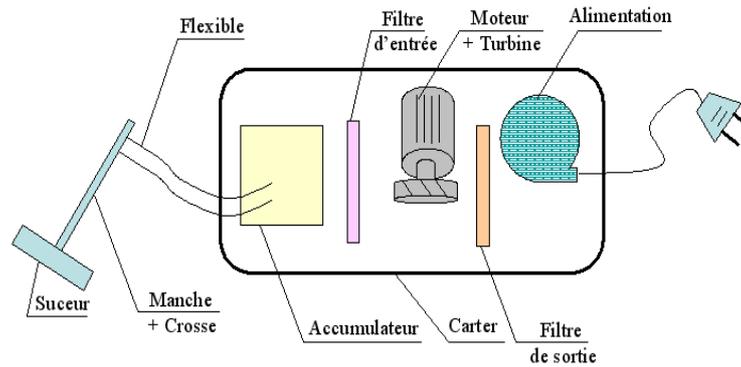


FIG. 6.3: Schéma de principe de l'aspirateur

Les principaux composants et leurs modes de valorisation

Dans le tableau suivant figurent les choix effectués concernant les modes de valorisation des composants principaux :

	<i>Composants fonctionnels</i>	<i>Matériaux</i>	<i>Estimation massique</i>	<i>Scénarios de FV</i>	<i>Composants retenus pour le désassemblage</i>
(S)	Suceur	Fer Plastique	5%	Recyclage Recyclage	
(M)	Crosse + Manche	Plastique Ferreux	6%	Recyclage Recyclage	
(A)	Sac	papier	1%	Incinération	
(Fe)	Filtres d'entrée	Plastiques	0,5%	Incinération	
(T)	Moteur + Turbine	Divers	30%	Réutilisation	✓
(Fs)	Filtres de sortie	Plastiques	0,5%	Incinération	
(E)	Alimentation électrique	Divers	10%	Réutilisation	✓
(C)	Carter	Plastique	40%	Recyclage	✓

TAB. 6.2: Les données minimales de l'aspirateur

Dans ce tableau, nous remarquons que le scénario de fin de vie des sous-ensembles filtres et sac est l'incinération. En effet, le choix de ce mode de valorisation a été effectué pour des raisons hygiéniques.

6.3 Structure et définition de la {Séquence₀}

Rappelons que notre objectif est d'obtenir une séquence optimale de désassemblage à partir des données du modèles minimal, afin de guider les concepteurs lors de la définition détaillée du produit. Pour obtenir cette séquence, nous allons dans la première étape définir une structure préliminaire de l'aspirateur et dans la seconde générer une séquence qui représentera l'objectif autour duquel la conception sera développée.

6.3.1 Analyse conceptuelle de la structure

Pour mener cette analyse, nous avons exploité les données minimales définies dans la section précédente et plus particulièrement les interactions qui existent entre les principaux composants d'un aspirateur. A partir de ces données, nous avons spécifié les niveaux d'importance spatiale et fonctionnelle en utilisant les qualifications décrites dans la Tableau 4.5 du quatrième chapitre. La Figure 6.4 montre la matrice d'importance d'interaction entre les principaux composants de l'aspirateur.

	S	M	F	A	Fe	T	Fs	E	C
Suceur	S								
Manche + Crosse	M	2	M						
Flexible	F	2	2	F					
Sac	A		2	A					
Filtre d'entrée	Fe			1	2	Fe			
Moteur + Turbine	T				1	2	T		
Filtre de sortie	Fs					1	2	Fs	
Alimentation électrique	E					1	2	E	
Carter + Roues	C		1	0	2	0	2	0	0

Légende

Adjacent :

A

 F : Flux

Remarque : *L'absence de notation dans une cellule signifie l'absence d'interaction.*

FIG. 6.4: Matrice d'interaction

Le but de cette matrice est d'aider les concepteurs à définir une structure préliminaire de l'aspirateur en cohérence avec les aspects fonctionnels. La structure est déduite par ordonnancement des lignes et des colonnes de façon à regrouper

les cellules d'interactions autour de la diagonale. La matrice ci-dessous montre les regroupements obtenus et les sous-ensembles identifiés de l'aspirateur.

	S	M	F	C	A	Fe	T	Fs	E
Suceur	S								
Manche • Crosse	2	M							
Flexible		2	F						
Carter • Roues			1	C					
Sac				2	A				
Filtre d'entrée				2	1	Fe			
Moteur • Turbine				2		1	T		
Filtre de sortie				2			1	Fs	
Alimentation électrique				2			1		E

FIG. 6.5: Regroupement des interactions de type spatial

Sur la base de cette matrice de définition de l'aspirateur, l'équipe de conception a identifié deux sous-ensembles :

- le premier sous-ensemble (S_1) : {S; M; F}
- le deuxième sous-ensemble (S_2) : {A; Fe; T; Fs; E; C}

La vue "BDS" permet de dire que ces deux sous-ensembles sont positionnés en série. L'analyse du premier sous-ensemble montre que S , M et F sont aussi positionnés en série. Par contre, l'analyse du deuxième sous-ensemble montre que les composants A ; Fe ; T ; Fs et E et C sont imbriqués. Les choix de conception ont amené l'équipe de conception à réaliser le composant C en une partie supérieure PS et une partie inférieure PI .

Dans le tableau suivant, nous présentons la définition de la structure préliminaire de l'aspirateur telle qu'elle a été finalement retenue par les concepteurs.

Ensembles	Matrices	Graphe																																																																																																														
(S_1) et (S_2)	<table border="1"> <tr> <td></td> <td></td> <td>S_1</td> <td>S_2</td> </tr> <tr> <td>{S; M; F}</td> <td>S_1</td> <td>■</td> <td></td> </tr> <tr> <td>{A; Fe; T; Fs; E; C}</td> <td>S_2</td> <td>1</td> <td>■</td> </tr> </table>			S_1	S_2	{S; M; F}	S_1	■		{A; Fe; T; Fs; E; C}	S_2	1	■																																																																																																			
		S_1	S_2																																																																																																													
{S; M; F}	S_1	■																																																																																																														
{A; Fe; T; Fs; E; C}	S_2	1	■																																																																																																													
S_1	<table border="1"> <tr> <td></td> <td></td> <td>S</td> <td>M</td> <td>F</td> </tr> <tr> <td>Suceur</td> <td>S</td> <td>■</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Manche + Crosse</td> <td>M</td> <td>2</td> <td>■</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Flexible</td> <td>F</td> <td></td> <td>2</td> <td>■</td> </tr> </table>			S	M	F	Suceur	S	■			Manche + Crosse	M	2	■		Flexible	F		2	■																																																																																											
		S	M	F																																																																																																												
Suceur	S	■																																																																																																														
Manche + Crosse	M	2	■																																																																																																													
Flexible	F		2	■																																																																																																												
S_2	<table border="1"> <tr> <td></td> <td></td> <td>C</td> <td>A</td> <td>Fe</td> <td>T</td> <td>Fs</td> <td>E</td> </tr> <tr> <td>Carter + Roues</td> <td>C</td> <td>■</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Sac</td> <td>A</td> <td>2</td> <td>■</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Filtre d'entrée</td> <td>Fe</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>■</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moteur + Turbine</td> <td>T</td> <td>2</td> <td></td> <td>1</td> <td>■</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Filtre de sortie</td> <td>Fs</td> <td>2</td> <td></td> <td></td> <td>1</td> <td>■</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Alimentation électrique</td> <td>E</td> <td>2</td> <td></td> <td></td> <td>1</td> <td></td> <td>■</td> </tr> </table>			C	A	Fe	T	Fs	E	Carter + Roues	C	■						Sac	A	2	■					Filtre d'entrée	Fe	2	1	■				Moteur + Turbine	T	2		1	■			Filtre de sortie	Fs	2			1	■		Alimentation électrique	E	2			1		■																																																							
		C	A	Fe	T	Fs	E																																																																																																									
Carter + Roues	C	■																																																																																																														
Sac	A	2	■																																																																																																													
Filtre d'entrée	Fe	2	1	■																																																																																																												
Moteur + Turbine	T	2		1	■																																																																																																											
Filtre de sortie	Fs	2			1	■																																																																																																										
Alimentation électrique	E	2			1		■																																																																																																									
Aspirateur ($S_1 + S_2$)	<table border="1"> <tr> <td></td> <td></td> <td>S</td> <td>M</td> <td>F</td> <td>C</td> <td>A</td> <td>Fe</td> <td>T</td> <td>Fs</td> <td>E</td> </tr> <tr> <td>Suceur</td> <td>S</td> <td>■</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Manche + Crosse</td> <td>M</td> <td>2</td> <td>■</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Flexible</td> <td>F</td> <td></td> <td>2</td> <td>■</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Carter + Roues</td> <td>C</td> <td></td> <td></td> <td>1</td> <td>■</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Sac</td> <td>A</td> <td></td> <td></td> <td>2</td> <td></td> <td>■</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Filtre d'entrée</td> <td>Fe</td> <td></td> <td></td> <td>2</td> <td>1</td> <td></td> <td>■</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moteur + Turbine</td> <td>T</td> <td></td> <td></td> <td>2</td> <td></td> <td>1</td> <td></td> <td>■</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Filtre de sortie</td> <td>Fs</td> <td></td> <td></td> <td>2</td> <td></td> <td></td> <td>1</td> <td></td> <td>■</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Alimentation électrique</td> <td>E</td> <td></td> <td></td> <td>2</td> <td></td> <td></td> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td>■</td> </tr> </table>			S	M	F	C	A	Fe	T	Fs	E	Suceur	S	■									Manche + Crosse	M	2	■								Flexible	F		2	■							Carter + Roues	C			1	■						Sac	A			2		■					Filtre d'entrée	Fe			2	1		■				Moteur + Turbine	T			2		1		■			Filtre de sortie	Fs			2			1		■		Alimentation électrique	E			2			1			■	
		S	M	F	C	A	Fe	T	Fs	E																																																																																																						
Suceur	S	■																																																																																																														
Manche + Crosse	M	2	■																																																																																																													
Flexible	F		2	■																																																																																																												
Carter + Roues	C			1	■																																																																																																											
Sac	A			2		■																																																																																																										
Filtre d'entrée	Fe			2	1		■																																																																																																									
Moteur + Turbine	T			2		1		■																																																																																																								
Filtre de sortie	Fs			2			1		■																																																																																																							
Alimentation électrique	E			2			1			■																																																																																																						

TAB. 6.3: Type des interactions techniques de l'aspirateur

Suite à cette analyse nous illustrons une structure préliminaire. La structure réunit les informations des matrices présentées ci-dessus. Comme le montre la Figure 6.6, notre produit est composé de deux sous-ensembles qui peuvent être développés séparément. A partir de cette représentation nous allons identifier dans la prochaine section les niveaux d'accessibilité *aux composants retenus pour le désassemblage* ainsi que la séquence optimale ($Séquence_0$) choisie pour la conception des aspirateurs.

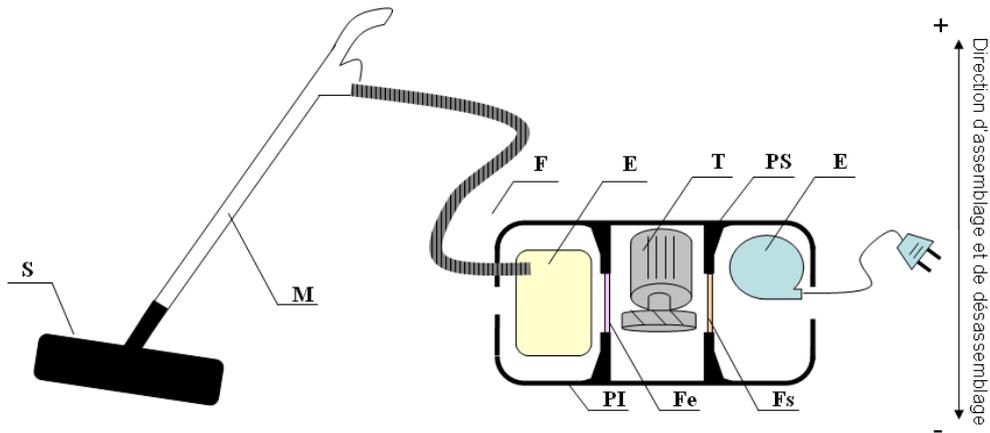


FIG. 6.6: Illustration minimale de l'aspirateur

6.3.2 Séquence optimale

Le principe de génération de cette gamme de désassemblage est basé sur les données minimales qui sont résumées dans le Tableau 2.2. En effet pour générer cette séquence on dispose :

- des principaux composants,
- des interactions fonctionnelles,
- d'une structure préliminaire,
- des composants cibles pour le désassemblage,
- des taux massiques des composants,
- des scénarios de valorisation.

Il nous reste à choisir une ou des directions de désassemblage afin de générer notre séquence optimale. Pour cela nous avons construit une matrice des précédences entre les composants. Cette matrice exprime l'accessibilité aux composants cibles. A l'aide de la matrice présentée par la Figure 6.6, nous allons déterminer, pour chaque composant ceux qui les précèdent en fonction de la direction choisie. Par exemple le composant (**E**) est précédé par le composant **PS** dans le sens (+) et par (**PI**) dans le sens (-). Cette précédence est transcrite dans la matrice ce qui permet au concepteur de notifier l'accessibilité suivant différentes directions envisagées. On remarque que pour atteindre (**E**) suivant la direction (+) il faut avant tout récupérer **PS**, ceci signifie que la cellule $(E,PS)=1$. Suivant la direction (-) nous avons la cellule $(PI,E)=1$. Toutefois, étant donné que nous ne disposons pas de toutes les données concernant la structure du produit, nous proposons les notations suivantes pour exprimer la précédence entre les composants.

- Note 0 : le composant J ne précède pas le composant i ,
- Note 1 : le composant J précède le composant i ,
- Note # : pas de contrainte de précédence, cette notation peut prendre la note 0 ou 1.

En raison d'absence d'informations de positionnement structurelles entre le composant (E) et les composants (A), (Fe), (Fs) et (T) les cellule de précédence entre ces composants seront notifiées par le symbole ($\#$). Cette notation ne peut être définie que par un choix de conception. C'est-à-dire que le positionnement de ces composants peut être effectué en accord avec les experts de désassemblage.

La Figure 6.7 montre la matrice de précédence entre les composants de l'aspirateur.

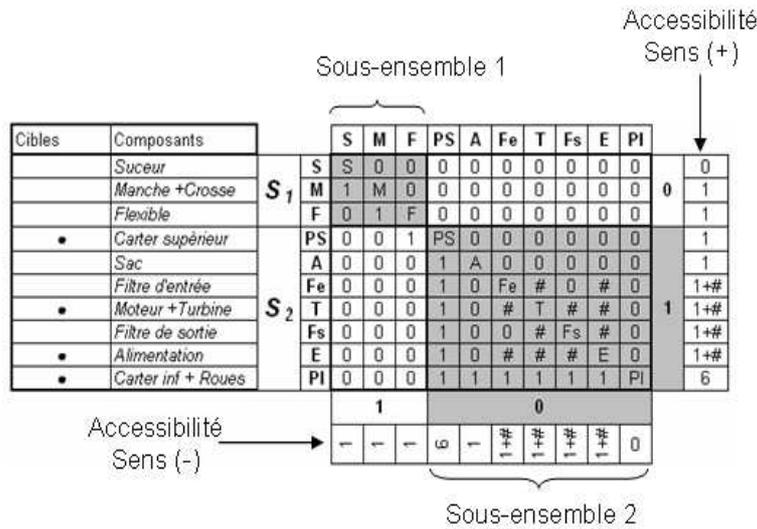


FIG. 6.7: Matrice de précédence

A partir de cette matrice, on déduit les niveaux d'accessibilité pour atteindre les composants cibles. Les composants accessibles sont ceux qui ont une accessibilité égale à "0" (La dernière colonne et le dernier ligne de la matrice présentée par la Figure 6.7). Ces composants représentent le premier niveau d'accessibilité. Etant donné la complexité de notre produit nous avons choisi dans un premier temps d'étudier l'accessibilité aux sous-ensembles S_1 et S_2 . Les composants retenus pour le désassemblage (Voir tableau 6.2) appartiennent à S_2 . Ainsi, dans la suite de notre analyse nous ne nous intéressons qu'au sous-ensemble S_2 .

La matrice (Figure 6.8) montre que les composants PI et PS qui constituent les deux parties du "Carter" sont directement accessibles. Une fois que l'un ou l'autre de

Cibles	Composants	PS	A	Fe	T	Fs	E	PI
•	Carter supérieur	PS	PS	0	0	0	0	0
	Sac	A	1	A	0	0	0	0
	Filtre d'entrée	Fe	1	0	Fe	#	0	1+#
•	Moteur + Turbine	T	1	0	#	T	#	1+#
	Filtre de sortie	Fs	1	0	0	#	Fs	1+#
•	Alimentation	E	1	0	#	#	E	1+#
•	Carter inf + Roues	PI	1	1	1	1	1	PI
		ω	1	1+#	1+#	1+#	1+#	0

FIG. 6.8: Matrice de précédence de S_2

ces composants ((PI) ou (PS)) est récupéré, les composants (T) et (E) deviennent directement accessibles. Par cette démarche nous avons obtenu les niveaux suivants :

- Niveaux d'accessibilité 0 : $N_0 = S_1 = \{S, M, F\}$ ou $S_2 = \{PS, A, Fe, T, Fs, E, PI\}$.
- Niveaux d'accessibilité 1 : $N_1 = \{PS; PI\}$
- Niveaux d'accessibilité 2 : $N_2 = \{T; E\}$

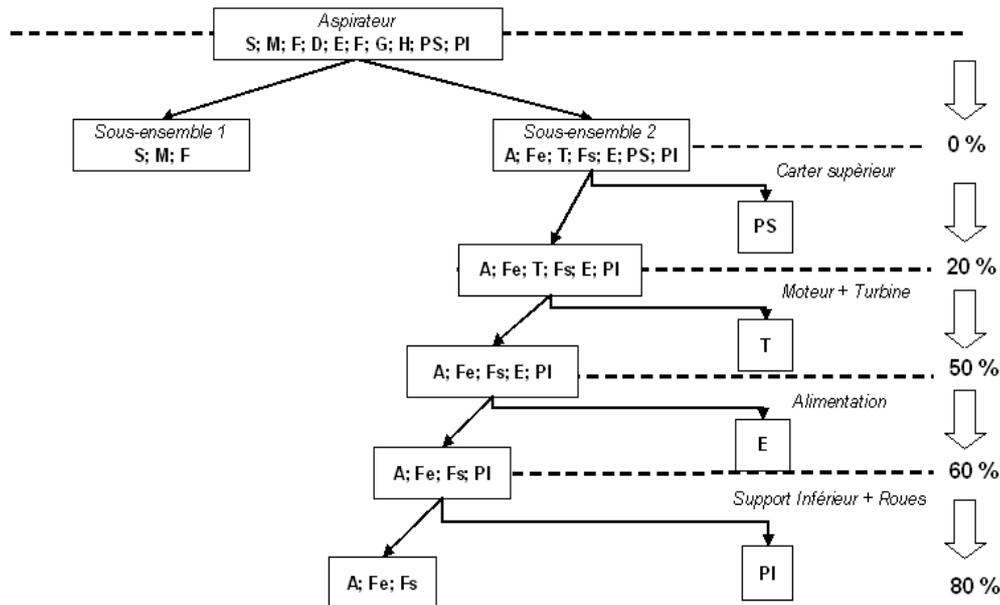


FIG. 6.9: Séquence optimale

Compte tenu de ces données, et des processus de (dé)fabrication, la séquence finalement retenue est celle figurant sur la branche de droite de la Figure 6.9. Elle permet d'atteindre 80% de recyclabilité après 4 niveaux de désassemblage. Cette séquence n'est qu'une première estimation qui servira de référence pour la compa-

raison. Nous remarquons aussi que le sous-ensemble S_1 peut avoir un grand potentiel de recyclabilité et de désassemblabilité à condition qu'il soit en mono-matériau. En effet, le sous-ensemble S_1 est parallèle à S_2 et accessible dès le niveau N_0 .

6.4 Evaluation des solutions de conception

A partir de notre modèle minimal, nous avons recensé plusieurs solutions de conception pour l'aspirateur. Pour réduire l'espace de recherche, nous nous sommes limités dans cette étude à quatre solutions. Pour chacune des solutions, nous avons généré et évalué la séquence de désassemblage retenue et nous avons estimé un coût. Avant d'évaluer nos quatre solutions, nous allons définir, pour chacun de nos trois indicateurs, une référence qui servira à positionner nos solutions.

6.4.1 Définition des références

Rappelons que les références sont le résultat d'évaluation de la *Séquence*₀. Ces références définissent l'intervalle d'acceptation d'une solution de conception. Pour la conception des aspirateurs, nous avons obtenu les références présentées dans le Tableau 6.4.

	I_S	I_L	I_M
<i>Aspirateur</i>	<i>0,55</i>	<i>0,66</i>	<i>0,8</i>

TAB. 6.4: Les références des indicateurs de désassemblage

6.4.2 Description des solutions

Pour les quatre solutions, les noms des composants standard ont été retenus : *Suceur (S)* ; *Manche + Crosse (M)* ; *Flexible (F)* ; *Sac (A)* ; *Filtres (Fe) et (Fs)* ; *Alimentation électrique (E)* et *Moteur + Turbine (T)*

Finalement, c'est essentiellement la partie "Carter" qui vient différencier nos solutions.

Pour la solution 1 : La partie supérieure du carter est composée d'un corps supérieur, d'un bac à accessoires, d'un capot compartiment accessoires et des composants de la partie commande électrique de l'aspirateur. La partie inférieure, est composée d'une *coque avant* en ABS et d'un *carter plastique* en PP, ces deux composants sont assemblés par 2 vis. L'assemblage entre la partie inférieure et supérieure du carter est assuré par vissage. Le coût de cette solution est de 80 euros.

Pour la solution 2 : Cette solution est similaire à la précédente seuls les matériaux constitutifs des composants changent. Cette solution est estimée à un coût de 70 euros.

Pour la solution 3 : Le *carter* est composé de deux matériaux, la partie supérieure est constituée de 6 composants en ABS, la partie inférieure comporte 7 composants en PP. Du point de vue structure le carter enveloppe les filtres, le sac, le moteur, la turbine, l'enrouleur et toutes les commandes électriques. Ces composants sont fixés sur la partie inférieure par clipsage ou par insertion. L'assemblage entre la partie supérieure et la partie inférieure est assuré par 6 vis. Le coût de cette solution est estimée à 75 euros.

Pour la solution 4 : La partie supérieure du *carter* est en PP par contre les composants qui sont assemblés sont en ABS. En raison de non compatibilité entre ces deux matériaux, ces composants doivent être séparés lors de la fin de vie de l'aspirateur. La partie inférieure du carter est similaire à celle de la première solution. Du point de vue structure le carter enveloppe les filtres, le sac, le moteur, la turbine, l'enrouleur et toutes les commandes électriques. L'assemblage des deux parties du carter est effectué par 6 vis. Cette solution est estimée à 85 euros.

Les coûts de ces solutions sont donnés à titre indicatif. Le détail de ces solutions et la séquence de désassemblage associée figurent en annexe 2.

6.4.3 Tableau de bord

L'évaluation dans le cadre de notre proposition avait pour principal objectif la mise en œuvre d'indicateurs spécifiques au désassemblage et à la fin de vie avec d'autres indicateurs par exemple : économiques, techniques etc.

L'évaluation est réalisée à partir des données de conception présentées dans la première colonne du tableau de bord (Tableau 6.5), qui représentent l'évolution du processus de conception.

Sur le tableau de bord (Tableau 6.5), les indicateurs de désassemblage pour l'aspirateur sont présentés par les deux colonnes de droite.

<i>Aspirateur</i>			
<i>Données sur le produit</i>		<i>Evaluation</i>	
<i>Progression de la conception</i>	<i>Etat</i>	<i>Indicateurs</i>	<i>Niveaux</i>
	Vérifié (+) Estimation (-) Inconnu (?)		
		Structure	
		(I_{S0})	0 ——— 0,5 —▼—— 1
La fonction	+	(I_{S1})	0 ——— ▼—— 0,5 ——— 1
les principaux composants	-	(I_{S2})	0 ——— ▼—— 0,5 ——— 1
Le nombre des composants	?	(I_{S3})	0 ——— 0,5 —▼—— 1
		(I_{S4})	0 ——— ▼—— 0,5 ——— 1
		Liaisons	
		(I_{L0})	0 ——— 0,5 —▼—— 1
La masse	-	(I_{L1})	0 ——— ▼—— 0,5 ——— 1
Les matériaux des composants	-	(I_{L2})	0 ——— ▼—— 0,5 ——— 1
Les liaisons	-	(I_{L3})	0 ——— ▼—— 0,5 ——— 1
		(I_{L4})	0 ——— 0,5 —▼—— 1
		Matériau	
		(I_{M0})	0 ——— 0,5 —▼—— 1
La précedence entre les composants	-	(I_{M1})	0 ——— 0,5 —▼—— 1
Les cotations	?	(I_{M2})	0 ——— 0,5 ——— ▼—— 1
Les volumes	-	(I_{M3})	0 ——— 0,5 —▼—— 1
		(I_{M4})	0 ——— 0,5 —▼—— 1

TAB. 6.5: Tableau de bord de désassemblabilité

Sur le tableau de bord, l'indicateur matériau nous informe que les quatre solutions, du point de vue taux de valorisation sont bonnes, puisque tous les I_M sont au voisinage de $I_{M0} = 0,8$. Les deux autres indicateurs nous permettent de constater que les solutions sont largement différentes les une des autres. En effet, pour un taux de valorisation équivalent, les solutions divergent dans la difficulté d'accessibilité (I_S) et de séparation des composants (I_L). De plus, par rapport à nos références (I_{S0} , I_{L0} , I_{M0}) on constate que les solutions proposées ne sont pas considérées comme de mauvaises solutions. Toutefois, l'identification de la meilleure solution reste difficile à déterminer à partir de cette visualisation, pour cela nous avons utilisé la méthode PROMETHEE pour surclasser les solutions suivant un degré de préférence pour interpréter les résultats du tableau de bord.

6.4.4 Surclassement des solutions

Initialement, l'objectif de notre approche était d'apporter des résultats pour motiver le concepteur à choisir la solution la plus respectueuse des contraintes de désassemblage et de fin de vie. Pour ceci les résultats doivent traduire le niveau de préférence d'une solution par rapport aux autres. Le détail des calculs effectués pour obtenir ces résultats figure en annexe 3.

Le point de départ du surclassement des solutions selon les indicateurs choisis, consiste en la création d'une matrice des données de base dans laquelle les rangées contiennent les solutions et les colonnes les indicateurs qui expriment l'accessibilité (I_S), la séparabilité (I_L), le taux de valorisation (I_M) et le coût (Tableau 6.6). Les données peuvent être de nature qualitative et/ou quantitative. A chaque indicateur est associé un poids qui traduit l'importance relative accordée à celui-ci par les experts et les acteurs de conception. Pour la conception de l'aspirateur, comme le montre les poids dans la Tableau 6.6, nous avons accordé une grande importance à l'indicateur I_S , I_L , I_M .

<i>Aspirateur</i>	I_S	I_L	I_M	<i>Coût</i>
<i>Poids W_i</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>1</i>
<i>Solution₁</i>	<i>0,35</i>	<i>0,47</i>	<i>0,86</i>	<i>80</i>
<i>Solution₂</i>	<i>0,47</i>	<i>0,35</i>	<i>0,76</i>	<i>70</i>
<i>Solution₃</i>	<i>0,58</i>	<i>0,45</i>	<i>0,82</i>	<i>75</i>
<i>Solution₄</i>	<i>0,48</i>	<i>0,5</i>	<i>0,78</i>	<i>85</i>

TAB. 6.6: Bilan d'évaluation

Rappelons aussi que l'optimisation du désassemblage au cours de la conception du produit restera toujours un compromis technico-économique. Nous construisons un indicateur économique afin de montrer comment prendre en compte dans la phase de décision, les aspects difficiles à exploiter dans la phase de recherche de solutions. Ce critère est choisi uniquement pour une simple démonstration. Cet indicateur économique prend en compte : le coût de la matière, le coût de fabrication et le coût d'assemblage.

Pour chaque critère et pour toutes les solutions un score est déterminé à l'aide des formules d'indicateurs présentées dans le chapitre 5. Ce score est représenté par un nombre appartenant à l'intervalle $[0, 1]$ pour les indicateurs de désassemblabilité. Il peut être aussi exprimé par un chiffre, par exemple le coût d'une solution.

La deuxième étape consiste à pondérer le degré de préférence d'une solution par rapport aux autres, en considérant simultanément tous les indicateurs. Dans le tableau ci-dessous nous présentons le degré de préférence entre la première et la deuxième solution.

<i>Indicateurs</i>	<i>Solution₃</i>	<i>Solution₄</i>	<i>Préf (1,2)</i>
<i>I_S</i>	<i>0,58</i>	<i>0,48</i>	<i>1,0</i>
<i>I_L</i>	<i>0,45</i>	<i>0,5</i>	<i>0,1</i>
<i>I_M</i>	<i>0,82</i>	<i>0,78</i>	<i>1,0</i>
<i>Coût</i>	<i>75</i>	<i>85</i>	<i>1,0</i>

TAB. 6.7: Fonction de préférence

La troisième étape consiste à calculer les flux sortants qui représentent la faiblesse d'une solution par rapport aux autres et les flux entrants qui traduisent la dominance d'une solution par rapport aux autres. Le surclassement partiel et total de préférence des solutions de conception de l'aspirateur, selon la méthode PROMETHEE I et II, est résumé dans le Tableau 6.8.

<i>Solutions</i>	<i>Flux entrant (Φ^-)</i>	<i>Flux sortant (Φ^+)</i>	<i>Flux net (Φ)</i>
<i>Solution₁</i>	<i>0,476</i>	<i>0,523</i>	<i>0,047</i>
<i>Solution₂</i>	<i>0,761</i>	<i>0,238</i>	<i>-0,523</i>
<i>Solution₃</i>	<i>0,333</i>	<i>0,666</i>	<i>0,333</i>
<i>Solution₄</i>	<i>0,428</i>	<i>0,571</i>	<i>0,142</i>

TAB. 6.8: Les flux de surclassement

Les relations de préférence selon la méthode PROMETHEE I et II sont représentées par la Figure 6.10.

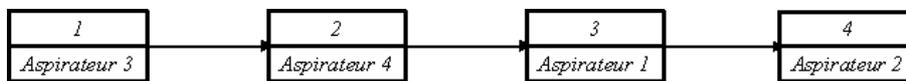


FIG. 6.10: Graphe de classification de solution

Dans notre surclassement toutes les solutions étaient comparables. Par conséquent, on obtient le même surclassement avec la méthode PROMETHEE I et II.

6.5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'application de notre approche d'intégration du désassemblage pour le recyclage dans la phase conceptuelle. Le produit choisi est l'aspirateur. Une définition du modèle minimal de l'aspirateur a été exposée. Une séquence préliminaire de désassemblage pour l'aspirateur a été définie.

Nous avons montré la prise en compte des critères de désassemblage, des contraintes de valorisation et des critères économiques. Nous remarquons par cette étude, que la modélisation des critères nécessite des connaissances spécifiques du domaine d'un point de vue global et synthétique sur l'évaluation des solutions obtenues. En effet, dans les critères de désassemblage, les influences des solutions techniques implicites et leur interprétation dépendent des scénarios de valorisation choisis.

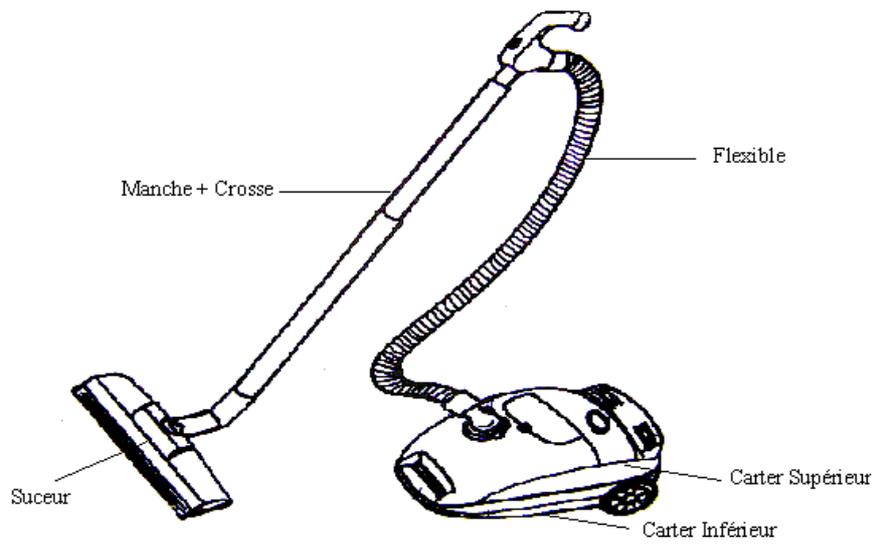


FIG. 6.11: La solution retenue et développée par les concepteurs

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons présenté une évaluation des solutions de conception de l'aspirateur. Cet exemple nous a permis d'illustrer et d'évaluer notre approche.

Conclusion

Bilan de notre étude

Les travaux présentés dans ce mémoire traitent le problème d'intégration des contraintes de désassemblage pour la valorisation dans le processus de conception.

Le premier chapitre nous a permis d'exposer l'ampleur de la problématique environnementale. Nous l'avons située par rapport à l'entreprise et avons rapidement abordé les différentes mutations des systèmes industriels face à cette problématique. Ceci nous a permis de comprendre les effets des aspects environnementaux sur l'organisation industrielle et de mieux cerner le contexte de nos travaux de recherche. Nous avons résumé les éléments à prendre en compte liés à l'évolution législative concernant le traitement des PFV et nous nous sommes intéressés à l'évolution des systèmes de production face à ces contraintes. Ensuite, nous avons donné le cadre de notre sujet de recherche, en montrant la complémentarité de notre travail au sein du projet " Concevoir propre ". Nous avons alors défini notre champ de recherche, caractérisé par sa pluridisciplinarité et par la multitude de compétences dont il faut tenir compte.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté une étude bibliographique sur les outils d'évaluation du désassemblage présents au cours des démarches de conception. Cette étude a montré que l'approche actuelle de conception pour le désassemblage était essentiellement présente dans les phases ultimes de la conception, lors des validations en conception détaillée. Nous avons donc mis en évidence le besoin d'avoir des outils plus adaptés aux démarches de conception. Nous avons donc proposé une démarche et des outils pour mettre en évidence les contraintes de désassemblage en fin de vie dès la phase conceptuelle. L'approche de l'intégration du désassemblage prend donc une dimension innovante dans laquelle la spécification du concept produit du point de vue recyclage est abordée dès la phase de préconception.

Dans le troisième chapitre, nous avons renforcé ces constats en nous appuyant sur une observation du processus de conception chez TEFAL pesage. Cette observation

avait pour but de mieux cerner l'approche que nous nous proposons de mettre en œuvre dans le cadre de la conception pour le désassemblage. Nous avons ainsi retracé le processus de conception de TEFAL à l'aide des outils d'analyse fonctionnelle BDF et le FAST, puis nous avons montré comment la mise en œuvre des outils comme le DFMA et la méthode MTM pourraient aider les technologues pour l'évaluation du désassemblage, avant la phase de prototypage du produit. Cette revue nous a permis de constater que la prise en compte des contraintes de désassemblage est possible dès la phase conceptuelle et qu'une définition d'un modèle de données minimales (conceptuelles) peut guider les concepteurs dans leur démarche d'intégration.

Nous avons ainsi proposé dans le quatrième chapitre la définition d'un modèle minimal. Ce modèle est constitué des données suivantes :

- Bloc Diagramme Simplifié
- Principaux composants
- Matériaux
- Estimations massiques
- Scénarios de valorisation
- Liste des composants potentiellement valorisables

A partir de ces données, nous pouvons définir une séquence de désassemblage $\{\mathbf{Séquence}_0\}$ qui est considérée comme la séquence optimale autour de laquelle le concepteur va développer son produit.

Dans le cinquième chapitre, nous avons présenté un outil d'évaluation du désassemblage permettant de guider et d'aider le concepteur dans ses choix. Nous avons ainsi défini des indicateurs spécifiques au désassemblage pour le recyclage. Trois indicateurs ont été proposés :

Un indicateur de structure (I_S) cet indicateur traduit l'évaluation de l'accessibilité aux composants, c'est une fonction du nombre de composants à désassembler pour atteindre le composant cible.

Un indicateur de liaison (I_L) cet indicateur exprime la difficulté de séparation d'un ou plusieurs composants du produit.

Un indicateur de matériau (I_M) cet indicateur exprime le taux de valorisation.

Pour palier au problème d'évaluation multicritères, nous avons choisi d'utiliser la méthode PROMETHEE. C'est une méthode qui permet de faciliter l'interprétation des résultats obtenus pour faciliter le choix de solutions.

Notre proposition consiste donc en :

- La définition d'un modèle minimal pour l'étude du désassemblage des produits en fin de vie en phase de conception avancée,

-
- Mise en évidence d'une séquence de désassemblage $\{Séquence_0\}$ qui va servir de référence lors de la conception du produit,
 - La mise en place d'indicateurs et d'une méthode d'évaluation multi-critères pour le choix des solutions.

Nous avons testé ces propositions lors de la conception d'un premier produit industriel, puis nous avons appliqué la démarche sur un produit plus complexe afin d'évaluer ses limites.

Apports et limites

Le principal intérêt de l'approche proposée est de permettre l'intégration des contraintes de fin de vie dès la phase conceptuelle. En effet, tant la démarche décrite que les outils proposés, peuvent s'adapter à des situations de conception courantes. C'est donc une démarche fortement adaptable, qui peut être étendue à des problèmes moins spécifiques que le désassemblage. A partir d'outils simples et connus comme le tableau de bord, les indicateurs et l'analyse multicritères, nous fournissons aux concepteurs des moyens pour améliorer l'intégration du désassemblage dans un processus de conception. L'approche fonctionnelle retenue comme éléments de référence pour tous, permet de s'adapter à des contextes variés de conception. Nous proposons ainsi des axes de réponse à des problèmes particuliers tels que le rapport entre le désassemblage et le taux de valorisation ou la prise en compte des données conceptuelles (données minimales) dans une démarche de conception pour le désassemblage. L'outil proposé présente quant à lui l'avantage de ne pas être intrusif. En effet, la définition des données minimales issues des outils classiques à la conception (*l'analyse fonctionnelle*) et leur implémentation dans un outil d'évaluation du désassemblage permet de ne pas risquer de perturber l'évolution du processus de développement, tout en assurant une intégration optimale.

Pour montrer les apports de notre modèle, nous proposons le tableau suivant dans lequel est décrite la démarche actuelle identifiée chez TEFAL et en parallèle notre démarche. (Tableau 1).

Démarche actuelle chez TEFAL	Démarche proposée
<p>1. Les acteurs de conception recensent, suivant le cahier des charges, la faisabilité technique.</p>	<p>1. Les acteurs recensent suivant le cahier des charges, les faisabilités techniques et l'expert recyclage spécifie ses attentes</p>
<p>2. Les résultats sont transmis aux autres acteurs de conception sous forme d'un premier " prototype "</p>	<p>2. Dans un premier temps les résultats sont transmis aux différents acteurs de conception et de recyclage</p>
<p>3. Lors d'une réunion " CpD" on évalue en présence d'un expert de recyclage</p>	<p>3. Dans un second temps, les résultats de synthèse des données croisées (caractéristiques produit et attentes de valorisation) se formalisent sous forme d'un modèle minimal (objectifs, contraintes, BDS, estimations, esquisse et scénarios de valorisation) qui évolue tout au long de la phase de développement du nouveau produit. A partir de ces données, une gamme optimale pour le désassemblage sera prescrite et des recommandations seront formalisées.</p>
<p>4. Les points faibles seront retransmis aux acteurs pour des modifications.</p>	<p>4. Le modèle minimal et les recommandations sont exposés pour tous les acteurs (conception et environnement). Par conséquent, lors d'une réunion les acteurs se centrent sur le développement des solutions. Les contraintes de désassemblage deviennent une partie intégrante du processus de la conception.</p>

TAB. 1: Les apports de notre modèle

Enfin, notre méthode va impacter le travail des concepteurs au niveau de la collecte des données, de l'évaluation et des recommandations (Tableau 2).

<p>Collecte des données : essentiellement technologiques et environnementales. Les données sont principalement quantitatives (nombre de composants, masse, matériaux, polluant, liaisons, recyclabilité etc.)</p>	<p>Collecte des données</p> <ul style="list-style-type: none"> - Formalisation de CdC fonctionnel et environnemental : besoins consommateurs, contraintes de valorisation lors de la fin de vie. - Dans un premier temps : élaboration du BFS (composants indispensables, les flux fonctionnels et les interactions entre les composants) et estimation des caractéristiques techniques et des modes de valorisations des composants indispensables. Une séquence optimale de désassemblage $\{Séquence_0\}$ est définie à partir de ces données. - Dans un deuxième temps, les acteurs conjointement avec l'expert de recyclage cherchent des structures de produits qui se rapprochent le plus à la $\{Séquence_0\}$.
<p>Évaluation : recherche de gamme, optimisation, taux massique valorisable, coûts du processus.</p>	<p>Évaluation : en parallèle, l'expert recyclage, évalue les différentes propositions : le positionnement des composants doit être représentatif du point de vue fonctionnel et désassemblage.</p>
<p>Recommandation : modification de certaines caractéristiques techniques du produit. Ces recommandations sont de trois types : structure, matériau et liaison</p>	<p>Recommandations : sont élaborées sur des concepts, ici les recommandations ont un rôle stratégique dans le choix et l'innovation pour développer une solution acceptable.</p>

TAB. 2: Les apports de la démarches dans le processus de conception

Nous pouvons conclure que, nous apportons une démarche innovante dans les approches de *conception pour le désassemblage*. C'est une démarche de synchronisation des contraintes de fin de vie avec l'évolution des données de conception (Figure 1).

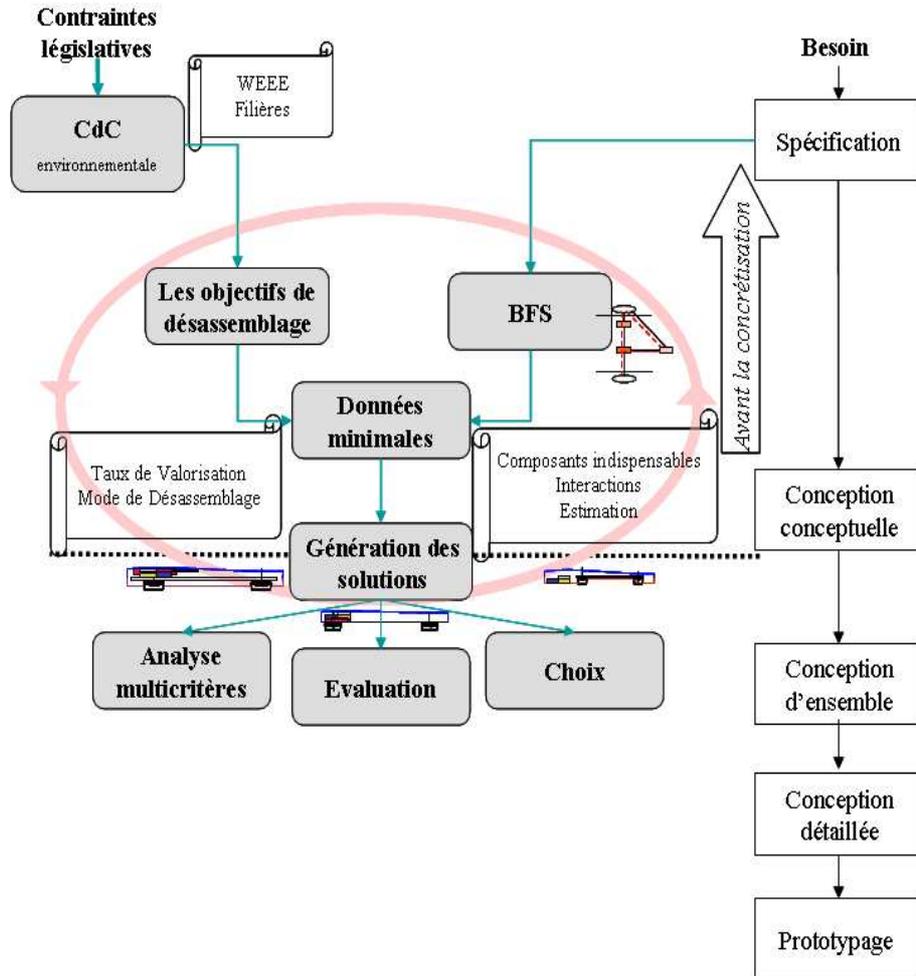


FIG. 1: Démarche de conception pour le désassemblage

Perspectives de recherche

Suite à ce travail, plusieurs perspectives de recherche sont envisagées.

Le prolongement naturel de la construction de la démarche consisterait à étendre la problématique du désassemblage à tout le cycle de vie du produit : des critères de désassemblage et de ré-assemblage pour la maintenance et le remanufacturing devraient en particulier être définis et pourraient ainsi conduire à affiner notre indicateur de liaisons I_L . Une qualification plus fine des liaisons pourrait permettre de mieux prendre en compte les aspects de désassemblage dans le cycle de vie du produit tel que la réversibilité des liaisons pour la maintenance ou encore le désassemblage actif des liaisons sur la base de matériaux dits intelligents ou "smart" [94] [95]. En fonction des nouvelles technologies liées au désassemblage, on pourra envisager de nouvelles structures de produits qui présenteront plus d'aptitude à cette nouvelle contrainte qu'est le désassemblage.

Un deuxième niveau de recherche concerne le concept de modèle minimal. Le travail mené dans cette thèse nous a permis de conduire et de mettre en place une démarche d'intégration adaptée aux contraintes de désassemblage des produits en fin de vie dès la phase conceptuelle du développement. Ceci a été rendu possible par la mise en place d'un modèle minimal sur la base duquel il est possible à différents acteurs d'intervenir tôt en conception. Nous pensons que d'autres contraintes de conception interviennent assez tardivement dans les projets, alors qu'elles pourraient être prises en compte dès cette phase de réflexion. En particulier, la prise en compte de contraintes environnementales issues des ACV pourrait venir compléter les données du modèle minimal. Mais d'autres domaines sont concernés : la fabrication, le design, l'ergonomie, ... Une perspective de ce travail consiste donc à nous interroger sur l'affinité de ce modèle minimal par rapport à d'autres domaines que celui du désassemblage.

Pour finir, il semble évident que la prise en compte du désassemblage des produits pour leur fin de vie va conduire à s'interroger de plus en plus sur les modes de fin de vie envisageables. En effet, l'enjeu sociétal est de diversifier les scénarios liés au cycle de vie des produits et d'aller vers de la réutilisation, du remanufacturing, de la vente de services, ... Au-delà des réponses apportées par les techniques de désassemblage pour la récupération et la réutilisation, il va s'agir d'apporter des solutions innovantes en terme de gestion de la vie des produits. Ici, les changements devraient apporter au concepteur de nouveaux points de vue sur la conception des produits, qui conduiront à une logique de développement de produits innovants.

Références

- [1] Vanegas J. Sustainable design and construction strategies for the built environment. *Building Energy : Ensuring a Sustainable Future.*, 1997.
- [2] Ciupek M. Herrmann C. Kernbaum S. Luger T. Ohlendorf M. Planning approaches for manual and automated disassembly systems. In *Global Conference on Sustainable Product . Development and Life Cycle Engineering*, Berlin, Germany, 2004.
- [3] Anderson R.C. *Mid-Course Correction*. Atlanta, Georgia, The Peregrinzilla Press, 1998.
- [4] Ncr. Life-cycle analysis and costing in an environmentally conscious manufacturing environment, the national center remanufacturing. Technical report, 1999.
- [5] Johansson G. *Design for disassembly - A framework*. PhD thesis, Graduate School of Management and Industrial Engineering, Linköoing (Suède), 1997.
- [6] Feldmann K. Stefan T. Otto M. Innovative disassembly strategies based on flexible partial destructive tools. *Annual Reviews in Control*, vol 23 :p 159–164, 1999.
- [7] Pahl G. Beitz W. Engineering design a systematic approach. *Springer-Verlag*, 2nd édition, 1996.
- [8] Gero J.S. Mass customisation of creative designs. In *International Conference on Engeneering Design ICED'01, Glasgow*, 2001.
- [9] Schmidheiny S. *Changer de Cap*. Dunod, 1992.
- [10] Dowie A.T. *A Disassembly planning and optimisation methodology for design*. PhD thesis, Department of Mechanical Engineering, Design and Manufacture the Manchester Metroplitan University, 1995.

- [11] Mathieux F. *Contribution à l'intégration de la valorisation en fin de vie dès la conception d'un produit. Une méthode basée sur l'évaluation multicritères de la recyclabilité du produit et sur l'identification de ces points faibles de conception.* PhD thesis, ENSAM - Chambéry, 2002.
- [12] Pomars J. Puente S-T. Torres F-A. Candelas P-G. Virtual disassembly of products based on geometric models. *Computers in Industry*, vol 55 :p 95–110, 2004.
- [13] Bruntland G. *Notre avenir à tous.* 1987.
- [14] Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement (CMED). *Notre avenir à tous.* Les publications du Quebec, Montréal, 1988.
- [15] Ayres R. U. Ayres L.W. *Accounting for Resources.* Edward Elgar, USA, 1998.
- [16] Tibbs H.C. *Industrial Ecology : An Environmental Agenda for Industry.* Arthur D. Little, Inc, 1991.
- [17] Frosch R. A. Industrial ecology : A philosophical introduction. *Proceedings of the national academy of sciences 89*, 1992.
- [18] Hileman B. Industrial, ecology making an impact. *C&EN*, 1998.
- [19] Andersson K. Eide M.H. Lundqvist U. Mattsson B. The feasibility of including sustainability in lca for product development. *Journal of Cleaner Production*, vol. 6 :p 289–298, 1997.
- [20] Millet D. *Prise en compte de l'environnement en conception : Proposition d'une démarche d'aide à la conception permettant de limiter les ponctions et rejets engendrés par le produit sur son cycle de vie.* PhD thesis, ENSAM Paris, 1995.
- [21] Janin M. *Démarche d'éco-conception en entreprise un enjeu : construire la cohérence entre outils et processus.* PhD thesis, ENSAM - Chambéry, 2000.
- [22] Kassamaly A. Froelich D. Correc Y. La valorisation énergétique des résidus de broyage. In *Déchets : traitement, valorisation*, 1996.
- [23] Landrieu A. *Logistique du recyclage : modelisation d'un réseau de plates-formes REX.* PhD thesis, INPG Grenoble, 1999.
- [24] Le Pochat S. *Intégration de l'éco-conception dans les PME : proposition d'une méthode d'appropriation de savoir-faire pour la conception environnementale des produits.* PhD thesis, ENSAM Chambéry, 2005.

-
- [25] Dewulf J. Langenhove V.L. Integrating industrial ecology principles into a set of environmental sustainability indicators for technology assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, vol 43 :p 419 – 432, 2005.
- [26] Anderberg S. Industrial metabolism and the linkages between economics, ethics and the environment. *Ecological Economics*, vol 24 :p 311 – 320, 1998.
- [27] Heeres R.R. Vermeulen W. J. Walle F.B. Eco-industrial park initiatives in the usa and the netherlands : first lessons. *Journal of Cleaner Production*, vol 12 :p 985 – 995, 2004.
- [28] Hawken P. *The Ecology of Commerce*. New York, HarperCollins Publishers, Inc., 1993.
- [29] Braungart M. Engelfried J. *An Intelligent Product System to replace Waste Management*. Fresenius Envir Bull, 1992.
- [30] Lopez-Ontiveros M. A. *Intégration des contraintes de remanufacturabilité en conception de produits*. PhD thesis, INPG - Grenoble, 2004.
- [31] Lopez-Ontiveros M. A. Zwolinski P. Brissaud D. Integrated design of remanufacturable products based on product profiles. *Journal of Cleaner Production*, 2006.
- [32] Van Schaik A. *Theory of recycling systems*. PhD thesis, Delft University of Technology, 2004.
- [33] Boks C. *The relative importance of uncertainty factors in product end-of-life scenarios*. PhD thesis, Delft University of Technology, 2002.
- [34] Ademe. <http://www.ademe.fr>.
- [35] Eckart U. Tomas F. Ingo F. Strategies for increasing the efficiency of disassembly systems. In *11th International CIRP Life Cycle Seminar, Belgrade, Serbia*, 2004.
- [36] Jovane F. Alting L. A key issue in product life cycle : disassembly. *Annals of the CIRP*, vol 42 :p 651–658, 1993.
- [37] Gungor A. Gupta S. M. An evaluation methodology for disassembly process. *Computers and Industrial Engineering*, vol 33 :p 329–332, 1997.
- [38] Brennan L. Gupta S.M. Taleb K.N. Operations planning issues in an assembly/disassembly environment. *International Journal of Operations and Production Management*, vol 14 :p 57–67, 1994.

- [39] Kriwet A. Zussman E. Seliger G. Systematic integration of design-for-recycling into product design. *International Journal of production Economics*, vol 38 :p 15–22, 1995.
- [40] Srinivasan H. Shyamsundar N. Gadh R. A framework for virtual disassembly analysis. *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol 8 :p 277–295, 1997.
- [41] Touzanne F. Perrard C. Henrioud J.M. A software structure for a computer aided disassembly system design. In *Proceedings of the 16th International Conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future (Cars & Fof 2000)*, 26-28 Juin 2000.
- [42] Penev K.D de Ron A.J. Determination of a disassembly strategy. *International Journal of Production and research*, vol 34, 1996.
- [43] Lorenz C. *La dimension design : atout concurrentiel décisif*. Préf. de Tom Peters., 1990.
- [44] Simon A. *The Science of the Artificial/ Herbert*. Cambridge (Mass.) ; London : MIT Press, 1969.
- [45] Hubka V. Ernst E.W. *Design Science : Introduction to the Needs, Scope and Organization of Engineering Design Knowledge*. London ; Berlin ; Heidelberg ; etc. : Spinger, 1996.
- [46] Tichkiewitch S. Kasusky E. K. Méthode et outils pour l'intégration et la conception holonique. *Revue internationale de CFAO et d'informatique graphique*, vol 12 :p 647 – 669, 1997.
- [47] Ulrich K. Farl T. Steven D. *Product Design and Development*. 2nd ed.-Eppinger, 2000.
- [48] Vadcard P. *Aide à la programmation de l'utilisation des outils en conception de produit*. PhD thesis, ENSAM, 1996.
- [49] Huisman J. *The QWERTY/EE Concept : Quantifying Recyclability and Eco-efficiency for End-of-Life Treatment of Consumer Electronic Products*. PhD thesis, Delft University of Technology, 2003.
- [50] Gerner S. *Génération d'un processus de désassemblage et évaluation du recyclage d'un produit*. PhD thesis, INPG - Grenoble, 2001.
- [51] Griese H. Müller J. Reichl H. Somi G. Stevels A. Zuber K.H. SMTA, Boston/Massachusetts, USA, 2000.

-
- [52] Lee S.G. Lye S.W. Khoo M.K. A multi-objective methodology for evaluating product end-of-life options and disassembly. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol 18 :p 148–156, 2001.
- [53] Altin L. Legarth J.B. Life cycle engineering and design. *Annals of the CIRP*, vol 44 :p 569–580, 1995.
- [54] Coppens C. *Elaboration d'un outil d'aide à la conception pour améliorer la valorisation des véhicules usagés*. PhD thesis, ENSAM, 1999.
- [55] Coppens C. Millet D. Lecoq M. Design for recycling methodology : Evaluating and improving the recovery aptitude of an automotive function. *International Journal of Vehicle Design*, vol 29 n°4 :p 307–316, 2002.
- [56] Millet D. (sous la direction de). *Intégration de l'environnement en conception : Entreprise et Développement Durable*. 2003.
- [57] Srinivasan H. Figeroa R. Gadh. R. Selective disassembly for virtual prototyping as applied to de-manufacturing. *PERGAMON, Robotics and computer integrated manufacturing*, pages p 231–245, 1999.
- [58] Kroll E. Beadsley B. Parulian A. A methodology to evaluate ease of disassembly for product recycling. *IIE Transactions*, vol 28 n°10 :p 837–845, 1996.
- [59] Kondo Y. Hirai K. Obata F. A design for recycling technique for optimizing resource circulation characteristics of products. In *Eco-design 2001 : Second international Symposium on Environmentally Conscious Design and inverse Manufacturing, Tokyo (Japan)*, 2001.
- [60] Rose C.M. *Design for Environment : A Methode for Formulating Product End-Of-Life Strategies*. PhD thesis, Stanford University, 2000.
- [61] Gaucheron T. *Intégration du recyclage en conception. Le modèle produit : un outil descriptif et cognitif dans le processus de prise en compte du recyclage*. PhD thesis, INPG - Grenoble, 2000.
- [62] Feldmann K. Meedt O. Recycling and disassembly of electronics device. In *The IFIP WG5.3 International Conference on Life-Cycle Modelling for Innovative Products and processes - Berlin, Allemagne*, 1995.
- [63] Navin-Chandra D. Restar : A design tool for environmental recovery analysis,. In *International Conference on Engineering Design - La Haye, Pays-Bas*, 1993.

- [64] Kang H. Y. Jung J. W. Herrmann C. Recycling oriented design - a case study on house appliances using the software atroid. In *Eco-design 2001 : Second international Symposium on Environmentally Conscious Design and inverse Manufacturing - Tokyo, Japan*, pages 309–314, Tokyo, Japan, 2001. IEEE.
- [65] Furuhjelm J. *Incorporating the end-of-life aspect into product development*. PhD thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Linköpings, 2000.
- [66] Tonnelier P. Millet D. Richir S. Lecoq M. Is it possible to evaluate the recovery potential earlier in the design process ? proposal of a qualitative avaluation tool. *Journal of Engineering Design*, vol 16 n°3 :p 297–309, 2005.
- [67] Dixon J.R. Design with features : building manufacturing knowledge into more intelligent cad systems. In *ASME Manufacturing International Conference, Atlanta*, 1988.
- [68] Brown D.C. *Intelligent Computer Aided-Design, Encyclopaedia of Computer Science and Technology*. Williams and Sochats, 1998.
- [69] Chandraskaran B. Design problem solving : A task 1analysis. *AI Magazine*, vol 11(4) :p 59–71, 1990.
- [70] Vargas C. *Modélisation du processus de conception en ingénierie des systèmes mécaniques. Application à la conception d'une culasse automobile*. PhD thesis, l'ENS Cachan, France, 1995.
- [71] Sellini F. *Contribution à la représentation et à la vérification des modèles de connaissances en ingénierie d'ensembles mécaniques*. PhD thesis, Ecole Centrale de Paris, France, 1999.
- [72] Petre M. How expert engineering teams use disciplines of innovation. *Design Studies*, vol 25 :p 477–493, 2004.
- [73] Liu H. Tang M. Evolutionary design in multi-agent design environment. *Applied Soft Computing*, vol 6 :p 207–220, 2006.
- [74] Kota S. Ward A.C. *Functions, structures and constraints, in Conceptual Design*. University of Michigan, 1991.
- [75] Brown D.C. *Intelligent Computer Aided-Design, Encyclopedia of Computer Science and Technology*. 1998.

-
- [76] Wang Q. Rao M. Zhou J. *Intelligent systems for conceptual design of mechanical products*. New York : Chapman & Hall USA, 1994.
- [77] Schon D. A. *The Reflective Practitioner : How professionals think in action*. 1995.
- [78] Quarante D. *Éléments de design industriel*. Polytechnica - Paris, 2001.
- [79] Grand-Dictionnaire. <http://www.granddictionnaire.com>, 2005.
- [80] Renaudin F. Mise en place d'une démarche d'éco-conception chez tefal. Master's thesis, ENSAM de Chambéry, 2000.
- [81] Moisdon J.C. *Du mode d'existence des outils de gestion*. Paris, 1997.
- [82] Umeda Y. Tomiyama T. Functional reasoning in design. In *IEEE Expert Intelligent Systems & their applications*, pages 42–48, 1997.
- [83] Aublin M. Cahuzac R. Ferraz J-P. *Construction mécanique*. DUNOD, 1996.
- [84] Constant D. *Contribution à la spécification d'un modèle fonctionnel de produits pour la conception intégrée de systèmes mécaniques*. PhD thesis, Université Joseph Fourier, 1996.
- [85] Brezet H. Bigma A. Silvester S. Innovative electronics as an opportunity for eco-efficient service-products. In *ELECTRONICS GOES GREEN 2000*, volume Volume 1, page PP. 859, Germany, September 11-13 2000.
- [86] Oosterman B. *Improving product development projects by Matching product architecture and organization*. PhD thesis, University of Groningen, 2001.
- [87] Güngör A. Evaluation types in design for disassembly (dfd) using analytically network process. *Computers & Industrial Engineering*, 2006.
- [88] Association Française de Gestion Industrielle. *Evaluer pour évoluer, les indicateurs de performance au service du pilotage industriel*. ouvrage collectif AFGI, 1992.
- [89] Berrah L. Mauris G. Foulloy L. Haurat A. Global vision and performance indicators for an industrial improvement approach. *Computers in Industry*, vol 43 :p 211–225, 2000.
- [90] Zang Y. *Le pragmatisme du "choix contraint orienté par objectifs" pour l'aide à la conception mécanique*. PhD thesis, Ecole Centrale de Paris, 1997.

- [91] Roy B. Bouyssou D. *Aide multicritère à la décision : méthodes et cas*. Université de Paris dauphine, LAMSAD, 1993.
- [92] Haoues N. Froelich D. Zwolinski P. Disassembly for valorisation in conceptual design. In *Environmentally Conscious Manufacturing IV*, 2004.
- [93] Viswanathan S. Allada V. Product configuration optimisation for disassembly planning : A differential approach. *Omega*, vol 34 :p 599–616, 2006.
- [94] Jones N. Harrison D. Hussein H. Billett E. Chiodo J. Towards self-disassembling vehicles. *The Journal of Sustainable Product Design*, vol 3 :p 59–74, 2004.
- [95] Chiodo D. Boks C. Assessment of end-of-life strategies with active disassembly using smart materials. *The Journal of Sustainable Product Design*, vol 2 :p 69–82, 2002.

ANNEXES

ANNEXE 1 : *Surclassement des solutions de pèse-personne*

Pour la conception d'un pèse-personne les concepteurs nous ont proposés trois solutions. Ces solutions sont détaillées dans le chapitre 5. La méthode PROMETHEE permet de surclasser les solutions suivant un ordre de préférence. Le surclassement tient compte des indicateurs de désassemblage : Structure (I_S); Liaison (I_L) et Matériaux (I_M).

Les solutions sont :

Solution 1 : Support en verre,

Solution 2 : Support en tôle d'acier,

Solution 3 : Support en bois aggloméré.

Les critères pris en compte dans cette étude sont :

I_S : Structure

I_L : Liaison

I_M : Matériaux

C : Coût

Chaque indicateur, on lui a associé un poids. Ce poids représente l'importance relative que nous avons accordée à l'indicateur. Dans cette étude de cas nous avons donné une grande importance aux indicateurs structure et liaison. Les poids de nos différents indicateurs se présentent comme suit :

$$\begin{aligned}W_{Structure} &= 3 \\W_{Liaison} &= 3 \\W_{Materiaux} &= 2 \\W_{Cout} &= 2\end{aligned}$$

I_S ; I_L ; I_M sont à maximiser et C est à minimiser.

Préférence entre les solutions

<i>Indicateurs</i>	<i>Bois</i>	<i>Acier</i>	<i>Préf (Bois, Acier)</i>
I_S	0,72	0,68	1,0
I_L	0,35	0,5	0,1
I_M	0,82	0,82	0,0
<i>Coût</i>	4	5	1,0

TAB. 1: Fonction de préférence

$$\prod (Bois, Acier) = \frac{(1 \times 3) + (0 \times 3) + (0 \times 2) + (1 \times 2)}{(3 + 3 + 2 + 2)} = 0,5$$

$$\prod (Acier, Bois) = \frac{(0 \times 3) + (1 \times 3) + (0 \times 2) + (0 \times 2)}{(3 + 3 + 2 + 2)} = 0,3$$

<i>Indicateurs</i>	<i>Acier</i>	<i>Verre</i>	<i>Préf (Acier, Verre)</i>
I_S	0,68	0,56	1,0
I_L	0,5	0,2	1,0
I_M	0,82	0,82	0,0
<i>Coût</i>	5	3	0,1

TAB. 2: Fonction de préférence

$$\prod (Acier, Verre) = \frac{(1 \times 3) + (1 \times 3) + (0 \times 2) + (0 \times 2)}{(3 + 3 + 2 + 2)} = 0,6$$

$$\prod (Verre, Acier) = \frac{(0 \times 3) + (0 \times 3) + (0 \times 2) + (1 \times 2)}{(3 + 3 + 2 + 2)} = 0,2$$

<i>Indicateurs</i>	<i>Bois</i>	<i>Verre</i>	<i>Préf (Bois, Verre)</i>
I_S	0,72	0,68	1,0
I_L	0,35	0,5	0,1
I_M	0,82	0,82	0,0
<i>Coût</i>	4	3	0,1

TAB. 3: Fonction de préférence

$$\prod (Bois, Verre) = \frac{(1 \times 3) + (0 \times 3) + (0 \times 2) + (0 \times 2)}{(3 + 3 + 2 + 2)} = 0,3$$

$$\prod (Verre, Bois) = \frac{(0 \times 3) + (1 \times 3) + (0 \times 2) + (1 \times 2)}{(3 + 3 + 2 + 2)} = 0,5$$

Les flux de surclassement

$$\Phi^+(Verre) = \frac{1}{3-1} (\prod_{(Verre,Bois)} + \prod_{(Verre,Acier)}) = 0,35$$

$$\Phi^-(Verre) = \frac{1}{3-1} (\prod_{(Bois,Verre)} + \prod_{(Acier,Verre)}) = 0,45$$

$$\Phi(Verre) = \Phi^+(Verre) - \Phi^-(Verre) = -0,1$$

$$\Phi^+(Acier) = \frac{1}{3-1} (\prod_{(Acier,Bois)} + \prod_{(Acier,Verre)}) = 0,45$$

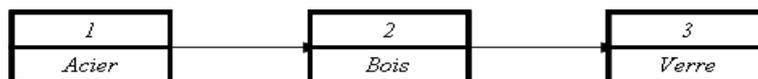
$$\Phi^-(Acier) = \frac{1}{3-1} (\prod_{(Bois,Acier)} + \prod_{(Verre,Acier)}) = 0,35$$

$$\Phi(Acier) = \Phi^+(Acier) - \Phi^-(Acier) = 0,1$$

$$\Phi^+(Bois) = \frac{1}{3-1} (\prod_{(Bois,Acier)} + \prod_{(Bois,Verre)}) = 0,4$$

$$\Phi^-(Bois) = \frac{1}{3-1} (\prod_{(Acier,Bois)} + \prod_{(Verre,Bois)}) = 0,4$$

$$\Phi(Bois) = \Phi^+(Bois) - \Phi^-(Bois) = 0$$

Graphe de classification des solutions

ANNEXE 2 : Définitions des références

Indicateur structure :

$$I_s = \frac{N_T}{\left(\sum_{n,j} N_{ni,j} \cdot NI_j \right) + N_T}$$

Avec

$N_T = 10$ correspond au nombre total des composants,

$N_{ni=0,\{PI,PS,T,E\}} = 0$

$N_{ni=1,\{PI,PS,T,E\}} = \{PS; PI\}$

$N_{ni=2,\{PI,PS,T,E\}} = \{A; T; E\}$

$$I_{S0} = 0,55$$

Indicateur liaison :

$$I_L = \frac{N_j}{\sum_{n,j} NL_{n,j} \cdot \eta_{n,j} + 1}$$

Avec

$N_j = 4$ correspond au nombre à récupérer,

$NL_{n,j} = 5$ liaisons,

$\eta_{n,j} = 1$, Coefficient de difficulté de séparation pour la Séquence₀,

$$I_L = 0,66$$

Indicateur matériau :

$$I_M = \frac{\sum M_i}{M_T}$$

Avec : $I_{M,(PI+PS)} = 0,4$; $I_{M,T} = 0,3$; $I_{M,E} = 0,1$.

$$I_M = 0,8$$

ANNEXE 3 : *Solutions et évaluation*

l'aspirateurs est composé de neuf sous-ensemble

- Suceur (**S**)
- Manche + Crosse (**M**)
- Flexible (**F**)
- Accumulateur (**A**)
- Filtres d'entrée (**Fe**)
- Moteur + Turbine (**T**)
- Filtres de sortie (**Fs**)
- Enrouleur (**E**)
- Carter (**C**)

Compte tenu du fait que de nombreux éléments sont standard, les propositions ont été développées sous-ensemble par sous-ensemble. Nous avons considéré dans cet exemple que les sous-ensembles (S); (M); (F); (A); (Fe); (T); (Fs) et (E) sont identiques quelles que soient les solutions. Seul le sous-ensemble *Carter* (C) change d'une solution à une autre. Ci-dessous nous présentons les nomenclatures des différentes propositions de conception du *Carter* (C).

		Nb	Désignation	Matériaux	Masse	Taux massique	
Carter	Partie supérieure (PS)	26	PS1 Corps supérieur	ABS	558	7.712508639	
			PS2 Bac à accessoires	ABS	356	4.920525225	
			PS3 Capot compartiment access	ABS	82	1.133379406	
			PS4 Suceur ameublement	PP	36	0.497581202	
			PS5 Suceur plat	PP	18	0.248790601	
			PS6 Capot filtre	ABS	128	1.769177609	
			PS7 2 Ressort	ACIER	8	0.110573601	
			PS8 Bouton réglage	ABS	14	0.193503801	
			PS9 Cadran puissance	ABS	14	0.193503801	
			PS10 Cache enrouleur	ABS	30	0.414651002	
			PS11 Poignée+revêtement	??	400	5.528680028	
			PS12 Bouton M/A	ABS	44	0.608154803	
			PS13 Bouton enrouleur	ABS	44	0.608154803	
		Partie inférieure (PI)		PI1 Corps inférieur	ABS	774	10.69799585
			PI2 2 vis	ACIER	2	0.0276434	
			PI3 Coque avant	ABS	110	1.520387008	
			PI4 Roue D	PP	61	0.843123704	
			PI5 Roue G	PP	61	0.843123704	
			PI6 Enjoliveur D	ABS	16	0.221147201	
			PI7 Enjoliveur G	ABS	16	0.221147201	
			PI8 Porte roulette	PP	12	0.165860401	
			PI9 Roulette	PP	6	0.0829302	
			PI10 Carter plastique enrouleur	PP	534	7.380787837	
	PI11 6 vis	ACIER	6	0.0829302			

FIG. 1: Nomenclature "Aspirateur 1ère solution"

Première solution

Indicateur structure (I_S)=0,35

$N_T = 34$ correspond au nombre total des composants,

$$N_{ni=0,\{PI,PS,T,E\}} = 1$$

$$N_{ni=1,\{PI,PS,T,E\}} = 1$$

$$N_{ni=2,\{PI,PS,T,E\}} = 7$$

$$N_{ni=3,\{PI,PS,T,E\}} = 5$$

$$N_{ni=4,\{PI,PS,T,E\}} = 8$$

Indicateur liaison (I_L)=0,47

$N_j = 18$ correspond au nombre à récupérer,

$N_{L_{n,j}} = 11$ fixations de type vissage, avec $\eta_{n,j}= 2$

$N_{L_{n,j}} = 15$ fixations de type clipsage ,avec $\eta_{n,j}= 1$

Indicateur matériau $I_M = 0,86$

Avec : $I_{M,T} = 0,3$; $I_{M,E} = 0,1$; $I_{M,PS+PI} = 0,48$.

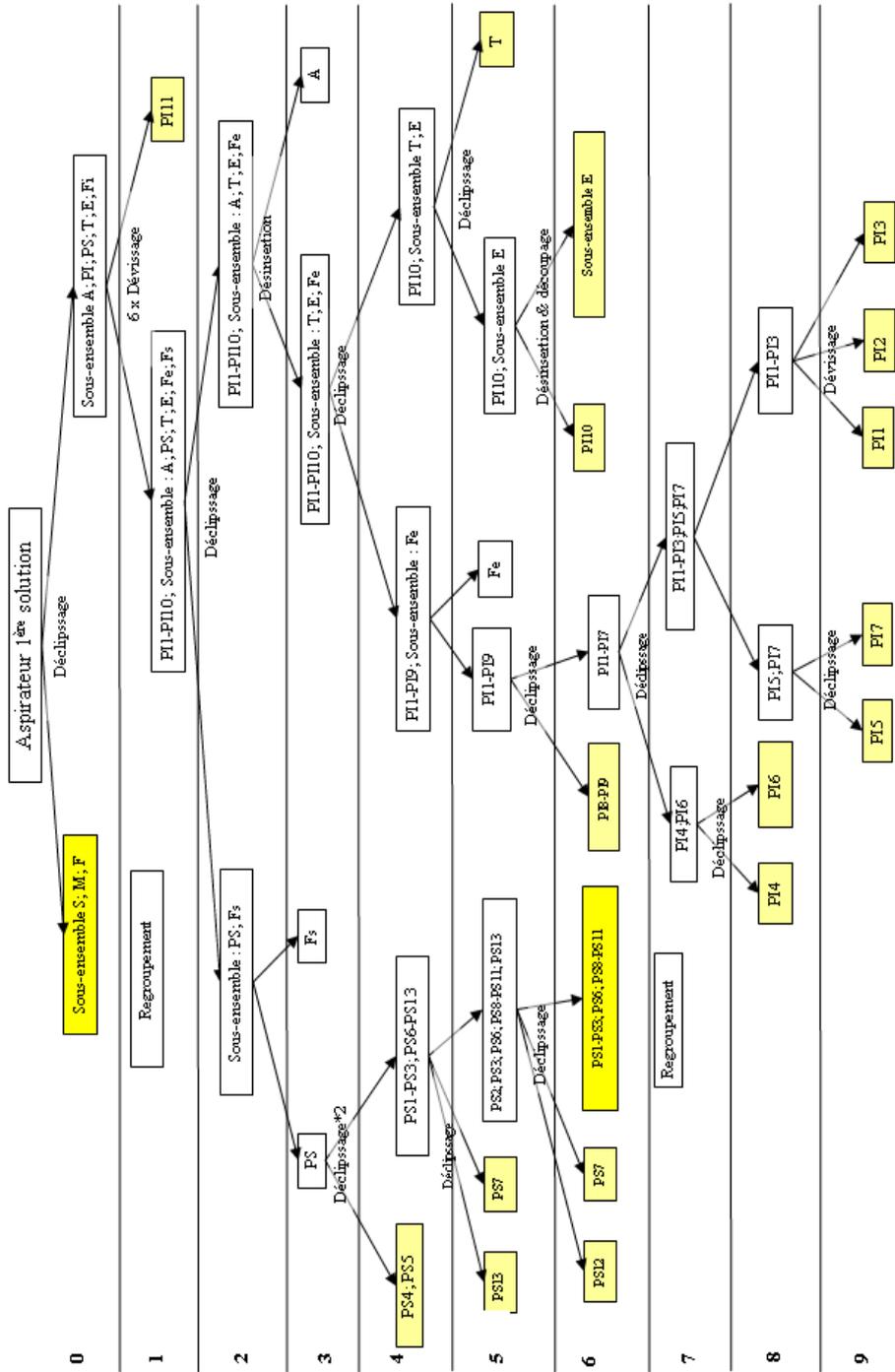


FIG. 2: Séquence de désassemblage "Aspirateur 1ère solution"

Deuxième solution

		Nb	Désignation	Matériaux	Masse	Taux massique	
Carter	Partie supérieur (PS)	PS1	Corps supérieur	PP	494	7.345724907	
		PS2	Bac à accessoires	PP	500	7.434944238	
		PS3	Capot compartiment acces	PP	62	0.921933086	
		PS4	Suceur ameublement	PP	26	0.3866171	
		PS5	Suceur plat + Suceur 3	PP	38	0.565055762	
		PS6	Fermeture bac	PP	18	0.267657993	
		PS7	2 Ressort	ACIER	2	0.029739777	
		PS8	Bouton M/A	ABS	44	0.654275093	
		PS9	Bouton enrouleur	ABS	44	0.654275093	
		PS10	Tube	PP	4	0.059479554	
		PS11	Coque violette	PP	75	1.115241636	
		PS12	2 vis	ACIER	2	0.029739777	
		PS13	Poignée	PP	84	1.249070632	
		Partie inférieur (PI)	PI1	Corps inférieur	PP	780	11.59851301
			PI2	2 Vis	ACIER	2	0.029739777
			PI3	Repose suceur	PP	8	0.118959108
			PI4	Roue D	PP	75	1.115241636
			PI5	Roue G	PP	75	1.115241636
			PI6	Porte roulette	PP	10	0.148698885
			PI7	Vis	ACIER	1	0.014869888
			PI8	Ecrou	ACIER	1	0.014869888
			PI9	Axe Roulette	ACIER	2	0.029739777
			PI10	Roulette directionnelle	PP	2	0.029739777
			PI11	2 Petites roulettes	PP	2	0.029739777
			PI12	Joint carré		58	0.862453532
			PI13	6 Vis	ACIER	6	0.089219331

FIG. 3: Nomenclature "Aspirateur 2ème solution"

Indicateur structure (I_S)=0,35

Avec

$N_T = 34$ correspond au nombre total des composants,

$$N_{ni=0,\{PI,PS,T,E\}} = 1$$

$$N_{ni=1,\{PI,PS,T,E\}} = 1$$

$$N_{ni=2,\{PI,PS,T,E\}} = 6$$

$$N_{ni=3,\{PI,PS,T,E\}} = 4$$

$$N_{ni=4,\{PI,PS,T,E\}} = 4$$

Indicateur liaison (I_L)=0,35

Avec

$N_j = 12$ correspond au nombre à récupérer,

$NL_{n,j} = 12$ fixations de type vissage, avec $\eta_{n,j} = 2$

$NL_{n,j} = 9$ fixations de type clipsage, avec $\eta_{n,j} = 1$

Indicateur matériau (I_M)= 0,76

Avec : $I_{M,T} = \mathbf{0,28}$; $I_{M,E} = \mathbf{0,11}$; $I_{M,PS+PI} = \mathbf{0,37}$.

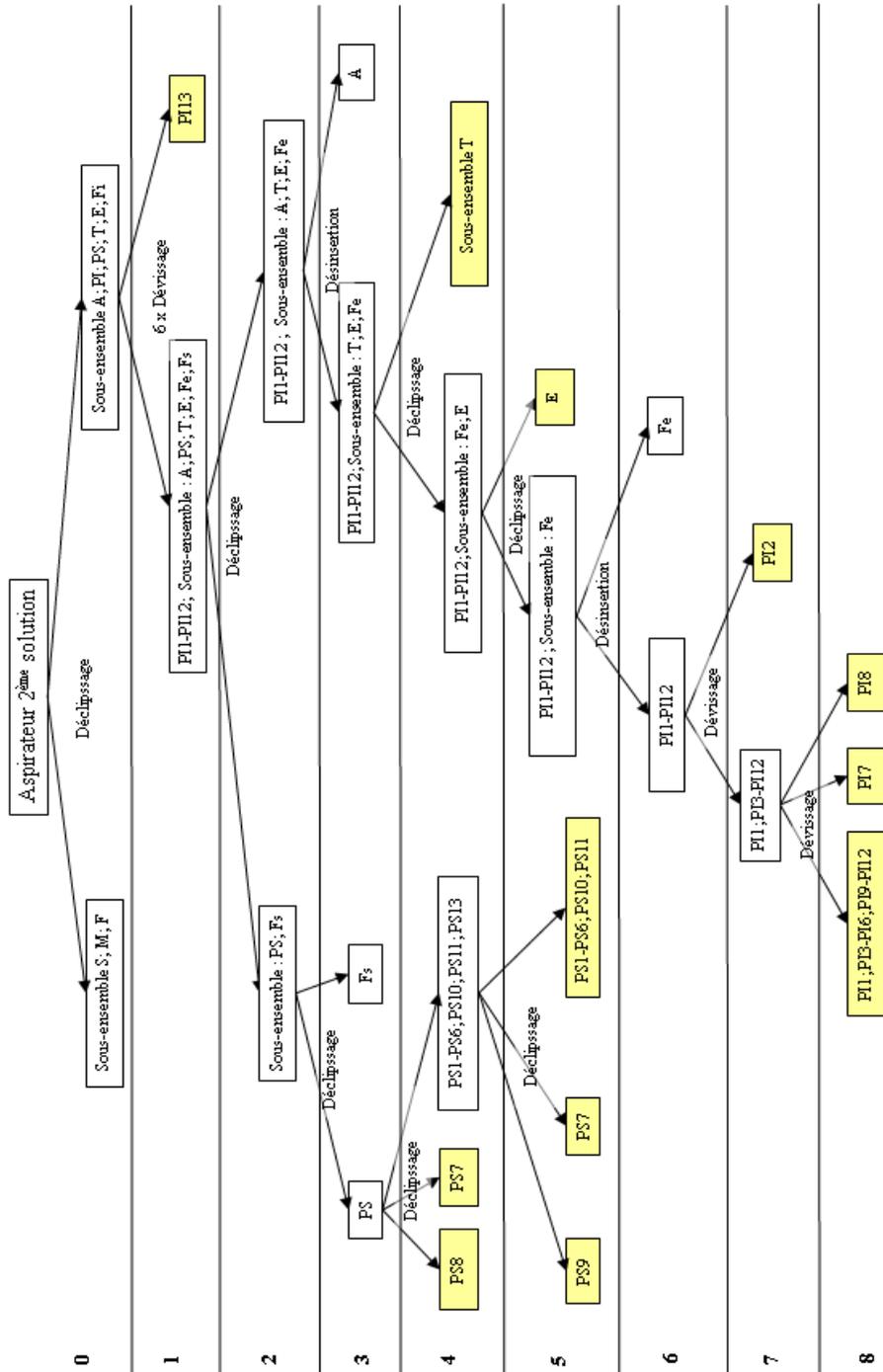


FIG. 4: Séquence de désassemblage "Aspirateur 2ème solution"

Troisième solution

		Nb	Désignation	Matériaux	Masse	Taux massique
Carter	Partie supérieure (PS)	PS1	Corps supérieur	ABS	700	9.675190048
		PS2	2 insert pla	ABS	8	0.110573601
		PS3	Bouton M/A	ABS	44	0.608154803
		PS4	Bouton enrouleur	ABS	44	0.608154803
		PS5	Bouton réglage	ABS	14	0.193503801
		PS6	Cadran puissance	ABS	14	0.193503801
	Partie inférieure (PI)	PI1	Corps inférieur	PP	900	12.43953006
		PI4	Roue D	PP	61	0.843123704
		PI5	Roue G	PP	61	0.843123704
		PI6	Enjoleur D	PP	16	0.221147201
		PI7	Enjoleur G	PP	16	0.221147201
		PI6	Porte roulette	PP	12	0.165860401
		PI7	Roulette	PP	6	0.0829302
		PI8	Carter plastique enrouleur	PP	534	7.380787837
		PI9	6 vis	ACIER	6	0.0829302

Indicateur structure (I_S)=0,58

$N_T = 23$ correspond au nombre total des composants,

$$N_{ni=0,\{PI,PS,T,E\}} = 1$$

$$N_{ni=1,\{PI,PS,T,E\}} = 1$$

$$N_{ni=2,\{PI,PS,T,E\}} = 6$$

$$N_{ni=3,\{PI,PS,T,E\}} = 1$$

Indicateur liaison (I_L)=0,45

$N_j = 5$ correspond au nombre à récupérer,

$$NL_{n,j} = 6 \text{ fixations de type vissage, avec } \eta_{n,j} = 2$$

$$NL_{n,j} = 7 \text{ fixations de type clipsage, avec } \eta_{n,j} = 1$$

Indicateur matériau (I_M)= 0,82

Avec : $I_{M,T} = 0,3$; $I_{M,E} = 0,08$; $I_{M,PS+PI} = 0,44$.

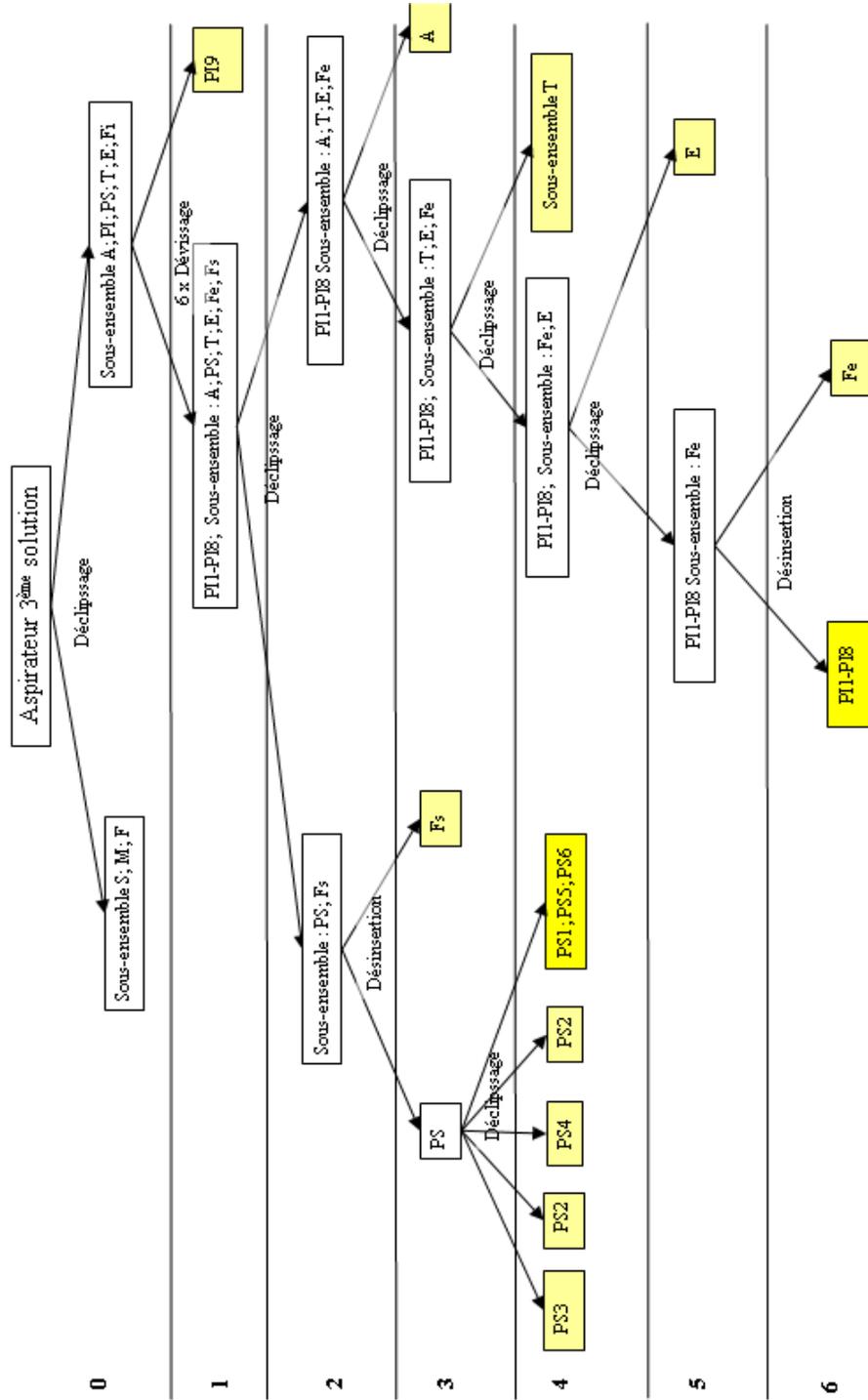


FIG. 5: Séquence de désassemblage "Aspirateur 3ème solution"

Quatrième solution

		Nb	Désignation	Matériaux	Masse	Taux massique
Carter	Partie supérieur (PS)	PS1	Corps supérieur	PP	700	9.675190048
		PS2	2 Ressort	ACIER	8	0.110573601
		PS3	Bouton réglage	ABS	14	0.193503801
		PS4	Cadran puissance	ABS	14	0.193503801
		PS6	Bouton M/A	ABS	44	0.608154803
		PS7	Bouton enrouleur	ABS	44	0.608154803
		PI1	Corps inférieur	PP	774	10.69799585
	PI2	2 Vis	ACIER	2	0.0276434	
	PI3	Coque avant	ABS	110	1.520387008	
	PI4	Roue D	PP	61	0.843123704	
	PI5	Roue G	PP	61	0.843123704	
	PI6	Porte roulette	PP	12	0.165860401	
	PI7	Roulette	PP	6	0.0829302	
	PI8	Carter plastique enrouleur	PP	534	7.380787837	
	PI9	6 vis	ACIER	6	0.0829302	

Indicateur structure (I_S)=0,48

$N_T = 23$ correspond au nombre total des composants,

$$N_{ni=0,\{PI,PS,T,E\}} = 1$$

$$N_{ni=1,\{PI,PS,T,E\}} = 1$$

$$N_{ni=2,\{PI,PS,T,E\}} = 10$$

$$N_{ni=3,\{PI,PS,T,E\}} = 1$$

Indicateur liaison (I_L)=0,5

$N_j = 9$ correspond au nombre à récupérer,

$$NL_{n,j} = 6 \text{ fixations de type vissage, avec } \eta_{n,j} = 2$$

$$NL_{n,j} = 5 \text{ fixations de type clipsage, avec } \eta_{n,j} = 1$$

Indicateur matériau (I_M) = 0,78

Avec : $I_{M,T} = 0,31$; $I_{M,E} = 0,09$; $I_{M,PS+PI} = 0,38$.

Préférence entre les solutions

Poids	Les indicateurs	Aspirateur 1	Aspirateur 2	Préf (1,2)
2	I _s	0.35	0.47	1.0
2	I _i	0.47	0.35	0.1
2	I _v	0.86	0.76	0.1
1	Coût	80	70	1.0

⇒ $\Pi(1;2) = 0,571$
 $\Pi(2;1) = 0,428$

Poids	Les indicateurs	Aspirateur 1	Aspirateur 3	Préf (1,3)
2	I _s	0.35	0.58	0.1
2	I _i	0.47	0.45	1.0
2	I _v	0.86	0.82	1.0
1	Coût	80	75	0.1

⇒ $\Pi(1;3) = 0,571$
 $\Pi(3;1) = 0,428$

Poids	Les indicateurs	Aspirateur 1	Aspirateur 4	Préf (1,4)
2	I _s	0.35	0.48	0.1
2	I _i	0.47	0.5	0.1
2	I _v	0.86	0.78	1.0
1	Coût	80	85	1.0

⇒ $\Pi(1;4) = 0,428$
 $\Pi(4;1) = 0,571$

Poids	Les indicateurs	Aspirateur 2	Aspirateur 3	Préf (2,3)
2	I _s	0.47	0.58	0.1
2	I _i	0.35	0.45	0.1
2	I _v	0.76	0.82	0.1
1	Coût	70	75	1.0

⇒ $\Pi(2;3) = 0,142$
 $\Pi(3;2) = 0,857$

Poids	Les indicateurs	Aspirateur 2	Aspirateur 4	Préf (2,4)
2	I _s	0.47	0.48	0.1
2	I _i	0.35	0.5	0.1
2	I _v	0.76	0.78	0.1
1	Coût	70	85	1.0

⇒ $\Pi(2;4) = 0,142$
 $\Pi(4;2) = 0,857$

Poids	Les indicateurs	Aspirateur 3	Aspirateur 4	Préf (3,4)
2	I _s	0.58	0.48	1.0
2	I _i	0.45	0.5	0.1
2	I _v	0.82	0.78	1.0
1	Coût	75	85	1.0

⇒ $\Pi(3;4) = 0,714$
 $\Pi(4;3) = 0,285$

$$\Phi^+(1) = \frac{1}{4-1} (\Pi_{(1,2)} + \Pi_{(1,3)} + \Pi_{(1,4)}) = 0,523$$

$$\Phi^-(1) = \frac{1}{4-1} (\Pi_{(2,1)} + \Pi_{(3,1)} + \Pi_{(4,1)}) = 0,476$$

$$\Phi(1) = \Phi^+(1) - \Phi^-(1) = 0,047$$

$$\Phi^+(2) = \frac{1}{4-1} (\Pi_{(2,3)} + \Pi_{(2,3)} + \Pi_{(2,4)}) = 0,238$$

$$\Phi^-(2) = \frac{1}{4-1} (\Pi_{(1,2)} + \Pi_{(3,2)} + \Pi_{(4,2)}) = 0,761$$

$$\Phi(2) = \Phi^+(2) - \Phi^-(2) = -0,523$$

$$\Phi^+(3) = \frac{1}{4-1} (\Pi_{(3,1)} + \Pi_{(3,2)} + \Pi_{(3,4)}) = 0,666$$

$$\Phi^-(3) = \frac{1}{4-1} (\Pi_{(1,3)} + \Pi_{(2,3)} + \Pi_{(4,3)}) = 0,333$$

$$\Phi(3) = \Phi^+(3) - \Phi^-(3) = 0,333$$

$$\Phi^+(4) = \frac{1}{4-1} (\Pi_{(4,1)} + \Pi_{(2,4)} + \Pi_{(3,4)}) = 0,571$$

$$\Phi^-(4) = \frac{1}{4-1} (\Pi_{(1,4)} + \Pi_{(2,4)} + \Pi_{(3,4)}) = 0,428$$

$$\Phi(4) = \Phi^+(4) - \Phi^-(4) = 0,142$$