

THÈSE

présentée pour obtenir

le titre de

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE

ÉCOLE DOCTORALE SYSTÈMES

Spécialité : SYSTÈMES INDUSTRIELS

par

Raymond HOUE NGOUNA

**Modélisation des connaissances normatives en vue
l'évaluation de la recyclabilité d'un produit en conception :
des normes aux contraintes**

Soutenue le 04 décembre 2006 devant le jury composé de :

Mme	Nada MATTA	Maître de Conférences, HDR, Université de Technologie de Troyes	Rapporteur
M.	Abdelaziz BOURAS	Professeur, Université Lumière de Lyon II	Rapporteur
MM.	Alain BERNARD	Professeur, École Centrale de Nantes	Président
	Christian TAHON	Professeur, Université de Valenciennes	Examineur
	Michel TOLLENAERE	Professeur, ENSGI INP de Grenoble	Examineur
M.	Rafael ENPARANTZA	Ingénieur de recherche, TEKNIKER	Invité
M.	Bernard GRABOT	Professeur, ENI de Tarbes	Directeur de thèse

Remerciements

Je remercie plus globalement la providence de m'avoir permis de rencontrer toutes les personnes grâce à qui ce travail a pu se réaliser.

Je voudrais tout d'abord exprimer toute ma gratitude à Monsieur Daniel NOYES, Directeur de la Recherche au Laboratoire Génie de Production de l'ENI de Tarbes, de m'avoir accepté au sein de cet établissement et de m'avoir offert d'excellentes conditions de travail tout au long de cette thèse. Dans le même ordre d'idée, je tiens tout particulièrement à remercier mon Directeur de thèse, Monsieur Bernard GRABOT, dont les qualités humaines ont favorisé une collaboration des plus harmonieuses ainsi que mon épanouissement personnel durant cet apprentissage à la recherche scientifique. La confiance qu'il m'a constamment accordée dans mes prises d'initiative a en définitive facilité l'aboutissement de cette thèse qui doit beaucoup à ses multiples conseils avisés.

Je remercie également tous les membres du jury de l'intérêt qu'ils ont manifesté pour mon travail. Je voudrais ainsi exprimer ma reconnaissance à Madame Nada MATTA (MCF, HDR à l'Université de Technologie de Troyes) et à Monsieur Abdelaziz BOURAS (Professeur à l'Université Lumière de Lyon II) du temps qu'ils ont consacré à la lecture de mon mémoire et des échanges très fructueux qui ont suivi. J'associe à ces remerciements les autres membres du jury, Messieurs Alain BERNARD (Professeur à l'École Centrale de Nantes), Christian TAHON (Professeur à l'Université de Valenciennes), Michel TOLLENAERE (Professeur à l'ENSGI de Grenoble) et Rafael ENPARANTZA (Ingénieur de Recherche chez TEKNIKER) qui ont également accepté d'associer leurs expertises respectives à l'évaluation de cette thèse.

Je ne saurais oublier Monsieur Laurent GENESTE (Professeur à l'ENI de Tarbes) pour ses précieux conseils et sa constante disponibilité, et de même, Madame Pascale ZARATE (Professeur à l'ENSIACET de Toulouse) dont l'encadrement pendant mon année de D.E.A ainsi que le constant soutien ont conforté mon choix de faire cette thèse.

J'adresse également des remerciements très appuyés à Monsieur Sylvain BENILAN (Responsable R&D chez Expert-Solutions) dont la générosité et la disponibilité ont facilité mon apprentissage du langage CLAIRE.

Je voudrais également souligner la disponibilité et la bonne humeur de Cécile et Henriette (du secrétariat du LGP) que je remercie notamment pour leur aide dans certaines démarches administratives auxquelles j'ai été confronté durant cette thèse.

En somme, ces premiers pas dans la recherche scientifique se sont indubitablement enrichis des échanges que j'ai eus avec toutes ces personnes et d'autres que j'oublie certainement. Le bénéfice que j'en tire au plan humain mérite également d'être mentionné.

« Après avoir gravi une haute colline, tout ce que l'on découvre, c'est qu'il reste beaucoup d'autres collines à gravir » N. M.

Tables des matières

<u>TABLE DES ILLUSTRATIONS</u>	<u>xiii</u>
<u>LISTE DES TABLEAUX</u>	<u>xv</u>
<u>GLOSSAIRE</u>	<u>xvii</u>
<u>INTRODUCTION</u>	<u>21</u>
<u>CHAPITRE 1 L'ÉCO-CONCEPTION</u>	<u>27</u>
1. CADRE MÉTHODOLOGIQUE ET OUTILS DE L'ÉCO-CONCEPTION	28
1.1. L'analyse du cycle de vie du produit	28
1.2. L'éco-conception	29
1.3. La conception pour le recyclage	32
1.4. Les outils disponibles	35
1.4.1. Outils pour l'analyse du cycle de vie	35
1.4.2. Logiciels de "screening"	36
1.4.3. Logiciels traitant du désassemblage	36
1.4.4. Logiciel traitant de la recyclabilité des matières	37
2. DIRECTIVES ET STANDARDS LIÉS À L'ÉCO-CONCEPTION	38
2.1. Cadre général	39
2.1.1. Les instruments réglementaires directs	39
2.1.2. Les instruments économiques	39
2.1.3. Les instruments obligatoires liés à l'information	39
2.1.4. Les instruments volontaires liés à l'information	39

2.1.5.	Les accords volontaires	40
2.2.	Réglementations et standards environnementaux	41
2.2.1.	Directives Européennes	41
2.2.2.	Eco-labels	41
2.2.3.	Normes ISO	43
2.3.	Un exemple représentatif d'éco-label : Blue Angel	45
2.3.1.	Généralités	45
2.3.2.	Exigences et vérification de conformité	45
2.3.3.	Exigences spécifiques	47
2.3.4.	Bilan de l'analyse de Blue Angel	48
2.3.5.	Généralisation à d'autres éco-labels	50
	BILAN DU CHAPITRE	52
	<u>CHAPITRE 2</u> MODÉLISATION DES CONNAISSANCES POUR L'AIDE À LA DÉCISION	55
1.	DONNÉE, INFORMATION, CONNAISSANCE	56
1.1.	Définitions	56
1.2.	Typologies des connaissances	57
2.	OUTILS ET APPROCHES POUR LA MODÉLISATION DES CONNAISSANCES	58
2.1.	Quelques approches de modélisation des connaissances	58
2.1.1.	Approche orientée documents non informatisés	59
2.1.2.	Approche orientée base documentaire	59
2.1.3.	Approche basée sur le Raisonnement à Partir de Cas (RàPC)	60
2.1.4.	Approche basée sur des systèmes distribués de connaissances	60

2.1.5.	Approche orientée Systèmes à Base de Connaissances (SBC)	61
2.1.6.	Bilan	62
2.2.	Modélisation d'un domaine : langages à base d'ontologies	62
2.2.1.	Définitions	62
2.2.2.	Méthodologies de construction des ontologies	64
2.2.3.	NIAM/ORM, un formalisme de modélisation basé sur des ontologies	65
2.3.	Méthodes de représentation des connaissances	70
2.3.1.	Les méthodes à base de logique	71
2.3.2.	Les méthodes de représentation par objets structurés	74
2.3.3.	Les méthodes « mixtes »	76
2.3.4.	La programmation sous contraintes	78
	BILAN DU CHAPITRE	79
	<u>CHAPITRE 3</u> DÉFINITION D'UN MODÈLE « ÉTENDU » DE PRODUIT	83
1.	MODÉLISATION DANS LE CADRE DES SIP	83
1.1.	Premier exemple de l'approche multipoints de vue : le modèle MOKA	84
1.1.1.	La vue « organique » du modèle MOKA	85
1.1.2.	La vue « représentation » du modèle MOKA	86
1.1.3.	La vue « technologie » du modèle MOKA	86
1.1.4.	Bilan	87
1.2.	Deuxième exemple de l'approche multipoints de vue : le modèle de Harani	87
1.2.1.	Les concepts de base du modèle de Harani	87
1.2.2.	La notion de « point de vue » du modèle de Harani	88

1.2.3.	La notion de « lien » du modèle de Harani	89
1.2.4.	Bilan	90
2.	CARACTÉRISATION DES ÉCO-LABELS RETENUS	90
2.1.	Choix d'éco-labels représentatifs	92
2.1.1.	Les éco-labels internationaux	93
2.1.2.	Les éco-labels nationaux	94
2.1.3.	Les éco-labels industriels	94
2.1.4.	Bilan	95
2.2.	Les principaux thèmes caractéristiques des éco-labels retenus	95
2.2.1.	Le thème de l'identification des pièces et composants	95
2.2.2.	Le thème de l'homogénéité	96
2.2.3.	Le thème du démontage	98
3.	EXTRACTION DES DONNÉES « RECYCLABILITÉ »	99
3.1.	Cadre initial de la modélisation : la vue structurelle	99
3.2.	Définition des vues spécifiques à l'étude	101
3.2.1.	La vue « recyclabilité »	102
3.2.2.	La vue « démontabilité »	103
3.3.	Liens entre les vues du modèle « étendu »	103
	BILAN DU CHAPITRE	105
	<u>CHAPITRE 4</u> MODÉLISATION DES STANDARDS : DU LANGAGE NATUREL AUX CONTRAINTES	<u>107</u>
1.	DÉFINITIONS	108
1.1.	Le concept de « produit »	108

1.2. Le concept de « matière »	108
1.3. Le concept de « substance »	109
1.4. Les concepts de « nœud » et de « lien »	109
2. MODÉLISATION À L'AIDE DE LA LOGIQUE PROPOSITIONNELLE	110
2.1. Principe de la modélisation	110
2.1.1. Traduction d'un critère	110
2.1.2. Compléments d'information sur l'interprétation d'un critère	111
2.1.3. Modélisation	111
2.1.4. Forme logique de la règle associée à un critère	112
2.2. Description de la modélisation	112
2.3. Bilan	115
3. MODÉLISATION SOUS FORME DE CONTRAINTES	117
3.1. Définitions	117
3.1.1. Typologie des variables	117
3.1.2. Typologie des contraintes	118
3.1.3. Exemple de représentation d'un CSP	119
3.1.4. Solution d'un CSP	120
3.1.5. Techniques de résolution	120
3.2. Description de la modélisation par contraintes	127
3.2.1. Synthèse du CSP défini sur les éco-labels retenus	127
3.2.2. Expression de quelques critères sous formes de contraintes	130
BILAN DU CHAPITRE	132

<u>CHAPITRE 5</u>	<u>IMPLÉMENTATION</u>	<u>135</u>
1.	CHOIX TECHNIQUES	135
1.1.	Description du langage de programmation adopté	137
1.1.1.	Présentation générale	137
1.1.2.	Déclaration d'un problème de satisfaction de contraintes	138
1.1.3.	Déclaration des variables d'un CSP	139
1.1.4.	Définition des contraintes d'un CSP	139
1.1.5.	Résolution d'un CSP	142
1.2.	Bilan	146
2.	DÉFINITION D'UNE DÉMARCHE D'AIDE	146
3.	EXEMPLE	149
3.1.	Description du produit choisi	149
3.2.	Implémentation de l'exemple	151
3.2.1.	Schéma général	151
3.2.2.	Tests effectués	152
	BILAN DU CHAPITRE	155
	<u>CONCLUSION ET PERSPECTIVES</u>	<u>157</u>
	<u>ANNEXES</u>	<u>161</u>
	ANNEXE 1 : MODÉLISATION DES CRITÈRES	161
	1) EXPRESSION À L'AIDE DE LA LOGIQUE PROPOSITIONNELLE	161
	2) EXPRESSION SOUS FORME DE CONTRAINTES	167

ANNEXE 2 : NOMENCLATURE COMPLÈTE DE L'EXEMPLE ÉTUDIÉ	175
ANNEXE 3 : EXTRAITS DE CODE CLAIRE	176
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	<u>183</u>

Table des illustrations

Figure 1 : Le recyclage dans le cycle de vie d'un produit.....	23
Figure 2 : Schéma de principe de la démarche proposée.....	24
Figure 3 : La « roue stratégique » de l'éco-conception ([Brezet et VanHemel, 1997]).....	30
Figure 4 : Illustration de la richesse des ontologies au niveau applicatif.....	64
Figure 5 : Aperçu de la vue structurelle du modèle MOKA.....	85
Figure 6 : Vue structurelle du modèle de produit multipoints de vue de Harani [1997].....	88
Figure 7 : Cadre initial de définition d'un modèle « étendu » de produit.....	100
Figure 8 : Vue « recyclabilité » du modèle « étendu » de produit.....	102
Figure 9 : Vue « démontabilité » du modèle « étendu » de produit.....	103
Figure 10 : Illustration de la complémentarité entre points de vue.....	104
Figure 11 : Exemple de nomenclature-produit.....	108
Figure 12 : Exemple de représentation d'un CSP.....	120
Figure 13 : Exemple de CSP pour illustrer les algorithmes AC-3 et AC-4.....	124
Figure 14 : Réseau de contraintes de notre problème dans le cas <i>Blue Angel</i>	128
Figure 15 : Expression du critère A1 sous forme de contraintes.....	130
Figure 16 : Expression du critère A2 sous forme de contraintes.....	131
Figure 17 : Aperçu de l'architecture Webclaire.....	136
Figure 18 : Code source de l'implémentation de l'exemple de la Figure 13.....	145
Figure 19 : Résultats de la résolution de l'exemple de la Figure 13.....	146
Figure 20 : Aperçu de la démarche d'aide proposée.....	147
Figure 21 : Exemple traité - source: http://www.srl.gatech.edu/education/ME4171/DFR-Improve.ppt	150
Figure 22 : Interface provisoire de saisie des paramètres d'un critère.....	152

Liste des tableaux

Tableau 1 : Panorama des instruments de politique environnementale orientés « produits » dans quelques pays.....	40
Tableau 2 : Produits électriques et électroniques faisant l'objet d'éco-labels nordiques et l'éco-label européen en 1998.....	42
Tableau 3 : Exemple de critères de base de <i>Blue Angel</i>	46
Tableau 4 : Principales notations ORM et leurs significations.....	66
Tableau 5 : Catalogue du label écologique européen (source : www.eco-label.com/french/).....	91
Tableau 6 : Principaux labels identifiés dans la famille des PEE (ordinateurs personnels).....	93
Tableau 7 : Illustration de l'exécution de l'algorithme AC-3.....	125
Tableau 8 : Illustration de l'exécution de l'algorithme AC-4.....	126
Tableau 9 : Récapitulatif des variables du CSP pour l'éco-label <i>Blue Angel</i>	129
Tableau 10 : Données de l'exemple - source: http://www.srl.gatech.edu/education/ME4171/DFR-Improve.ppt	151
Tableau 11 : Domaines respectifs des variables utilisées dans les contraintes du critère A2.....	153

Glossaire

AC : *Arc Consistency* (Arc-Cohérence ou cohérence d'arc)

ACV / LCA : *Analyse du Cycle de Vie / LifeCycle Analysis*

AFNOR : *Association Française de NORmalisation*

CFAO : *Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur*

CLAIRE : *Combining Logical Assertions, Inheritance, Relations and Entities*

CpD : *Conception pour le Désassemblage*

CpDV : *Conception pour le Désassemblage en vue de la Valorisation*

CpND : *Conception pour le Non Désassemblage*

CpSV : *Conception pour le Système de Valorisation*

CSDP : *Conceptual Schema Design Procedure*

CSP : *Constraint Satisfaction Problem*

DFE : *Design For Environment*

DFR : *Design For Recycling*

IC : *Ingénierie des Connaissances*

IGES : *Initial Graphic Exchange Specifications*

ISO : *International Organization for Standardization*

LOT / NOLOT : *Logical Object Type / Non Object Logical Object Type*

NIAM : *Nijssen Information Analysis Method*

ORM : *Object Role Modelling*

PEE : *Produit Électrique et Électrotechnique*

PLM : *Product Lifecycle Management*

PME : Petite et Moyenne Entreprise

RàPC : Raisonnement à Partir de Cas

SBC : Système à Base de Connaissances

SET : Standard d'Échange et de Transfert

SIP : Système d'Information Produit

STEP : *STandard for the Exchange of Product data*

VHU : Véhicule Hors d'Usage

TAL : Traitement Automatique du Langage

Introduction

Le processus de conception de produits manufacturés a considérablement évolué ces dernières années, en partie pour permettre une meilleure prise en compte lors de la conception de contraintes liées à des étapes ultérieures du cycle de vie du produit. Avec la parallélisation des activités, cette prise en compte précoce des contraintes aval est d'ailleurs une des caractéristiques principales de l'ingénierie concurrente [Sohlenius, 1992].

Du point de vue des systèmes d'information et de l'aide à la décision se pose alors le problème difficile de l'intégration de ces contraintes, et plus généralement de la communication entre deux domaines de connaissances : celui de la conception et celui des étapes dans lesquelles ces contraintes sont générées.

Cette thèse aborde cette problématique sur un cas particulier mais très représentatif : la prise en compte lors de la conception de contraintes de recyclabilité du produit, domaine qui fait l'objet d'un intérêt croissant dans notre société de plus en plus marquée par le concept de Développement Durable. Dans cette thèse, nous aborderons cette problématique avec le point de vue particulier de l'aide à la décision pour l'intégration de contraintes aval du cycle de vie du produit dans le processus de conception. Nous nous situons donc dans une approche de type « gestion du cycle de vie du produit » (*Product Lifecycle Management*) visant à prendre en compte ce cycle de vie dans son ensemble.

Il y a relativement peu d'années qu'ont émergé en parallèle les deux idées de base du Développement Durable : les activités humaines ont un impact sur l'état de notre planète, et les ressources naturelles ne sont pas inépuisables [Meadows *et al.*, 1972]. A la suite de ce double constat, dont les conséquences sont loin d'être encore universellement acceptées, le concept de Développement Durable, né du rapport de la Commission Brundtland [Brundtland, 1987], est devenu un des piliers du développement de l'espace communautaire européen. Il s'est ainsi traduit d'une part par une série d'incitations aux industriels, et d'autre part par un encouragement à lancer des programmes de recherche donnant une réalité à ce concept.

Dans un premier temps présentées comme de simples recommandations, ces incitations, prenant souvent la forme des normes et de standards, sont progressivement imposées. Dans le domaine de la production de biens, des directives européennes de plus en plus nombreuses cadrent ainsi la conception, la fabrication, l'utilisation et la gestion en fin de vie des produits manufacturés. Les entreprises sont ainsi amenées à prendre en compte l'impact environnemental lié à la production et à l'utilisation de leurs produits, ainsi que leur mode de recyclage et les filières associées, et ce dès la phase de conception. Pour cela, l'intégration à l'équipe de conception d'une personne compétente tant en environnement qu'en conception semble nécessaire [Puyou, 1999]. Si les grandes entreprises disposent souvent du personnel qualifié et d'outils adaptés pour intégrer ces contraintes environnementales dans leurs processus de conception, le problème est tout autre pour les petites et moyennes entreprises (PMEs) qui ne disposent en général ni du savoir-faire, ni des compétences, ni de la disponibilité nécessaire pour aborder ces problèmes. Or, il devient clair que le respect de critères environnementaux n'est pas seulement un problème de contrainte : la récente prise de conscience du grand public est en effet en train de se répercuter dans les chaînes logistiques d'élaboration des produits, à partir des acteurs finaux en contact avec le public. On commence ainsi à voir de grands donneurs d'ordres engagés dans une démarche environnementale répercuter ces contraintes vers leurs fournisseurs. Le respect de critères environnementaux est donc en passe de devenir un avantage concurrentiel réel, et un atout fort dans la concurrence avec les pays à faible coût de main d'oeuvre, non seulement pour les entreprises concevant des produits « propres », mais pour toute entreprise impliquée dans une chaîne logistique.

C'est sur cette base qu'a été lancé le projet européen INTERREG PREMI¹, dans lequel est impliqué le Laboratoire Génie de Production de l'ENIT. Ce projet vise en effet à diffuser dans les PME de la façade atlantique européenne des technologies innovantes amenant un meilleur respect de l'environnement, en particulier axées sur la miniaturisation, la diminution des gaspillages en production et la recyclabilité des produits. Au sein d'un réseau international de cinq organismes de recherche et de transfert (IDIT - Santa Maria Da Fera - Portugal ; MEC

¹ *Partnership in Sustainable Development through Product Recyclability, Miniaturisation and Production Waste reduction.*
<http://www.premi.cf.ac.uk>

- Cardiff - Royaume Uni ; UCD - Dublin - Irlande ; TEKNIKER - Eibar - Espagne et LGP/ENIT - Tarbes - France), notre étude a porté plus particulièrement sur le thème de la recyclabilité, sous l'angle de l'aide à la décision au concepteur de produits mécaniques.

Le cycle de vie d'un produit est rappelé dans la Figure 1. L'analyse de la recyclabilité peut être envisagée à tout instant de ce cycle de vie, par exemple, en phase de conception (cf. la partie A de la Figure 1), ou bien en fin de vie (entre les zones B et C de la Figure 1). Il est clair toutefois que prévoir a posteriori le recyclage d'un produit n'a qu'une efficacité limitée, et conduit souvent à se contenter de définir des modes de collecte et de destruction, par incinération par exemple (tel qu'illustré par le scénario sc3 de la Figure 1), qui ont un intérêt économique et environnemental relativement faible. Il faut donc pouvoir envisager la recyclabilité dès la phase de conception afin d'optimiser son efficacité, voire d'en tirer un avantage concurrentiel. C'est en effet la manière avec laquelle le produit a été conçu qui permettra, lorsque cela est possible, d'utiliser les scénarios sc1 (réutilisation du produit après reconditionnement) et sc2 (recyclage d'une partie de ses composants) plutôt que le scénario sc3.

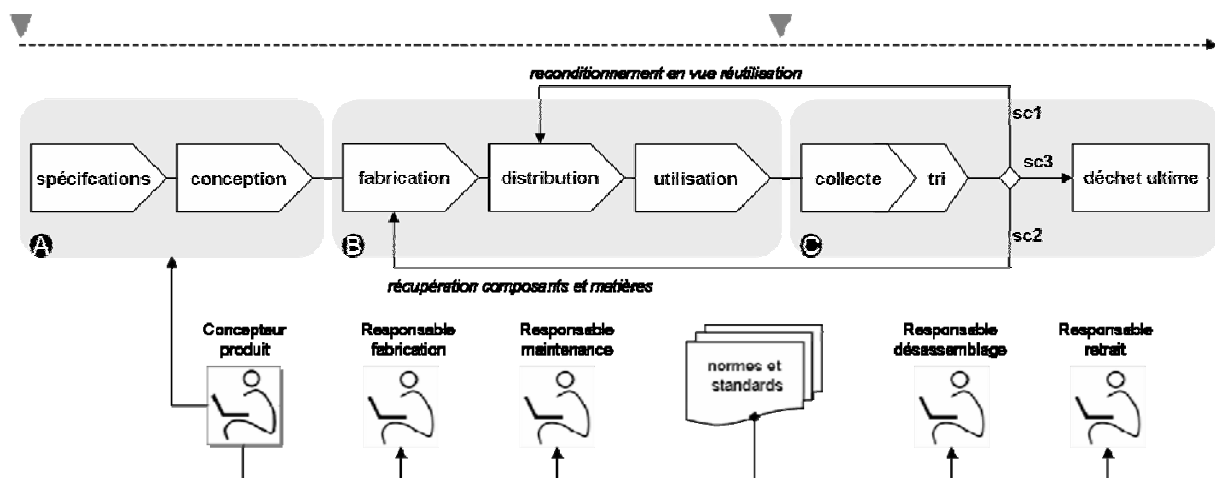


Figure 1 : Le recyclage dans le cycle de vie d'un produit.

Les outils d'aide développés jusqu'ici, notamment dans le cadre de l'évaluation des performances environnementales, traitent en général de principes très génériques, et n'apportent donc pas une réponse ciblée à la prise en compte de contraintes de recyclabilité dans le cycle de vie des produits. Dans le cadre de cette thèse, notre objectif est de montrer la faisabilité de la définition de systèmes d'aide très flexibles permettant aux acteurs du cycle de vie du produit de mieux prendre en compte des contraintes environnementales pour la conception d'un produit donné, destiné à un marché précis. Pour cela, nous nous sommes restreint à un

des sous problèmes sous-jacents dans la Figure 1 : la prise en compte de contraintes de recyclabilité lors de la conception du produit.

Relier la conception du produit et le respect de critères de recyclabilité demande l'élaboration d'une chaîne de traitement de l'information qui peut faire l'objet de choix multiples. Aux deux extrémités de la chaîne, nous avons tout d'abord réalisé les choix suivants :

- Le produit sera décrit par sa *nomenclature*, qui est un des résultats de l'activité de conception. Nous verrons en effet par la suite que la nomenclature-produit est un cadre de base simple mais suffisant pour positionner une grande partie des concepts permettant d'évaluer la recyclabilité.
- Nous avons choisi les *éco-labels* comme exemples de recueil de règles de « bonnes pratiques » portant sur la recyclabilité. Ces standards, qui seront dans la suite positionnés dans l'ensemble des directives existantes, nous ont en effet semblé à la fois relativement simples et représentatifs des types de connaissances accessibles sur le sujet.

La démarche proposée dans cette thèse afin de relier nomenclature-produit et éco-labels est résumée dans le schéma de principe de la Figure 2.

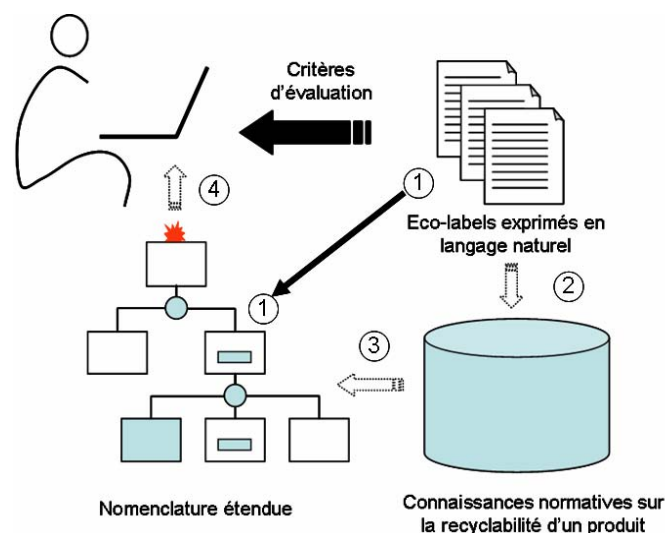


Figure 2 : Schéma de principe de la démarche proposée.

Dans un premier temps, nous proposons d'analyser le contenu des principaux éco-labels disponibles afin d'en extraire les données-produits pouvant être absentes des nomenclatures de

conception (repères 1 sur la Figure 2). Le résultat de cette étape sera la proposition d'une nomenclature-produit « étendue » susceptible de renfermer les informations nécessaires à l'évaluation de la recyclabilité d'un produit. La capacité du concepteur ou de son outil de CFAO (Conception et Fabrication Assistés par Ordinateur) à produire ces informations sera évidemment une condition nécessaire à l'utilisation de la méthode proposée. Ce point sera analysé par la suite.

Dans un deuxième temps, nous analyserons les connaissances décrites dans les éco-labels considérés, basées sur les données précédemment identifiées. Nous proposerons une typologie de ces connaissances, et envisagerons différentes approches pour la modélisation de ces connaissances-types afin d'en permettre l'utilisation par un logiciel d'aide à la décision (repère 2 de la Figure 2). Ces approches seront en particulier évaluées en fonction de la disponibilité d'outils permettant l'exploitation automatique des connaissances modélisées (moteurs d'inférence par exemple).

En préalable à l'utilisation du système, le ou les éco-labels retenus seront traduits en règles utilisables dans notre système d'aide à la décision, en nous basant sur les outils de modélisation des connaissances retenus (repère 3 sur la Figure 2).

Lors de l'utilisation du système, il s'agira alors de choisir l'éco-label pertinent, puis de propager les connaissances correspondantes dans la nomenclature étendue du produit (repère 4 dans la Figure 2), avec différentes finalités possibles, par exemple :

- a) identifier les problèmes pouvant exister (critères de recyclabilité non vérifiés),
- b) évaluer le degré de recyclabilité du produit,
- c) proposer des solutions permettant d'améliorer la recyclabilité.

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes focalisés sur le premier point. De plus, nous verrons que l'exploitation automatique d'un éco-label complet ne peut se faire qu'au prix d'une complexification extrême du système. Nous nous cantonnerons donc ici au cadre plus réaliste d'un système d'aide à la décision permettant de détecter certains problèmes mais faisant largement appel à l'expertise humaine, au cours de phases d'interaction entre logiciel et utilisateur. Le but est en effet de diminuer l'effort nécessaire pour prendre en compte des

contraintes de recyclabilité en conception : il serait illusoire de penser pouvoir réduire cet effort à zéro.

Notre but n'est pas de créer un système d'aide à la décision dédié à un éco-label donné, et donc amené à être très rapidement obsolète. Notre ambition est de proposer, puis de valider, une méthode de traduction des connaissances contenues dans les normes et labels sous forme automatisable, et de définir les bases d'un système d'aide à la décision interactif utilisant ces connaissances. Ces principes devront donc être transposables à d'autres sources de connaissances, et éventuellement à d'autres étapes du cycle de vie du produit.

La suite de ce document est structurée comme suit. La problématique générale de l'éco-conception sera abordée dans le Chapitre 1 ; les méthodologies et systèmes d'aide à la décision existants seront alors analysés. Le bilan de l'existant nous permettra de justifier notre approche.

Des éléments de modélisation des connaissances pour l'aide à la décision seront proposés dans le Chapitre 2. Sur un sujet aussi vaste, ce chapitre ne prétend nullement à l'exhaustivité : dans le contexte précis qui est le nôtre, il s'agit de dégager les solutions possibles et de justifier nos choix.

Un modèle « étendu » du produit basé sur sa nomenclature sera défini dans le Chapitre 3, tandis que la modélisation des connaissances contenues dans les éco-labels sera présentée dans le Chapitre 4.

Le Chapitre 5 nous permettra de présenter les choix techniques ayant conduit au prototypage de notre proposition de système d'aide à la décision. La faisabilité de ce système sera analysée sur un exemple.

Une conclusion et des perspectives seront exposées dans la partie finale.

L'éco-conception

Sous l'impulsion des associations de consommateurs puis du législateur, une prise de conscience sur l'état de la planète tend à se généraliser, encadrée par le paradigme du Développement Durable : dorénavant, les industriels doivent pouvoir allier leurs performances classiques de *coût*, *délai* et *qualité* à des impératifs de protection de l'environnement, cadrés par des réglementations de plus en plus strictes. Les normes de la famille ISO 14000 et les éco-labels sont deux exemples représentatifs du mode d'intégration des considérations environnementales dans les processus industriels.

Les méthodes permettant la prise en compte de critères environnementaux en conception sont en général lourdes, et de nombreux logiciels d'aide ont été développés, bien souvent dans le cadre de travaux de recherche ou de partenariats recherche/industrie. En pratique, nous verrons que les hypothèses d'analyse (notamment les critères environnementaux considérés) et les modes calculs des indicateurs environnementaux adoptés par les outils développés sont soit très génériques, soit dédiés à des cas spécifiques.

Dans ce chapitre, nous montrerons tout d'abord comment la prise de conscience des années 70 concernant l'impact des produits industriels sur l'environnement a conduit aux principes de l'éco-conception. En nous restreignant à la conception pour la recyclabilité qui fera l'objet de notre étude, nous proposerons une synthèse du cadre réglementaire du Développement Durable et des principaux textes consacrés à l'intégration des considérations environnementales dans les processus industriels. Nous dresserons un panorama rapide des outils logiciels associés aux méthodes d'éco-conception. Nous montrerons comment les éco-labels, d'une utilisation plus limitée que les méthodes complètes d'éco-conception, peuvent procurer un avantage concurrentiel aux entreprises, et plus précisément aux PME. Nous détaillerons sur un exemple le contenu d'un éco-label afin de montrer comment se traduisent les connaissances sur l'éco-conception, et plus particulièrement sur la recyclabilité, dans un éco-label.

Notre intérêt n'est dans ce chapitre que de resituer les éco-labels dans le cadre plus général de l'éco-conception : notre objectif n'est pas, en effet, de développer des connaissances

sur le fond (la recyclabilité), mais de faire des propositions permettant de manipuler plus facilement les connaissances relatives à la recyclabilité disponibles dans les éco-labels lors de la conception.

1. Cadre méthodologique et outils de l'éco-conception

1.1. *L'analyse du cycle de vie du produit*

Un premier élément important ayant conduit à la notion d'éco-conception est la prise de conscience qu'un produit interagit avec l'environnement au cours de toutes les phases de son cycle de vie. Plus connue dans la littérature scientifique sous sa dénomination anglaise, à savoir *Life Cycle Analysis (LCA)*, la technique d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) d'un produit est ainsi née aux USA dans les années 70 à la suite de la crise énergétique sévissant à l'époque. Initialement développée dans le but de répertorier les exigences énergétiques des processus industriels, les points concernant les émissions dans l'atmosphère ainsi que l'utilisation des matières premières ont été rajoutés par la suite.

D'après la norme NF X30 300, l'ACV peut être définie comme « une approche méthodologique visant à mesurer l'ensemble des flux de matières et d'énergie, ainsi que l'ensemble des rejets provoqués dans le cycle de vie de produit ». En dépit des variantes pouvant exister dans ses différentes versions, on retiendra que cette technique vise à s'assurer que les effets environnementaux lors des différentes phases du cycle de vie du produit sont identifiés et réduits, et pas simplement transférés d'une phase à l'autre [Reyes *et al.*, 2006]. En pratique, il s'agit de collecter puis d'évaluer (qualitativement et quantitativement) les données nécessaires à l'analyse d'un produit donné, dont son impact environnemental. Une telle analyse prend en compte chacune des phases du cycle de vie du produit. Svoboda propose une définition plus détaillée, et distingue notamment trois phases bien distinctes [Svoboda, 1995] :

- une phase d'inventaire (*Life Cycle Inventory*) dédiée à la construction d'une base de données relatives à l'analyse souhaitée, recensant notamment les matières premières, l'énergie, les émissions, les déchets, etc., sur tout le cycle de vie du produit ;
- une phase d'évaluation de l'impact dans le cycle de vie (*Life Cycle Impact Assessment*) qui concerne, par exemple, l'évaluation des effets environnementaux du produit,

aussi bien sur la santé des individus que des points de vue sociétal, culturel et économique ;

- une phase d'analyse des améliorations (*Life Cycle Improvement Analysis*) qui porte par exemple sur une étude des possibilités de réduction des impacts environnementaux, en se basant sur des critères qualitatifs et quantitatifs.

Du fait de sa couverture complète du cycle de vie des produits, l'ACV met en jeu des connaissances et outils très variés puisque touchant aussi bien à la conception du produit qu'à sa fabrication, son utilisation ou son retrait. Pour améliorer la compatibilité d'un produit avec les critères environnementaux, l'ACV a débouché sur les principes de l'éco-conception, décrits dans la partie suivante.

1.2. L'éco-conception

D'après [Gungor et Gupta, 1999], les connaissances acquises lors d'une démarche d'ACV peuvent être mises à profit pendant la phase de conception d'un produit afin de mieux évaluer l'impact environnemental. Ceci peut notamment s'avérer utile lorsque les impacts générés au-delà de la phase de production n'ont pas été pris en compte [Reyes *et al.*, 2006]. Dans la littérature, les méthodes et techniques visant à analyser l'impact environnemental d'un produit afin d'en minimiser les effets en agissant sur les paramètres de conception sont connues sous la dénomination d'éco-conception, ou encore *Design For Environment (DFE)*, appellation la plus usitée aux USA. Une définition très souvent citée est due à Fiksel (cf. [Fiksel, 1996]) qui considère l'éco-conception comme la « prise en compte systématique des considérations environnementales, de santé et de sûreté dans l'évaluation des performances de conception d'un produit (ou d'un service) sur tout son cycle de vie ». Au sens de la norme ISO 14062, l'éco-conception vise à proposer des démarches et principes généraux de conception permettant de minimiser, à performances égales, l'impact environnemental d'un produit durant tout son cycle de vie.

D'un point de vue applicatif, l'*eco-design strategy wheel* [Brezet et VanHemel, 1997] (voir Figure 3) constitue un des meilleurs supports permettant notamment d'analyser les performances d'un produit relativement à des critères environnementaux associés à chaque phase de son cycle de vie. Cet outil visuel permet en particulier de comparer un produit à une

version « idéale » (du point de vue des critères environnementaux), ce qui permet d'identifier les points faibles devant faire l'objet d'une plus grande attention de la part du concepteur de produit.

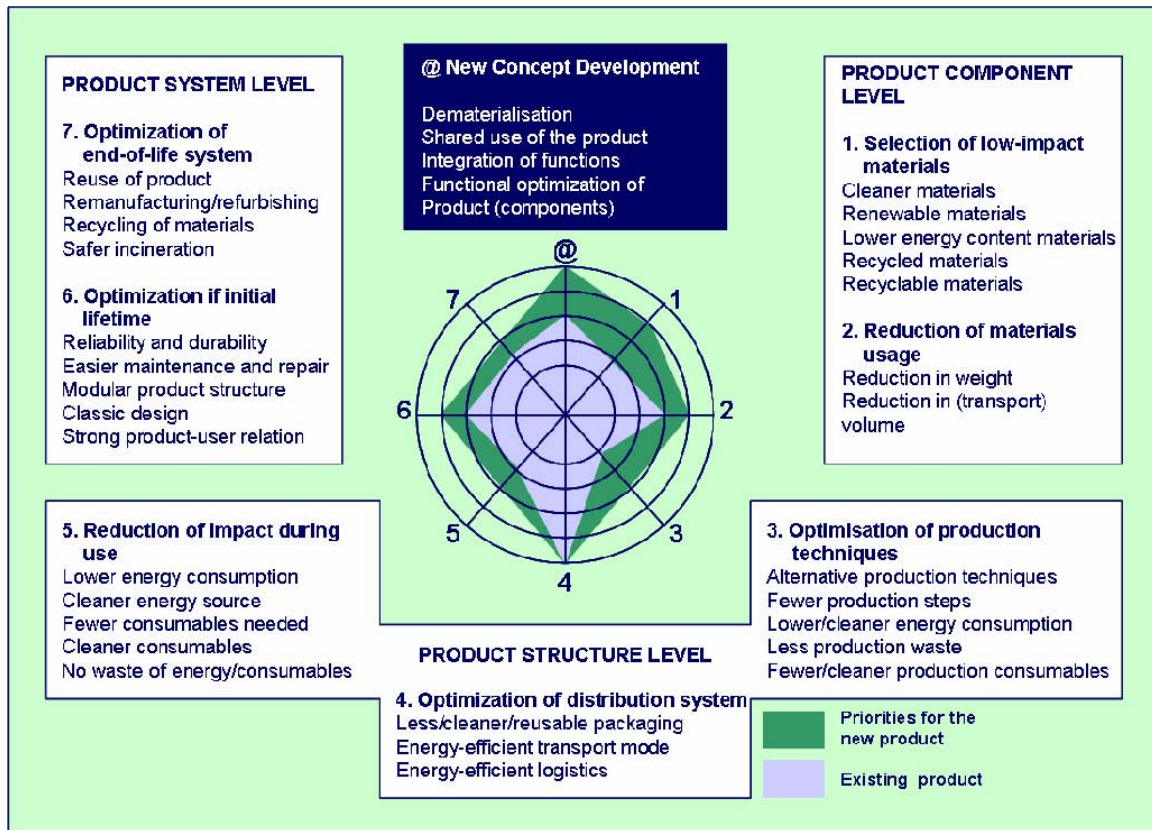


Figure 3 : La « roue stratégique » de l'éco-conception ([Brezet et VanHemel, 1997]).

Comme on peut le voir sur la Figure 3, l'éco-conception propose une panoplie très complète d'actions, abordant des niveaux de plus en plus globaux :

- 1) Niveau des éléments constitutifs du produit :
 - sélection de matières à faible impact environnemental,
 - réduction de la consommation de matières.
- 2) Niveau de la « structure » du produit :
 - optimisation des techniques de production,
 - optimisation de la distribution,

- réduction de l'impact environnemental durant l'utilisation du produit.

3) Niveau du « système-produit » :

- optimisation de la durée de vie initiale,
- optimisation du retrait.

Les actions à mener à ces différents niveaux peuvent être résumées par les « treize principes de l'éco-conception » [Behrendt *et al.*, 1997] :

- 1) Coupler respect environnemental et fonctionnalité optimale
- 2) Sauvegarder les ressources
- 3) Utiliser des ressources renouvelables, disponibles en quantité suffisante
- 4) Accroître la durée de vie du produit
- 5) Concevoir en vue de réutiliser le produit
- 6) Concevoir en vue de recycler les matériaux
- 7) Concevoir en vue de désassembler
- 8) Limiter l'emploi de substances dangereuses
- 9) Produire en respectant l'environnement
- 10) Minimiser l'impact environnemental du produit au cours de son utilisation
- 11) Utiliser des emballages respectueux de l'environnement
- 12) Éliminer les matériaux non recyclables en respectant l'environnement
- 13) Développer une logistique respectueuse de l'environnement.

Appliquer une démarche pratique d'éco-conception en entreprise est un projet de grande ampleur, dont les étapes peuvent être les suivantes [Puyou, 1999] :

- choix du produit,
- proposition d'objectifs de conception (fonctionnels et économiques),
- recherche de solutions techniques,
- industrialisation et production,
- analyse de la commercialisation et de la communication autour du produit,
- proposition de services au client lors de l'utilisation et de la fin de vie.

Il est clair que l'éco-conception aborde des problèmes de natures très différentes, au moyen de techniques et outils variés. Des exemples d'application des techniques d'éco-conception peuvent par exemple être trouvés dans [Barnabé *et al.*, 2003], tandis qu'une étude récente de l'AFNOR sur l'éco-conception [Brun et Saillet, 2005], avec application à huit secteurs dont le secteur de la mécanique, en fait une synthèse très complète montrant que la fabrication mécanique est encore actuellement relativement peu abordée.

Comme nous l'avons déjà précisé en introduction, notre ambition n'est toutefois pas de couvrir tous les champs de l'éco-conception, mais de nous limiter à la recyclabilité du produit (point 1 de la roue de l'éco-conception). Les principales techniques participant à cette partie de l'éco-conception sont listées dans la partie suivante ; nous verrons que les problèmes impliqués lors de cette étape sont en fait plus complexes que ne semble le suggérer la Figure 3.

1.3. La conception pour le recyclage

Un des objectifs fixés dans le cadre de la mise en œuvre d'une démarche d'éco-conception est le recyclage. Notons qu'il débute par la collecte des produits à recycler, souvent appelée *logistique inverse*, problème que nous n'aborderons pas ici (voir une revue de littérature dans [Prahinski et Kocabasoglu, 2006]).

Le DFR (*Design For Recycling*) ou conception pour le recyclage concerne une panoplie de méthodes permettant d'améliorer la recyclabilité d'un produit (cf. [Hundal, 2000] ou [Ishii,

1998]). Il est guidé par une échelle des valeurs portant sur l'impact environnemental du type de recyclage envisagé.

On distingue ainsi, par impact croissant :

- la réutilisation du produit dans son ensemble, pour le même usage ou pour un usage différent,
- la réutilisation de sous-ensembles du produit ou de ses composants,
- le recyclage des matériaux inclus dans le produit, par :
 - recyclage dans leur utilisation originelle (recyclage primaire),
 - recyclage dans une utilisation dégradée (recyclage secondaire),
 - recyclage de plastiques dans l'industrie pétrochimique (recyclage tertiaire).
- l'incinération sûre avec récupération d'énergie et mise au rebut des déchets :
 - incinération de matériaux non réutilisables pour la génération d'énergie (recyclage quaternaire) avec purification des gaz produits,
 - incinération de matériaux non réutilisables sans génération d'énergie avec purification des gaz produits,
 - stockage des matériaux sous forme de déchets solides en environnement contrôlé.

Nous nous intéresserons ici aux trois premiers types de recyclage, concernant la réutilisation de tout ou partie du produit. Ce recyclage induit deux types de problèmes distincts mais corrélés, liés à la faisabilité technique et économique du recyclage envisagé. Tel que décrit dans [Mathieux, 2002], on peut distinguer quatre types de travaux abordant ces deux aspects de la problématique :

- La Conception pour le Désassemblage (*CpD*) en vue de l'optimisation de la « démontabilité » d'un produit [Johansson, 1997] : en s'appuyant sur certaines règles de conception (par exemple, celles énoncées dans [Dowie, 1994] et [VDI, 1993]), les

principaux objectifs visés ici sont de faciliter la séparation des matières, l'identification des éléments à séparer, leur accessibilité et leur manipulation lors du démontage, etc.

- La Conception pour le Désassemblage en vue de la Valorisation (*CpDV*) visant l'adaptation de la « démontabilité » aux filières disponibles : les principaux objectifs concernent la diminution du nombre de destinations possibles du produit en fin de vie [Ishii et Lee, 1996] [Lee et Ishii, 1998], en déterminant notamment une séquence optimale de désassemblage [Pnuelli et Zussman, 1997] relativement à la stratégie adoptée et en incluant des contraintes liées à la compatibilité entre les matériaux ou aux coûts de recyclabilité.
- La Conception pour le Non Désassemblage (*CpND*), un concept classique mais peu formalisé, qui porte sur les alternatives au démontage manuel, à savoir le broyage et le tri. Il vise en particulier des méthodes pour le choix approprié de *matériaux compatibles*, broyables et recyclables sans démontage [Hundal, 2000], et des *matériaux séparables*, par exemple les matériaux à très faible densité, facilement séparables.
- La Conception pour le Système de Valorisation (*CpSV*), une tendance novatrice qui combine les précédentes en considérant une approche systémique. Il s'agit ici d'optimiser la conception en maximisant la valorisation du produit en fin de vie selon des critères massique et économique.

Un problème majeur dans le cadre de l'évaluation de la faisabilité économique du recyclage est la disponibilité des données concernant les performances économiques des filières à considérer. Il est néanmoins maintenant possible de trouver des données intéressantes portant sur les quantités de matière à isoler par minute de manière à obtenir un recyclage à coût zéro². Ces données peuvent servir de contraintes pour évaluer la qualité de la « démontabilité » des produits.

² voir par exemple http://www.design.ntnu.no/fag/ecodesign/theory/theory_frames.htm, module B

Étant donné les besoins industriels croissants dans ce domaine, de nombreux logiciels ont vu le jour afin d'apporter une aide à la démarche d'éco-conception. Nous proposons une revue des principaux logiciels dans la partie suivante.

1.4. Les outils disponibles

Les divers aspects du cycle de vie d'un projet d'éco-conception sont abordés dans de multiples outils logiciels disponibles sur le marché. On trouvera par exemple des informations sur ces outils dans [Barnabé *et al.*, 2003], [Butel-Bellini et Janin, 1999], [Vezzoli, 1999], ou sur le site <http://www.ulg.ac.be/cior-fsa/activite/Enviro/Lienslog.htm>. Nous ne prétendons pas ici à une quelconque exhaustivité mais tenterons de citer les principaux outils du marché afin de mieux positionner nos objectifs par rapport aux outils existants. Même si les fonctionnalités souvent très variables de ces logiciels peuvent rendre leur affectation à une catégorie donnée hasardeuse, nous avons tenté d'organiser cette liste selon la cible principale des logiciels.

1.4.1. Outils pour l'analyse du cycle de vie

De nombreux outils proposent une assistance lors de l'analyse du cycle de vie des produits. On retiendra par exemple CMLCA (Centre of Environmental Science (CML))³, EDIP PC-tool (Danish EPA)⁴, EPS 2000 Design System (Assess Ecostrategy Scandinavia AB)⁵, GaBi (IKP, Université de Stuttgart et PE Product Engineering GmbH)⁶, KCL-ECO (KCL)⁷, LCAiT (CIT Ekologik)⁸, SimaPro (PRé Consultants)⁹, TEAM™ (Ecobilan PricewaterhouseCoopers)¹⁰, Umberto

³ <http://www.leidenuniv.nl/interfac/cml/ssp/software/cmlca/index.html>

⁴ <http://www.mst.dk/activi/08030000.htm>

⁵ <http://www.assess.se/>

⁶ <http://www.gabi-software.de>

⁷ <http://www.kcl.fi/eco/index.html>

⁸ <http://www.lcait.com/01.html>

⁹ <http://www.pre.nl/simapro/default.htm>

¹⁰ http://www.ecobalance.com/fr_team.php

(*Institute for Environmental Informatics, Hamburg*)¹¹ ou Green Design Advisor (Motorola - Université d'Erlangen) [Feldmann *et al.*, 1999].

Ces outils traitent de l'ensemble du cycle de vie du produit, et intègrent pour la plupart plusieurs bases de données permettant d'évaluer l'impact d'un paramètre donné sur l'environnement, puis d'évaluer un indice d'impact global selon différentes méthodes. Ils s'adressent pour la plupart davantage à un analyste environnemental qu'au concepteur lui-même [Vezzoli, 1999], même si certains, comme *SimaPro* ou *Green Design Advisor*, permettent la comparaison de plusieurs alternatives de conception d'un produit complexe du point de vue de son impact environnemental. Il est intéressant de noter que la plupart de ces outils ont vu leur origine dans des universités allemandes ou scandinaves.

1.4.2. Logiciels de “screening”

Ces logiciels plus simples permettent une évaluation rapide de l'impact environnemental d'un produit sur la base de scores prédéfinis contenus dans leurs bases de données (à partir de méthodes figées). On trouvera par exemple dans cette catégorie : EcoScan (TNO *Industrial Technology*)¹², ECO-it (PRÉ *Consultants*)¹³ ou GEMIS (*Global Emission Model for Integrated Systems*) (Öko-Institut)¹⁴.

1.4.3. Logiciels traitant du désassemblage

On trouvera ici des logiciels plus proches du problème de la recyclabilité, comme ATROiD (LCE *Consulting*, LG-PRC et IWF)¹⁵, Demrop (réalisé dans le cadre d'un projet européen, voir [Thomas et Kox, 1996]), AMETIDE (CDGM-Renault-Laboratoire 3S)¹⁶ ou ReGrEd/display [Feldmann et Meedt, 1995] qui permettent d'optimiser une séquence de désassemblage, en allant parfois jusqu'au calcul du coût de valorisation. ReStar (*Carnegie Mellon University*) [Navin-

¹¹ <http://www.umberto.de/english/index.htm>

¹² <http://www.ind.tno.nl/en/product/ecoscan/>

¹³ <http://www.pre.nl/eco-it/default.htm>

¹⁴ <http://www.oeko.de/service/gemis/en/index.htm>

¹⁵ <http://www.atroid.com>

¹⁶ <http://greenmfg.me.berkeley.edu/green/SoftwareTools/SoftwareTools.html>

Chandra, 1993] permet quant à lui non seulement de générer des gammes de démontage optimales, mais aussi d'analyser à chaque nœud la meilleure stratégie possible entre le désassemblage, le broyage, la vente ou l'élimination.

1.4.4. Logiciel traitant de la recyclabilité des matières

SFB392 (Université de Darmstadt)¹⁷ comporte un « expert recyclage » qui informe le concepteur des exigences des filières de valorisation (notamment sur la composition des matières, la géométrie et la masse des composants). ELDA (TNO - Université de Stanford - *National Science Foundation*) [Rose et al., 2000] peut être lié à un logiciel de CFAO (*ProEngineer*) et propose, pour chaque produit, une stratégie optimale entre la re-fabrication, la réutilisation des composants, le recyclage des matières, ou le broyage. De son côté, IDEmat (Université de Delft)¹⁸ est une base de données plus particulièrement dédiée à l'aide au choix des matières à faible impact environnemental. Le logiciel RECREATION (*IPA-Frankfurt Institute*) fournit une base de données contenant diverses informations sur les processus de recyclage ainsi que sur les fournisseurs de matières recyclables.

Apparemment récemment disparu, DfE (*Boothroyd Inc.*, USA et TNO, Pays-Bas) [Vezzoli, 1999] a figuré parmi les outils logiciels qui ont le mieux abordé la diversité des domaines impliqués par l'analyse des performances environnementales, notamment dans sa deuxième version ; il permettait en outre d'intégrer des indicateurs d'ACV. Selon la stratégie choisie, une séquence optimale de désassemblage était alors proposée, de même qu'une estimation prédictive des coûts et bénéfices associés, par exemple par rapport aux temps et coûts de démontage correspondant à chaque stratégie (en fonction de la revente estimée des composants dans leurs filières respectives, de leur réutilisation, de leur coût de mise en décharge, etc.). De plus, la communication avec d'autres outils était rendue possible : une partie des données était ainsi extraite des bases de données de production (concernant par exemple des données sur les matières produites, les matières recyclées, les matières envoyées dans les décharges agréées, les matières nécessitant un traitement spécial avant mise en décharge, les matières incinérées, etc.).

¹⁷ <http://www.sfb392.tu-darmstadt.de/>

¹⁸ http://www.io.tudelft.nl/research/dfs/idemat/Product/pi_frame.htm

Un changement dans la stratégie de *Boothroyd* pourrait avoir provoqué l'arrêt de la commercialisation du logiciel.

Comme on peut le voir, ces logiciels couvrent largement les étapes de l'analyse du cycle de vie d'un produit, certains abordant la recyclabilité par le désassemblage ou la compatibilité des matériaux. Ils sont toutefois relativement « fermés » puisque basés sur l'utilisation d'un modèle figé des connaissances et règles générales liés à l'éco-conception. Or, on voit de plus en plus apparaître des normes et standards dédiés à un pays ou à un type de produit donné, dont la prise en compte peut permettre d'aborder un marché ciblé sans traiter le problème de l'éco-conception dans son ensemble. C'est cette problématique, plus simple et à notre avis mieux adaptée aux PME, que nous souhaitons aborder. Pour cela, nous commencerons par dresser un panorama des directives et standards découlant du concept de l'éco-conception.

2. Directives et standards liés à l'éco-conception

Dans le contexte du Développement Durable, la conception, l'utilisation et la gestion en fin de vie des produits manufacturés sont de plus en plus régies par un cadre réglementaire. Tout d'abord formulé sous la forme de simples recommandations, ce cadre prend progressivement la forme d'obligations de plus en plus contraignantes. De fait, les anciennes techniques de retrait des produits telles que la mise en décharge, l'enfouissement ou l'incinération dans des sites ouverts ne sont plus envisageables, car de plus en plus réglementées.

Dans l'espace communautaire européen, des directives ont ainsi été progressivement édictées par le Parlement¹⁹ pour garantir le faible impact environnemental de certaines familles de produits. A titre d'exemple, environ 150 directives, lois et arrêtés relatifs à l'environnement applicables en France sont recensés pour la seule année 2004 dans [Colombet, 2004].

¹⁹http://europa.eu.int/eur-lex/fr/lif/reg/fr_register_15103030.html

Nous dresserons tout d'abord un panorama général des outils utilisés pour promouvoir le Développement Durable, l'éco-conception et la recyclabilité, en insistant sur leur caractère local. Nous listerons ensuite les principales directives en vigueur, pour aboutir à la notion d'éco-label.

2.1. Cadre général

Les instruments associés à la politique de promotion du Développement Durable auprès des entreprises manufacturières peuvent être classés suivant cinq catégories principales²⁰ :

2.1.1. Les instruments réglementaires directs

Il s'agit d'interdictions, procédures d'admission ou d'enregistrement, standards sur les produits ou sur les règles de publicité (qui ne font l'objet d'aucune législation dans certains pays), périodes de garanties, obligation de collecte des produits en fin de vie, quotas de produits retournés, restrictions de distribution, devoirs de l'utilisateur, droits de l'utilisateur, etc.

2.1.2. Les instruments économiques

On trouve ici des taxes et charges sur les produits, des aides financières pour les activités liées à l'éco-conception, des crédits d'impôt, des autorisations de mise sur le marché, les conditions d'acquisition par des marchés publics, la responsabilité sur le produit, etc.

2.1.3. Les instruments obligatoires liés à l'information

Ce point regroupe l'étiquetage obligatoire des produits contenant des substances dangereuses (pour l'environnement), les instructions pour une manipulation et une mise au rebut adéquates, la consommation d'énergie et la déclaration de contenu, etc.

2.1.4. Les instruments volontaires liés à l'information

Nous trouverons dans ce groupe les éco-labels, les rapports de tests, d'autres types d'étiquetage volontaire, les codes de conduite, la notation de la qualité, les marques déposées, l'analyse du cycle de vie, etc.

²⁰ http://design.ntnu.no/fag/ecodesign/theory/theory_frames.htm

2.1.5. Les accords volontaires

Il s'agit d'auto engagements non obligatoires de certaines industries, la plupart du temps mises en place à l'initiative d'organisations commerciales. Certains de ces engagements peuvent prendre avec le temps un caractère légal plus ou moins affirmé.

Il est important de noter que ces instruments diffèrent d'un pays à l'autre, et que leur standardisation semble difficile, même au niveau Européen. Le Tableau 1 (source : http://design.ntnu.no/fag/ecodesign/theory/theory_frames.htm) illustre cette disparité.

	Instruments réglementaires directs				Instruments économiques	Instruments obligatoires liés à l'information	Instruments volontaires liés à l'information		Engagements volontaires
	Orientés matériaux	Orientés produits	Gaspiillage et réutilisation	Publicité			Eco-label	Autres	
Union Européenne	•	•	•			•	•		
France	•		•		•		•		
Irlande				•					
Portugal	•		•	•			•		
Espagne	•	•	•				•		•
Royaume Uni	•	•	•		•		•		•
Etats-Unis	•	•	•	•		•	•		•

Tableau 1 : Panorama des instruments de politique environnementale orientés « produits » dans quelques pays.

Il est clair que la prise en compte d'instruments réglementaires directs, par son caractère obligatoire, ne peut évidemment procurer un avantage concurrentiel à une entreprise, tous ses concurrents étant supposés satisfaire ces mêmes exigences. Par contre, les instruments volontaires sont susceptibles de permettre une différenciation des produits, à condition d'être capable de gérer leur diversité. C'est donc dans ce cadre que nous nous situons, et plus particulièrement dans celui des éco-labels qui sont actuellement les mieux formalisés de ces instruments, et abordent largement le problème de la recyclabilité qui est le plus proche de la conception d'un produit mécanique.

Toutefois, comme nous le verrons par la suite, les éco-labels font largement appel à des normes en vigueur dans leur pays d'application. La partie suivante nous permettra de dresser un

rapide panorama des directives et des éco-labels auxquels nous allons plus particulièrement nous intéresser.

2.2. Réglementations et standards environnementaux

2.2.1. Directives Européennes

Ces directives posent des principes de base très généraux, qui sont ensuite déclinés en projets de lois au niveau de chaque pays. Historiquement, on peut constater que ces directives consacrent la prise de conscience européenne sur un sujet auparavant traité pendant plusieurs années au moyen d'actions volontaires, comme les auto-déclarations et les éco-labels, en particulier en Allemagne et dans les pays scandinaves.

Parmi les principales directives européennes en vigueur actuellement, nous citerons à titre d'exemples la Directive 2000/53/CE portant sur la gestion des Véhicules Hors d'Usage (VHU), la Directive 2002/95/CE relative à la limitation des substances dangereuses présentes dans les Produits Électriques et Électrotechniques (PEE), la Directive 2002/96/CE concernant la gestion en fin de vie des PEE. En France, depuis le 13 août 2005 et en vertu du principe du « *pollueur-payeur* », cette dernière directive engage la responsabilité des constructeurs sur la gestion et le coût de recyclage. Enfin, la Directive 2005/32/CE du Parlement européen et du Conseil du 6 juillet 2005 établit un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'éco-conception applicables aux produits consommateurs d'énergie.

2.2.2. Eco-labels

L'objectif des labels environnementaux ou éco-labels, est de fournir au consommateur une information sur les propriétés environnementales du produit afin de lui permettre le choix de produits engendrant la plus faible charge environnementale possible [Kärnä, 1998]. Pour l'entreprise, il s'agit clairement de se démarquer de la concurrence en adoptant une attitude proactive par rapport aux problèmes environnementaux.

Les éco-labels sont rédigés pour des produits donnés. Ils peuvent être reconnus dans des périmètres variés : certains sont internationaux (c'est par exemple le cas des éco-labels *communautaires* de l'Union Européenne ou des éco-labels *trans-nationaux* comme *Nordic Swan* du Conseil Nordique); d'autres sont nationaux (*NF-Environnement* en France, *Blue Angel* en Allemagne, *Eco-mark* au Japon, *EPA Energy Star* aux USA...) tandis que d'autres encore peuvent

être portés par des entreprises (SIEMENS™ SN 36350-1 pour les produits électriques et électroniques par exemple) ou des organisations (voir le label de l'ECMA-European Computer Manufacturers Association portant sur les ordinateurs personnels).

Le Tableau 2, tiré de [Kärnä, 1998], illustre les disparités qui existaient en 1998 entre les labels nordiques et l'éco-label européen quant aux produits touchés. Aujourd'hui encore, la sensibilité de certaines zones géographiques aux questions environnementales et leur réactivité font que les labels nordiques et allemands restent constamment en avance par rapport aux éco-labels européens, dont la validation est évidemment beaucoup plus lourde. Être capable d'évaluer rapidement et de manière « économique » la satisfaction d'un éco-label nordique ou allemand nous paraît ainsi de nature à anticiper efficacement l'arrivée des nouveaux éco-labels européens, mais aussi des directives futures en terme de recyclabilité. La multiplication des éco-labels traduit aussi la concurrence qui sévit entre eux [Clay, 2002] : un éco-label peut ainsi en supplanter un autre, ce qui peut obliger une entreprise à des réactions rapides afin de ne pas perdre son avantage sur les produits concurrents.

Eco-labels Nordiques	Eco-label Européen
<ul style="list-style-type: none"> - lave vaisselle - machines à laver - réfrigérateurs et congélateurs - piles non rechargeables - piles rechargeables - photocopieuses - ordinateurs personnels - imprimantes et faxes - ampoules et néons - tondeuses à gazon - moteurs de bateaux <p>Prévus :</p> <ul style="list-style-type: none"> - téléphones, télévisions, radios, magnétoscopes, chaînes stereo 	<ul style="list-style-type: none"> - lave vaisselle - machines à laver - réfrigérateurs et congélateurs - lampes - néons <p>Prévus :</p> <ul style="list-style-type: none"> - piles pour produits de grande consommation, ordinateurs personnels

Tableau 2 : Produits électriques et électroniques faisant l'objet d'éco-labels nordiques et l'éco-label européen en 1998.

Pour l'instant, il est intéressant de noter que l'éco-label européen comme l'éco-label national *NF-environnement* ont été appliqués à relativement peu de produits manufacturiers : sur plus de 300 produits portant la marque *NF-Environnement* en 2003, la majorité sont des peintures et vernis (160) et des sacs plastiques (100). Or, si un éco-label adapté à un produit donné n'existe pas, une entreprise peut envoyer à l'AFNOR une lettre d'intérêt pour la création d'une nouvelle marque *NF-Environnement*. L'AFNOR lui communique en retour les informations générales sur la marque et ses procédures. Le réveil de l'industrie manufacturière,

qui nous paraît inévitable, nous laisse penser qu'il est temps d'aborder le problème de l'aide à l'application de tels labels.

A l'image du label *NF-Environnement*, un éco-label comprend en général [Boeglin, 1998] :

- un descriptif de son champ d'application : catégorie de produits visés,
- les critères écologiques retenus,
- les exigences en matière d'aptitude à l'usage,
- les procédures d'évaluation de la conformité et la surveillance,
- les dispositions concernant le consommateur et le marquage des produits.

2.2.3. Normes ISO

La profusion des déclarations environnementales et des éco-labels ainsi que leur disparité a incité l'ISO (*International Standard Organisation*) à se pencher sur le sujet. C'est ainsi que la famille des normes ISO 14000 (cf. [ISO, 2002] ou [Salamitou, 2004]) permet de fixer les principes généraux relatifs à l'impact environnemental des produits. On peut distinguer parmi les aspects abordés :

- la description des performances environnementales basée notamment sur des méthodes d'Analyse de Cycle de Vie (ISO 14040),
- l'amélioration des performances environnementales qui s'appuie sur des méthodes d'éco-conception (ISO 14062),
- la communication sur la conformité d'un produit avec des critères environnementaux qui forme la famille des éco-labels (ISO 14020) composés :
 - d'éco-labels de type I (ISO 14024) qui concernent les labels officiels tels que *Blue Angel*, *Nordic Swan* ou *NF-Environnement*,
 - d'éco-labels de type II (ISO 14021) que constituent les auto-déclarations telles que le « point vert » en France,

- d'éco-labels de type III (ISO 14025) qui portent sur les éco-profil, c'est-à-dire la garantie qu'une certaine catégorie de critères environnementaux est satisfaite lors de l'utilisation du produit, à l'instar de l'éco-profil VOLVO™ concernant les émissions de CO₂.

Enfin, la norme ISO 14063 - 2006 fournit des lignes directrices sur les principes généraux, la politique, la stratégie et les activités liées à la communication environnementale interne et externe par un organisme.

Ces normes ne se substituent pas aux éco-labels eux-mêmes, mais posent les règles de la communication sur le sujet au moyen de neuf principes de base [Boeglin, 1998] :

1. les déclarations et étiquetage environnementaux doivent être exacts, vérifiables et pertinents,
2. les procédures et prescriptions d'étiquetage et de déclaration ne doivent pas avoir pour but la création d'obstacles inutiles aux échanges internationaux,
3. les déclarations et étiquetage environnementaux doivent reposer sur une méthodologie scientifique détaillée, exhaustive et répétable,
4. ces déclarations doivent prendre en compte, lorsque cela est possible, le cycle de vie du produit,
5. les déclarations et étiquetages environnementaux ne doivent pas décourager les innovations portant sur la préservation ou l'amélioration des performances environnementales,
6. les exigences administratives et demandes d'informations doivent se limiter à ce qui est nécessaire à l'établissement de la conformité avec les normes et critères applicables,
7. les processus de développement des déclarations et étiquetage environnementaux doivent comprendre une consultation des intéressés,
8. les informations portant sur les aspects environnementaux des produits doivent être mis à disposition des acheteurs,

9. les informations relatives à la procédure doivent être disponibles.

Comme nous l'avons dit, chaque éco-label présente des spécificités. Pour cerner davantage le problème de l'extraction des connaissances portant sur la recyclabilité à partir d'un éco-label, il nous a néanmoins paru intéressant de décrire avec plus de détails un des éco-labels les plus connus, *Blue Angel*. Il nous semble en effet caractéristique des éco-labels utilisables en conception de produits manufacturiers, encore peu développés en France comme au niveau européen.

2.3. Un exemple représentatif d'éco-label : Blue Angel

La version étudiée ici [RAL German Institute for Quality Assurance and Certification, 2004] est celle de Février 2004. Cet éco-label est dédié aux ordinateurs, et ne devrait bien sûr pas être utilisé sur d'autres produits. Nous verrons toutefois que beaucoup de connaissances contenues dans *Blue Angel* peuvent être transposées à d'autres produits : cet éco-label, et les éco-labels voisins comme *Nordic Swan*, nous ont donc particulièrement intéressé comme annonceurs d'éco-labels à venir portant sur des produits manufacturiers d'autres secteurs industriels, comme la mécanique.

2.3.1. Généralités

Blue Angel est constitué d'un document principal de 18 pages, suivi d'une première annexe de 7 pages (« Check-list - Critères de base ») et d'une deuxième d'une page (« Matériaux et composants nécessitant un traitement sélectif »). Un exemplaire de contrat à signer suit (1 page), suivi de 10 annexes à remplir représentant la déclaration du fabricant (24 pages). La réponse à chaque question de la déclaration se fait au moyen d'une case à cocher « oui/non ».

Blue Angel débute par une introduction générale donnant les bases de l'éco-conception (durabilité du produit, diminution de consommation, etc.). La cible de l'éco-label est ensuite détaillée : il s'agit ici des ordinateurs, incluant unité centrale, clavier et moniteur. Les ordinateurs portables ne sont pas concernés.

2.3.2. Exigences et vérification de conformité

Cette première partie est relativement générique, et est donc très proche de la partie comparable d'autres éco-labels.

Le premier point abordé est celui de la conception pour le recyclage, traitant de la structure du produit. Quelques exigences de base sont rédigées en langage courant, et renvoient à la check-list de l'annexe 1 pour une formulation exhaustive. Cette check-list débute par une description du vocabulaire décrivant les différents composants du produit (châssis, pièces mécaniques, module électrique, etc.). Elle est structurée en trois parties :

- structure et technologie de connexion (12 critères),
- sélection et marquage des matériaux (8 critères),
- longévité et mise à niveau (4 critères).

Seules, les deux premières parties traitent donc de la recyclabilité proprement dite. Quelques exemples de critères sont proposés dans le Tableau 3 (traduit de [RAL German Institute for Quality Assurance and Certification, 2004]). On peut voir dans ce tableau que les questions sont commentées et expliquées. Certaines des exigences sont obligatoires (catégorie *M* pour “mandatory”), tandis que d'autres « devraient » être satisfaites (*S* pour “should”).

Exigence		S'applique au(x) module(s)	Cat.	Satisfait ?	
				Oui	Non
A.1	Les composants faits de matériaux incompatibles peuvent ils être retirés séparément ou au moyen d'aides à la séparation ?	boîtier, châssis, modules électriques	M		
Les connexions importantes sont celles qui existent entre le châssis et le support ainsi que celles entre le châssis et les modules électriques. Leur séparabilité est un prérequis pour une utilisation séparée ou un recyclage des modules et matériaux comme pour une séparation rapide et sûre des produits contenant des polluants. Les étiquettes adhésives (par exemple les étiquettes et les logos de l'entreprise) sont aussi concernées. Le terme « aides à la séparation » s'entend par exemple pour des points de cassure prédéterminés.					
B.4	Les matériaux et matériaux composés peuvent-ils être recyclés en matériaux à haut niveau ?	boîtier, châssis	M		
« Recyclés en matériaux » s'applique à des matériaux qui peuvent être recyclés à une échelle industrielle - ce qui signifie que le recyclage est technologiquement et économiquement utile. « Haut niveau » signifie qu'un matériau recyclé comparable au matériau original peut être obtenu, apte à satisfaire un besoin similaire.					
C.1	Le produit est-il conçu de manière modulaire ?	tout le produit	M		
Une structure de produit modulaire se distingue par des groupes fonctionnels regroupés en modules. La mise à niveau ou l'expansion de fonctionnalités peut être réalisée sans remplacer tout le produit.					

Tableau 3 : Exemple de critères de base de *Blue Angel*.

Le deuxième point abordé est celui des exigences portant sur les matériaux, aspect lui aussi important pour la recyclabilité. Ceci concerne tout d'abord des listes d'additifs interdits aux plastiques ou aux circuits imprimés : sont interdits ici les produits mentionnés dans la norme TRGS 905²¹ ou présents dans les listes de produits cancérigènes, mutagènes ou tératogènes de l'Union Européenne. On voit donc que des règles peuvent se référer à des sources d'informations/connaissances extérieures.

Des conditions sur le marquage des plastiques, puis sur les impuretés présentes dans les piles et accumulateurs sont ensuite mentionnées. Dans les deux cas, une référence est faite à des normes extérieures (marquage selon la norme DIN ISO 11469 pour les plastiques de plus de 25 grammes, impuretés n'excédant pas les valeurs limites décrites dans la norme 98/101/EC pour les piles et accumulateurs).

Les points suivants ne sont plus liés à la conception du produit, et nous intéresseront donc dans une moindre mesure :

- Les conditions de garantie sont fixées : nécessité de garantie de deux ans avec possibilité de souscrire une troisième année, etc.
- Les conditions de retrait du produit sont ensuite cadrées : des retours sans frais doivent être possibles auprès de stations de retrait disponibles en Allemagne, soit directement, soit par la poste.
- Le conditionnement est ensuite abordé (pas d'utilisation de plastiques halogénés dans les plastiques d'emballage).
- Le manuel opératoire doit être imprimé sur du papier non blanchi au chlore.

2.3.3. Exigences spécifiques

La partie suivante porte sur des exigences spécifiques aux ordinateurs, en commençant par la consommation de l'unité centrale et de l'écran, en marche et en veille.

²¹ TRGS 905 est une liste allemande substance dangereuses

La conformité de l'écran avec des normes de confort et d'ergonomie est ensuite demandée. Ces points s'appuient principalement sur d'autres normes (DIN EN 29241-3 "Visual Display Requirements", ISO 9241 part B "Requirements for displayed colours", etc.).

Les émissions de bruit sont ensuite abordées, par l'intermédiaire des normes ISO 9296 sur les émissions acoustiques.

Les possibilités de mise à niveau ou d'extension de l'appareil sont évaluées. Les termes d'utilisation du label sont enfin détaillés.

Ces différents points, liés aux fonctionnalités du produit, ne présentent à notre avis pas de spécificités « environnement » : ils font en effet partie de l'analyse fonctionnelle classique d'un produit et de l'analyse de sa conformité par rapport aux besoins de l'utilisateur. Nous ne nous intéresserons donc pas spécifiquement aux connaissances listées dans cette partie.

2.3.4. Bilan de l'analyse de Blue Angel

Malgré la relative brièveté du document et sa clarté, il apparaît que la vérification de la conformité d'un produit à un éco-label comme *Blue Angel* se heurte à de nombreuses difficultés :

- Le label fait appel à de nombreuses données portant sur les composants du produit (masse, composition exacte, etc.). Ces données peuvent être difficiles à rassembler *a posteriori*.
- Le label fait appel à de nombreux standards extérieurs. Il est quelquefois nécessaire de connaître ces standards (dans le cas où la conformité par rapport à ces standards est demandée), mais il peut être simplement requis de disposer d'informations présentes dans ces standards (listes de matières dangereuses, tables de compatibilité entre matières, etc.).
- Le label fait appel à des connaissances liées, quelquefois redondantes, souvent disséminées dans le document. Une bonne compréhension globale des exigences est donc nécessaire avant de répondre aux questions précises.

- Même si le fond reste identique, la forme des connaissances exprimées varie : questions, affirmations, nécessité de conformité à une norme extérieure dont les conditions sont quelquefois exprimées *in extenso* par la suite, etc.
- Enfin, de par la modularité des produits actuels, la vérification de conditions mêmes simples sur les matériaux ou les modes de fixation débouche sur une combinatoire pouvant être très importante dans le cas de produits complexes. Les risques d'erreurs ou d'oublis sont ainsi importants, surtout si certains sous-ensembles du produit sont conçus par des entreprises partenaires comme c'est de plus en plus le cas actuellement.

Par rapport à nos objectifs, plusieurs points nous semblent des facteurs de simplification :

- On constate facilement que beaucoup de connaissances contenues dans *Blue Angel* sont simples et très structurées, liées par exemple à la valeur d'un paramètre calculable (exemple : « Le taux de matières recyclées est-il supérieur à 5% ? »).
- Une partie des éco-labels aborde des aspects qui ne nous intéressent pas directement, soit parce qu'ils sont déjà traités lors de la conception du produit (analyse fonctionnelle, conformité à des normes d'utilisation, consommation...) soit qu'ils relèvent d'aspects connexes de la conception du produit (emballage, manuels d'utilisation, garantie...). On peut ainsi évaluer à 60 à 70% le pourcentage du contenu d'un éco-label qui nous intéresse directement dans le cadre de la conception pour la recyclabilité, ce qui est une simplification non négligeable.
- Il est intéressant de noter qu'une partie importante des questions porte sur des paramètres dont la valeur est connue lors du processus de conception (masse, compositions des produits, etc.), même si ces valeurs peuvent être difficiles à retrouver par la suite.

Ces différents points nous paraissent conforter notre idée d'étudier la faisabilité d'une automatisation partielle du processus de vérification de conformité d'un produit à un éco-label, sur le poste de travail du concepteur.

2.3.5. Généralisation à d'autres éco-labels

Le caractère représentatif de *Blue Angel* peut être validé en considérant les (rares) comparaisons précises entre labels accessibles. C'est par exemple le cas du document “*Overview of Dfe assessment standards*” publié en 2001 par le WEPSI (*Western Electronic Product Stewardship Initiative*)²², organisme visant à faire communiquer industriels du secteur électronique et intervenants institutionnels. Une dizaine d'éco-labels nationaux et de standards d'entreprises sont ainsi comparés dans le secteur électronique.

La structure suivante, généralisant les structures des labels considérés, est proposée dans ce document :

1. Introduction
2. Caractéristiques générales de conception du produit
 - 2.1 Principes de conception
 - 2.2 Conception pour la réduction des gaspillages et pour la réutilisation du produit ou de ses composants
 - 2.3 Conception pour le désassemblage et le recyclage
 - 2.4 Conformité avec un système de retrait national
3. Caractéristiques des matériaux et composants
 - 3.1 Simplification du contenu des matériaux
 - 3.2 Contamination des matériaux recyclables
 - 3.3 Utilisation de matériaux recyclés et recyclables
4. Services relatifs au retrait du produit et à son recyclage

²² <http://www.recyclingadvocates.org/wepsi/about/finmkt.htm>

4.1 Services de recyclage

5. Fourniture d'informations et de données pour la gestion de la fin de vie du produit

5.1 Instructions aux utilisateurs concernant la fin de vie

5.2 Informations fournies aux gestionnaires de la fin de vie

5.3 Étiquetage des matériaux

6. Mécanismes permettant d'assurer une continuité dans la conformité

6.1 Certification d'un système de management environnemental.

La cohérence avec les informations contenues dans *Blue Angel* est complète : il est rassurant de constater que cette même structure permet d'aborder les autres labels.

Au niveau des exigences élémentaires, ce document permet de constater à la fois les convergences entre labels - les mêmes points généraux sont abordés - mais aussi leurs spécificités - les critères précis ne sont pas identiques. On peut ainsi constater que la conformité par rapport à un éco-label n'entraîne pas automatiquement la conformité par rapport aux éco-labels voisins : la nécessité d'un traitement spécifique, basé sur une prise en compte fine des exigences de chaque label, est ainsi bien visible.

Prenons un exemple pour illustrer ce point important, permettant justifier l'intérêt de notre approche :

Critère général : Il faut limiter la variété des matériaux présents dans le produit, et plus particulièrement les résines de plastique, pour faciliter le processus de recyclage.

Interprétations :

(Exemple 1) TCO'99

Obligatoire : Tous les composants plastiques de plus de 100 grammes doivent être faits du même type de plastique. Les plastiques contenant des polymères chlorés ou bromés (comme le PVC) ne sont pas acceptés quelque soit la taille de la pièce.

Exception : L'utilisation de deux plastiques différents ou de mélanges de plastique est autorisée pour les pièces de l'écran de plus de 100 grammes, l'un pour le support et l'autre pour le logement. Le plastique guidant la lumière n'est pas sujet à cette exigence.

(Exemple 2) *Blue Angel*

Les pièces de plastique de grande taille ne seront constituées que d'un homopolymère ou d'un copolymère. Les polymères mélangés (alliages de polymères) sont autorisés. Les boîtes en plastique ne seront constituées au maximum que de deux polymères ou alliages de polymères séparables. Les grandes pièces de plastique seront conçues de manière à permettre la réutilisation des plastiques utilisés sur la base des technologies existant pour la production de produits en plastique de haute qualité et à grande durée de vie.

(Exemple 3) AEA Dfe

Réduire la diversité des produits :

- limiter le nombre des matériaux spécifiés,
- limiter le nombre de substances dans chaque composant ou matériau,
- limiter le nombre de couleurs pour chaque matériau.

Comme on le voit, la forme des exigences correspondant à un même principe de base peut changer de manière significative : il est donc important de cibler un standard précis lors de la demande de labellisation.

Bilan du chapitre

Comme nous avons tenté de le montrer, la prise en compte de contraintes environnementales en conception est une tendance qui ira en s'amplifiant, et qui est bien amorcée dans certains pays, même si la France et l'Union Européenne accusent un retard certain sur l'Allemagne et les pays nordiques par exemple.

Dans ce contexte, les entreprises doivent anticiper les évolutions à venir, sans attendre l'arrivée d'un cadre législatif contraignant et inévitable, en faisant de cette contrainte un avantage concurrentiel immédiat. Les éco-labels, image « volontariste » des réglementations à

venir, sont une parfaite cible pour tenter de relever ce défi. Le problème est toutefois particulièrement difficile pour les PME, ne disposant pas de compétences et de moyens importants sur le sujet. Les outils logiciels disponibles, orientés vers les principes généraux de l'éco-conception, n'offrent pas à notre avis la flexibilité nécessaire à l'intégration opportuniste de contraintes environnementales ciblées, présentant certaines spécificités, comme les éco-labels.

L'analyse globale puis détaillée d'éco-labels nous a permis de montrer que ceux-ci étaient principalement constitués de connaissances et informations très structurées, mais fastidieuses à manipuler efficacement et pouvant être formulées de manière très différente d'un label à l'autre. Nous pensons avoir ainsi justifié l'intérêt potentiel, mais aussi le caractère réaliste de nos objectifs, présentés en introduction : développer une méthode de codification de connaissances contenues dans les éco-labels, et propager ces connaissances dans un modèle complété de la nomenclature-produit, afin d'exploiter la richesse des données présentes sur le poste de travail du concepteur.

Notre analyse rapide de *Blue Angel* laisse toutefois penser que de nombreuses connaissances ne pourront être modélisées avec une complexité maîtrisable. Notre approche se situe donc dans le cadre de l'aide à la décision : il ne s'agira pas de poursuivre l'objectif irréaliste d'une automatisation complète du processus de vérification de la conformité d'un produit à un label, mais de décharger le concepteur d'un maximum de la charge de travail induite, et de faire décroître de manière significative les besoins en spécialiste « environnemental ». Ce n'est qu'au terme de l'implantation de nos idées que nous pourrions montrer si ces hypothèses sont réalistes.

Modélisation des connaissances pour l'aide à la décision

Le précédent chapitre a montré que la problématique visant à vérifier la satisfaction des critères contenus dans des éco-labels (telle qu'envisagée dans cette thèse) est définie dans le cadre suivant :

- (a) Les critères à vérifier sont constitués de connaissances et informations structurées, qui peuvent être toutefois fastidieuses à manipuler efficacement ; ces critères peuvent en outre être formulés de manière différente, d'un éco-label à un autre ;
- (b) Une partie importante des questions posées dans les éco-labels porte sur des paramètres dont la valeur est connue lors du processus de conception, mais ces valeurs peuvent être difficiles à retrouver ;
- (c) Une partie seulement des critères contenus dans les éco-labels nous intéresse, l'étude étant bornée par des aspects de la recyclabilité correspondant au point 1 de la « roue stratégique de l'éco-conception » (cf. Figure 3).

Cette problématique peut donc naturellement faire l'objet de choix de modélisation et d'outils multiples. Nous pensons toutefois que certaines exigences spécifiques à ce cadre d'étude méritent d'être considérées :

La prise en compte de la nature (textuelle) des sources utilisées dont l'interprétation n'est pas triviale ;

La facilité d'échange d'informations entre systèmes : elle doit favoriser la récupération des données qui figurent déjà dans des systèmes existants (tels que par exemple les outils PLM ou de CFAO) ;

La flexibilité : elle doit nous permettre de définir un cadre de modélisation capable, non seulement d'intégrer d'autres aspects de la recyclabilité non considérés dans notre étude, mais également apte à s'adapter à la récurrence des éco-labels (comme nous l'avons souligné au chapitre précédent).

Nos options de modélisation doivent donc tenir compte de ces exigences particulières à notre étude. Le présent chapitre tentera d'apporter des éléments pouvant aider aux choix de méthodes et outils capables de les satisfaire.

Un domaine de la littérature qui nous intéresse est celui qui concerne les études sur le concept de « connaissances ». La plupart des ouvrages consacrés à ce concept et accessibles dans la littérature traitent en général le problème de la « gestion des connaissances » au sens large. Les méthodes proposées dans ce cadre visent alors à définir une mémoire d'entreprise i.e. son capital immatériel [Bekthi et Matta, 2004]. Les définitions que nous présenterons dans la suite sont empruntées à ces ouvrages. Toutefois, comme nous le repreciserons plus loin dans ce chapitre, notre étude aborde le problème de la modélisation avec un point de vue qui n'intègre pas les aspects de « capitalisation des connaissances ». Nous nous intéressons plus particulièrement aux techniques d'extraction des « connaissances » à partir des sources textuelles, travaux généralement effectués en Ingénierie des Connaissances (IC). Notre but prioritaire est en effet de modéliser les « connaissances » d'un domaine (le recyclage) pour les opérationnaliser dans un système destiné à assister une tâche (la conception) : c'est cette vision opérationnelle de la manipulation des « connaissances » (telle que définie dans [Bachimont, 2004]) qui correspond à nos objectifs en matière de modélisation.

Nous commencerons le chapitre par des généralités. Nous passerons en revue quelques approches de modélisation des « connaissances » en relevant les principaux outils et méthodes qui s'y réfèrent. Quelques principes d'utilisation des « connaissances » avec les applications associées seront ensuite décrits et resitués dans notre contexte de modélisation, suivis d'une brève présentation de méthodes de représentation des « connaissances » qui nous semblent en rapport avec notre étude.

1. Donnée, Information, Connaissance

1.1. Définitions

Une « connaissance » peut être définie comme une *donnée* interprétée dans un certain contexte [Tsuchiya, 1993]. Tsuchiya précise en effet que « lorsqu'un sujet interprète une *donnée* pour lui donner un sens, celle-ci devient une *information* ; et de même, lorsqu'il interprète une *information* pour lui donner un sens, cette dernière devient une *connaissance* ». Cette définition

correspond à une hiérarchie du paradigme « donnée, information, connaissance » couramment rencontrée dans la littérature.

Pour compléter cette définition très générale, notons qu'une *connaissance* peut également être perçue comme « une donnée nécessaire à l'accomplissement d'une tâche » [Bachimont, 2004]; ceci correspond au paradigme « *data, information, knowledge, wisdom* » (i.e. donnée, information, connaissance, sagesse) également rencontré dans la littérature. Le terme *wisdom* étant ici défini comme une sélection de connaissances appropriées à la réalisation d'une tâche spécifique et qui peut être obtenue « à travers une découverte, une inférence, une expérience... » [Ackoff, 1989]. Ce qui précise le sens que nous accorderons au terme « connaissance » dans cette thèse, et qui nous semble donc le plus en rapport avec notre contexte d'étude (caractérisé par l'utilisation de connaissances appropriées à l'intégration du référentiel du recyclage en conception de produits). Plusieurs types de connaissances peuvent correspondre à cette définition. Celui que nous considérons dans cette étude est précisé dans la partie suivante où nous commencerons par décrire brièvement les principales typologies rencontrées dans la littérature et que nous tenterons de resituer dans notre contexte.

1.2. Typologies des connaissances

Une manière de distinguer les connaissances entre elles, parmi les définitions les plus citées dans la littérature, est décrite dans [Polanyi, 1966]; l'auteur distingue les *connaissances tacites* et les *connaissances explicites* que Grundstein [Grundstein, 2002] décrit de la manière suivante :

Les premières revêtent un aspect « personnel » et sont difficiles à formaliser et à communiquer. Elles caractérisent en général la représentation que l'humain se fait du monde, notamment à travers ses croyances, ses points de vues, des schémas, des paradigmes, etc. Elles peuvent également concerner les savoir-faire concrets, les habiletés... qui s'appliquent dans des contextes particuliers.

La seconde catégorie est quant à elle constituée de connaissances qui peuvent être transmissibles par un langage formel. Celles-ci sont en général contenues dans des bibliothèques, des bases de données, etc.

Bien qu'elles soient explicites, les connaissances appartenant à cette dernière catégorie peuvent être difficiles à modéliser. En effet, si elles sont interprétables au travers d'un langage, les interprétations résultantes peuvent toutefois différer les unes des autres. C'est en particulier le cas des connaissances contenues dans les éco-labels auxquelles nous nous intéressons : celles-ci sont présentées sous forme textuelle, rédigées en langage naturel ; leur interprétation n'est par conséquent pas triviale.

Dans cette thèse, nous considérons donc prioritairement des *connaissances explicites*, plus particulièrement la catégorie des *connaissances métier* (ou "*profession memory*"). Ces dernières sont généralement composées de référentiels, documents, outils, méthodes... utilisés dans une profession. Ce qui correspond bien aux informations contenues dans les éco-labels (formulées dans des documents écrits) que nous souhaitons intégrer au domaine de la conception d'un produit. Par choix guidé par la définition de notre cadre d'étude, les *connaissances individuelles* (ou "*individual memory*") qui sont en général caractérisées par des savoir-faire, compétences, statuts... d'un acteur donné au sein d'une organisation ne seront donc pas abordées ici : précisons toutefois que ce type de connaissances peut naturellement faire l'objet d'études complémentaires à la nôtre afin d'intégrer le spectre le plus large possible du référentiel du recyclage sur le poste de travail du concepteur. Cet aspect de la modélisation (prenant en compte savoir-faire et compétences) n'est pour le moment pas traité dans cette thèse qui est bornée par l'utilisation de connaissances normatives contenues dans des éco-labels dont nous avons justifié le choix et la pertinence au chapitre précédent. Ainsi, comme nous l'avons indiqué en introduction de ce chapitre, nous ne considérerons pas la modélisation des connaissances, parmi les différentes réalités qu'elle peut recouvrir, du point de vue de la capitalisation. Nous avons choisi de nous intéresser à deux aspects principaux, importants dans notre contexte : les outils et approches de modélisation (à partir de quoi, pour quelle utilisation...) et les méthodes de représentation (comment encoder des connaissances pour résoudre un problème). Le premier point est abordé dans la partie suivante.

2. Outils et approches pour la modélisation des connaissances

2.1. Quelques approches de modélisation des connaissances

Les approches de modélisation des connaissances que nous présentons dans cette partie sont principalement tirés de [Dieng *et al.*, 1998]. Nous tenterons toutefois de les resituer dans le

contexte particulier de notre étude. Notons que cette présentation ne prétend nullement à l'exhaustivité sur un sujet aussi vaste que celui de la modélisation : notre principal objectif est simplement de mieux positionner le cadre particulier de l'extraction des connaissances orientées recyclage à partir des sources textuelles (les éco-labels) par rapport aux travaux les plus courants de la littérature.

2.1.1. Approche orientée documents non informatisés

Il s'agit ici de fournir des synthèses de documents basées sur des connaissances non explicites, contenues par exemple dans les rapports techniques. MEREX en est un exemple développé par RENAULT [Corbel, 1997], notamment pour formaliser des expériences positives et négatives.

On peut considérer que certains éco-labels, tels que par exemple *Blue Angel* (décrit au Chapitre 1), représentent une formalisation des expériences positives en conception, dans le contexte du recyclage. Il n'est toutefois pas certain qu'ils soient rédigés dans l'esprit de l'approche considérée ici. Comme nous l'avons montré au chapitre précédent, les sources que nous considérons dans notre étude (les éco-labels) sont déjà structurées : il ne nous semble donc pas nécessaire d'en proposer une synthèse (au sens de cette approche). Un de nos objectifs prioritaire est d'exploiter les connaissances contenues dans ces sources en vue de faciliter leur interprétation et leur utilisation en conception de produit. Ce type d'approche ne semble par conséquent pas suffisamment adapté à notre problème de l'extraction de connaissances.

2.1.2. Approche orientée base documentaire

Elle vise à favoriser l'accès à une masse de documents susceptibles de contenir des connaissances. Elle se différencie de la précédente en ce que les sources de connaissances sont ici informatisées. Les techniques d'indexation [Trigano, 1994] sont en général préconisées pour faciliter l'accès aux documents contenant ces connaissances, mais pas nécessairement aux connaissances elles-mêmes : l'exploitation du contenu relève d'une toute autre approche, par exemple celles concernant les travaux réalisés dans le cadre du Traitement Automatique du Langage (TAL).

Compte tenu du point (c) défini en introduction de ce chapitre (qui précise la délimitation de notre étude à un cadre précis de l'éco-conception) la nécessité de construire une

base documentaire pourrait difficilement se justifier dans notre contexte, quel que soit par ailleurs son intérêt lorsque la quantité d'informations à traiter est très grande. Ce qui n'est pour le moment pas le cas, dans les limites que nous nous sommes fixés dans cette étude.

2.1.3. Approche basée sur le Raisonnement à Partir de Cas (RàPC)

La connaissance est ici indirectement codifiée, au moyen de problèmes résolus dans des contextes donnés dont on pense qu'ils sont transposables ; certains auteurs interprètent d'ailleurs le RàPC comme un moyen de codification de connaissances implicites. Cette approche vise principalement (i) à éviter l'éparpillement des connaissances en se focalisant sur des cas d'expertises typiques passés, et (ii) à permettre une actualisation du système de connaissances par l'ajout de nouveaux cas [Simon, 1996].

Certains aspects de l'application d'un éco-label peuvent s'apparenter à une approche de type RàPC : les connaissances contenues dans les éco-labels sont en effet pour la plupart obtenues à partir des problèmes de conception résolus (voir par exemple le guide VDI proposé dans [VDI, 1993] ou les règles de conception pour le recyclage décrites dans [Dowie, 1994]). Néanmoins, et compte tenu de la nature des sources considérées dans notre étude, nous n'aborderons pas directement la modélisation sous angle car les connaissances à exploiter sont données (ne nécessitant par conséquent pas d'être construites).

2.1.4. Approche basée sur des systèmes distribués de connaissances

Cette approche est fondée sur le constat que des groupes d'individus, d'organisations, etc., autonomes et hétérogènes, peuvent avoir des intérêts communs, comme par exemple dans le cadre des entreprises virtuelles ou étendues. Un objectif est de favoriser une meilleure collaboration ainsi que le partage de certaines connaissances. Un exemple représentatif d'application concerne les systèmes multi-agents.

Notre problématique de passage de connaissances entre experts de l'environnement et experts de la conception, par l'intermédiaire d'un document (l'éco-label), n'est pas éloignée du principe de ce type d'approche. On pourrait en effet imaginer déléguer certains aspects de notre problématique à des agents spécifiques : par exemple un agent pour traiter les facettes du recyclage concernant le désassemblage, un autre pour gérer les critères relatifs aux substances dangereuses, un autre encore pour traiter les problèmes de fin de vie du produit, etc. Cela

pourrait par exemple se faire dans le cadre de l'intégration des diverses parties prenantes du cycle de vie du produit (concepteurs de produits, collectivités locales, recycleurs...) dans la spécification du système proposé. La maturité de chacune de ses parties prenantes concernant l'informatisation des données orientées « recyclage » spécifiques à leurs domaines respectifs de compétence ne nous semble toutefois pas établie. Nous nous en tiendrons donc aux limites que nous nous sommes fixées.

Ainsi, telle que nous l'avons définie et compte tenu du cadre fixé pour notre étude, notre problématique ne peut être abordée avec le même point de vue que ce type d'approche.

2.1.5. Approche orientée Systèmes à Base de Connaissances (SBC)

L'approche SBC est basée sur le constat que certaines connaissances cruciales pour une organisation sont tacites et doivent par conséquent être élicitées puis structurées sous forme de modèles. La méthode GAMETH [Grundstein et Rosenthal-Sabroux, 2004] en est un exemple pour *repérer les connaissances cruciales*, et CommonKADS (voir par exemple [Breuker et Van de Velde, 1994] ou [Schreiber *et al.*, 1994]) un autre exemple, dédié à la construction de modèles.

La nécessité d'un repérage des connaissances cruciales n'est pas justifiée dans notre contexte compte tenu du cadre normatif des connaissances considérées ; les sources utilisées sont en effet édictées par des critères qu'un produit doit satisfaire (elles sont données). D'un autre côté, une méthode générale telle que CommonKADS pourrait s'avérer lourde à mettre en œuvre dans notre cas. Son intérêt pour notre contexte de modélisation ne nous semble pas fondamental, à moins peut-être d'intégrer explicitement les spécificités propres à toutes les parties prenantes dans le recyclage d'un produit ; on l'a dit, cela est en dehors de nos objectifs.

Un aspect intéressant concernant la modélisation dans les approches relevant des SBC mérite toutefois d'être souligné : le principe du "*knowledge level*" (ou « niveau connaissances ») [Newell, 1982]. Il stipule que la modélisation d'un système peut se faire de manière pertinente en restant à un niveau conceptuel. Une manière de le réaliser consiste par exemple à construire les *ontologies* (terme que nous définirons plus loin) du domaine considéré. Bien qu'elle se situe dans le courant très répandu des méthodes de programmation qui préconisent la séparation entre les données et les traitements, Studer précise toutefois que la modélisation au « niveau connaissances » offre une plus grande flexibilité [Studer, 1998] : tandis que le modèle des données ainsi que les diagrammes des flux des traitements sont en général complètement

spécifiés dans les approches courantes, la modélisation au « niveau connaissances » décrit un domaine en de termes génériques sous la forme d'objets qui jouent des rôles (voir par exemple les modèles CommonKADS). Un objectif ici est de faciliter le passage du « monde réel » à un modèle. Un tel principe de modélisation peut donc être intéressant dans notre contexte d'étude où ce passage (du « monde réel » à un modèle) n'est pas trivial : comme nous l'avons précédemment souligné en effet, il existe un problème résultant de l'interprétation des éco-labels qui sont rédigés en langage naturel.

2.1.6. Bilan

Comme on peut ainsi le constater, la modélisation des connaissances peut être abordée de diverses manières : par exemple, en prenant en compte la nécessité de gérer une grande quantité d'informations, de les partager entre systèmes hétérogènes, de capitaliser des connaissances... Nous venons de voir que toutes les approches proposées ont en général leur pertinence, mais bien souvent dans des cas précis qui peuvent toutefois différer de notre contexte d'étude. En revanche, le principe de modélisation proposé dans les approches relevant des SBC semble correspondre aux exigences de notre d'étude (telles que décrites en introduction de ce chapitre) : nous avons vu qu'une manière de le réaliser consiste à construire des *ontologies*. Après avoir défini quelques notions qui s'y réfèrent, nous décrirons brièvement dans la partie suivante comment construire des *ontologies*, en particulier celles qui portent sur le domaine du recyclage (à partir des informations contenues dans des éco-labels). Nous tenterons par la même occasion d'en justifier l'intérêt pour notre étude.

2.2. Modélisation d'un domaine : langages à base d'ontologies

Il est clair que toute transcription des connaissances passe par une expression de concepts à travers un vocabulaire qui doit être partagé par les différents intervenants. En modélisation des connaissances, cela conduit à la notion d'*ontologie* que nous tentons de définir ci-après.

2.2.1. Définitions

Gruber proposa une définition de la notion d'*ontologie* qui figure parmi les plus citées dans la littérature : “*ontology is an explicit specification of a conceptualisation*” [Gruber, 1993] (i.e. « une spécification explicite d'une conceptualisation », parfois traduite en « description systématique de l'existence ». Le terme « conceptualisation » est lui-même défini comme un

« ensemble de relations conceptuelles définies sur un domaine » [Guarino, 1998]. La définition de Gruber nous semble néanmoins un peu abstraite. Nous lui préférons celle proposée par Maedche (cf. [Maedche, 2003]) qui décrit une *ontologie* comme un couple $\langle O, L \rangle$ caractérisé par (i) une *structure* O formée (entre autres) d'un ensemble de concepts et d'un ensemble de relations, et (ii) un *lexique* L constitué (entre autres) d'un ensemble de *lexiques de concepts* et d'un ensemble de *lexiques de relations*.

Les concepts (par exemple « produit », « matière ») peuvent ainsi être définis dans un lexique donné, qui peut être un idiome (le français, l'anglais) ou plus généralement une terminologie propre à une communauté de pratique. De manière analogue, les relations (par exemple « est une sorte de », « est composé de ») sont définies dans leurs propres lexiques. Ainsi décrite, la notion d'*ontologie* nous semble comporter des caractéristiques intéressantes en vue de la modélisation envisagée dans cette étude.

Premièrement, on note qu'il y a une nette séparation entre les *concepts* décrivant un domaine et les *relations* entre ces concepts ; ceci peut être utile pour enrichir un modèle de manière flexible et relativement simple. Nous avons vu en effet au chapitre précédent que l'apparition des éco-labels peut être récurrente ; il peut par conséquent être nécessaire de disposer d'un tel cadre de modélisation pour faciliter la mise en conformité d'un produit avec un nouvel éco-label dont les critères peuvent se référer à des connaissances absentes des modèles existants.

En second lieu, d'un point de vue implémentation, on note également qu'il est possible d'utiliser les mêmes ontologies pour des applications spécifiques, en en extrayant tout ou partie de leurs structures respectives. A titre d'exemple, on peut développer des applications de gestion de budget, de gestion de paie et de conception (comme illustré par la partie inférieure de la Figure 4) indépendamment les unes des autres, en garantissant qu'elles utilisent des données extraites d'une base commune.

Rappelons toutefois que ces deux caractéristiques ne constituent pas en soi une spécificité propre à l'approche de modélisation à base d'ontologies. On peut néanmoins relever que cette dernière approche comporte une bien meilleure flexibilité dans la manière de traiter les informations disponibles (comme nous l'avons indiqué plus haut en mentionnant l'argumentation suggérée dans [Studer, 1998]). Un exemple d'application a été proposée dans

[Mostefai et Bouras, 2006] dans le cas du développement d'outils PLM qui illustre notamment le point de vue de l'interopérabilité sémantique. Une présentation approfondie des avantages fournis par le cadre ontologique peut quant à elle être consultée dans [Guarino, 1998], [Horrocks *et al.*, 2003] ou [Welty, 1995].

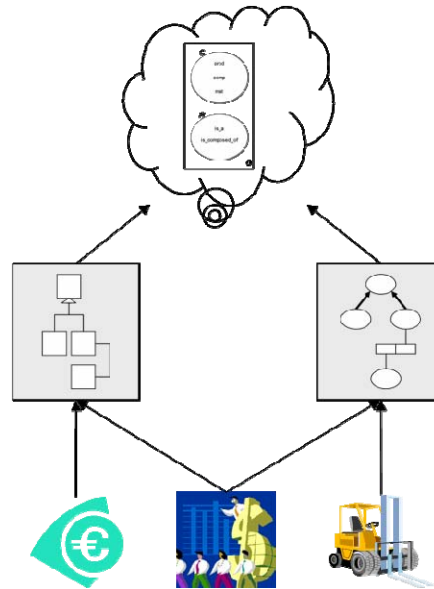


Figure 4 : Illustration de la richesse des ontologies au niveau applicatif.

Il reste à présent à préciser quelques aspects méthodologiques susceptibles d'aider à la modélisation des connaissances contenues dans les éco-labels.

2.2.2. Méthodologies de construction des ontologies

Des méthodes très génériques de construction d'ontologies ont été proposées dans la littérature. Nous nous bornerons à citer, à titre d'exemples, *On-To-Knowledge* [Sure et Studer, 2002], *Methontology* [Fernandez *et al.*, 1997] ou *OntoClean* [Guarino, 2002]. L'étendue du problème que nous considérons (par rapport aux limites que nous nous sommes fixées pour intégrer le référentiel du recyclage en conception de produit) ne semble pas justifier le recours à ces méthodes qui pourraient s'avérer trop longues à mettre en œuvre dans notre cas.

Nous préférons donc un cadre plus simple de construction d'ontologies du domaine de la recyclabilité : NIAM/ORM, comme nous tenterons de le montrer dans la suite, nous semble pour cela être un choix intéressant pour notre contexte d'étude.

2.2.3. NIAM/ORM, un formalisme de modélisation basé sur des ontologies

a) Aperçu général

Présenté comme un langage de modélisation et d'interrogation des Systèmes d'Information au niveau conceptuel, ORM (*Object-Role Modeling*) est aussi défini comme une méthode ou un langage de modélisation conceptuelle [Halpin, 1998]. Successeur de NIAM (*Nijssen language Information Analysis Method*) qui est l'appellation la plus utilisée en Europe [Habrias, 1998], il se définit également comme un langage de description du monde réel en termes « d'objets qui jouent des rôles ». Ce qui correspond au principe de modélisation au « niveau connaissances » tel que nous l'avons précédemment défini.

Un parallèle avec la définition de Maedche (présentée plus haut) fait apparaître que :

- Les *concepts* sont ici désignés « objets », tandis que les *relations* entre concepts sont dénommées « rôles ».
- La correspondance entre le niveau lexical et le niveau ontologique est assurée par la description d'un domaine sous une forme linguistique simple. Celle-ci correspond à la « normalisation » des sources, telle que préconisée dans les méthodes génériques (par exemple la « normalisation sémantique » proposée dans [Bachimont, 2000]). Elle permet notamment de gérer les problèmes d'interprétation.
- La manipulation des connaissances, à un très haut niveau d'abstraction peut être obtenue à partir de la notion d'« objectification » : il permet à un rôle de jouer un autre rôle (autrement dit de se transformer en « objet »). Des illustrations de ce concept peuvent par exemple être consultées dans [Halpin, 1998] ou [Houé *et al.*, 2006] où on peut notamment voir que cette notion permet de traduire des expressions grammaticales complexes du langage naturel en un langage de modélisation.

Ainsi, la modélisation des connaissances avec ORM peut d'une part être considérée à un bas niveau, i.e. au « niveau données » en se contentant des *concepts* formant le modèle, sans tenir compte des interprétations qu'ils peuvent comporter : cela peut par exemple concerner la représentation des caractéristiques d'un produit spécifiques à l'étude de sa recyclabilité. On peut d'autre part considérer la modélisation à un très haut niveau d'abstraction, en prenant en

compte les *relations* (ou liaisons) entre concepts et en exploitant plus particulièrement « l'objectification » : ce qui peut par exemple permettre d'inférer des connaissances à partir d'autres connaissances.

Nous préciserons plus loin dans ce chapitre le périmètre d'utilisation du formalisme ORM qui intéresse plus particulièrement notre cas de modélisation. Pour le moment, nous décrivons dans la suite les principales notations graphiques utilisées (résumées dans le Tableau 4) en rappelant qu'une présentation plus détaillée peut être consultée dans [Halpin, 1998].



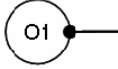
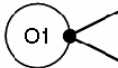

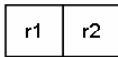
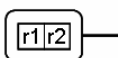
Principales primitives et leurs significations	
	Type d'objet non lexical ou NOLOT (Non Lexical Object Type) ; c'est l'équivalent des « classes » UML
	Type d'objet lexical ou LOT (Lexical Object Type) ; c'est l'équivalent des « attributs » UML
	Le point sur le segment dénote une contrainte d'obligation de rôle ; O1 doit obligatoirement « jouer » ce rôle i.e est nécessairement en relation avec l'autre objet associé audit rôle
	Les deux segments reliés par un point dénotent une contrainte disjonctive ; O1 ne peut être en relation avec les deux objets associés à ces rôles (un seul rôle est joué)
	La double flèche (positionnée sur un ou plusieurs rôles) matérialise une contrainte d'unicité ; une seule instance du ou des objets concernés est possible
	Exemple de relation binaire, matérialisée par les deux rectangles adjacents (représentant les deux rôles r1 et r2)
	Exemple « d'objectification » : les deux rôles r1 et r2 se transforme en un objet, matérialisé par un rectangle arrondi ; c'est l'équivalent des classes d'association d'UML

Tableau 4 : Principales notations ORM et leurs significations.

Une ellipse permet de définir un « objet » qui peut être de deux types : un objet « non lexical » ou NOLOT (i.e. *Non Lexical Object Type*) représente un concept générique et est figuré par une ellipse à trait plein (voir première ligne du Tableau 4), tandis qu'un objet « lexical » ou LOT (i.e. *Lexical Object Type*) représente un concept exprimé dans un lexique donné et est figuré par une ellipse à trait discontinu (voir deuxième ligne du Tableau 4). Les objets « lexicaux » peuvent être assimilés à des classes (ou objets) des modèles UML ou encore aux

entités des modèles Entité/Association (E/A), tandis que les objets « non lexicaux » peuvent être assimilés à des attributs ; une étude comparative présentée dans [Halpin, 1999] montre toutefois la flexibilité apportée par ORM pour le problème de définition des attributs.

Un rectangle permet de représenter un « rôle » dans un diagramme ORM. La forme « normalisée » utilisée pour décrire un domaine est la suivante : < sujet > < verbe > < complément >. Les parties < sujet > et < complément > correspondent aux « objets », tandis que la partie < verbe > désigne un « rôle ». Cette forme « normalisée » comporte par définition un équivalent, obtenu en inversant le sujet et le complément : par exemple, l'expression < produit > < possède > < étiquette > a pour équivalent < étiquette > < concerne > < produit >. Pour cet exemple, on utilisera deux ellipses pour figurer les objets « produit » et « étiquette », reliées entre elles par deux rectangles adjacents correspondant aux rôles « possède » et « concerne » (voir avant dernière ligne du Tableau 4).

Il est également possible de spécifier certaines contraintes portant sur des objets et des rôles. Nous citerons à titre d'exemples la contrainte d'obligation de rôle, la contrainte disjonctive et la contrainte d'unicité. La première contrainte permet d'indiquer (lorsque cela est requis) que toute instance d'un objet doit nécessairement jouer un rôle : cela est noté dans le diagramme par un point sur l'extrémité du segment qui relie cet objet au rôle contraint (voir troisième ligne du Tableau 4). La seconde contrainte est utile lorsqu'un objet peut jouer plusieurs rôles. Dans ce cas, il peut être nécessaire d'indiquer qu'un seul de ces rôles ne peut être joué : cela est alors représenté dans le diagramme par un point reliant les extrémités des segments qui lient l'objet concerné aux rôles contraints (comme illustré par la quatrième ligne du Tableau 4). La troisième contrainte permet d'indiquer qu'une seule instance de l'objet concerné par le rôle contraint ne peut être réalisée. Ce qui est matérialisé dans le diagramme par une flèche double positionnée au-dessus du rectangle associé au rôle contraint (comme illustré par la cinquième ligne du Tableau 4). Précisons que ce type de contrainte peut tout aussi bien porter sur deux rôles : cela signifie dans ce cas que l'unicité concerne toute instance de couple d'objets. Une contrainte d'unicité portant sur un rôle peut être assimilée à une association de type (1,n) telle que définie dans un modèle UML ou E/A, tandis qu'une contrainte d'unicité portant sur deux rôles peut être assimilée à une association de type (n,m).

Notons enfin que dans la dernière ligne du tableau, le rectangle arrondi entourant des rôles représente un rôle « objectif » (qui peut être assimilé à une classe d'association).

D'un point de vue implémentation, très peu d'outils logiciels permettant de manipuler des modèles ORM ont été proposées dans la littérature. InfoModeler, devenu VisioModeler depuis son rachat par Microsoft™ fait toutefois exception : il offre une interface très conviviale de construction de modèles basée sur des outils de type « glisser-déposer », et permet en outre de transformer un modèle ORM en un modèle relationnel. Un mécanisme de mise en correspondance (*mapping*) intégré à VisioModeler permet ainsi de générer les scripts SQL pour la construction des tables correspondant au modèle relationnel associé au modèle ORM considéré. Précisons que ce mécanisme de génération de modèles relationnels a été optimisé pour le respect des formes normales (propriétés utiles permettant notamment de garantir la cohérence et l'intégrité des données manipulées). Une version libre de VisioModeler est disponible en téléchargement sur le site de Microsoft™ ou bien sur le site officiel ORM (www.orm.net), tandis qu'une version payante est incluse dans la suite *Visio for Enterprise Architect* de Microsoft™.

b) Bilan par rapport à notre contexte

Les notations graphiques utilisées dans un modèle ORM ne constituent pas une originalité en soi (malgré leur simplicité). Cependant, l'aptitude du langage ORM à décrire un univers du discours avec un formalisme proche du langage naturel nous semble être un atout intéressant pour notre étude, notamment pour résoudre le problème d'interprétation sémantique posé par la nature des éco-labels que nous étudions.

Ce formalisme permet (comme on a pu le voir) de définir des contraintes, ce qui nous semble correspondre à la manière la plus naturelle de définir les caractéristiques d'un produit, voire celles du référentiel du recyclage dans sa globalité.

Le mécanisme de transformation des diagrammes ORM en modèles relationnels est un argument également important, qui peut notamment faciliter la définition d'un cadre favorisant les échanges d'informations et de données avec les systèmes existants (tels que par exemple les outils PLM ou de CFAO qui contiennent déjà une bonne partie de données qui nous intéressent).

Au total, par rapport à notre problématique de transcription des éco-labels en une forme exploitable par un système informatisé, toutes ces remarques nous semblent suffisantes pour

considérer que le formalisme ORM ainsi décrit est adapté à nos objectifs de modélisation. Nous en précisons ci-après le périmètre d'utilisation dans notre étude.

c) Périmètre d'utilisation du formalisme ORM dans notre étude

Nous avons précédemment vu que la manipulation des connaissances, à un très niveau d'abstraction est possible en construisant des ontologies avec ORM. Nous nous contenterons toutefois d'utiliser ce formalisme dans l'optique de faciliter la transcription des sources textuelles considérées (les éco-labels) en données nécessaires à l'évaluation de la recyclabilité. Les ontologies ainsi obtenues seront donc considérées au « niveau données », correspondant aux paramètres de recyclabilité.

Nous notons bien évidemment que des ontologies (i.e. des concepts reliés entre eux) peuvent tout aussi bien être assimilées à des connaissances, selon l'interprétation que l'on peut faire (d'après une définition du terme « connaissance » vue au début de ce chapitre). Mais il est clair pour nous que l'utilisation du formalisme ORM que nous ferons n'intègre pas de dimension « connaissances ». Ce point sera abordé plus loin dans ce chapitre, dans la partie relative au choix d'une méthode de représentation des connaissances en vue de la résolution de notre problème. Pour le moment, nous décrivons dans la partie suivante la méthodologie adoptée pour construire les ontologies de notre domaine d'étude.

d) Méthodologie de construction d'ontologies avec ORM

Nous avons vu précédemment que le formalisme ORM propose une théorie puissante mais simple permettant de décrire les concepts d'un domaine. Il est également doté d'une méthodologie simple pour construire des modèles : la procédure CSDP (*Conceptual Schema Design Procedure*) [Halpin, 1998]. Celle-ci est réalisée de manière incrémentale et comporte trois étapes que nous pouvons résumer de la manière suivante.

Etape1 : Verbalisation

On identifie tout d'abord des fragments de phrases simples permettant de décrire le domaine considéré et on les exprime sous la forme « normalisée » < sujet > < verbe > < complément > telle que précédemment décrite.

Etape2 : Élaboration d'un modèle préliminaire

On relie ensuite les objets identifiés (matérialisés par des ellipses) aux rôles qu'ils jouent (figurés par des rectangles) en utilisant les notations graphiques telles que celles du Tableau 4.

Étape3 : Ajout des contraintes

On complète pour finir le modèle préliminaire par l'ajout des contraintes relatives à l'interprétation que l'on peut se faire sur les relations entre les objets et les rôles identifiés.

C'est donc de cette manière (en considérant les trois étapes ci-dessus) que nous procéderons pour définir notre modèle « étendu » de produit, résultat de l'enrichissement de la structure du produit par des données supplémentaires spécifiques au domaine de la recyclabilité. Par rapport à notre problématique de vérification de la compatibilité d'un produit avec un éco-label, il reste à trouver une méthode appropriée pour en représenter la résolution. La présentation qui suit nous aidera à trouver quelques éléments de réponse.

2.3. Méthodes de représentation des connaissances

Nous avons décrit dans la partie précédente une méthodologie qui nous a semblé adaptée, aussi bien en terme de simplicité de mise en œuvre qu'en regard des critères définis en introduction de ce chapitre, pour faciliter le passage du langage naturel à un modèle de produit. Nous avons à cet égard précisé que les connaissances seront considérées à un « niveau données ». La dimension « connaissances » de notre modélisation est abordée dans cette partie où nous cherchons à définir comment nos ontologies peuvent être exploitées en vue de vérifier la satisfaction des critères contenus dans un éco-label. Quelques méthodes de représentation des connaissances proposées dans la littérature sont pour cela brièvement décrites dans la suite.

Rappelons tout d'abord qu'un langage de représentation des connaissances doit, selon Woods [Woods, 1975] :

- représenter de manière non ambiguë toute interprétation d'une phrase,
- proposer une méthode pour passer du langage naturel à cette forme de représentation,
- être utilisable pour le raisonnement.

Si de nombreux ouvrages détaillent telle ou telle technique de représentation des connaissances, il est surprenant de constater que peu de travaux à notre connaissance tentent de positionner les divers outils et langages de représentation des connaissances par rapport à des types d'utilisation. Le survol d'outils de représentation des connaissances que nous proposons ici est largement basé sur les travaux de Cawsey [Cawsey, 1997] (voir aussi <http://www.macs.hw.ac.uk/~alison/>).

Nous avons choisi de nous intéresser à trois familles de méthodes, les méthodes à base de logique, les méthodes de représentation par objets structurés et les méthodes « mixtes » combinant des caractéristiques des deux précédentes. Notons que la plupart des méthodes peuvent être assimilées à des méthodes « mixtes » si l'on prend en compte les aspects de logique qu'ils peuvent utiliser dans leurs mécanismes respectifs d'inférence ; la classification des méthodes que nous proposons dans la suite n'est donc pas absolue.

2.3.1. Les méthodes à base de logique

a) La logique propositionnelle

Dans la logique propositionnelle, les connaissances sont décomposées en propositions atomiques simples que nous pouvons assimiler à une *information* (par exemple, « la pièce *p* fait moins de 20 grammes »). Des propositions peuvent être combinées au moyen de connecteurs logiques (conjonction, disjonction, implication...) pour conduire à l'expression de *formules* que nous rapprocherons d'une *connaissance* élémentaire.

La base de connaissances est ici constituée de formules *bien formées* (i.e. syntaxiquement correctes). Par exemple, en considérant les propositions élémentaires P et Q, une *formule* telle que « P Q » est mal formée, tandis que « P et Q », « P » et « P ou Q » sont bien formées. Citons quelques de formules bien formées :

- P1 : « La pièce *p* est en plastique »
- P2 : « La pièce *p* pèse moins de 20 grammes »
- P3 : « La pièce *p* est marquée »

- P4 : « La pièce p est en plastique et pèse moins de 20 grammes IMPLIQUE qu'elle doit être marquée »

Une fonction d'*interprétation* du système permet d'affecter à chaque proposition une valeur de vérité, et donc de déterminer la validité d'une *formule*. La représentation se fait à l'aide de fonctions (ou *prédicats*) d'un ou plusieurs paramètres constants. Les exemples précédents peuvent ainsi être représentés par les prédicats suivants :

- P1 : $\text{matiere}(p, \text{plastique})$
- P2 : $\text{masse}(p, \text{« moins de 20g »})$
- P3 : $\text{marquage}(p)$
- P4 : $\text{matiere}(p, \text{plastique}) \text{ ET } \text{masse}(p, \text{« moins de 20g »}) \text{ IMPLIQUE } \text{marquage}(p)$

Ce cadre de modélisation très simple n'est en contrepartie pas très puissant, en particulier en ce qui concerne le lien entre le générique et le particulier, point traité par les mécanismes d'instanciation dans les objets structurés. Il serait par exemple dans notre cas nécessaire de générer autant de propositions de type P1, P2 et P3 qu'il y a de pièces dans un produit. Ce point est abordé au moyen de variables en logique des prédicats.

b) La logique des prédicats

La logique des prédicats, plus particulièrement la logique des prédicats du premier ordre, est certainement l'outil de représentation des connaissances le plus connu, notamment à travers le langage PROLOG. Cette technique de représentation des connaissances contient les mêmes primitives que la précédente, à savoir des prédicats, des connecteurs logiques, des constantes. Elle utilise en plus des *variables* et des *quantificateurs* universel et existentiel. Citons quelques exemples :

- P1 : $\text{matiere}(p, \text{plastique})$
- P2 : $\text{masse}(p, \text{« moins de 20g »})$
- Q : $\forall x (\text{matiere}(x, \text{plastique}) \text{ ET } \text{masse}(x, \text{« moins de 20g »}) \text{ IMPLIQUE } \text{marquage}(x))$

Le mécanisme d'inférence utilise ici un ensemble de règles pour produire des faits nouveaux à partir des faits connus. Nous citerons les deux plus connues, le *modus ponens* et le *modus tollens*. La première règle stipule que si une proposition implique une autre, et si l'on sait que la première est vraie, alors la seconde est également vraie. La seconde règle stipule que si une proposition implique une autre, et si l'on sait que la seconde est fausse, alors la première est également fausse.

La logique des prédicats nous semble un moyen très naturel pour représenter les règles contenues dans les éco-labels : elle peut par exemple permettre de définir dans quelle condition une contrainte sur une propriété donnée d'un produit doit être vérifiée. Comme dans l'exemple précédent (cf. proposition Q) qui montre que la marquage d'un produit doit être réalisé dès lors que le produit contient du plastique et pèse moins de 20 grammes. Nous verrons en effet plus loin que cette méthode est apte à représenter une grande partie des connaissances présentes dans les éco-labels.

La notation ensembliste qui semble être très utile dans notre contexte, notamment pour définir les diverses propriétés d'un produit, n'est par contre pas valide ici : la notation sous forme logique du fait qu'un matériau appartient à une liste de matériaux interdits n'est par exemple pas très naturelle.

c) Les systèmes à base de règles

Au lieu de représenter la connaissance de manière déclarative relativement statique (en déclarant les choses que l'on sait être vraies), les systèmes à base de règles représentent la connaissance en terme d'ensembles de règles représentant ce que l'on peut faire ou conclure dans différentes situations (modélisation procédurale). Un système à base de règles utilise souvent des règles dites *règles de production*, de type SI (condition) ALORS (conclusion). Les parties « conditions » et « conclusions » sont des propositions ou des prédicats dont la valeur de vérité peut être établie à partir d'une base de *faits* connus.

Les deux types d'inférence les plus connues sont le *chaînage avant* (on part des faits établis pour dériver des conclusions) et le *chaînage arrière* (on part d'un fait à établir pour tenter de remonter à ses conditions).

Les systèmes à base de règles ont permis le développement des premiers systèmes experts. Notons dans notre cas que nous n'avons pas besoin de bâtir de raisonnement de ce type (chaînage de règles), mais seulement d'établir la valeur de vérité de certains prédicats. Nous n'avons donc *a priori* besoin que d'établir la valeur de vérité de règles élémentaires, comme par exemple : SI (masse > 20 grammes) ALORS (pièce marquée) ; ce qui évite le problème complexe de la validation d'une base de règles globale par rapport à la résolution d'un problème donné.

2.3.2. Les méthodes de représentation par objets structurés

Précisons tout d'abord que le terme « objet » employé jusqu'ici peut avoir un sens différent de celui que nous utiliserons dans les descriptions qui vont suivre. Des indications pouvant lever toute ambiguïté seront ici rappelées.

La catégorie la plus simple des objets structurés est le *réseau sémantique*, apparu dans les années 60 pour représenter la signification des mots anglais [Brachman, 1977]. Un réseau sémantique est un graphe dans lequel les nœuds représentent des concepts tandis que les arcs représentent des relations binaires entre ces concepts. Les relations les plus importantes sont les relations de *sous-classe* entre classe et sous-classe, et les relations d'*instanciation* entre un objet particulier et la classe qui le définit. Ces relations permettent également d'utiliser l'*héritage* pour inférer de nouveaux faits ou des relations à partir de ceux déjà représentés. Les premiers réseaux n'avaient pas une sémantique claire (signification exacte des nœuds et des arcs). Les techniques ont évolué, mais au prix d'une complexification qui peut s'éloigner du parti pris initial de simplicité.

L'utilisation des réseaux sémantiques ne peut avoir à notre connaissance un réel intérêt que si l'on souhaite inférer des connaissances à partir des graphes qui les représentent. Une hiérarchisation rigoureuse des concepts du domaine étudié (ici, le recyclage) est alors indispensable. La prise en compte des aspects plus généraux de la recyclabilité, non définis dans le cadre normatif des éco-labels, serait alors nécessaire. Nous n'envisagerons par conséquent pas de baser la résolution de notre problématique à partir d'une représentation utilisant des graphes, quel que soit par ailleurs l'intérêt d'une telle approche dans le cadre du PLM comme cela a été montré dans [Mostefai *et al.*, 2005].

Les réseaux sémantiques ont débouché sur les langages de *frames*, variante des réseaux exploitant le paradigme *objet*, devenus un des moyens les plus répandus pour représenter la

connaissance non procédurale dans un système expert (cf. par exemple [Fox *et al.*, 1985] ou [Minsky, 1981]). Un *frame* est une structure de données dans laquelle toute l'information relative à un concept donné est stockée dans une entité complexe unique : le *frame*. On peut noter que la sémantique des langages de représentation comme les *frames* est souvent définie en terme de logique des prédicats. L'indépendance entre les catégories que nous listons n'est donc pas absolue.

Plus généralement, on considère maintenant que les langages de *frames* appartiennent à la catégorie générale des *langages à objets* avec les langages de *classes*, d'*acteurs* et les langages *hybrides* (voir [Masini *et al.*, 1997]). Le mécanisme d'inférence des connaissances représentées par des *frames* nécessite la construction d'une taxonomie de *frames* [Cali *et al.*, 2005]. Pour les mêmes raisons que pour la précédente méthode, une taxonomie résultant des concepts bâtis à partir de notre échantillon d'éco-labels ne nous semble pas justifiée.

Les langages à *objets* peuvent présenter six concepts de base (ou « dimensions ») [Wegner, 1987] qui permettent de les classer [Gaillard, 1994] :

- *objet* : entité possédant des opérations et un état qui mémorise l'effet des opérations,
- *type* : spécification de comportement pouvant être utilisée pour générer des instances ayant ce comportement ; la notion de type est le plus souvent identique à la notion de classe dans les langages à objets,
- *délégation* : mécanisme permettant à un objet de donner procuration à un autre objet pour exécuter une opération ; on distingue la délégation proprement dite (utilisée dans les langages à base de prototypes) et l'héritage, intrinsèquement liée à la notion de classe et qui est le mécanisme le plus connu dans les langages à objets,
- *abstraction ou encapsulation* : un objet n'est accessible que par l'intermédiaire de ses données,
- *concurrency* : capacité pour les objets d'exécuter certaines opérations simultanément dans le temps,

- *persistance* : capacité d'un objet de perdurer plus longtemps que le programme qui lui a donné naissance.

On peut alors proposer les définitions synthétiques suivantes [Gaillard, 1994] :

- langage orienté objet = objets + classes + héritage ;
- langage à base de prototypes = objets + délégation (pas de classes) ;
- langage acteur = objets + abstraction + concurrence.

Les langages à *objets*, qui se sont progressivement imposés, sont porteurs de propriétés permettant de simplifier énormément la description d'un domaine mais aussi la mise au point et la maintenance d'un programme. Nous retrouvons d'autre part ici la plupart des concepts qui nous permettront de passer du général au particulier, but principal des éco-labels : les classes (les pièces, les matières plastiques compatibles, les produits dangereux...), les instances (la pièce *p...*), l'héritage (l'étiquetage considérés comme modes d'identification...), etc.

2.3.3. *Les méthodes « mixtes »*

Nous citerons tout d'abord les *logiques terminologiques*. Elles s'appuient sur un mode de représentation par objets structurés, combiné à un mécanisme de raisonnement utilisant la logique du premier ordre. La structuration des connaissances est basée sur une forme particulière d'héritage, la *subsomption*. Celle-ci permet d'organiser hiérarchiquement les concepts manipulés. Un algorithme générique de classification, le « classificateur », permet de mettre à jour la hiérarchie des concepts.

Un point commun avec notre cadre de modélisation est que la source de connaissances est exprimée en langage naturel. Notons que les logiques terminologiques s'appuient sur une automatisation du traitement de l'information. On peut par exemple citer les études sur les corpus présentées dans [Habert *et al.*, 1997], d'autres portant sur des analyses terminologiques décrites dans [Meyer *et al.*, 1992]. On peut également mentionner les travaux réalisés au sein du groupe de travail Terminologie et Intelligence Artificielles (TIA) concernant l'exploration de corpus et la construction d'ontologies (cf. [Aussenac-Gilles *et al.*, 2004] ou [Condamines, 2003]) ou encore l'exploration du contenu (voir par exemple [Nazarenko, 1994]).

Les éco-labels sont toutefois rédigés sous une forme déjà structurée, les critères d'éligibilité étant notamment présentés, comme nous l'avons souligné au Chapitre 1, sous forme énumérative. Cette structure est par exemple illustrée dans [WEPSI, 2001] où une comparaison entre les éco-labels a été réalisée. Des analyses de type terminologique ou syntaxique ne nous semblent donc pas nécessaires.

Notons en outre que l'automatisation est dans notre cas partielle. Le passage du langage naturel en données nécessite en effet une intervention humaine, notamment pour « normaliser » la description des critères contenus dans les éco-labels (tel que décrit au paragraphe 2.2.3). C'est seulement après la « normalisation » de la description du référentiel du recyclage (tel que présenté dans les éco-labels) que la génération de données « recyclabilité » (par exemple en utilisant un éditeur d'ontologies tel que VisioModeler) est réalisée, suivie d'une interaction entre le système et le concepteur afin de fournir de l'aide à la vérification des critères d'un standard donné (d'après le schéma de principe décrit dans le chapitre introductif).

Nous citerons également les *graphes conceptuels*. Ils visent en général à représenter formellement des phrases du langage naturel [Sowa, 1991]. A l'instar de la précédente méthode, les graphes conceptuels combinent des représentations par objets structurés à un mécanisme de raisonnement logique. Sowa a ainsi développé un cadre théorique permettant d'inférer des connaissances à partir d'autres connaissances exprimées en langage naturel [Sowa, 1984]. Deux notions clés (analogues à celles déjà définies dans ORM) sont utilisées pour représenter des connaissances : les *concepts* et les *relations* qui sont organisés dans des structures hiérarchiques bien distinctes. Ici, un des objectifs est de permettre la manipulation et la vérification de chacune de ces structures à partir d'un ensemble réduit de règles de cohérence. Citons dans le même ordre d'idée les travaux basés sur la méthode B, récemment appliquée en vue de la spécification formelle d'un système automatisé de production [Morel *et al.*, 2001].

Ainsi, il peut s'avérer intéressant de représenter les connaissances contenues dans les éco-labels à partir des méthodes orientées graphes, notamment pour mieux gérer les problèmes d'interopérabilité sémantique ou pour faire des vérifications formelles. Toutefois, dans le cadre de notre contexte d'étude (d'après le point (c) décrit en introduction) et par rapport au choix d'une automatisation partielle de la démarche proposée (voir schéma de principe décrit dans le chapitre introductif), l'utilisation de telles méthodes ne nous semble pas suffisamment justifiée : par exemple, une hiérarchie de concepts et de relations à partir des seules informations

contenues dans les éco-labels nous paraît peu appropriée (quelle que soit par ailleurs la richesse de ces informations en vue de l'évaluation de la recyclabilité comme nous l'avons montré au Chapitre 1). Des informations plus générales et non définies dans le cadre normatif des éco-labels seraient alors nécessaires : par exemple, celles portant sur les points de la « roue stratégique » de l'éco-conception non considérés dans notre cadre d'étude (cf. Figure 3), des savoirs et savoir-faire des acteurs, le service après-vente, la collecte et la gestion des produits usagés, etc. Mais cela est, pour le moment, en dehors des limites fixées dans cette thèse.

2.3.4. La programmation sous contraintes

Nous citerons enfin sur un autre plan la *programmation sous contraintes*. Elle est davantage un moyen de réaliser des inférences dans un cadre générique et flexible, mélangeant programmation par règles et satisfaction de contraintes qu'un outil de représentation des connaissances proprement dit.

La modélisation est ici basée sur un ensemble de variables à instancier et qui doivent respecter des formules restreignant les valeurs possibles qu'elles peuvent prendre. En théorie, chacune de ces variables peut prendre ses valeurs dans un domaine qui peut être fini ou infini ; en pratique, seuls les domaines finis sont généralement considérés. On peut ici modéliser des problèmes du point de vue de leur satisfiabilité (i.e. en cherchant une solution ou un ensemble de solutions correspondant à la satisfaction d'un ensemble de contraintes) ou de l'optimisation de solutions (i.e. en cherchant la meilleure solution qui maximise ou minimise un certain critère). Le premier aspect est celui qui est abordé dans cette thèse, car des considérations concernant l'optimisation n'intéressent pas directement notre étude. Rappelons néanmoins que l'optimisation de la recyclabilité a fait l'objet d'une abondante littérature, notamment dans le cadre de la logistique inverse. Un exemple de problème traité est la détermination de séquences optimales de désassemblage d'un produit en fin de vie, en prenant en compte diverses données économiques ; ce qui n'est pas abordé dans cette thèse.

Une caractéristique intéressante de la représentation par contraintes pour notre étude est l'utilisation de la notation ensembliste non présente de manière « naturelle » dans les méthodes vues précédemment. Elle permet notamment de définir de manière simple quelques contraintes portant sur certaines propriétés d'un produit : par exemple, l'appartenance d'un matériau à une

liste de matériaux interdits (contrainte de type unaire) ou encore l'appartenance des matériaux constituant deux composants connexes à une table de compatibilité (contrainte de type binaire).

D'un point de vue résolution, un intérêt reconnu d'une approche par contraintes est qu'elle se prête bien à la gestion de la combinatoire qui est, comme nous l'avons déjà mentionné, un problème important dans notre contexte (notamment dans le cas des produits complexes). Une panoplie de techniques de résolution est en effet proposée dans la littérature (voir par exemple [Tsang, 1993] ou [Dechter, 2003]). Elles ont pour la plupart été utilisées avec succès pour de nombreux problèmes de grande taille. Nous citerons à titre d'exemples quelques réalisations dans le domaine de la conception : conception d'un mixer industriel [Gelle, 1998], conception d'appareils à pression [Fisher, 2000], conception d'avions [Mulyanto, 2002], conception de produits à forte diversité [Hadj-Hamou, 2002]. Précisons toutefois que ces derniers travaux ont davantage été axés sur l'efficacité des techniques de résolution. Or dans notre contexte, le besoin d'une méthode adaptée de représentation de la résolution est principalement guidé par la recherche d'un bon support de validation de la démarche proposée.

Bilan du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons vu que les principes d'utilisation des connaissances, ainsi que les méthodes de représentation que nous venons décrire ont leur pertinence, mais seulement dans des contextes qui peuvent différer de celui de cette thèse. Nous avons ainsi pu noter que ces principes et méthodes peuvent relever de manières différentes d'utiliser les connaissances.

Un aspect qui nous a toutefois semblé intéressant dans les approches SBC est le principe de modélisation au « niveau connaissances » dont un moyen de mise en œuvre consiste à décrire les ontologies d'un domaine. Ces dernières sont de plus en plus considérées comme des primitives de base pour la modélisation, les approches qui habituellement ne relèvent pas de cette logique commencent à adopter cette notion. Une ontologie tend en effet à devenir le terme générique qui représentent les classes (ou objets) des langages à objets. Notons toutefois qu'en général, ces langages ne traitent pas directement le problème de la définition des ontologies d'un domaine qui n'est pas trivial en soi ; le travail étant davantage axé sur les aspects de programmation. Une méthode relevant d'une approche à base d'ontologies comme le formalisme ORM, on l'a vu, permet de décrire de manière simple mais suffisante un

domaine à partir de sources textuelles. Il offre en outre un cadre théorique très riche permettant également d'inférer des connaissances, notamment en vue de la vérification de la cohérence entre certains concepts du domaine qui peuvent être liés ; cependant, dans notre contexte, nous limiterons notre intérêt pour ce formalisme à la perspective d'extraire facilement des données « recyclabilité » à partir des informations contenues dans les éco-labels. Il nous a en effet semblé être un moyen efficace pour bien gérer les problèmes d'interprétation (sémantique) qui sont importants dans notre problématique. Nous pensons ainsi avoir trouvé une méthode pouvant faciliter la transcription des sources textuelles considérées (les éco-labels) en données exploitables pour l'évaluation de la recyclabilité : premier problème posé par notre étude.

Pour ce qui concerne le second problème, à savoir celui de la résolution de notre problématique, les méthodes basées sur la logique pure, plus particulièrement la logique des prédicats, nous ont semblé être un cadre naturel très flexible permettant de formuler des connaissances (en particulier celles qui portent sur le domaine du recyclage). Dans notre cas, ces méthodes permettent par exemple définir dans quelle(s) condition(s) une contrainte sur une propriété du produit doit être satisfaite ; ce qui correspond à une grande partie des règles présentes dans les éco-labels. Nous avons par contre noté que la notation ensembliste, qui nous semble une manière très naturelle pour décrire les caractéristiques du produit, n'est pas ici présente. De plus, nous n'avons pas pu identifier d'outil basé sur la logique pure pouvant communiquer avec des systèmes tels que les outils CFAO ou PLM (où figurent déjà certaines données qui ne nécessitent pas d'être redéfinies). Nous avons donc jugé utile d'explorer une méthode alternative (notamment celle basée sur la programmation sous contraintes) pour représenter la résolution de notre problème. Nous verrons dans le chapitre suivant que cette méthode comporte d'autres caractéristiques intéressantes pour notre étude. Les problèmes de conception en général, la vérification de la satisfaction des critères d'un éco-label en particulier, peuvent en effet facilement être représentés sous forme de contraintes. De plus, les algorithmes développés dans ce cadre permettent de bien gérer la combinatoire qui est également un problème important dans notre contexte. Ils sont en outre dotés de mécanismes conviviaux permettant de contrôler la résolution en fournissant par exemple des explications concernant une contrainte non satisfaite. Ce qui peut être intéressant dans un contexte d'aide à la décision tel que le nôtre (défini dans le chapitre introductif).

Enfin, nous avons retenu la nécessité des langages à *objets* qui sont notamment reconnus pour leurs propriétés en programmation : réutilisation, évolution et maintenance aisées du code source. L'implémentation, avec de tels langages, de la résolution de notre problématique (à partir des méthodes de satisfaction de contraintes) nous semble également un bon choix. Ce choix nous permettra alors de faire une connexion avec la dimension « connaissances » des ontologies construites avec ORM.

Définition d'un modèle « étendu » de produit

Comme on a pu le voir au Chapitre 1, plusieurs aspects de la recyclabilité sont abordés dans les éco-labels : par exemple, les caractéristiques générales de conception d'un produit, les caractéristiques des matériaux et composants, les services relatifs au retrait du produit et à son recyclage, des informations et données pour la gestion en fin de vie... Notre modèle « étendu » de produit (i.e. la structure initiale du produit complétée par les informations contenues dans les éco-labels) doit donc comporter plusieurs facettes du même objet technique, le produit. Des modèles généraux ont déjà été proposés dans le cadre des Systèmes d'Information Produit (SIP). Nous commencerons donc par présenter deux exemples tirés de la littérature, basés sur la modélisation multipoints de vue. Celle-ci est en effet apparue comme une approche intéressante en vue de la prise en compte du cycle de vie complet d'un produit [Millon *et al.*, 1998]. Ce qui correspond bien à un de nos objectifs tels que décrits dans le chapitre introductif.

Nous verrons cependant sur ces deux exemples de la littérature que la manière de définir un point de vue peut avoir des conséquences sur l'adaptation d'un modèle à un contexte particulier. Nous tenterons alors de les resituer dans le contexte de cette thèse afin d'en extraire les aspects qui peuvent nous intéresser. Ces considérations générales sur la modélisation seront suivies d'une caractérisation des éco-labels retenus : le choix d'un échantillon représentatif pour notre étude sera notamment décrit et justifié. La mise en œuvre de la méthode d'extraction des données « recyclabilité » en vue de la définition d'un modèle « étendu » (basée sur la caractérisation de ces éco-labels et utilisant le formalisme adopté au chapitre précédent) sera ensuite présentée.

1. Modélisation dans le cadre des SIP

Les premiers modèles produit proposés dans les outils de conception visaient plus particulièrement la standardisation en vue de faciliter les échanges de données entre applications hétérogènes. Ce travail portait plus particulièrement sur la standardisation des formats d'échange, notamment de fichiers. Les travaux effectués par IGES (*Initial Graphic*

Exchange Specifications) ou SET (*Standard d'Echange et Transfert*) [Srinivasan, 2005] sont de ce type et sont principalement orientés Échange de Données Informatisées (EDI).

Dans le même cadre normatif, une initiative de l'ISO [ISO, 1994] a conduit à des modèles permettant une plus grande intégration des divers aspects du cycle de vie d'un produit : la géométrie et la topologie du produit sont ici les principaux aspects concernés. Les standards PDES (*Product Data Exchange System*) et STEP (*STandard for the Exchange of Product data*) en sont des exemples. Face à la profusion des standards proposés, un objectif majeur de l'ISO était de faciliter le développement des logiciels de CFAO (Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur). Néanmoins, un cadre de modélisation plus flexible, dépassant celui des outils de CFAO qui sont en général conçus sur des modèles « fermés », nous semble plus approprié à notre contexte. La flexibilité recherchée ici sera en effet utile pour positionner les données « recyclabilité » (à extraire des éco-labels) dans la structure physique du produit. Une difficulté est toutefois de pouvoir trouver un modèle qui s'y prête. Un objectif de ce chapitre est de proposer un cadre méthodologique permettant d'aborder ce problème.

Certains travaux réalisés dans le domaine des SIP ont tenté d'y apporter quelques réponses : les données techniques de différentes natures (structurelle, fonctionnelle...), à des niveaux d'abstraction divers (fonction, sous fonction...) et avec des niveaux de précision tout aussi variés (général, détaillé...) sont ainsi étroitement liés à des points de vue différents sur un même produit. Ce qui permet de représenter différentes facettes du même objet technique (le produit) dans un modèle. Deux exemples basés sur la définition de plusieurs vues sont décrits dans la suite : un premier modèle de type « spécialisé », et un second de type « générique ». Dans les deux exemples que nous allons décrire, les aspects fonctionnel et comportemental du produit ne seront pas abordés, car ils ne correspondent aux points de la « roue stratégique » de l'éco-conception que nous considérons (comme mentionné au Chapitre 1).

1.1. Premier exemple de l'approche multipoints de vue : le modèle MOKA

Un premier exemple de modèle intégrant plusieurs points de vue a été réalisé dans le cadre du programme ESPRIT IV [MML Working Group, 2000] : il s'agit du modèle MOKA, développé pour les secteurs de l'automobile et de l'aérospatiale. Nous n'en décrivons ici qu'un aperçu qui nous semble en rapport avec notre contexte.

Une particularité de ce modèle réside dans l'éclatement de la vue structurelle du produit en trois vues distinctes : les vues « organique », « représentation » et « technologie ». Elles sont organisées autour de la classe « structure », comme illustré dans la partie centrale de la Figure 5. Nous en proposons une brève description dans la partie suivante.

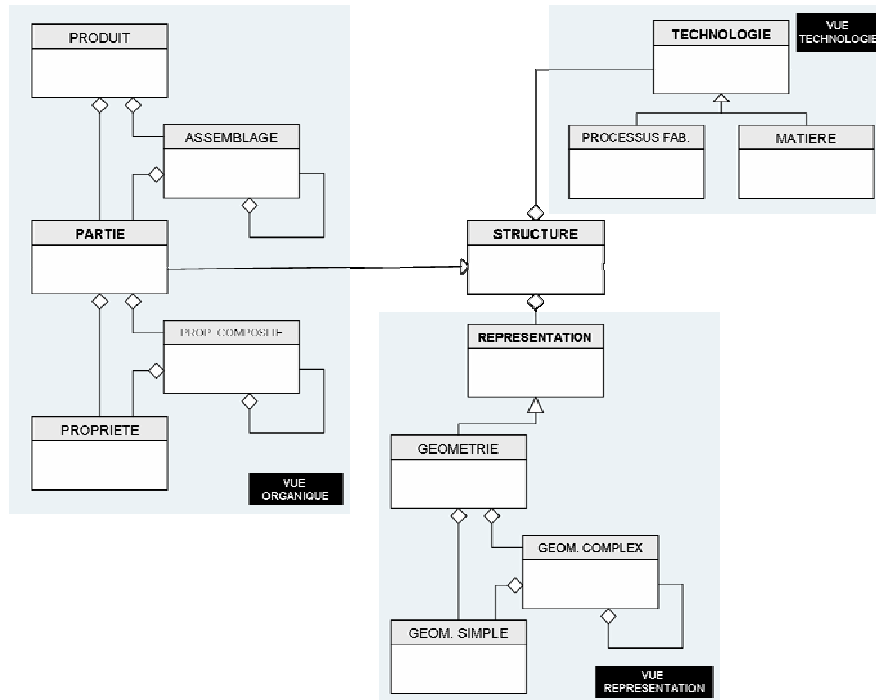


Figure 5 : Aperçu de la vue structurelle du modèle MOKA.

1.1.1. La vue « organique » du modèle MOKA

La vue « organique » du modèle est reliée à la classe « structure » par la classe « partie » : elle concerne la décomposition d'éléments d'un produit complexe en sous éléments. Comme l'illustre la partie gauche de la Figure 5, une partie est une sorte de structure (cf. spécialisation de la classe « structure » par la classe « partie ») et est composée de propriétés simples ou de propriétés composites (cf. agrégations des classes « propriété » et « propriété composite » par la classe « partie »). Une propriété composite est elle-même composée de propriétés simples ou d'autres propriétés composites (cf. agrégations de la classe « propriété composite » par elle-même et de la classe « propriété » par la classe « propriété composite »). Le produit est quant à lui composé d'une partie ou d'un assemblage (cf. agrégations des classes « partie » et « assemblage » par la classe « produit »), tandis qu'un assemblage est composé d'autres assemblages (cf. agrégation de la classe « assemblage » par elle-même).

Ainsi définie, cette vue du modèle ne nous semble pas être une spécificité propre à MOKA : il s'agit en effet de la définition de la décomposition d'un produit complexe en sous éléments, traduisant des relations de type « composé-composant » également définies dans le second exemple de modèle décrit plus loin.

1.1.2. La vue « représentation » du modèle MOKA

La vue « représentation » du modèle est reliée à la classe « structure » par la classe « représentation » : elle correspond à la définition de la géométrie d'un produit, avec les modèles de calcul associés. Telle qu'illustrée par la partie inférieure droite de la Figure 5, une géométrie est une sorte de représentation (cf. spécialisation de la classe « représentation » par la classe « géométrie »). Une structure est composée de représentations (cf. agrégation de la classe « représentation » par la classe « structure »), tandis qu'une géométrie est composée de géométries simples ou de géométries complexes (cf. agrégations des classes « géométrie simple » et « géométrie complexe » par la classe « géométrie »), une géométrie complexe étant elle-même composée de géométries simples ou d'autres géométries complexes (cf. agrégations de la classe « géométrie complexe » par elle-même et de la classe « géométrie simple » par la classe « géométrie complexe »).

Une analyse des critères des éco-labels nous amène à penser que cette vue ne peut avoir un quelconque intérêt dans notre cas : en effet, des caractéristiques du produit relatives à sa géométrie sont en général très peu concernées par les éco-labels.

1.1.3. La vue « technologie » du modèle MOKA

La vue « technologie » du modèle est reliée à la classe « structure » par la classe « technologie » : elle détermine notamment des choix technologiques concernant les matières et les processus de fabrication qui sont « des sortes de » technologie (cf. spécialisation de la classe « technologie » par les classes « processus de fabrication » et « matière » dans la partie supérieure droite de la Figure 5).

Certaines caractéristiques du produit relatives aux aspects de la recyclabilité présents dans les éco-labels sont ici définis : par exemple, la matière ou le processus de fabrication (que l'on peut rattacher aux aspects concernant le désassemblage du produit). Il est toutefois surprenant de devoir définir la matière d'un produit à un niveau aussi élevé que la « structure » (comme

c'est le cas ici). Une définition à un plus bas niveau du modèle nous semble plus judicieuse, car à nos yeux une matière peut être considérée comme un objet technique qui caractérise un constituant « élémentaire » et pas une caractéristique d'une structure « complexe ».

1.1.4. Bilan

Comme on peut ainsi le noter, les trois vues (ou points de vue) que nous venons de décrire peuvent permettre, dans notre contexte, de positionner une partie seulement des paramètres de recyclabilité contenus dans les éco-labels. Cet exemple illustre les difficultés que l'on pourrait rencontrer avec des modèles « spécialisés ». Ces derniers étant en général plus adaptés à un contexte de conception « routinière » [Labrousse, 2004] qui n'est forcément le nôtre. Nous nous situons en effet dans un cadre plus général pouvant permettre de prendre en compte l'évaluation de la recyclabilité de produits à forte variabilité (tels que par exemple les PEE qui sont concernés par les éco-labels étudiés dans cette thèse). Dans ce cas en effet, la sémantique entre objets techniques peut facilement varier d'un produit à un autre.

Un modèle multipoints de vue, flexible et adaptable (dont la nécessité pour les produits à forte variabilité a été montrée dans [Agard, 2004]) nous semble en définitive être un meilleur choix. Un exemple représentatif est décrit dans la partie suivante.

1.2. Deuxième exemple de l'approche multipoints de vue : le modèle de Harani

Un autre exemple d'approche multipoints de vue est le modèle décrit dans [Harani, 1997]. Pour bon nombre d'auteurs, son originalité réside dans la prise en compte très flexible et adaptable de la notion de « point de vue », comme nous tenterons de le montrer dans cette partie.

Nous commencerons par définir les concepts de base de ce modèle, nous ferons ensuite une brève présentation de la notion de « point de vue » telle que considérée par l'auteur.

1.2.1. Les concepts de base du modèle de Harani

Le modèle proposé par Harani est bâti autour de l'entité « produit ». Celle-ci est définie avec des attributs de base (un identifiant, une désignation) et représente un concept regroupant aussi bien des articles élémentaires que des structures plus complexes (article, module, sous-ensemble). Cela est décrit par l'association réflexive définie sur l'entité « produit » (voir la partie

centrale supérieure de la Figure 6). Cette association caractérise une relation de type « composé-composant » (vue dans l'exemple précédent).

Pour spécifier les caractéristiques d'un produit, Harani utilise l'entité « description » qui concerne une définition littérale, et l'entité « paramètre » qui sert à indiquer des grandeurs quantitatives. Chacune de ces grandeurs quantitatives peut comporter une unité de mesure, une règle d'intégrité, ou une borne de valeurs admises. Toute autre entité du modèle peut être caractérisée de la même manière, c'est-à-dire en définissant une association, soit avec l'entité « description », soit avec l'entité « paramètre » (voir par exemple l'association avec l'entité « point de vue » dans la partie inférieure de la Figure 6).

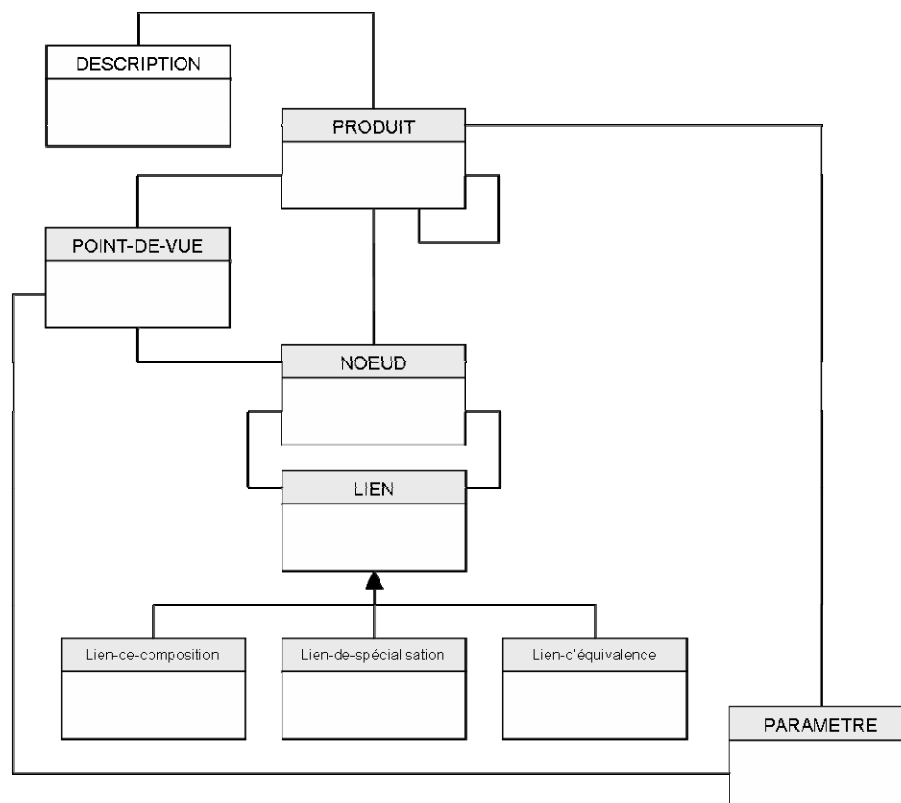


Figure 6 : Vue structurelle du modèle de produit multipoints de vue de Harani [1997].

1.2.2. La notion de « point de vue » du modèle de Harani

Selon Agard [Agard, 2004], l'intérêt de la notion de « point de vue » du modèle de Harani est :

- la possibilité de structurer les données relatives au produit en blocs homogènes pour mieux gérer la complexité ;

- la possibilité d'enrichir la spécification technique du produit en définissant si nécessaire de nouveaux points de vue ;
- la possibilité d'établir des liens entre points de vue afin d'assurer leur complémentarité.

En ce qui nous concerne, cette notion peut servir à positionner les aspects de la recyclabilité qui nous intéressent au sein de la nomenclature-produit. En effet, pour définir un nouveau point de vue dans le modèle de Harani, on utilise l'association entre les entités « produit » et « point-de-vue » (voir partie supérieure de la Figure 6). Cela nous semble plus flexible que dans un modèle ayant des points de vue prédéfinis où, comme on l'a vu avec le modèle MOKA, la dépendance avec la sémantique des concepts préexistants peut être très importante et par conséquent difficile à gérer (notamment pour des produits à forte variabilité).

1.2.3. La notion de « lien » du modèle de Harani

Un « nœud » dans le modèle de Harani permet de regrouper des objets techniques qui relèvent d'un même tenant (i.e. leur composé). Il permet également de définir des regroupements de type logique à partir de la notion de « lien ». Celle-ci généralise les relations de type « composé-composant », notamment à partir du « lien de composition ». La généralisation peut également concerner toute autre relation (différente du type « composé-composant ») : voir par exemple la notion de « lien de spécialisation » (cf. partie inférieure de la Figure 6).

Deux associations entre les entités « nœud » et « lien » (voir partie centrale de la Figure 6) sont également définies. Elles permettent de préciser pour un même nœud, d'une part l'objet technique situé au départ d'un lien, et d'autre part les objets techniques situés à l'arrivée de ce lien.

Une équivalence peut être définie entre les points de vue à partir du « lien d'équivalence » qui est une autre spécialisation de l'entité « lien » (voir la partie inférieure droite de la Figure 6). Comme nous tenterons de l'illustrer dans notre cas, ce type de lien peut être utile pour préciser la complémentarité entre des points de vue que nous aurons à définir.

1.2.4. Bilan

Comme on vient de le voir, un modèle multipoints de vue, flexible et adaptable peut être nécessaire pour bien définir les différentes facettes d'un même objet technique tel que le produit. Par rapport à notre contexte, nous avons notamment vu qu'un modèle comme celui de Harani peut permettre une manipulation relativement aisée des vues que l'on peut construire autour de la vue « structurelle » de la proposition de l'auteur. Ce qui peut ainsi être utile pour positionner les paramètres de recyclabilité qui nous intéressent dans la structure physique du produit.

Comme nous l'avons déjà souligné, un problème dans notre contexte est que ces paramètres sont contenus dans des sources textuelles. Ces derniers pouvant être difficiles à interpréter, rendant également difficile l'extraction des données qui intéressent notre étude. Nous avons pour cela retenu (voir chapitre précédent) un langage à base d'ontologies, utile notamment pour mieux gérer les problèmes d'interprétation sémantique. Une étape préalable à la description de nos ontologies a consisté à caractériser les éco-labels que nous avons retenus. Nous en proposons une brève description dans la partie suivante.

2. Caractérisation des éco-labels retenus

Comme nous l'avons déjà souligné au Chapitre 1 dans le cas du label français *NF-Environnement*, il y a une faible proportion d'éco-labels correspondant à notre cible, à savoir les produits manufacturiers (dans le domaine de la conception mécanique). Cette tendance est également observée pour le label communautaire européen : il existe en effet actuellement 24 catégories de produits répertoriées dans le catalogue du label écologique européen. Comme on peut le voir dans le Tableau 5, parmi les 11 grands secteurs couverts par ces produits, 2 secteurs seulement peuvent nous intéresser :

- la fabrication des appareils domestiques concernés par 4 catégories de produits ;
- la fabrication des matériels électroniques concernés par 3 catégories de produits.

Les autres secteurs répertoriés, à savoir la literie (1 catégorie de produit), les articles chaussants (1 catégorie de produit), le bricolage (3 catégories de produits), le jardinage (2 catégories de produit), le nettoyage (4 catégories de produit), les lubrifiants (1 catégorie de produit), les textiles (1 catégorie de produit) et le papier (2 catégories de produit) n'étant pas

concernés par notre étude. Un premier survol des labels correspondant à ces produits montre en effet que la plupart des critères qu'ils contiennent sont souvent exprimés de manière impérative, définissant uniquement ce qui est interdit, ce qui est toléré et avec quel seuil, etc. Cela nous paraît peu intéressant dans une optique d'aide à la décision telle que nous l'envisageons dans cette thèse.


<p>…✦ Literie (1)</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Matelas</u> 	<p>…✦ Jardinage (2)</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Amendements pour sols</u> • <u>Milieus de culture</u> 	<p>…✦ Matériel électronique (3)</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Ordinateurs personnels</u> • <u>Ordinateurs portables</u> • <u>Télévisions</u> 
<p>…✦ Articles chaussants (1)</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Chaussures</u> 	<p>…✦ Appareils domestiques (4)</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Aspirateurs</u> • <u>Lave-linge</u> • <u>Lave-vaisselle</u> • <u>Réfrigérateurs</u> 	<p>…✦ Textiles (1)</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Habillement, linge de lit et textiles d'intérieur</u>
<p>…✦ De bricolage (3)</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Ampoules électriques</u> • <u>Peintures et vernis</u> • <u>Revêtements de sols durs</u> 	<p>…✦ Nettoyage (4)</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Détergents pour lave-vaisselle</u> • <u>Détergents textiles</u> • <u>Liquides vaisselle</u> • <u>Nettoyants tous usages</u> 	<p>…✦ Papier (2)</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Papier à copier et papier graphique</u> • <u>Produits en papier absorbant</u>
<p>…✦ Services (2)</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Lieux d'hébergement touristique</u> • <u>Services de camping</u> 	<p>…✦ Lubrifiants (1)</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Lubrifiants</u> 	

Tableau 5 : Catalogue du label écologique européen (source : www.eco-label.com/french/).

Au-delà de la nature des informations qu'ils peuvent contenir, il est également intéressant de remarquer que les labels écologiques n'ont pas tous atteint un même niveau de diffusion. Leurs accessibilités respectives n'étant pas toujours garanties.

Un autre élément qui nous semble également important dans le choix des éco-labels est, comme nous l'avons déjà souligné au Chapitre 1, la sensibilité de certaines zones géographiques pour les questions environnementales. La conséquence étant que les labels issus de ces régions sont souvent en avance par rapport aux autres.

C'est en définitive sur ces considérations qu'a été construit notre échantillon d'éco-labels représentatifs dont le choix est brièvement décrit et justifié dans la partie suivante.

2.1. *Choix d'éco-labels représentatifs*

Nous avons précédemment vu que certains labels pouvaient se contenter de formuler des exigences. Ce type de label nous paraît être plutôt adapté à des analyses de type audit, basées sur des vérifications *a posteriori*. Or nous souhaitons dans notre étude vérifier la satisfaction de ces critères dès la phase de conception. Dans ce cas, lorsque des contraintes ne sont pas satisfaites, il peut être en effet intéressant de suggérer des alternatives aux choix initiaux, voire proposer des conseils pouvant faciliter la satisfaction de ces contraintes.

Nous nous sommes donc prioritairement intéressés à la catégorie de labels qui contiennent, outre les exigences de base concernant certaines restrictions, un recueil de « bonnes pratiques » sur le recyclage. C'est précisément dans cet esprit que semblent avoir été rédigés les exemples cités dans le document publié en 2001 par le groupe WEPSI (cf. [WEPSI, 2001]). Étant un des rares documents disponibles dans la littérature qui proposent une comparaison entre éco-labels accessibles, il nous a par conséquent servi de support pour le choix et la caractérisation des labels représentatifs de notre étude. L'analyse détaillée que nous avons alors proposée dans la partie 2.3 du Chapitre 1 a en outre montré une cohérence des informations contenues dans *Blue Angel* par exemple avec la structuration de ce document. Une généralisation de la structure ainsi proposée à d'autres labels nous a donc semblé envisageable. Rappelons que ces labels analysés dans [WEPSI, 2001] concernent la famille des PEE, plus particulièrement les ordinateurs personnels qui ne correspondent pas à notre cible principale, à savoir la fabrication mécanique. Nous les avons néanmoins considérés dans notre étude car aucun éco-label n'a encore à notre connaissance atteint un large niveau de diffusion dans le domaine des produits mécaniques.

Les labels identifiés ont ensuite été classés selon la sensibilité des zones géographiques où ils ont été créés pour les questions environnementales. Nous aurons ainsi une préférence pour les labels allemand ou nordique par exemple, qui peuvent être considérés comme des références permettant d'anticiper au mieux l'arrivée de nouveaux labels ou des directives futures.

Les éco-labels représentatifs de notre étude sont listés dans le Tableau 6, dans l'ordre chronologique de création. On peut notamment voir, comme nous l'avons déjà souligné au Chapitre 1, qu'ils correspondent à trois périmètres d'application (national, international et industriel) que nous présentons brièvement dans la partie suivante.













Eco-label	Périmètre	Initiateur / site web
ECMA (European Computer Manufacturers Association) 	Industriel	Association européenne de constructeurs d'ordinateurs (1961) http://www.ecma-international.org/
Blue Angel 	National (Allemagne)	Ministère de l'Intérieur (1978) http://www.blauer-engel.de/Englisch/
Environmental Choice 	National (Canada)	Ministère de l'Environnement (1988) http://www.environmentalchoice.com/index_main.cfm
Nordic Swan 	International (Trans-national : pays nordiques)	Conseil des pays nordiques : Danemark, Finlande, Norvège, Suède, Islande (1989) http://www.ecolabel.no
Eco-Mark 	National (Japon)	Agence japonaise de l'Environnement (1989) http://www.ecomark.jp/english/
NF-Environnement 	National (France)	AFNOR (1991) http://www.marque-nf.com/
Milieukeur 	National (Pays-Bas)	Ministères de l'Environnement de l'Economie (1991) http://www.milieukeur.nl/nl-NL/default.aspx
Umweltzeichen Bäume 	National (Autrichien)	Ministère de l'Environnement, de la Jeunesse et de la Famille (1991) http://www.milieukeur.nl/nl-NL/default.aspx
Eco-label européen 	International (Communautaire : UE)	Règlement CEE n°880/92 du conseil du 23 mars 1992 http://ec.europa.eu/environment/ecolabel/index_en.htm
EPA Energy Star 	Industriel	Environmental Protection Agency (EPA) – Agence américaine de protection environnementale (1992)
AENOR-Media ambiente 	National (Espagne)	AENOR : organisme espagnole de normalisation et de certification (1993) http://www.aenor.es/desarrollo/inicio/home/home.asp
Siemens: SN 36350-1	Industriel	Siemens (1997)
TCO'99 	National (Suède)	Confédération suédoise des professionnels du matériel informatique (1999) http://www.tcodevelopment.com

Tableau 6 : Principaux labels identifiés dans la famille des PEE (ordinateurs personnels).

2.1.1. Les éco-labels internationaux

Parmi les labels internationaux, nous avons considéré un label communautaire, l'éco-label européen (créé par le règlement CEE n°880/92 du conseil du 23 mars 1992), et le label trans-national *Nordic Swan*, fondé par le conseil des pays nordiques en 1989 (Danemark, Finlande, Norvège, Suède et Islande).

Le label communautaire est un modèle générique qui comporte des informations très générales. Il nous semble davantage correspondre à la catégorie de standards orientés audit (telle que précédemment définie). Cela n'est en revanche pas le cas de *Nordic Swan* qui comporte un recueil de « bonnes pratiques » qui peut bien se prêter à un contexte d'aide à la décision tel que le nôtre.

2.1.2. Les éco-labels nationaux

Parmi les labels nationaux identifiés et ayant atteint un certain niveau de diffusion, on peut citer *Blue Angel* (label allemand créé par le ministère de l'intérieur en 1978), *Environmental Choice* (label canadien créé par le ministère de l'environnement en 1988), *Eco-mark* (label japonais créé par l'agence japonaise de l'environnement en 1989), *NF-Environment* (label français créé par l'AFNOR en 1991), *Milieukeur* (label néerlandais créé conjointement par les ministères de l'environnement et de l'économie en 1991), *Umweltzeichen Baüme* (label autrichien créé par le ministère de l'environnement, de la jeunesse et de la famille en 1992), *AENOR - Media ambiente* (label espagnol créé en 1993 par l'AENOR, organisme espagnol de normalisation et de certification), *TCO'99* (label suédois créé en 1999 par l'organisme suédois pour la certification et la normalisation).

Par rapport à nos critères de choix (cf. partie 2.1 de ce chapitre), seuls les labels allemand, japonais et suédois semblent avoir un réel intérêt pour notre étude.

2.1.3. Les éco-labels industriels

Les labels industriels auxquels nous avons pu accéder semblent dans leur intégralité représentatifs de notre contexte d'étude, car remplissant à nos yeux nos critères de choix. C'est ainsi par exemple que les standards AEA (à travers un rapport technique établi en 1993), SN 36350-1 (créé par le groupe Siemens en 1999 pour les ordinateurs), et ECMA (à travers un rapport technique établi en 1999), disposent tous d'un recueil de « bonnes pratiques » comme illustré dans le document WEPSI.

En effet, le rapport AEA est le fruit de la collaboration d'un très large panel d'industriels du secteur des PEE, visant à indiquer pourquoi et comment appliquer l'éco-conception dans ce secteur, tandis que le standard Siemens fait très largement appel à des référentiels externes tels

que par exemple VDI 2243 [VDI, 1993] (une des références en matière de règles de conception pour le recyclage).

2.1.4. Bilan

Notre tentative d'étudier la faisabilité d'une automatisation partielle du processus de vérification de la conformité d'un produit avec un éco-label a donc été réalisée en considérant l'échantillon d'éco-labels qui viennent d'être brièvement présentés. Les choix que nous venons de décrire et justifier nous amènent donc à penser que l'échantillon ainsi construit peut suffire pour extraire des données « recyclabilité » couvrant notre contexte d'étude.

Nous nous proposons de décrire dans la partie suivante une caractérisation qui semble conforme aux informations contenues dans les éco-labels retenus.

2.2. Les principaux thèmes caractéristiques des éco-labels retenus

Nous présenterons chacun des thèmes caractéristiques des éco-labels retenus avec un ensemble de phrases atomiques simples qui les décrivent. Ce qui correspond à la « normalisation » de la description de l'univers du discours, conformément à la méthodologie adoptée pour la modélisation (décrite au chapitre précédent).

2.2.1. Le thème de l'identification des pièces et composants

Les données « recyclabilité » correspondant à ce thème concernent en général le marquage ou l'étiquetage des produits. Citons à titre d'exemples les critères suivants :

Siemens: “Mark plastic components suitable for recycling” (i.e. marquer les composants plastiques afin de faciliter leur recyclage).

Blue Angel: “Have the plastic parts been labelled according to ISO 11469?” (i.e. les composants plastiques ont-ils été étiquetés conformément à la norme ISO 11469 ?)

Nordic Swan: “Labels must be made of the same material as the parts to which they are affixed or they have to be separable and fulfil VDI 2243, part 11 table 2” (i.e. les étiquettes doivent être de la même matière que les parties sur lesquelles elles sont apposées, ou bien elles doivent être séparables et remplir les conditions de la table 2 de la partie 11 du guide VDI 2243).

Dans ces trois exemples, le premier label aborde le marquage des composants plastiques tandis que les deux autres s'intéressent à leur étiquetage. Ce que nous pouvons assimiler à une caractéristique commune. Il se trouve par ailleurs que la manière d'étiqueter un produit peut exiger la conformité à une certaine référence (une norme ou un guide). Nous l'appliquerons également au marquage, bien que cela ne soit pas explicitement formulé ici.

Afin de mettre en œuvre la procédure CSDP (adoptée pour la modélisation – voir chapitre précédent), nous pouvons spécifier les aspects de la recyclabilité correspondant au thème de l'identification de la manière suivante :

- (A1) un produit peut être marqué
- (A2) un produit peut posséder une étiquette
- (A3) le marquage d'un produit peut se faire selon une référence
- (A4) l'étiquetage d'un produit peut se faire selon une référence

2.2.2. Le thème de l'homogénéité

Les données « recyclabilité » concernant ce thème portent en général sur la nature des matières utilisées ou sur l'homogénéité des matières et substances. A l'instar du thème précédent, les éco-labels ne considèrent pas les mêmes aspects de l'homogénéité, tandis que les points communs ne sont pas formulés de la même manière. A titre d'exemples :

Nordic Swan : “Single plastic parts (over 25g) in the housing and chassis must consist of one type of polymer (homopolymer or copolymer) or recyclable plastic blend” (i.e. tout composant plastique de plus de 25g, contenu dans le boîtier ou le châssis, doit être formé d'un seul type de polymère, à moins que le mélange de plastique utilisé soit recyclable).

Nordic Swan : “Large plastic parts (over 25g) may not be painted” (i.e. éviter de peindre les composants plastiques de plus de 25g).

Blue Angel : “Avoidance of coatings and composite structure materials” (i.e. éviter les matières de structure composite ou recouverts).

Siemens: “Take account of compatibility between materials with respect to recycling (SN 36350-3,4)” (i.e. s’assurer de la compatibilité des matières conformément à la norme de recyclage édictée dans la référence SN 36350-3,4).

Siemens: “Use company logos and labels made from the same material as the body of the products or a compatible material” (i.e. les logos et étiquettes utilisés doivent être de la même matière que celle du produit où ils seront apposés ou bien d’une matière compatible).

La spécification du thème de l’homogénéité (à travers sa description « normalisée ») peut se faire en utilisant les assertions suivantes :

(B1) tout produit est constitué d’une matière

(B2) toute étiquette est constituée d’une matière

(B3) toute étiquette peut contenir une substance

(B4) l’étiquetage d’un produit peut nécessiter une substance

(B5) un assemblage peut nécessiter une substance

(B6) un produit peut contenir une substance

(B7) toute matière appartient à une seule classe de matière

(B8) toute classe de matière appartient à une seule famille de matières

(B9) une classe de matière est concernée par une table de compatibilité

(B10) une classe de matière peut être concernée par une table de compatibilité

(B11) une substance peut être concernée par une table de compatibilité

(B12) toute table de compatibilité matières possède une référence

(B13) toute table de compatibilité entre matières et substances possède une référence

2.2.3. Le thème du démontage

Ce thème concerne le choix du mode d'assemblage de composants élémentaires qui permette un démantèlement aisé du produit. Citons quelques extraits de critères d'éligibilité :

Siemens: “Design all connections that require dismantling to be readily identifiable” (i.e. les composants doivent être facilement séparables)

Blue Angel: “Did the manufacturer carry out a check disassembly and prepare a disassembly report listing weak points?” (i.e. des directives de démontage doivent être clairement formalisées)

Nordic Swan: “It must be possible to carry out the dismantling without special tools” (i.e. on doit pouvoir démonter le produit sans recourir à d'outils spéciaux)

Blue Angel: “Can disassembly be done with all-purpose tools exclusively?” (i.e. le démontage peut-il être réalisé uniquement à l'aide des outils prévus ?)

Les deux derniers critères semblent traduire la même exigence, à savoir que les opérations de démontage ne doivent pas nécessiter d'outils spéciaux (i.e. des outils difficilement accessibles sur le marché, à l'inverse des outils dits « standards » qui sont supposés plus accessibles).

D'autres critères relatifs au processus de désassemblage sont par exemple :

Blue Angel: “Is the product equipped with the necessary points of application and working spaces for disassembly tools?” (i.e. le produit dispose-t-il de points d'accès et d'espace de manipulation suffisant pour l'utilisation des outils de démontage ?)

Siemens: “Design all connections that require dismantling to be easily accessible” (i.e. préférer des liaisons facilement accessibles lors du démontage)

Nous spécifions alors le thème du démontage à partir des assertions suivantes :

(C1) tout assemblage peut nécessiter un processus de désassemblage

(C2) tout démontage peut nécessiter une ressource

(C3) un opérateur est un type de ressource de démontage

(C4) un outil est un type de ressource de démontage

(C5) une machine est un type de ressource de démontage

(C6) un opérateur est apte à utiliser une machine

(C7) un opérateur est apte à utiliser un outil

Les spécifications des caractéristiques des données « recyclabilité » étant ainsi définies (cf. les Ai, Bj et Ck), nous décrivons dans la suite les modèles ORM associés à chacun des thèmes identifiés.

3. Extraction des données « recyclabilité »

Rappelons tout d'abord que dans une approche multipoints de vue, le cadre initial de modélisation est la base commune à tous les points de vue adoptés pour définir un produit [Derigent et Lombard, 2006]. D'après les justifications fournies précédemment, nous considérerons la vue structurelle du modèle proposé par Harani [Harani, 1997] comme point de départ de notre modélisation (des données « recyclabilité »).

3.1. Cadre initial de la modélisation : la vue structurelle

La description « normalisée » de notre cadre initial de modélisation est donnée par les assertions suivantes :

(H1) un produit être composé d'un autre produit

(H2) un produit possède un niveau

(H3) tout produit peut appartenir à un nœud

(H4) un nœud possède plusieurs liens

(H5) une liaison entre nœuds détermine la position de chacun des nœuds concernés

Nous définissons par ailleurs le concept « paramètre » en spécifiant deux types :

(H6) tout paramètre possède une description

(H7) un paramètre qualitatif est une sorte de paramètre

(H8) un paramètre quantitatif est une sorte de paramètre

(H9) tout paramètre quantitatif est associé à au moins un paramètre qualitatif

(H10) toute caractéristique de produit peut avoir au moins un paramètre

Ces assertions correspondent à la description de la vue structurelle du modèle multipoints de vue de Harani. Une légère modification a toutefois été introduite : tandis que Harani définit une association entre un « produit » et un « paramètre », nous formulons que d'une manière générale, tout caractéristique du produit peut avoir un paramètre ; ce qui correspond à (H10).

A partir de la procédure CSDP (préconisée pour la construction des ontologies), on obtient le modèle ORM de la Figure 7. Sa description littérale ne nécessite à nos yeux pas de commentaires particuliers. Il en sera de même pour les deux autres vues de notre modèle qui utilisent une démarche similaire de modélisation.

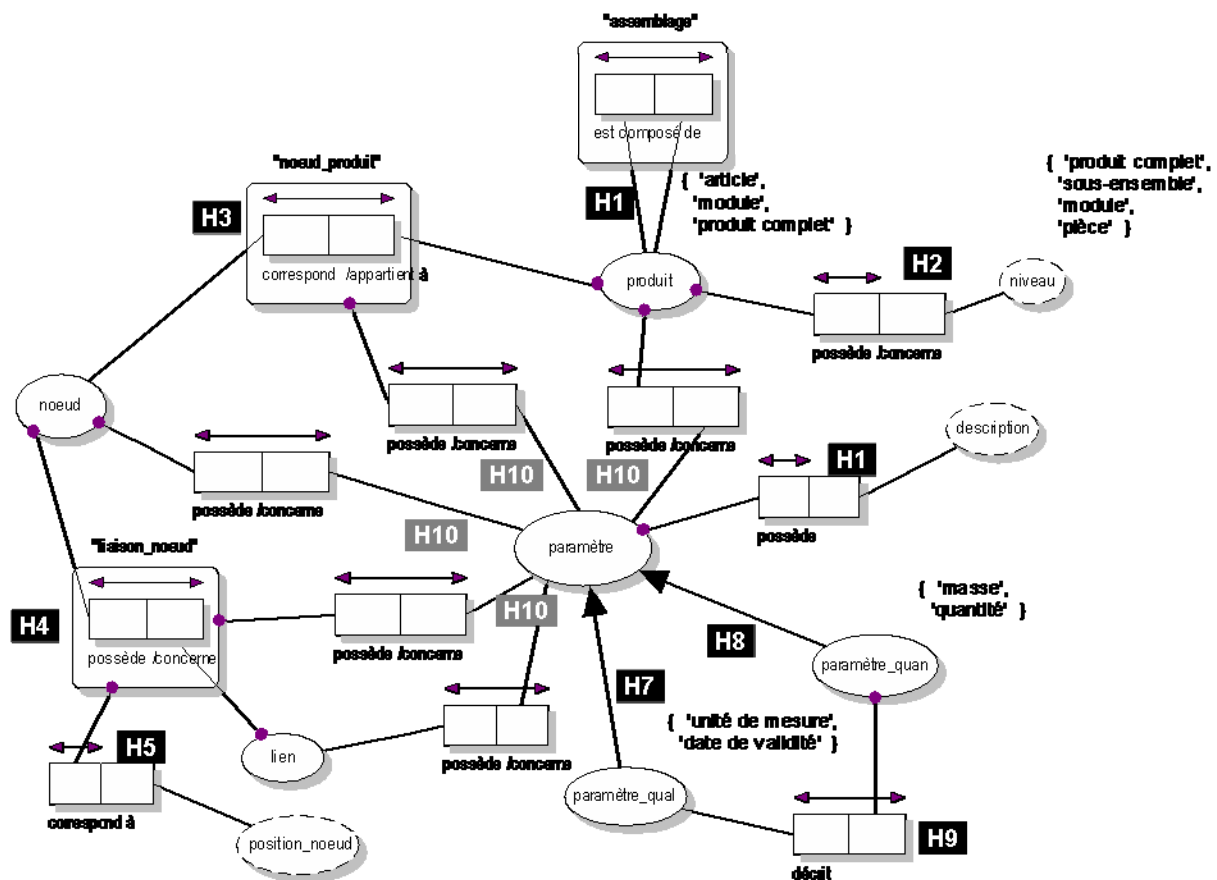


Figure 7 : Cadre initial de définition d'un modèle « étendu » de produit.

Notons cependant qu'on peut apporter plus de précision au modèle en indiquant, à proximité de chaque objet, quelques cas ou instances (voir par exemple les objets « produit » et « niveau »). Rappelons également que lorsque les rectangles figurant une relation sont entourés par un autre rectangle (qui est arrondi), cela signifie que cette relation peut jouer un rôle, correspondant au principe « d'objectification » défini précédemment ; voir par exemple (H3) qui modélise l'expression linguistique suivante : tout produit (i.e. tout composant d'un produit complexe) doit appartenir à au moins un nœud, et l'appartenance d'un produit (i.e d'un composant) à un nœud peut nécessiter la définition d'un paramètre (par exemple, la validité du nœud comme défini dans le modèle de Harani).

Dans un cadre plus général, on doit réitérer les trois étapes de la démarche CSDP pour éventuellement modifier une spécification. On voit ici tout l'intérêt du pseudo langage naturel utilisé au travers de la « normalisation » (cf. étape 1 de la procédure CSDP), étant donné qu'une modification du modèle ne nous semble pas exiger de compétence particulière en modélisation : ceci peut par exemple permettre (dans un cadre plus général que le nôtre) la participation de divers experts de l'environnement dans la spécification d'un modèle « étendu ».

3.2. Définition des vues spécifiques à l'étude

La vue « structurelle » de notre modèle étant construite comme ci-dessus, notre proposition d'un modèle « étendu » est définie à partir des paramètres du produit correspondant à cette vue, complétées par des caractéristiques de la recyclabilité extraites des éco-labels dont une description « normalisée » a été décrite plus haut (cf. Ai, Bj et Ck). Une difficulté est de pouvoir organiser ces caractéristiques en blocs homogènes, au sens d'une définition du concept de « point de vue » mentionnée précédemment.

Dans notre contexte, la principale difficulté vient du fait que le thème de l'identification est transversal (d'après la caractérisation des éco-labels décrite plus haut) : il peut en effet concerner aussi bien les matières et substances dangereuses que les liaisons difficiles à défaire. Nous pensons toutefois qu'une identification se traduit en pratique par un étiquetage ou un marquage de produit : il nous semble donc raisonnable de l'associer au thème de l'homogénéité pour former le point de vue « recyclabilité » présentée dans la partie suivante.

3.2.1. La vue « recyclabilité »

Un exemple de relation unaire (figurée par un seul rectangle) est ici illustré par le repère A1 de la Figure 8.

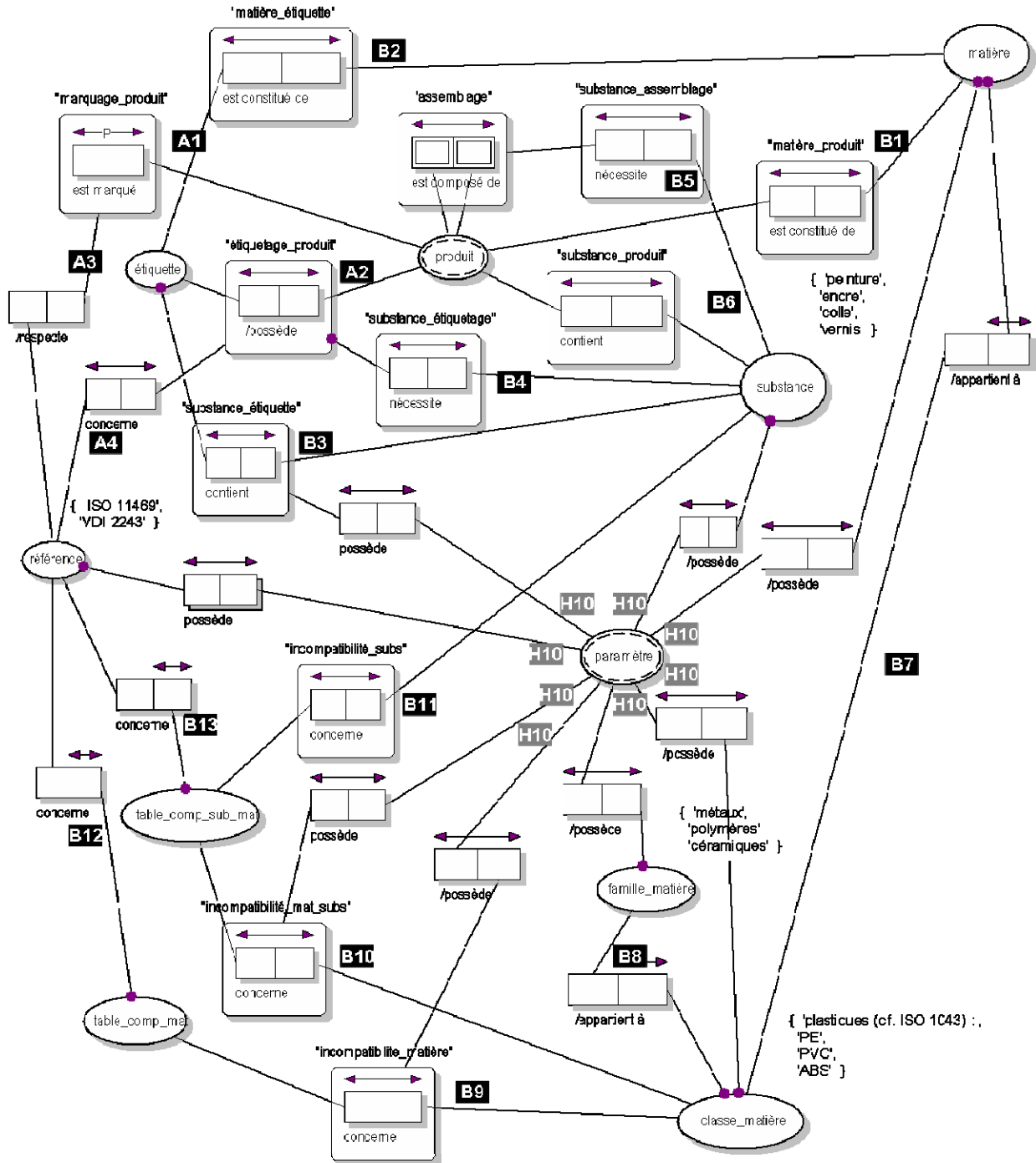


Figure 8 : Vue « recyclabilité » du modèle « étendu » de produit.

Notons en outre que la double ellipse ou les doubles rectangles sont des commodités proposées par l'outil utilisé pour la modélisation : VisioModeler permet en effet de définir les

modèles de façon modulaire. Ainsi, les objets ou relations du modèle ne sont définis qu’une seule fois. Ceux qui sont communs à plusieurs sous modèles sont normalement représentés une première fois, puis déclarés comme « externes » dans les autres sous modèles, comme par exemple l’objet « paramètre » ou la relation « est composé de » présents dans toutes les vues.

3.2.2. La vue « démontabilité »

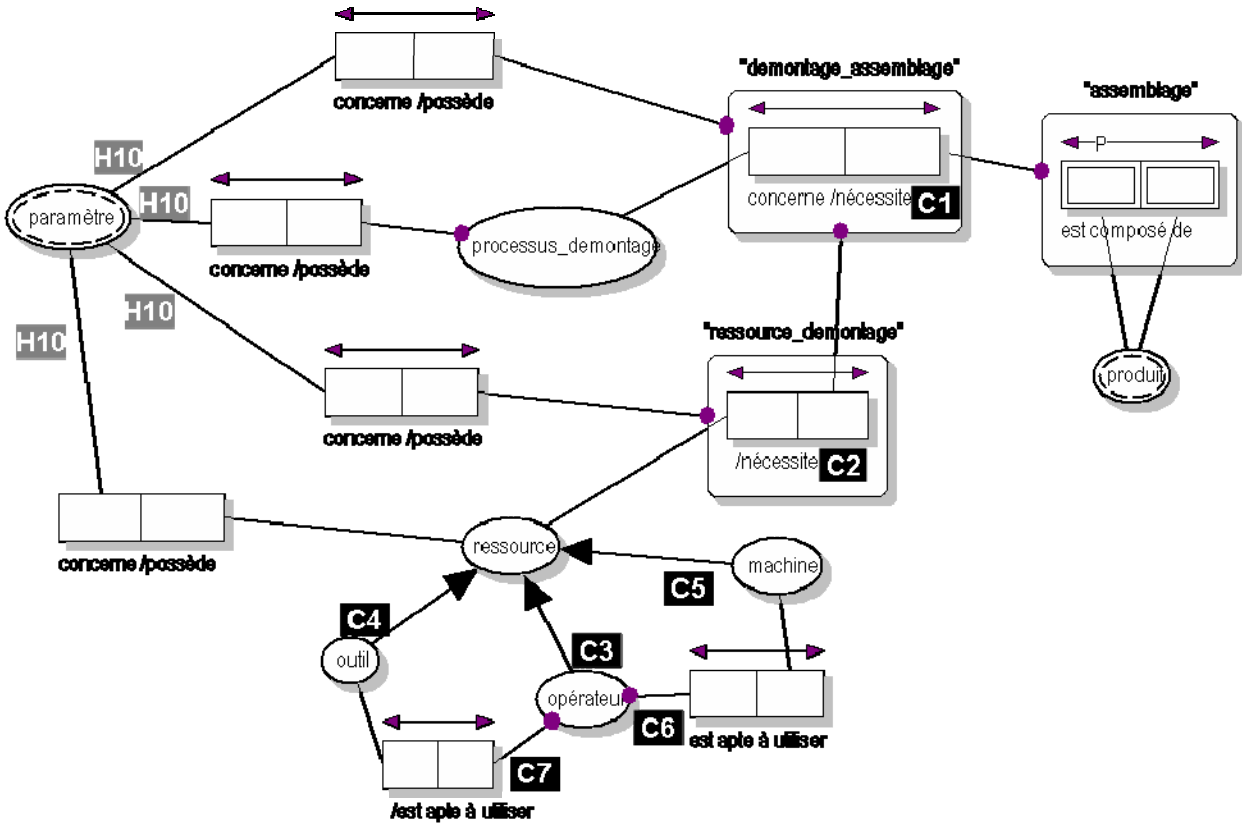


Figure 9 : Vue « démontabilité » du modèle « étendu » de produit.

3.3. Liens entre les vues du modèle « étendu »

Pour illustrer les liens entre les points de vue du modèle « étendu » proposé, nous avons considéré l’exemple d’un produit p_i constitué des composants p_{i1} , p_{ij} et p_{il} . Cette composition correspond à la vue « structurelle » de notre exemple.

Supposons que ce produit est constitué d’une matière (par exemple, le bois), est recouvert par une substance (par exemple, le vernis) et a nécessité à la fois un marquage et l’apposition d’une étiquette. Cela correspond à la vue « recyclabilité » de notre exemple. Supposons enfin

que la recyclabilité exige une opération de démontage qui elle-même requiert un opérateur apte à utiliser l'outil de démontage dédié. Ce travail étant réalisé sur une machine. Ceci définit la vue « démontabilité » de notre exemple.

La description de cet exemple correspond au schéma de la Figure 10 : les liens de composition (relation « composé-composant ») sont représentés ici par des flèches à traits pleins. Deux types de liens inter points de vue sont définis : entre les vues « structurelle » et « recyclabilité » (flèches à traits en pointillés), et entre les vues « structurelle » et « démontabilité » (flèches à segments courts séparés par des points). La complémentarité entre les vues de notre exemple de produit est donc assurée : le objet technique (le produit p_i) peut être perçu soit du point de vue de sa décomposition en sous éléments, soit du point de vue des substances et matières qu'il contient, soit du point de vue des paramètres liés à son démontage.

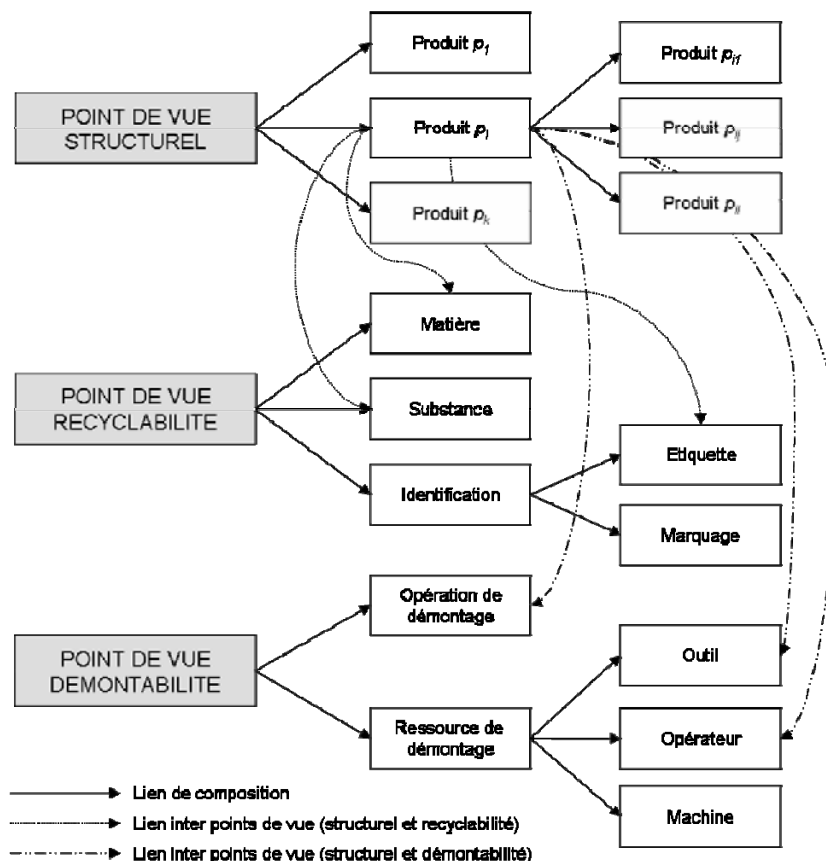


Figure 10 : Illustration de la complémentarité entre points de vue.

Bilan du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons proposé un modèle « étendu » de produit défini à partir des paramètres de « recyclabilité » extraites des éco-labels. Nous avons pour cela retenu la nécessité d'un langage à base d'ontologies afin de les transcrire dans un modèle en vue des analyses futures : le formalisme NIAM/ORM qui a été décrit au chapitre précédent (et dont nous avons par ailleurs justifié la pertinence pour notre contexte) a été utilisé.

Nous avons tout d'abord construit un échantillon représentatif d'éco-labels à partir d'un large panel accessible dans la littérature. Rappelons toutefois que notre choix s'est porté sur le cas concernant les PEE car il n'existe pas à notre connaissance d'exemples d'éco-labels ayant atteint un large niveau de diffusion dans le domaine de la conception mécanique qui est notre cible prioritaire. La caractérisation obtenue met en évidence trois thèmes principaux : l'identification des pièces et composants, l'homogénéité des matières et substances utilisées et la démontabilité du produit.

A partir de la description « normalisée » de chacun de ces thèmes (conformément à la procédure CSDP adoptée pour la construction des ontologies du domaine de la recyclabilité), nous avons par la suite traduit ces expressions verbales en modèle de données. Le modèle conceptuel ORM ainsi obtenu a été construit en partant de la vue « structurelle » du modèle multipoints de vue de Harani [Harani, 1997] dont nous pensons avoir montré la flexibilité et l'adaptabilité, notamment pour décrire plusieurs facettes d'un même objet technique tel que le produit. Les facettes spécifiques à notre étude sont la vue « recyclabilité » et la vue « démontabilité » dont nous avons établi la complémentarité avec la vue « structurelle » considérée comme point de départ de la modélisation. Ces trois vues définissent en définitive notre proposition d'un modèle « étendu » de produit. Celui-ci a été réalisé en utilisant VisioModeler, un des rares éditeurs accessibles permettant de manipuler le formalisme ORM. Une particularité de cet éditeur est qu'il permet également de générer un modèle physique de données (à partir du modèle conceptuel ORM). Ces données pourront ainsi être exploitées dans des analyses futures, notamment pour traiter le problème de la vérification de la satisfaction des critères des éco-labels, but principal de cette thèse.

Chapitre 4 **Modélisation des standards :** **du langage naturel aux contraintes**

Ce chapitre vise à proposer un modèle de connaissances représentant la résolution de notre problématique (i.e. vérification de la satisfaction des critères d'un éco-label par un produit en cours de conception). La modélisation est ici basée sur des éco-labels qui nous ont semblé les plus représentatifs de leurs domaines d'application respectifs : *Blue Angel* (20 critères d'éligibilité) pour les éco-labels nationaux, *Nordic Swan* (11 critères) pour les éco-labels internationaux et un standard *Siemens* (13 critères) pour le domaine industriel. Nous détaillerons plus particulièrement le cas *Blue Angel* qui comporte le plus de critères et dont la présentation des informations nous semble la plus complète (voir pour cela la description présentée au Chapitre 1).

Nous verrons que la vérification des exigences formulées par un éco-label peut déboucher sur une combinatoire qui peut être importante dans le cas des produits complexes. Dans une perspective d'aide (au concepteur), il est donc nécessaire qu'un système utilisant le modèle de connaissances proposé permette de gérer au mieux cette combinatoire. Le concepteur doit par exemple pouvoir savoir quel(s) paramètre(s) du produit (pour la définition proposée) remet en cause la satisfaction d'un critère.

Une première tentative de modélisation à l'aide de la logique propositionnelle a tout d'abord été réalisée. Celle-ci montre que la représentation des connaissances par cette méthode est possible pour la quasi-totalité des critères étudiés. La difficulté, pour les outils logiciels basés sur la logique pure, à proposer un mécanisme d'explication convivial (pour notamment identifier les paramètres d'un produit provoquant la non satisfaction d'un critère) constitue un problème par rapport à nos objectifs. Une méthode alternative a donc également été mise en œuvre : la seconde tentative de modélisation qui a été réalisée est quant à elle basée sur les techniques de propagation de contraintes. La capacité des approches par contraintes à proposer des mécanismes conviviaux d'explications a semblé conforter ce choix de modélisation.

Ce chapitre est structuré de la manière suivante : nous commencerons par présenter quelques définitions. Nous décrirons ensuite la modélisation de *Blue Angel* (cas traité dans ce chapitre). Nous considérerons tout d'abord la représentation de la résolution de notre

problème à partir de la logique propositionnelle, puis la représentation par contraintes. Dans chacun de ces cas, nous précisons les concepts manipulés, et nous donnerons une description succincte des critères modélisés (pour l'exemple traité dans ce chapitre). Pour les deux autres standards considérés (*Nordic Swan* et *Siemens*) nous proposerons un bref résumé des résultats obtenus.

1. Définitions

1.1. Le concept de « produit »

Il désigne l'artefact en cours de conception. On peut distinguer deux types : (1) le produit complet lui-même, (2) l'un de ses constituants (qui peut être un sous-ensemble, un module, un boîtier, une pièce élémentaire quelconque, etc.). Ainsi, dans l'exemple de nomenclature illustrée par la Figure 11, P_0 est un produit complet formé par les constituants élémentaires tels que par exemple P_1 et P_2 (au premier niveau de la nomenclature), P_{21} (au second niveau de la nomenclature).

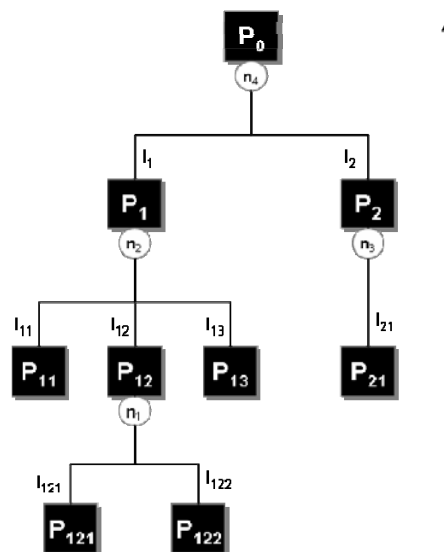


Figure 11 : Exemple de nomenclature-produit.

1.2. Le concept de « matière »

Il désigne l'objet technique correspondant au matériau qui constitue un produit. En nous référant à l'état de l'art décrit au Chapitre 3, nous considérerons une classification reconnue dans le domaine des matières (cf. [Ashby et Cebon, 2003]). Cette classification indique qu'une matière appartient à une famille de matières qui peut être celle des métaux, des polymères (i.e.

matières plastiques), des céramiques, des mousses, des matières composites, ou des matières naturelles (telles que le bois). Une famille de matière peut elle-même comporter des classes de matières : par exemple, la famille des métaux contient le fer, l'aluminium, etc., la famille des polymères contient le PA (*Polyamide*) ou le PVC (*Chlorure de Polyvinyle*). L'intérêt de ces terminologies pour notre étude est justifié par la nécessité de rester en cohérence avec les tables de compatibilité entre matières. Telles que fournies dans la littérature, ces tables portent sur des « classes de matières », au sens de la classification qui vient d'être décrite.

1.3. Le concept de « substance »

Il désigne l'objet technique correspondant à des solutions (en général liquides) utilisées lors de la fabrication d'un produit. Parmi les multiples usages rencontrés, on note par exemple des solutions utilisées pour recouvrir un produit (par exemple la peinture, le vernis), celles utilisées comme adhésifs (par exemple la colle), ou d'autres utilisées pour écrire sur des étiquettes (par l'encre). Dans les éco-labels (et plus généralement dans les réglementations sur l'environnement), ces solutions sont sujettes à une utilisation contrôlée. Il s'agit donc dans notre étude de pouvoir les identifier à partir des standards analysés, puis les intégrer dans un modèle produit.

1.4. Les concepts de « nœud » et de « lien »

Ces concepts permettent de définir la nomenclature du produit, notamment la relation « composé-composant » qui forme un « nœud ». Dans cette relation, le « composé » constitue le produit parent du nœud tandis que le « composant » représente un des produits fils. Le produit parent est relié à ses fils par des « liens ». Nous avons vu précédemment qu'un lien peut traduire deux types de relation : une relation de type « logique » ou une relation de type « physique » (qui concerne la relation « composé-composant »). Nous ne nous intéressons dans ce chapitre qu'à ce dernier type de relation.

Dans l'exemple de la Figure 11, on a par exemple défini un nœud (n_4) entre le « composé » P_0 et ses « composants » P_1 et P_2 . Deux liens permettent donc de particulariser la relation entre le « composé » et ses « composants » : un lien (l_1) entre P_0 et P_1 et un lien (l_2) entre P_0 et P_2 . Un cas d'utilisation dans notre contexte peut être décrit de la manière suivante : pour vérifier la compatibilité entre des matières qui constituent des pièces connexes, on pourrait considérer des composants d'un produit appartenant au même nœud (voir modèle de Harani).

Or, la notion de compatibilité est définie à partir des tables, autrement dit en considérant des couples de classes de matières. Il nous semble par conséquent difficile de positionner la compatibilité dans un nœud qui peut regrouper plus de deux constituants (le constituant père et ses fils). Le lien nous paraît donc être un choix plus approprié comme nous le verrons dans la modélisation des règles.

2. Modélisation à l'aide de la logique propositionnelle

2.1. Principe de la modélisation

La description de chaque critère est présentée sous forme d'un tableau qui comporte successivement :

- une traduction du critère considéré (à partir de sa version originale en anglais),
- si nécessaire, des compléments d'information sur l'interprétation du critère,
- la modélisation (en langage logique, sous forme de clauses) des contraintes que doivent vérifier les paramètres d'un produit,
- enfin, la formalisation de la règle associée au critère considéré.

Chacune de ces étapes est brièvement décrite dans la suite.

2.1.1. Traduction d'un critère

Elle est présentée dans une ligne à deux colonnes : dans la première colonne, on rappelle la référence du critère telle que définie dans sa version originale (par exemple A1, B2...) suivie d'une traduction de l'intitulé du critère. Dans la seconde colonne, on mentionne les parties du produit concernées par le critère (par exemple boîtier, châssis, module électrique, produit complet).

Les traductions que nous proposons comprennent à la fois, (i) la transcription linguistique (de l'anglais au français) de l'intitulé d'origine, mais également (ii) l'explicitation de certaines caractéristiques du produit (telles que nous les avons définies au Chapitre 3). Par exemple, dans le cas concernant l'incompatibilité entre matières (voir critère A1), nous

intégrons explicitement le fait que cela doit être vérifié pour des produits connexes : ceci nous amène à introduire la notion de lien qui n'est pas spécifiée dans la version originale du critère.

D'un point de vue modélisation des connaissances, ce mode de traduction des critères nous semble être un bon moyen pour éliciter les connaissances contenues dans un éco-label, en proposant une formulation plus proche de la définition des caractéristiques d'un produit telles que définies au Chapitre 3. Notons que cela permet également de mettre en exergue certaines insuffisances des outils normatifs tels que les standards et normes : la pertinence d'une contrainte édictée n'est en effet pas toujours évidente lorsque l'on veut formaliser les paramètres du domaine considéré (dans notre cas la conception de produit) qui doivent la vérifier.

2.1.2. Compléments d'information sur l'interprétation d'un critère

Nous reprenons ici un principe utilisé dans le formulaire *Blue Angel* (dont la description est détaillée au Chapitre 1). Compte tenu de la méthode de traduction des critères décrite précédemment, qui prend en compte certains paramètres du produit, la formulation résultante est la plupart du temps non ambiguë. Dans certains cas, il peut toutefois être nécessaire de lever des ambiguïtés d'interprétation : à la suite de la traduction du critère, nous ajoutons pour cela une ligne supplémentaire à une colonne, pour préciser le sens de certains termes (voir par exemple le critère A1).

2.1.3. Modélisation

Cette ligne à deux colonnes permet de décrire les contraintes que doivent vérifier les paramètres du produit à l'aide la logique propositionnelle. Comme nous le détaillons au paragraphe suivant, la vérification d'un critère met en jeu une relation entre un objet technique, un de ses attributs et éventuellement une valeur d'instance de cet attribut. Cette relation est exprimée par une clause dont la valeur de vérité permet de conclure sur la vérification du critère considéré.

Étant donné qu'un critère peut porter sur une partie seulement du produit (cf. seconde colonne de la ligne de traduction d'un critère), il peut être nécessaire de définir des relations supplémentaires qui déterminent les caractéristiques du produit dépendant spécifiquement dudit critère. Nous décrirons donc également dans le paragraphe suivant comment les clauses

représentant la contrainte exprimée par un critère sont organisées. Nous indiquerons en outre (dans la colonne de gauche) la dénomination d'une clause (affectée arbitrairement, par exemple F1), tandis que la colonne de droite figure l'expression logique de cette clause.

2.1.4. *Forme logique de la règle associée à un critère*

Elle est exprimée sous la forme SI <condition> ALORS <conclusion>. Ce qui stipule dans notre contexte que certaines caractéristiques du produit doivent satisfaire la partie <conclusion> dans le cas où d'autres caractéristiques vérifient la partie <condition>. Par exemple, le critère fictif « *tout module électrique doit être identifiable* » indique que l'identification d'un produit doit être satisfaite si celui-ci est de type « module électrique ».

La description de la modélisation des critères *Blue Angel*, basée sur les principes rappelés plus haut est alors présentée dans la partie suivante.

2.2. *Description de la modélisation*

Nous détaillerons ici quelques critères et leurs traductions respectives en règles logiques. La suite de cette modélisation peut être consultée en Annexe 1.

A1. Tous les composants d'un même lien et constitués de matières incompatibles doivent pouvoir être « facilement » séparables (critère obligatoire)		Boîtier, châssis, module électrique
Il est précisé qu'une séparation « facile » concerne par exemple la présence de points de séparation prédéterminés.		
F1	composition_lien (l, p1) // le lien l contient le produit p1	
F1'	composition_lien (l, p2)	
F2	matiere_produit (p1, m1) // le produit p1 est de constitué de la matière m1	
F2'	matiere_produit (p2, m2)	
F3	classe_matiere (m1, c1) // la matière m1 appartient à la classe de matière c1	
F3'	classe_matiere (m2, c2)	
F4	incompatible_matiere (c1, c2) // les classes de matière c1 et c2 sont incompatibles	
F5	type_produit (p1, « boîtier ») // le produit p1 est un boîtier	
F5'	type_produit (p2, « boîtier »)	

F6	type_produit (p1, « module électrique »)
F6'	type_produit (p2, « module électrique »)
F7	type_produit (p1, « châssis »)
F7'	type_produit (p2, « châssis »)
F8	separation_lien (l, « facile ») // le lien l est « facilement » séparable
R1	Si ((F1 et F1') et (F2 et F2') et (F3 et F3') et F4 et (F5 ou F5' ou F6 ou F6' ou F7 ou F7')) Alors F8

Ce critère est de type obligatoire et concerne plus particulièrement les produits de type « boîtier », « module électrique », ou « châssis » (cf. F5, F6, et F7 pour la représentation des clauses correspondant à la détermination d'un type de produit). Rappelons que l'objectif est ici de vérifier la compatibilité entre matières. Nous considérons pour cela que la vérification doit porter sur des constituants connexes. D'après les terminologies rappelées au début de ce chapitre, celles-ci doivent appartenir à un même nœud. De plus, en référence à la remarque formulée sur l'utilisation des concepts « nœud » et « lien », la compatibilité est ici considérée entre couples de produits (constituants d'un produit complet) appartenant à un même lien. Pour cela, on définit alors un lien (l) composé des produits p1 et p1 (voir F1 et F1').

La règle résultante (R1) peut être lue de la manière suivante : si deux produits appartenant à un même lien (F1 et F1') sont constitués de matières (F2 et F2') dont les classes (F3 et F3') sont incompatibles (F4), chacun de ces produits étant de type « boîtier » ou « module électrique » ou « châssis » (F5 ou F5' ou F6 ou F6' ou F7 ou F7') , alors ils doivent être « facilement » séparables (F8).

A2. Tout module électrique doit pouvoir être identifiable et extractible (critère obligatoire)		Le système complet, incluant les lampes
F6	type_produit (p, « module électrique »)	
F9	extraction_produit (p, .) // le produit p est extractible	
F10	identification_produit (p, .) // le produit p est identifiable	
R2	Si F6 Alors (F9 et F10)	

Ce critère est également de type obligatoire et ne concerne pas une caractéristique particulière du produit. Notons que l'objectif visé ici est de faciliter l'extraction des modules électriques, sources d'impact environnemental (notamment en raison de leur contenance de métaux lourds) afin d'éviter toute contamination des composants réutilisables. Une identification visible de ce type de composant est par conséquent nécessaire.

La règle résultante (R2) peut être lue de la manière suivante : si un produit est de type « module électrique » (F5), alors il doit être à la fois extractible et indentifiable (F9 et F10).

Ce critère (A2) doit être vérifié quels que soient les modes d'extraction et d'identification utilisés, ce qui est représenté par le « . » qui remplace le deuxième argument des prédicats relatifs aux modes d'identification et d'extraction. Précisons toutefois que dans certains autres cas, le mode d'extraction peut être imposé : par exemple « utilisation d'un outil standard » (comme dans le critère A4 présenté en Annexe 1).

A3. Tout lien « à séparer » doit pouvoir être « facilement » identifiable (critère obligatoire)		Composants du boîtier, châssis
F1	compose_lien (1, p)	
F5	type_produit (p, « boîtier »)	
F7	type_produit (p, « châssis »)	
F11	type_lien (1, « à séparer »)	
F12	identification_lien (1, « facile ») // le lien est « facilement » identifiable	
R3	Si (F1 et (F5 ou F7) et (F11)) Alors F12	

Ce critère est lui aussi de type obligatoire et concerne plus particulièrement les composants du boîtier ou le châssis du produit (clauses F5 et F7). L'objectif est ici de faciliter le démontage par identification des liens qui concernent les produits que l'on souhaite séparer (i.e. extraire de la structure), plus particulièrement ceux qui sont de type « boîtier » ou « châssis ».

La compréhension des modélisations des critères suivants (voir Annexe 1) ne nécessite plus de commentaires particuliers. Soulignons toutefois que certains critères n'ont pu être

transcrits dans la forme logique considérée. En effet, ces derniers nous ont semblé s'éloigner de la description de notre modèle « enrichi » de produit, les informations qu'ils fournissent n'étant pas directement concernées par les caractéristiques d'un produit. C'est notamment le cas des critères A10, A12 et B7 mentionnés dans la suite et que nous avons choisi de vérifier à partir d'une question posée au concepteur (conformément au principe de la démarche proposée tel que décrit dans le chapitre introductif).

	A10. L'espace de travail (support des produits pendant le démontage) doit être constamment maintenu (critère non obligatoire)	Le système complet
R10	Modélisé sous forme de QUESTION/REPONSE	

	A12. Le constructeur doit avoir réalisé des tests de désassemblage qui respectent les critères A1 - A11 et en établir un rapport technique mentionnant les points faibles (critère obligatoire)	Le système complet
R12	Modélisé sous forme de QUESTION/REPONSE	

	B7. La sélection des matières utilisées doit avoir été réalisée en concordance avec les critères B.1 - B.5, et consignée dans un rapport écrit (critère obligatoire)	Le système complet
R19	Modélisé sous forme de QUESTION/REPONSE	

2.3. Bilan

Pour l'exemple du label *Blue Angel* que nous venons de décrire, 3 critères (sur les 20 considérés) n'ont pu être transcrits sous forme de règles logiques, les informations qu'ils contiennent nous semblant éloignées des caractéristique d'un produit tels que définies dans notre modèle « enrichi » (défini au chapitre précédent). Pour les deux autres labels considérés dans l'étude, nous nous contenterons de rappeler ici les principaux résultats.

Sur les 13 critères du standard *Siemens*, 10 ont été transcrits en règles proches de celles de *Blue Angel* sans difficultés particulières. Pour les mêmes raisons que dans le cas précédent, 3

critères n'ont pas été transcrits : le premier stipule que le concepteur doit rédiger un rapport contenant des instructions sur le démontage et la destruction du produit, conformément à un référentiel interne à *Siemens*, ce qui ne nous semble pas en rapport direct avec la description d'un produit. Les deux autres portent, l'une sur la minimisation du nombre et de la variété des liens, et l'autre sur la minimisation du nombre d'étapes nécessaires au démontage. Leurs transcriptions respectives sont difficiles à réaliser car aucune information n'est fournie pour évaluer les seuils minimums visés. Notons toutefois que l'optimisation des étapes de désassemblage est par exemple traitée dans le cadre des études relatives à la logistique inverse qui concerne un point de la « roue stratégique » de l'éco-conception situé est en dehors de notre contexte d'étude.

Les 13 critères du label *Nordic Swan* ont tous été modélisés sous forme de règles. Un cas particulier mérite toutefois un commentaire : il s'agit du critère 2 qui stipule que le personnel affecté au démantèlement du produit doit en avoir la compétence requise. Cette information peut en effet, *a priori*, être considérée comme étant éloignée de la description d'un produit. Nous l'avons toutefois assimilée à une « ressource » nécessaire au démontage d'un produit, au même titre que les outils (pour lesquels un critère *Blue Angel* stipule qu'ils doivent être « standards »).

Au final, on s'aperçoit que la logique propositionnelle permet de modéliser une grande partie des informations contenues dans les éco-labels retenus. Par rapport à nos objectifs toutefois, eu égard à la nécessité de pouvoir récupérer des données déjà renseignés dans des systèmes existants (utilisés en conception), ce choix de représentation de la résolution de notre problématique nous paraît inadapté. Il peut en effet être difficile de faire interagir un système basé sur la logique pure avec une base de données qui est le cadre idéal pour rapidement extraire certains paramètres déjà renseignés dans les outils de conception existants. Un autre problème est posé du point de vue de l'interaction qui est une exigence incontournable dans une optique d'aide à la décision. Or il n'existe pas à notre connaissance un outil basé sur a logique pure permettant de fournir de manière interprétable (par le concepteur) les causes d'une incohérence. La « trace » proposée par de tels outils (comme PROLOG par exemple) représente le chaînage des règles élémentaires mis en œuvre dans le raisonnement ; un tel résultat ne nous paraît pas suffisamment intuitif pour aider le concepteur.

3. Modélisation sous forme de contraintes

La famille dite des problèmes de satisfaction de contraintes revêt un caractère important dans le cadre de l'aide à la décision. Le concept de contrainte peut ainsi être considéré comme un fragment de connaissance sur un espace de possibilités [Dechter, 2003] permettant une modélisation flexible très proche du problème initial considéré. Dans une optique de prise de décision, une telle représentation permet par exemple d'enrichir ou au contraire d'appauvrir le problème considéré en ajoutant ou en supprimant une contrainte lors de la résolution. Ce qui peut notamment être intéressant dans un contexte tel que le nôtre où les choix des paramètres d'un produit en cours de conception doivent être confrontés à la vérification des contraintes de recyclabilité. Cette vérification pouvant se faire au fur et à mesure que les paramètres du produit sont définis ou au terme d'une définition complète du produit.

Une discussion plus détaillée sur l'intérêt, pour l'aide à la décision, de cette approche de modélisation est présentée dans la littérature (voir par exemple [Dechter, 2003] ou [Tsang, 1993]). Nous nous bornons dans la suite à présenter quelques définitions.

3.1. Définitions

Un problème de satisfaction de contraintes ou CSP (*Constraint Satisfaction Problem*) peut être formellement défini par la donnée d'un triplet (X, D, C) [Montanari, 1974] :

$X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ est l'ensemble des variables du problème.

$D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ est l'ensemble des domaines tels que chaque D_i (pour $i = 1, \dots, n$) est l'ensemble des valeurs que peut prendre chaque variable X_i .

$C = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$ est l'ensemble des contraintes où chaque contrainte C_j (pour $j = 1, \dots, k$) est une relation entre certaines variables de X , qui restreint les valeurs qu'elles peuvent prendre simultanément.

3.1.1. Typologie des variables

Une typologie des variables d'un CSP peut être décrite en distinguant des variables dites symboliques des variables numériques :

- les variables symboliques ont pour domaines des listes de symboles ;

- les variables numériques peuvent être réparties en deux sous groupes :
 - des variables discrètes dont les domaines peuvent être finis dénombrables ou infinis dénombrables, correspondant respectivement à des listes d'entiers ou de réels, ou à des intervalles de valeurs entières ;
 - des variables continues dont les domaines sont infinis non dénombrables, correspondant à des intervalles réels.

Dans notre cas, toutes les variables sont discrètes et finies, définies comme des listes de symboles. Les domaines *a priori* continus, correspondant par exemple à « masse > 25g » ou « nombre d'outils > 1 » ont été discrétisés. Nous avons dans ce cas de figure créé deux modalités : ainsi, pour reprendre l'exemple de la masse, nous avons défini une modalité correspondant à « masse > 25g » et une autre correspondant à « masse ≤ 25g ». Il est en effet montré dans [Faltings, 1994] qu'il est possible de discrétiser une variable numérique en partitionnant sa plage de valeurs admissibles en des intervalles auxquels on associe une « étiquette » ou valeur symbolique.

3.1.2. Typologie des contraintes

Les contraintes d'un CSP peuvent appartenir à différents types :

- des tables de compatibilité i.e. des listes de combinaisons des valeurs admissibles,
- des expressions logiques,
- des expressions mathématiques i.e. des fonctions numériques de n variables ($n \geq 1$).

D'après la typologie des variables de notre problème, les expressions mathématiques ne font pas partie de notre modèle.

Une illustration des définitions que nous venons de proposer est décrite dans la partie suivante à l'aide d'un exemple fictif. Notons que la nature des domaines ainsi que des contraintes de notre problème, tel que nous venons de le préciser, nous permet de considérer des techniques de résolutions spécifiques que nous décrirons plus loin, basé sur des techniques d'énumération.

3.1.3. Exemple de représentation d'un CSP

Reprenons l'exemple de la nomenclature de la Figure 11. On peut définir un CSP sur cet exemple en considérant quatre domaines : le domaine des classes de matières (comprenant des matières plastiques telles que le PVC ou l'ABS, de l'acier, du zinc), le domaine des produits (formé par les constituants du produit complet P_0 de la Figure 11), le domaine des types de produits (constitué des boîtiers, des châssis, des modules électriques, des parties mécaniques, et des autres types de pièces différentes des précédentes) et le domaine des modes de démontage d'un produit (composé des démontages avec outil spécial, avec outil standard, ou sans outil).

On définit ensuite trois contraintes entre les variables « classe de matière », « produit », et « type de produit » :

- la contrainte C1 définie entre les « classes de matière » et les « produits » spécifie que P_2 est constitué de PVC, que P_{12} , P_{121} et P_{122} sont constitués d'acier, etc. ;
- la contrainte C2 définie entre les « produits » et les « types de produit » spécifie que P_2 est un boîtier et que P_{12} est un châssis ;
- et enfin la contrainte C3 définie entre les « produits » et les « modes de démontage » spécifie que P_2 nécessite un outil spécial pour le démontage, tandis que les autres constituants peuvent être manuellement démontés.

Le CSP ainsi défini peut être représenté par un diagramme sagittal tel que celui de la Figure 12 où une partie seulement des classes de matières et des produits est représentée.

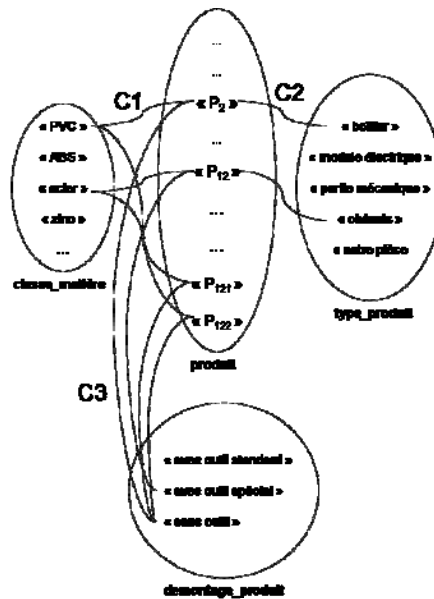


Figure 12 : Exemple de représentation d'un CSP.

3.1.4. Solution d'un CSP

Une *solution* d'un CSP est une instanciation de toutes les variables (i.e. une *affectation totale*) qui ne viole aucune contrainte ; cela correspond à un problème de *satisfiabilité*.

Une *solution optimale* est une solution qui minimise ou maximise un certain critère, ce qui correspond à un problème d'*optimisation*.

Comme nous l'avons précédemment souligné, notre contexte est défini par un problème de satisfiabilité : nous cherchons seulement à vérifier la satisfaction de certaines contraintes.

3.1.5. Techniques de résolution

Une première approche de résolution d'un CSP consiste à tester systématiquement toutes les valeurs possibles de chacune des variables du problème (conformément au principe du « *génère et teste* »). Comme on peut s'en douter, cette technique ne peut naturellement pas être envisagée pour des problèmes de grande taille, comme cela peut être le cas avec certains produits complexes. La complexité de l'algorithme associé est en effet exponentielle : il est trivial que l'ensemble de toutes les combinaisons des valeurs admissibles correspond au produit scalaire des variables du problème.

Une alternative est fournie par le principe de filtrage qui permet notamment d'anticiper la détection des incohérences : toutes les variables du problème sont pour cela localement

testées afin de détecter et d'éliminer les valeurs qui ne peuvent être solutions. Cela correspond à définir un CSP « équivalent » au problème initial, sur des domaines réduits, mais dont on sait que l'ensemble des solutions, s'il en existe, est préservé.

Étant donnée la nature des contraintes de notre problème, la technique qui nous intéresse plus particulièrement est l'arc-cohérence [Mackworth, 1977] définie dans la suite.

a) Définitions et algorithmes de filtrage

Étant donné un CSP (X, D, P) défini comme ci-dessus, une variable X_i est arc-cohérente avec une variable X_j si et seulement si pour toute valeur a_i de D_i , il existe une valeur a_j de D_j telle que le couple (a_i, a_j) satisfait la contrainte binaire entre X_i et X_j . L'algorithme permettant de rendre une variable X_i arc-cohérente avec une variable X_j est décrit ci-après.

```
REVISE( $X_i, X_j$ )  
// En entrée : une contrainte binaire entre  $X_i$  et  $X_j$  de domaines  $D_i$  et  $D_j$   
// En sortie :  $D_i$ , tel que  $X_i$  est arc-cohérent avec  $X_j$   
Pour toute valeur  $a_i$  du domaine de  $X_i$  Faire  
    Si il n'existe pas de valeurs  $a_j$  dans le domaine de  $X_j$   
        pour laquelle l'affectation  $(a_i, a_j)$  est cohérente  
        Alors éliminer  $a_i$  du domaine de  $D_i$   
Fin Si  
Fin Pour
```

Notons que cet algorithme est directionnel, car n'agissant que sur le domaine d'une seule des variables formant une contrainte binaire (i.e. le domaine de la variable correspondant à l'origine de l'arc « révisé »).

Un CSP est arc-cohérent si et seulement si pour toute paire de variables $\{X_i, X_j\}$, X_i est arc-cohérente avec X_j et inversement, X_j est arc-cohérente avec X_i .

Un premier algorithme proposé par Markworth, l'algorithme AC-1, consistait à appliquer la fonction `REVISE` précédemment définie, successivement aux arcs (X_i, X_j) et (X_j, X_i) participant à une contrainte binaire. La complexité de cet algorithme est de $O(nkd^3)$ où k est le nombre de contraintes binaires, n le nombre de variables, et d la cardinalité maximale des domaines.

Un problème majeur posé par cet algorithme est dû à la reconduite du filtrage sur toutes les variables du CSP. Une première amélioration proposée par l'auteur, l'AC-2, a consisté à revenir à l'étape précédente chaque fois qu'un domaine est modifié. Nous nous bornerons à

affirmer que la première véritable amélioration reconnue et citée dans la littérature est l'AC-3, algorithme basé sur la construction d'une file d'attente contenant les arcs à « réviser ».

Le principe de cet algorithme, de complexité $O(kd^3)$, peut être décrit de la manière suivante : on définit tout d'abord une file d'attente avec tous les arcs formés par les variables participant à une contrainte binaire. Chaque arc « révisé » est ensuite retiré de la file, et éventuellement réintroduit en queue de file si le domaine de la deuxième variable formant l'arc est réduit. Ce processus est réitéré tant que la file n'est pas vide. Cette brève description correspond à l'algorithme présenté ci-après.

```

AC-3 (CSP)
// En entrée : un réseau de contraintes d'un CSP  $(X, D, P)$ 
// En sortie : un CSP équivalent au problème initial, avec des domaines réduits
file  $\leftarrow \emptyset$ 
Pour toute paire  $\{X_i, X_j\}$  participant à une contrainte binaire Faire
    file  $\leftarrow$  file  $\cup \{(X_i, X_j), (X_j, X_i)\}$ 
Fin Pour
Tant que file  $\neq \emptyset$  Faire
    // Sélectionner et supprimer un arc  $(X_i, X_j)$  de la file
    file  $\leftarrow$  file  $\setminus \{(X_i, X_j)\}$ 
    REVISE( $X_i, X_j$ )
    si REVISE( $X_i, X_j$ ) provoque la réduction de  $D_i$  Alors
        file  $\leftarrow$  file  $\cup \{(X_k, X_i), k \neq i, k \neq j\}$ 
    Fin Si
Fin Tant que

```

Parmi les algorithmes de filtrage permettant d'améliorer l'AC-3, on peut citer l'AC-4 qui a une complexité $O(kd^2)$ [Mohr et Hendersen, 1986]. Cet algorithme exploite, non pas la « révision » successive des arcs formés par des paires de variables participant à une contrainte binaire, mais plutôt la structure organique du graphe. Pour cela, étant données deux variables X_i et X_j participant à une contrainte binaire, on associe à chaque valeur a_i de X_i son *support* dans X_j , i.e. l'ensemble des valeurs a_j de X_j cohérentes avec a_i .

Le principe de cet algorithme stipule qu'une valeur a_i est supprimée du domaine de X_i si un de ses supports est vide. Pendant son déroulement, l'algorithme que nous présentons dans la suite utilise :

- une liste L constituée des valeurs courantes a_i sans support dans X_j , un ensemble M qui mémorise les éléments retirés de cette liste ;
- un compteur *compt* des valeurs « supportées » par a_i dans X_j ;

- un tableau $S(X_j, a_j)$ des valeurs des autres variables X_j ayant un support non vide.

```

AC-4 (CSP)
// En entrée : un réseau de contraintes d'un CSP (X, D, P)
// En sortie : un CSP équivalent au problème initial, avec des domaines réduits
// Initialisations
M ← ∅
Pour toute variable Xi participant à une contrainte binaire, on initialise :
- les supports de ses valeurs S(Xi, ai)
- leurs compteurs respectifs compt(Xi, ai, Xj)
Pour tous les compteurs Faire
    // si une valeur de Xi n'a pas de support dans Xj
    // l'ajouter à la liste des éléments de L
    Si un compteur compt(Xi, ai, Xj) = 0 Alors
        Ajouter la valeur ai de Xi notée <Xi, ai>, dans L
    Fin Si
Fin Pour
Tant que L est non vide Faire
    // Choisir puis retirer un élément <Xi, ai> de L et l'ajouter à M
    L ← L \ {<Xi, ai>}
    M ← M ∪ {<Xi, ai>}
    Pour tout <Xj, aj> dans S(Xi, ai) Faire
        // Décrementer le compteur compt(Xj, aj, Xi)
        compt(Xj, aj, Xi) ← compt(Xj, aj, Xi) - 1
        // mettre à jour la liste L
        Si compt() = 0 Alors
            L ← L ∪ {<Xj, aj>}
        Fin Si
    Fin Pour
Fin Tant que

```

Des algorithmes utilisant d'autres techniques de filtrage, plus performants que l'AC-3 et l'AC-4 que nous venons de présenter, ont été proposés dans la littérature. Notons que les complexités théoriques sont définies pour les cas les plus défavorables qui sont toutefois rarement rencontrées dans des cas réels. Un algorithme théoriquement moins performant qu'un autre pouvant ainsi s'avérer meilleur dans la pratique.

Pour notre problème, en nous basant sur des exemples réussis d'implémentation, et compte tenu de la nature de nos contraintes, les deux algorithmes que nous venons de décrire peuvent suffire. Nous en proposons dans la suite une petite illustration.

b) Définitions et algorithmes de filtrage

Considérons un problème formé de trois variables : « référence », « mode de liaison » et « mode d'identification ». Nous définissons sur ces trois variables deux contraintes pour indiquer que chaque mode d'identification ou de liaison doit correspondre à une référence. Les combinaisons des valeurs possibles sont données par la Figure 13 où sont en outre représentées les domaines respectifs de ces variables.

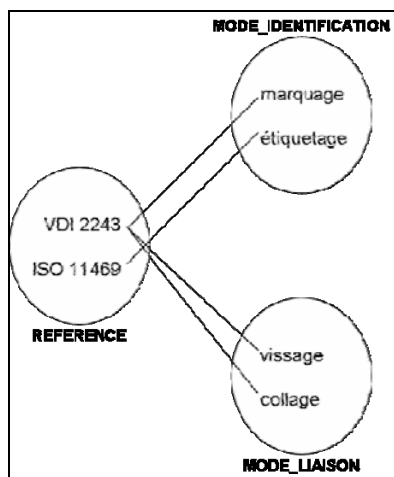


Figure 13 : Exemple de CSP pour illustrer les algorithmes AC-3 et AC-4.

L'exécution des algorithmes AC-3 et AC-4 sur le CSP ainsi défini est décrite dans la suite.

Pour l'algorithme AC-3, les deux premières étapes, à savoir la « révision » des deux premiers arcs de la file, ne modifient aucun domaine : en effet, toute référence concerne au moins un mode d'identification, et inversement, tout mode d'identification correspond à au moins une référence.

En revanche, à l'étape 3, la « révision » de l'arc <référence, mode de liaison> entraîne la suppression de la valeur « ISO 11469 » du domaine des références, car elle ne concerne aucun mode de liaison. Cela provoque la réintroduction de l'arc <mode d'identification, référence> dans la file car la variable « référence » (dont le domaine vient d'être réduit) participe à une contrainte binaire avec la variable « mode d'identification ».

A l'étape 4, lorsque l'arc suivant de la file (i.e. <mode de liaison, référence>) est « révisé », on n'observe aucune modification de domaine car tout mode de liaison correspond désormais à au moins une référence (le « vissage » et le « collage » sont en correspondance avec « VDI 2243 »).

A l'étape 5, lorsqu'on « révisé » de nouveau l'arc <mode d'identification, référence> (réintroduite dans la file à l'étape 3), on supprime la valeur « étiquetage » du domaine des modes d'identification car elle ne correspond plus à aucune référence : la seule valeur cohérente i.e. « ISO 11469 » ayant été précédemment supprimée. La modification du domaine des modes d'identification entraîne la réintroduction de l'arc <référence, mode d'identification> dans la file.

Enfin, à l'étape 6, la « révision » du seul arc de la file (celui qui a été introduit à l'étape 5) ne provoque aucune modification de domaine. La file étant à présent vide, l'algorithme s'arrête et on peut consulter les valeurs admissibles dans la dernière ligne de la colonne droite du Tableau 7.

étape	files	domaines des variables
0	{ (REF, MID) , (MID, REF) , (REF, MLI) , (MLI, REF) }	D(REF)={VDI 2243, ISO 11469} D(MID)={marquage, étiquetage} D(MLI)={vissage, collage}
1	{ (REF, MID) , (MID, REF) , (REF, MLI) , (MLI, REF) }	D(REF)={VDI 2243, ISO 11469} D(MID)={marquage, étiquetage} D(MLI)={vissage, collage}
2	{ (REF, REF) , (REF, MLI) , (MLI, REF) }	D(REF)={VDI 2243, ISO 11469} D(MID)={marquage, étiquetage} D(MLI)={vissage, collage}
3	{ (REF, MLI) , (MLI, REF) , (MID, REF) }	D(REF)={VDI 2243, ISO 11469} D(MID)={marquage, étiquetage} D(MLI)={vissage, collage}
4	{ (REF, REF) , (MID, REF) }	D(REF)={VDI 2243} D(MID)={marquage, étiquetage} D(MLI)={vissage, collage}
5	{ (REF, REF) , (REF, MID) }	D(REF)={VDI 2243} D(MID)={marquage, étiquetage} D(MLI)={vissage, collage}
6	{ (REF, MID) }	D(REF)={VDI 2243} D(MID)={marquage} D(MLI)={vissage, collage}

Tableau 7 : Illustration de l'exécution de l'algorithme AC-3.

Pour l'algorithme AC-4 (cf. Tableau 8), on commence par initialiser les supports des valeurs de toutes les variables, avec leurs compteurs respectifs. Notons ici qu'il n'est pas nécessaire de mentionner le support d'une variable dans le domaine d'une autre variable avec laquelle elle n'est pas en relation. Ce travail étant effectué, on place dans la liste à évaluer, L, les valeurs qui ont un support vide (on est certain qu'elles ne participent à aucune solution). C'est le cas de la référence « ISO 11469 » qui ne correspond à aucun mode de liaison.

A la première étape, on retire la première valeur de la liste des éléments sans support du domaine de la variable correspondante : ici, la valeur « ISO 11469 » de la variable « référence » notée <REF, ISO>, est retirée du domaine des références puis ajoutée à la liste des valeurs retirées i.e. M. Ce retrait entraîne la mise à jour du compteur des variables ayant la valeur retirée (i.e. « ISO 11469 ») dans leur support. C'est le cas de la valeur « étiquetage » de la variable « mode

d'identification » : on a bien en effet $S(MID, \text{étiquetage}) = \{ \langle REF, ISO \rangle \}$. Par suite, le compteur associé, i.e. $compt(MID, \text{étiquetage}, REF)$ est décrémenté d'une unité. Après à cette mise à jour, le support de la valeur « étiquetage » dans la variable « référence » est maintenant vide : $compt(MID, \text{étiquetage}, REF) = 0$. Cette valeur est par conséquent ajoutée à la liste des valeurs à évaluer.

A l'étape 2, la nouvelle valeur à évaluer, i.e. « étiquetage », est retirée de la liste puis du domaine de la variable correspondante, et aucune mise à jour n'est plus nécessaire. La liste à évaluer étant vide, l'algorithme s'arrête. De nouveau, on a des domaines filtrés qui correspondent bien à ceux obtenus précédemment.

Sur un exemple aussi simple que celui que nous avons considéré, on peut par la même occasion apprécier l'efficacité de cet algorithme par rapport au précédent.

étape	S, compt, L, M	domaines des variables
0	$S(REF, VDI) = \{ \langle MID, marquage \rangle, \langle MLI, vissage \rangle, \langle MLI, collage \rangle \}$ $compt(REF, VDI, MID) = 1$ $compt(REF, VDI, MLI) = 2$ $S(REF, ISO) = \{ \langle MID, \text{étiquetage} \rangle \}$ $compt(REF, ISO, MID) = 1$ $compt(REF, ISO, MLI) = 0 \leftarrow$ $S(MID, marquage) = \{ \langle REF, VDI \rangle \}$ $compt(MID, marquage, REF) = 1$ $S(MID, \text{étiquetage}) = \{ \langle REF, ISO \rangle \}$ $compt(MID, \text{étiquetage}, REF) = 1$ $S(MLI, vissage) = \{ \langle REF, VDI \rangle \}$ $compt(MLI, vissage, REF) = 1$ $S(MLI, collage) = \{ \langle REF, VDI \rangle \}$ $compt(MLI, collage, REF) = 1$ $L = \{ \langle REF, ISO \rangle \}$ car $compt(REF, ISO, MLI) = 0$ $M = \emptyset$	$D(REF) = \{ VDI\ 2243, ISO\ 11469 \}$ $D(MID) = \{ marquage, \text{étiquetage} \}$ $D(MLI) = \{ vissage, collage \}$
1	$M = \{ \langle REF, ISO \rangle \}$ $compt(MID, \text{étiquetage}, REF) = 0 \leftarrow$ $L = \{ \langle MID, \text{étiquetage} \rangle \}$	$D(REF) = \{ VDI\ 2243 \}$ $D(MID) = \{ marquage, \text{étiquetage} \}$ $D(MLI) = \{ vissage, collage \}$
2	$compt(MID, \text{étiquetage}, REF) = 0$ $L = \emptyset$ $M = \{ \langle REF, ISO \rangle, \langle MID, \text{étiquetage} \rangle \}$	$D(REF) = \{ VDI\ 2243 \}$ $D(MID) = \{ marquage \}$ $D(MLI) = \{ vissage, collage \}$

Tableau 8 : Illustration de l'exécution de l'algorithme AC4.

Il est intéressant de remarquer que le résultat d'un filtrage par arc-cohérence est un ensemble de domaines. Rien ne garantit toutefois que les valeurs conservées soient solutions. Par rapport à notre problématique, notons que l'implémentation des algorithmes AC-3 et AC-4 dans le solveur adopté pour la résolution (voir chapitre suivant) prend en compte cette lacune

des techniques de filtrage. Pour cela, comme nous le décrirons au chapitre suivant, un mécanisme de résolution adapté a été intégré dans ce solveur afin de donner des informations pertinentes sur la résolution.

Les techniques de résolutions adoptées pour notre étude étant présentées puis illustrées par un exemple, nous présentons dans la partie suivante la représentation du CSP correspondant à notre contexte. La modélisation (sous forme de contraintes) de quelques critères extraits de *Blue Angel* sera ainsi brièvement décrite. Nous verrons notamment que l'exemple simple que nous venons de décrire est très représentatif du CSP défini dans notre contexte, car toutes nos contraintes sont de type binaire.

3.2. Description de la modélisation par contraintes

3.2.1. Synthèse du CSP défini sur les éco-labels retenus

Le CSP que nous avons défini sur un des éco-labels retenus forme un réseau de contraintes, comme celui présenté dans la Figure 14 pour le cas de *Blue Angel*. Comme on peut le voir, 29 variables ont été définies, leurs domaines respectifs étant formés de listes de symboles dont les valeurs possibles sont mentionnées dans le Tableau 9.

Les domaines de certaines variables dépendent du produit à analyser : par exemple la variable « lien » dont les valeurs possibles sont constituées des liaisons entre constituants du produit considéré (la terminologie du terme « lien » a été précisée en début de chapitre). Les domaines des variables « classe de matière » et « matière » ne sont pas explicités dans le tableau, la liste de leurs valeurs admissibles étant trop longue.

Si l'on excepte la variable « produit » dont les valeurs possibles dépendent également du cas considéré, les variables de notre problème ont en moyenne 4 valeurs possibles. La combinatoire est donc très liée à la complexité du produit à analyser car la plupart des produits susceptibles d'être analysés peuvent avoir plus de 4 constituants.

Notre problème comporte en outre 31 contraintes binaires, dont 2 contraintes intra variable : la contrainte entre « classes de matières » utile pour lister les matières compatibles entre elles, et la contrainte entre « produits » définie pour préciser la nomenclature-produit.

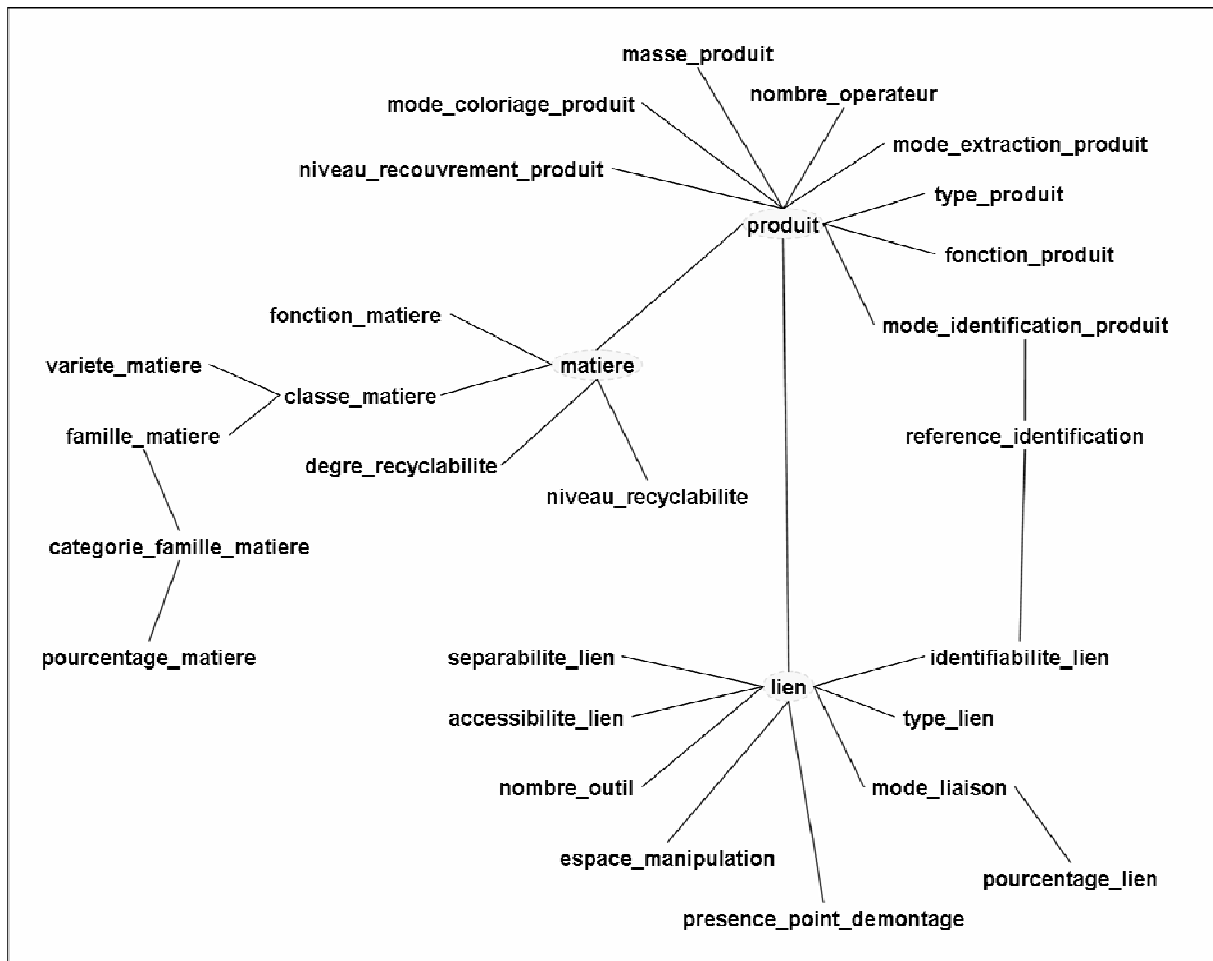


Figure 14 : Réseau de contraintes de notre problème dans le cas *Blue Angel*.

	Variables	Valeurs possibles
1	Produit	Dépend du produit analysé
2	Mode d'identification du produit	1- marquage 2- étiquetage 3- autre 4- nul (aucune identification)
3	Référence d'identification	1- ISO 11469 2- VDI 2243 3- autre
4	Mode d'extraction du produit	1- avec outil standard 2- avec outil spécial 3- sans outil 4- nul (non extractible)
5	Type de produit	1- boîtier 2- module électrique 3- châssis 4- partie mécanique 5- autre
6	Nombre d'opérateurs affectés au démontage du produit	1- exactement un 2- supérieurs à un
7	Masse du produit	1- inférieure à 25g 2- supérieure à 25g
8	Mode de coloriage du produit	1- uniforme 2- compatible 3- autre
9	Niveau de recouvrement du produit	1- minimum 2- autre
10	Variété des matières constituant le produit	1- exactement un 2- supérieur à un
11	Fonction du produit	Dépend du produit analysé
12	Matière	-
13	Classe de matière	-
14	Famille de matière	1- plastique 2- métal 3- céramique 4- matière composite 5- autre
15	Catégorie de la famille de matière	1- recyclé 2- non recyclé 3- autre
16	Pourcentage de matière d'une famille	1- au moins 5% 2- moins de 5%
17	Fonction de la matière	Dépend des matières utilisées
18	Degré de recyclabilité de la matière	1- haut 2- faible 3- autre
19	Niveau de recyclabilité de la matière	1- industriel 2- autre
20	Lien	Dépend du produit analysé
21	Identification du lien	1- facile 2- autre
22	Accessibilité du lien	1- axiale 2- radiale 3- autre
23	Nombre d'outils nécessaires au démontage du lien	1- moins de trois 2- autre
24	Espace de manipulation pour les outils de démontage	1- suffisant 2- insuffisant 3- autre
25	Présence d'un point de démontage du lien	1- oui 2- non
26	Séparabilité du lien	1- facile 2- autre
27	Mode de liaison entre constituants d'un produit	1- vissage 2- clipsage 3- collage 4- soudure 5- baïonnette 6- autre
28	Pourcentage de liens d'une catégorie	1- au moins 50% 2- moins de 50%
29	Type de lien	1- à séparer 2- autre

Tableau 9 : Récapitulatif des variables du CSP pour l'éco-label *Blue Angel*.

3.2.2. Expression de quelques critères sous formes de contraintes

Nous présentons dans cette partie une illustration de la représentation des critères d'un éco-label sous forme de contraintes. Nous reprenons l'exemple *Blue Angel* précédemment modélisé avec la logique propositionnelle. Nous décrirons plus particulièrement les critères A1 et A2, les autres critères étant représentés de la même manière (cf. Annexe 1).

Comme nous l'avons déjà souligné, la vérification d'un critère n'est effectuée que si certaines caractéristiques du produit considéré remplissent certaines conditions. Notre problème est donc caractérisé par des contraintes dites « dynamiques ».

1) Critère A1

Dans la représentation du critère A1 (présentée dans la Figure 15), les valeurs admissibles connues d'avance sont listées dans leurs domaines respectifs et présentées entre guillemets (variables « type de produit » et « séparabilité du lien »), tandis que les valeurs admissibles des autres domaines dépendent du produit à analyser (variables « lien », « produit », « matière » et « classe de matière »).

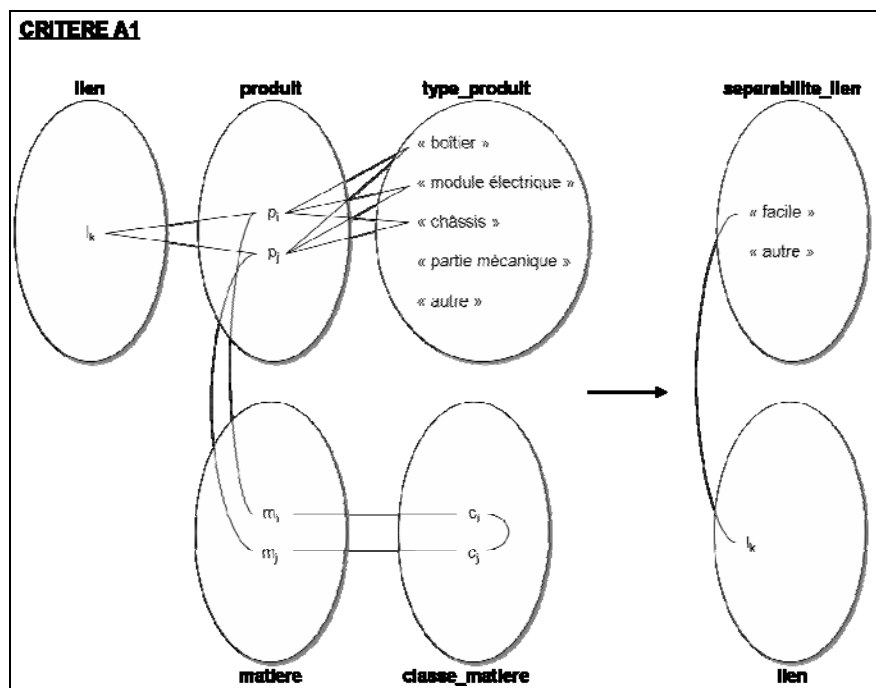


Figure 15 : Expression du critère A1 sous forme de contraintes.

Rappelons que le critère A1 stipule qu'il faut que deux produits reliés par un même lien (contrainte entre « lien » et « produit »), de type « boîtier » ou « module électrique » ou « châssis » (contrainte entre « produit » et « type de produit »), et qui sont constitués de matières (contrainte entre « produit » et « matière ») appartenant à des classes de matière incompatibles (contraintes entre « matière » et « classe de matière »), soient facilement séparables (contrainte entre « séparabilité du lien » et « lien »).

La contrainte à vérifier est ici l'aptitude du lien à être facilement séparé (voir partie droite de la figure). Elle n'est active que si les contraintes de la partie gauche de la figure, qui représentent la condition d'activation, sont simultanément satisfaites.

2) Critère A2

L'expression du critère A2 sous forme de contraintes est présentée dans la Figure 16.

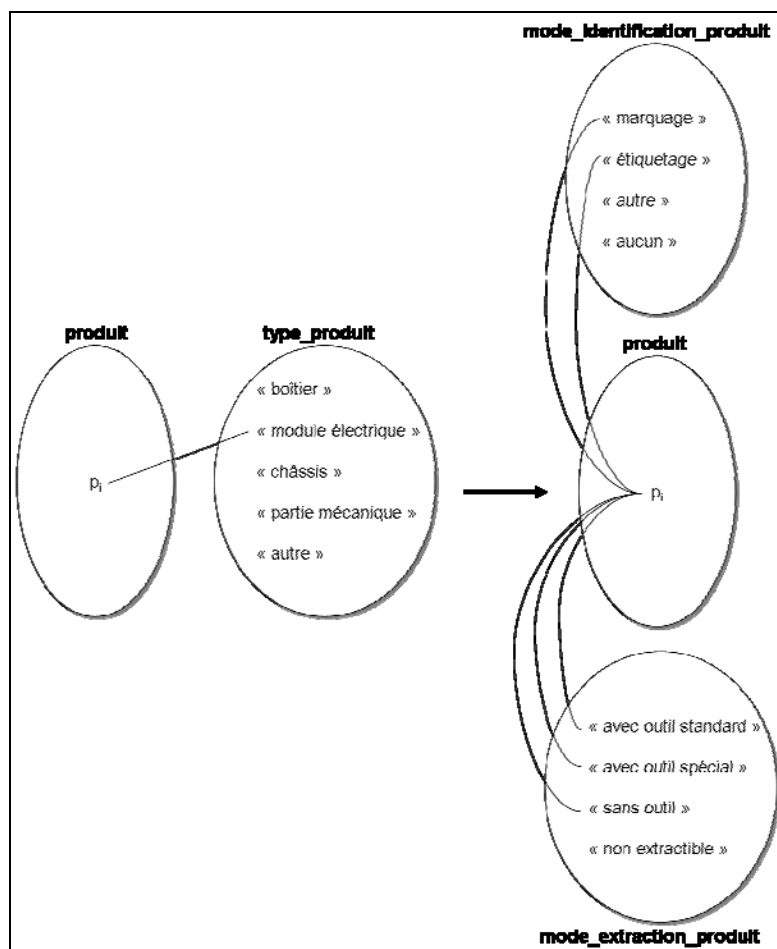


Figure 16 : Expression du critère A2 sous forme de contraintes.

Rappelons que ce critère stipule qu'il faut que tout « module électrique » (contrainte entre les domaines « produit » et « type de produit ») soit extractible et identifiable (contrainte entre « identification du produit » et « produit » d'une part, et entre « produit » et « extraction du produit » d'autre part).

La contrainte d'activation est ici le fait que le produit est de type « module électrique ». Comme pour le critère précédent, la satisfaction de cette contrainte active les deux contraintes de la partie droite de la figure.

Tous les autres critères (cf. Annexe 1) s'expriment de la même manière que ceux que nous venons de décrire : ils comportent tous une partie condition, formée d'une ou plusieurs contraintes dont la satisfaction active la ou les contraintes correspondant à la vérification de la satisfaction du critère associé.

Bilan du chapitre

Nous avons précédemment décrit l'extraction des données « recyclabilité » nécessaires à la résolution du problème de la satisfaction des critères des éco-labels. Ce chapitre nous a permis de proposer deux approches de représentation de la résolution de ce problème, l'objectif étant de pouvoir traduire les critères de conception pour le recyclage, telles qu'édictées par les éco-labels, du langage naturel en une forme exploitable par un système informatisé.

Une première tentative de modélisation a montré que la logique propositionnelle permet de représenter une grande partie des critères des éco-labels retenus. L'absence d'outil logiciel basé sur la logique pure et capable de communiquer avec des systèmes existants contenant certaines données du produit nous a toutefois amené à envisager une autre méthode. En effet, comme on a pu le voir dans le modèle « étendu » proposé, certaines données extraites des éco-labels existent déjà dans des outils de conception/fabrication ou des outils de gestion des données techniques. Elles ne nécessitent donc pas d'être redéfinies, car cela pourrait complexifier l'automatisation de l'analyse telle que nous le préconisons. Il nous a également semblé difficile de mettre en œuvre (dans un outil basé sur la logique pure) un mécanisme permettant de fournir de manière conviviale des informations pertinentes sur la résolution, notamment les explications de la non satisfaction d'un critère.

La représentation par contraintes est l'alternative que nous avons adoptée. Comme nous avons pu le voir, les critères présents dans les éco-labels peuvent être représentés de manière naturelle sous forme de listes (correspondant à ce qui est interdit, ce qui est toléré, etc.) ou sous forme de combinaisons de paramètres admissibles (décrivant ainsi les liens entre certaines caractéristiques du produit). Le problème de la vérification de la satisfaction des critères de recyclage nous a par conséquent semblé bien se prêter à une expression sous forme de contraintes. De plus, les techniques de filtrage proposées dans le cadre des CSP (plus particulièrement les algorithmes d'arc-cohérence qui correspondent à notre cas et que nous avons décrits et illustrés par un exemple simple) ont des performances reconnues pour gérer la combinatoire qui est une difficulté importante dans notre contexte. Enfin, comme nous le verrons au chapitre suivant, les techniques de résolution proposées dans le cadre des CSP permettent d'implémenter des mécanismes de contrôle qui offre de nombreuses possibilités : parmi les informations pertinentes sur la résolution que l'on peut obtenir, les explications avancées nous intéressent plus particulièrement. En effet, il est nécessaire pour nous de pouvoir fournir par exemple au concepteur les causes d'une incohérence (par rapport à un critère du label considéré) de la description du produit proposée.

Implémentation

Nous avons montré dans les deux précédents chapitres qu'il existe des méthodes intéressantes pour notre étude permettant d'extraire des données « recyclabilité » des éco-labels puis de représenter la résolution du problème de la vérification de la satisfaction des critères associés. Dans ce chapitre, nous étudions la faisabilité d'une implémentation de ce problème.

L'intérêt d'un langage à objets a été précédemment établi au Chapitre 2. Dans ce chapitre, nous décrivons en le justifiant le choix particulier du langage *CLAIRE* (*Combining Logical Assertions, Inheritance, Relations and Entities*) qui constitue le principal choix technique effectué en vue de l'implémentation. Ce point sera abordé dans la première partie du chapitre.

Après avoir ensuite décrit le principe de la démarche d'aide proposée, nous commenterons les résultats obtenus pour quelques tests effectués sur un exemple de produit de la littérature qui sera préalablement décrit.

1. Choix techniques

Compte tenu de notre conclusion sur les langages de programmation (cf. Chapitre 2), nous avons adopté le langage *CLAIRE* qui comporte, comme nous le verrons, des caractéristiques intéressantes pour notre étude. Pour l'instant, notons que ce langage offre deux modes d'utilisation : en ligne de commande ou à partir d'une interface web, la seconde solution nous semblant toutefois plus intéressante. En effet, comme le montre la Figure 17, une couche supérieure à *CLAIRE* a été récemment développée (*webclaire*). Un des objectifs est de permettre l'exploitation des multiples fonctionnalités des outils de l'Internet, telles que par exemple l'accès à distance à une application ou à un service. Pour cela, il est toutefois nécessaire de disposer du serveur *Apache* (en version 2.x) dans lequel un module *webclaire*, en l'occurrence `mod_wcl`, doit être ajouté comme passerelle entre le serveur web et les applications et services *webclaire* (voir partie supérieure gauche de la Figure 17). Ce module étant configuré dans *Apache*, les scripts *webclaire* (`wcl`) peuvent alors exploiter le protocole `Http` pour l'affichage ou la manipulation de certaines données dans un navigateur Internet. Cela est

réalisé en mêlant du code HTML au code CLAIRe. Ces techniques peuvent donc permettre de mettre à disposition des solveurs CLAIRe sur le poste de travail du concepteur via Internet.

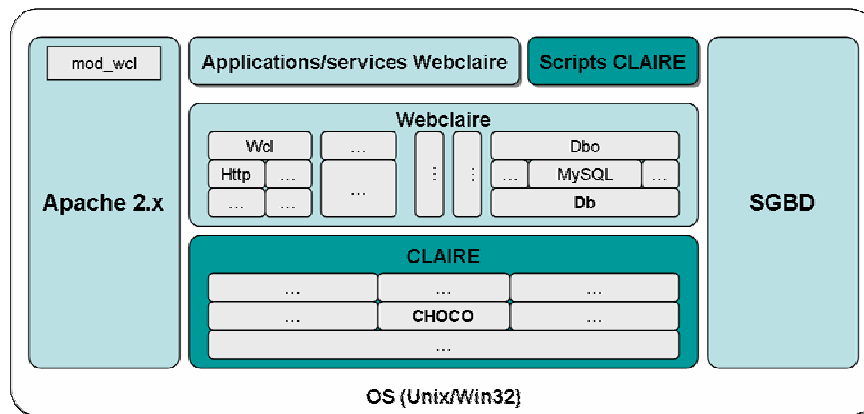


Figure 17 : Aperçu de l'architecture Webclaire.

Nous avons naturellement besoin de stocker une quantité importante d'informations concernant les produits. En effet, certains paramètres, par exemple les matières avec leurs classifications ou bien les combinaisons de matières compatibles, comportent une liste de valeurs qui peuvent être renseignées de manière pérenne dans le système. Une base de données nous semble pour cela appropriée, car offrant des possibilités de mise à jour intéressantes qu'il serait difficile d'obtenir en renseignant ces paramètres directement dans le code source. Notre choix s'est porté sur le SGBD MySQL qui appartient au domaine libre, et présente toutes les caractéristiques techniques que l'on peut attendre d'une base de données moderne. Notons qu'une bibliothèque de fonctions dédiée à l'utilisation de ce système a été implémentée dans webclaire. Cela est en effet possible à partir de la couche d'abstraction des données (Db) qui permet une interaction avec divers SGBD (Systèmes de Gestion de Bases de Données) comme illustré par la partie centrale droite de la Figure 17.

Il est en outre intéressant de souligner que les modules CLAIRe (i.e. en version classique) sont naturellement accessibles à la couche webclaire (i.e. version web de CLAIRe). C'est notamment le cas du module CHOCO dont nous précisons plus loin l'intérêt pour notre étude.

Notons toutefois que l'utilisation d'une interface web tout comme la gestion de la des données doivent être ici considérées comme des choix complémentaires à la spécification du système d'aide proposé. Il est en effet clair pour nous que le principal choix technique visant à implémenter la résolution de notre problème concerne le langage de programmation CLAIRe

utilisé notamment pour implémenter les techniques de propagation adoptées pour cette résolution. Une brève description de ce langage suivie de quelques illustrations est présentée dans la partie suivante.

1.1. Description du langage de programmation adopté

Dans cette partie, nous décrivons tout d'abord quelques caractéristiques du langage CLAIRE qui peuvent être intéressantes pour notre étude. Pour cela, cette présentation est axée sur l'implémentation de la résolution d'un problème de satisfaction de contraintes sous CLAIRE. Nous présenterons ainsi les principales instructions de ce langage permettant de définir et résoudre un CSP.

1.1.1. Présentation générale

CLAIRE est un langage orienté-objet de haut niveau, créé en 1994 par une équipe des laboratoires BouyguesTM encadrée par Yves Caseau. C'est un langage multi-paradigme combinant efficacement la programmation fonctionnelle, la programmation par ensembles, la programmation logique.

Un intérêt non négligeable pour notre étude est qu'il a spécialement été conçu pour développer des algorithmes complexes dans le cadre des problèmes à forte combinatoire. Ces algorithmes ont été par ailleurs implémentés avec succès pour des problèmes de grande taille. Il bénéficie par conséquent d'une riche bibliothèque, dont le solveur CHOCO [Laburthe, 2000] dédié à l'implémentation des problèmes de satisfaction des contraintes (approche choisie pour la représentation de la résolution de notre problématique).

Telles que décrites dans [Josset, 2002], l'expressivité et la lisibilité des programmes CLAIRE sont le résultat de la combinaison de certaines caractéristiques qui peuvent correspondre aux besoins de notre problématique :

- CLAIRE est un langage à objets comportant des propriétés que nous avons définies au Chapitre 2 ; les classes étant ici organisées en une hiérarchie d'héritages simple. Ce qui permet, comme nous l'avons déjà dit, de passer du général au particulier, notamment lors de la définition de la structure physique d'un produit complexe.

- `CLAIRE` possède un riche système de types basé sur les ensembles. La notation ensembliste pouvant, comme nous l'avons également souligné, servir à déclarer une grande partie des données « recyclabilité » (par exemple l'appartenance d'un matériau à une liste de matériaux à proscrire).
- `CLAIRE` permet d'écrire des règles de propagation qui se déclenchent lorsque certains événements interviennent pendant l'exécution. Cette caractéristique correspond notamment au mécanisme de résolution utilisé par la méthode que nous avons adoptée. Comme nous l'avons établi au chapitre précédent, les contraintes correspondant à un critère doivent en effet être activées lorsque certaines autres contraintes sont satisfaites.
- `CLAIRE` autorise plusieurs styles de programmation, ce qui permet d'écrire du code faiblement typé comme en `SmallTalk`, ou bien du code typé de façon plus stricte comme en `C++`. Cette caractéristique non spécifique à notre étude nous semble toutefois un argument important pour faciliter la prise en main de ce langage.

Comme on peut le voir, le langage `CLAIRE` comporte des caractéristiques intéressantes pouvant nous permettre d'implémenter notre problème de vérification de la satisfaction des contraintes de recyclabilité (à partir des techniques de CSP). L'implémentation des éléments de base d'un CSP est brièvement décrite dans la partie suivante.

1.1.2. Déclaration d'un problème de satisfaction de contraintes

La classe `Problem` est utilisée pour déclarer un problème de satisfaction de contraintes. Pour cela, on doit en préciser le nom et le nombre maximum de variables. Par exemple, l'instruction `makeProblem("conformiteBlueAngel", 50)` permet de créer un CSP dénommé `conformiteBlueAngel` comportant au plus 50 variables.

La bibliothèque utilisée pour la résolution étant dans un module spécifique de `CLAIRE` (solveur `CHOCO`) l'appel des fonctions est préfixé par le nom de ce module : par exemple, `choco/makeProblem("conformiteBlueAngel", 50)` indique que le constructeur de la méthode `makeProblem` se trouve dans le module `choco` (qui correspond physiquement à un sous répertoire du répertoire d'installation de `CLAIRE`). Il en est de même pour tout appel à une fonction

figurant dans un module quelconque de CLAIRE (par exemple, le module `DB`, couche d'abstraction des bases données).

1.1.3. Déclaration des variables d'un CSP

Le solveur CHOCO supporte deux types de variables : les variables entières et les ensembles d'entiers. Dans notre contexte, toutes les variables sont toutefois de type symbolique. Pour nous conformer à la syntaxe du solveur, nous associons un nombre entier à chaque symbole.

Les variables entières sont des instances de la classe prédéfinie `IntVar` ayant pour propriétés une borne inférieure, une borne supérieure et une valeur d'instance. Citons quelques exemples : `choco/makeIntVar(p:Problem, s:string, d:(set[integer]Ulist[integer]))` qui permet de définir un domaine fini a (union d'un ensemble d'entiers et d'une liste d'entiers), ayant pour nom `s`, relativement au problème `p`, et `choco/makeIntVar(p:Problem, s:string, i:integer, j:integer)` qui permet de définir un domaine $(i..j)$ où `i` est la borne inférieure et `j` la borne supérieure.

Les ensembles d'entiers sont définis de la même manière en utilisant la méthode `makeSetVar`.

Une variable entière étant créée, plusieurs méthodes sont proposées pour changer dynamiquement son état : par exemple, redéfinir sa borne inférieure ou supérieure, retirer une valeur ou une étendue de valeurs du domaine. Dans notre cas toutefois, la méthode qui nous intéresse plus particulièrement est celle qui permet d'affecter une valeur à une variable donnée, cela étant notamment nécessaire pour instancier les variables correspondant au produit considéré. A titre d'exemple, l'instruction `choco/setVal(v:IntVar, i:integer)` permet d'affecter la valeur `i` à la variable `v`.

1.1.4. Définition des contraintes d'un CSP

Tout comme les domaines et comme nous l'avons souligné lors de la présentation générale de CLAIRE, les contraintes sont des objets organisés dans une hiérarchie simple. La classe dont héritent toutes les contraintes est la classe abstraite `AbstractConstraint` (qui ne peut par conséquent être instanciée). Pour associer une contrainte à un problème, il est nécessaire de la « poster » à ce problème, c'est-à-dire préciser que la contrainte est utilisable dans le problème. Par exemple, l'instruction `choco/post(p:Problem, c:AbstractConstraint)` permet de

poster la contrainte c au problème p . Une typologie des contraintes implémentées dans le solveur ainsi que les instructions correspondantes sera décrite plus loin.

Précisons que les contraintes créées mais non « postées » n'auront aucun effet sur la résolution : leurs domaines ne seront pas réduits et elles ne pourront être intégrées aux causes d'un conflit si cela est demandé au système. Par défaut, lorsqu'une contrainte est « postée », elle est systématiquement intégrée à l'arbre des contraintes. Il est possible toutefois d'associer dynamiquement une contrainte à la propagation. Deux possibilités sont pour cela offertes : (1) l'utilisation d'une contrainte de type logique, avec par exemple l'implication logique, ou (2) l'utilisation des mécanismes d'activation et de désactivation de contraintes que nous décrirons plus loin (et qui correspond à la nature de notre problème).

Parmi les contraintes implémentées dans le solveur, on peut citer les contraintes arithmétiques, les contraintes ensemblistes, les contraintes utilisateurs, les contraintes logiques.

a) Les contraintes arithmétiques

Après les simplifications effectuées qui ont conduit à transformer certaines variables (labellisation des variables numériques), ce type de contraintes n'est donc pas considéré dans notre contexte. Rappelons toutefois qu'elles sont également organisées en une hiérarchie de classes, la classe dont héritent toutes les contraintes arithmétiques étant la classe abstraite `Term`. Cette dernière est formée des sous-classes `UnTerm`, `BinTerm` et `LinTerm` qui correspondent respectivement à des contraintes unaires, binaires et linéaires.

b) Les contraintes ensemblistes

Elles sont basées sur les domaines de type ensembliste. Elles peuvent par exemple servir à définir des contraintes à partir des unions, des intersections, des sous-ensembles, etc. de domaines, ou bien à partir de l'appartenance ou de la non appartenance d'une variable entière à un domaine. Une grande partie des contraintes de notre problème peuvent s'exprimer de cette manière. Par rapport aux tests unitaires d'implémentation effectués, nous nous sommes toutefois bornés à des contraintes de type combinaisons de valeurs (qui correspondent à la nature de notre problème). Celles-ci sont considérées dans le solveur `CHOCO` comme des contraintes utilisateurs dont une brève définition est présentée dans la partie suivante.

c) Les contraintes utilisateurs

C'est le type de contraintes qui nous intéresse plus particulièrement, car elles peuvent être associées à une technique de résolution qui se prête bien à nos besoins, à savoir l'arc-cohérence. Il s'agit par exemple des contraintes de type binaire, qui permettent de définir des paires de valeurs admissibles. Ainsi, l'instruction `choco/binConstraint(va: IntVar, vb: IntVar, feasRel: BinRelation, ac: integer)` permet de définir une contrainte binaire (`feasRel`) entre les variables `va` et `vb`, en utilisant un des algorithmes d'arc-cohérence précédemment décrit. La valeur `ac = 3` correspondant à l'algorithme `AC-3`, tandis que la valeur `ac = 4` correspond à l'algorithme `AC-4`.

Une autre manière de créer une contrainte binaire est de définir une table comportant les paires des valeurs admises. Dans notre cas, cela correspond par exemple aux tables de compatibilités entre (classes de) matières. Mentionnons, à titre d'exemple, l'instruction `choco/makeBinrelation(min1: integer, max1: integer, min2: integer, max2: integer, mytuples: list[tuples(integer, integer)])` qui permet de définir une table de compatibilité entre deux variables. Leurs domaines respectifs sont représentés dans la contrainte par les intervalles d'entiers (`min1 .. max1`) et (`min2 .. max2`). Les paires des valeurs admissibles étant définies dans la variable `mytuples` qui est une liste de tuples formés de couples d'entiers. Pour définir une table de compatibilité formée par le produit cartésien de deux domaines, autrement dit sans préciser de liste des paires admissibles, il suffit d'omettre la variable `mytuples` ci-dessus définie.

On peut étendre cette définition de contraintes à des relations de plus de deux variables. Mentionnons, à titre d'exemple, l'instruction `choco/feasTupleConstraint(vars: list[IntVar], goodTuples: list[list[integer]])` qui permet de créer une contrainte définissant une liste de tuples admissibles formés ici d'un n-uplet de valeurs définies dans la variable `goodTuples`. On définit de manière analogue une contrainte correspondant à des tuples incohérents, en utilisant la méthode `inFeasTupleConstraint`.

d) Les contraintes logiques

Elles sont très utilisées dans notre contexte car, comme on l'a vu au chapitre précédent, la plupart des critères des éco-labels ne doivent être satisfaits que dans des situations bien précises : notre problème correspond en effet à un CSP « dynamique ». Des considérations

théoriques, notamment les algorithmes spécifiques à ce cas de figure, peuvent être consultées dans la littérature (voir par exemple [Dechter, 2003]). Comme nous l'avons signalé précédemment, les techniques d'énumération telles que celles basées sur l'AC-3 ou l'AC-4 peuvent suffire dans notre cas. Nous nous bornerons à rappeler qu'on peut utiliser les opérateurs de conjonction (`or`), de disjonction (`and`), de négation (`opposite`), et l'implication logique (`implies`). Par exemple, `choco/implies(c1:AbstractConstraint, c2:AbstractConstraint)` permet de créer une contrainte qui stipule que la contrainte `c2` doit être vérifiée si `c1` est vérifiée. Autrement dit, ou bien ces deux contraintes doivent être simultanément vérifiées, ou bien `c1` seule ne doit pas l'être, ce qui est équivalent à `choco/or(opposite(c1), c2)`.

La définition des variables, domaines et contraintes d'un CSP dans le solveur adopté étant ainsi présentée, intéressons nous à présent aux possibilités offertes par CLAIRES dans le cadre de la résolution.

1.1.5. Résolution d'un CSP

Le solveur CHOCO offre plusieurs possibilités lors de la résolution d'un problème : contrôler la propagation, effectuer une recherche globale, contrôler l'arbre de recherche, limiter l'espace de recherche, personnaliser l'arbre de recherche. Ces trois derniers points ne seront toutefois pas abordés ici, car ne faisant pas partie des tests que nous avons réalisés.

a) Contrôle de la propagation

L'instruction `choco/propagate(pb:Problem)` déclenche la propagation des contraintes définies pour le problème `pb`, à condition qu'elles aient été préalablement « postées ».

Il est possible de contrôler dynamiquement l'état d'une contrainte en l'activant ou en la désactivant temporairement : cela correspond respectivement aux instructions `setActive(c:AbstractConstraint)` et `setPassive(c:AbstractConstraint)`, qui doivent être définies avant l'appel de la propagation.

Dans notre cas, toutes les contraintes sont par défaut inactives ; pour permettre la résolution, nous définissons pour cela des règles qui permettent de spécifier l'activation des contraintes associées aux critères à vérifier.

On peut également contrôler la propagation en indiquant qu'un conflit est rencontré avec une variable (ou une contrainte ou un problème). Cela peut être utile pour guider la recherche afin d'éviter l'exploration d'une branche particulière dont on sait qu'elle est source de conflit. A titre d'exemple, l'instruction `choco/raiseContradiction(v:IntVar)` permet d'indiquer qu'un conflit est survenu avec la variable `v`. Il est alors possible d'interroger par la suite le système pour obtenir les causes de ce conflit. Ainsi, après la déclaration d'un conflit (comme ci-dessus indiqué), l'instruction `choco/getContradictionCause(pb:Problem)` permet d'en fournir les causes. Le résultat obtenu est soit une liste de variables, soit une liste de contraintes, soit un problème, en fonction du paramètre renseigné lors de l'appel de la méthode `raiseContradiction`.

b) Recherche globale

Jusqu'ici, nous avons vu que la résolution pouvait être réalisée en « postant » des contraintes à un problème, puis en déclenchant la propagation qui pouvait elle-même être contrôlée. Une autre manière de résoudre un problème est d'effectuer une recherche globale. Trois étapes sont pour cela nécessaires : (1) on crée tout d'abord une recherche globale, (2) celle-ci est ensuite « attachée » au problème considéré, puis (3) exécutée. Les instructions correspondant à ces trois étapes sont brièvement décrites dans la suite.

L'instruction `choco/makeGlobalSearchSolver(allsolutions:boolean)` permet de créer une recherche globale. Pour retourner toutes les solutions, le booléen `allsolutions` doit être fixé à vrai (`True`) ; dans le cas contraire, la première solution trouvée est retournée.

L'instruction `choco/attach(gs:GlobalSearchSolver, pb:Problem)` permet quant à elle « d'attacher » une recherche globale, ici `gs` (définie comme ci-dessus), au problème `pb`, tandis que `choco/run(gs:GlobalSearchSolver)` permet d'exécuter une recherche globale préalablement « attachée » au problème courant.

L'intérêt de la recherche globale est qu'il est par la suite possible de demander des informations pertinentes sur la résolution, par exemple, la faisabilité globale du problème, le nombre de solutions, le nombre de « retour arrière », ou une solution parmi celles trouvées. A titre d'exemple, l'instruction `choco/restoreSolution(gs:GlobalSearchSolver, i:integer)` permet d'afficher la `i`-ième solution trouvée.

c) Illustration de la résolution

Nous présentons dans cette partie une illustration de la résolution correspondant à l'exemple de la Figure 13 qui correspond, pour un produit en conception, aux règles suivantes :

- si le mode d'identification choisi est le « marquage », il doit être conforme au standard VDI 2243,

- si le mode d'identification choisi est l'étiquetage, il doit être conforme à la norme ISO 11469

- si le mode de liaison choisi est le vissage il doit être conforme au standard VDI 2243

- si le mode de liaison choisi est le collage il doit être conforme au standard VDI 2243.

Par souci de simplification, nous décrivons ici l'implémentation en mode ligne de commande. Le code source correspondant est présenté dans la Figure 18, tandis que le résultat de la résolution est donné dans la Figure 19.

L'implémentation a consisté à définir une fonction qui est appelée lors de la résolution (voir ligne 1 de la Figure 18). Le problème est déclaré dans la ligne 2 et les trois variables du problème respectivement dans les lignes 3, 4 et 5. Ces variables ont toutes des listes d'entiers pour domaines, constitués de deux valeurs (1 et 2).

Les deux contraintes du problème étant de types binaires, les combinaisons des tuples admissibles sont ensuite définies (voir ligne 7 pour la contrainte entre les variables « référence » et « mode d'identification », et la ligne 8 pour la contrainte entre les variables « référence » et « mode de liaison »). Le symbole noté en premier correspond à la valeur 1, le second à la valeur 2 : ainsi, pour la variable « référence » par exemple, « VDI 2243 » correspond à la valeur 1 tandis que « ISO 11469 » correspond à la valeur 2.

Une constante dénotant le type d'algorithme utilisé est également précisée, stockée dans la variable AC figurée dans la ligne 10. Le CSP étant complètement défini (i.e. le problème déclaré et ses variables et contraintes définies), la résolution peut alors commencer. Comme nous l'avons souligné dans la présentation du solveur, les deux contraintes sont tout d'abord « postées » afin d'être associées au problème déclaré (voir ligne 14 et 15). Signalons que l'AC-3

est l’algorithme choisi pour le test. Nous avons intégré un chronomètre, à titre indicatif, pour illustrer la possibilité obtenir le temps de résolution : voir la ligne 13 pour l’initialisation du chronomètre, et la ligne 18 pour son affichage au terme de la résolution. Comme nous l’avons déjà précédemment indiqué, les considérations relatives à l’évaluation de l’efficacité des algorithmes restent toutefois en dehors de nos préoccupations.

```

1  [blue_angel() : void
2  -> let pb := choco/makeProblem("Blue Angel",3),
3      reference := choco/makeIntVar(pb, "reference", 1, 2),
4      mode_identification := choco/makeIntVar(pb, "mode_identification", 1, 2),
5      mode_liaison := choco/makeIntVar(pb, "mode_liaison", 1, 2),
6
7      comp_ref_id := choco/makeBinRelation(1,2,1,2,list(tuple(1,1),tuple(2,2))),
8      comp_ref_li := choco/makeBinRelation(1,2,1,2,list(tuple(1,1),tuple(1,2))),
9
10     AC := 3
11     in
12     (
13     time_set(),
14     choco/post(pb, choco/binConstraint(reference,mode_identification,comp_ref_id,AC)),
15     choco/post(pb, choco/binConstraint(reference,mode_identification,comp_ref_li,AC)),
16     choco/propagate(pb),
17     printf("%S %S %S\n",reference,mode_identification,mode_liaison),
18     time_show()
19     )
20 ]

```

Figure 18 : Code source de l’implémentation de l’exemple de la Figure 13.

Ce code source est ensuite sauvegardé dans un fichier, dénommé ici « test_blue_angel.cl ». Le logiciel est lancé par la commande illustrée par la ligne <1> de la Figure 19. Une fois lancé, nous pouvons alors charger le fichier contenant le code source de notre exemple (voir ligne <2>). L’appel de la fonction permettant de déclencher la résolution du problème est indiqué à la ligne <3>, tandis que les résultats de la résolution sont mentionnés dans les lignes suivantes : à la ligne <4> on retrouve les résultats connus. Par exemple, pour la variable « mode de liaison », le logiciel indique bien que les deux valeurs de son domaine sont solutions. Ces solutions sont représentées par une liste d’entiers (dénoté `set<integer>`).

Si on suppose que pour un produit donné la variable « mode d’identification correspond à la valeur 2 (dont on sait qu’elle n’est pas solution), on l’indique en ajoutant après la ligne 13 de la Figure 18 l’instruction `choco/setVal(mode_identification,2)`. En relançant la résolution, on obtient bien évidemment un conflit tel que mentionné à la ligne <6>.

Un problème est que le résultat tel que fourni par le solveur ne permet pas de savoir la cause de ce conflit, ce qui est une lacune des techniques de filtrage et qui justifie alors l’intérêt d’un mécanisme d’explications avancées. Ce point sera abordé plus loin.

```
<1> C:\CLAIRE>webclaire
default memory size by 2^3 and 2^3, Loglist = 21
-- CLAIRE run-time library v3.3.37 [os:Darwin-ppc-g++4.0.1, C++:g++] --
<2> [5016]WebClaire> load("test_blue_angel")
eval[1]> true
<3> [5016]WebClaire> blue_angel()
<4> eval[2]> reference:1 mode_identification:1 mode_liaison:[2]set<integer><1, 2>
<5> Counter[2] Elapsed time: 0ms.

[3872]WebClaire> blue_angel()
<6> eval[2]> A contradiction has occurred.
```

Figure 19 : Résultats de la résolution de l'exemple de la Figure 13.

1.2. Bilan

Comme on vient de le voir, le langage CLAIRE, via son solveur CHOCO, offre une panoplie de possibilités permettant de représenter puis de résoudre notre problématique, définie comme un problème de satisfaction de contraintes. Ces contraintes sont (dans notre cas) relatives aux critères de recyclabilité contenus dans les éco-labels.

Nous avons en outre vu que des informations pertinentes sur la résolution peuvent être obtenues, ce qui correspond bien à un principe d'aide à la décision qui est le point de vue considéré pour traiter notre problématique. Une démarche d'aide correspondant à ce principe est brièvement décrite dans la partie suivante.

2. Définition d'une démarche d'aide

La démarche d'aide proposée est résumée dans la Figure 20. Elle s'appuie sur la base de connaissances précédemment créée. Nous avons en effet montré, d'une part comment extraire des données « recyclabilité » à partir des éco-labels, et d'autre part comment traduire ces éco-labels en contraintes. Nous avons en outre souligné que certaines données (telles que par exemple la masse d'un produit) peuvent être directement extraites des systèmes existants tels que les outils PLM ou CFAO. Cela est illustré par la partie supérieure droite de la Figure 20.

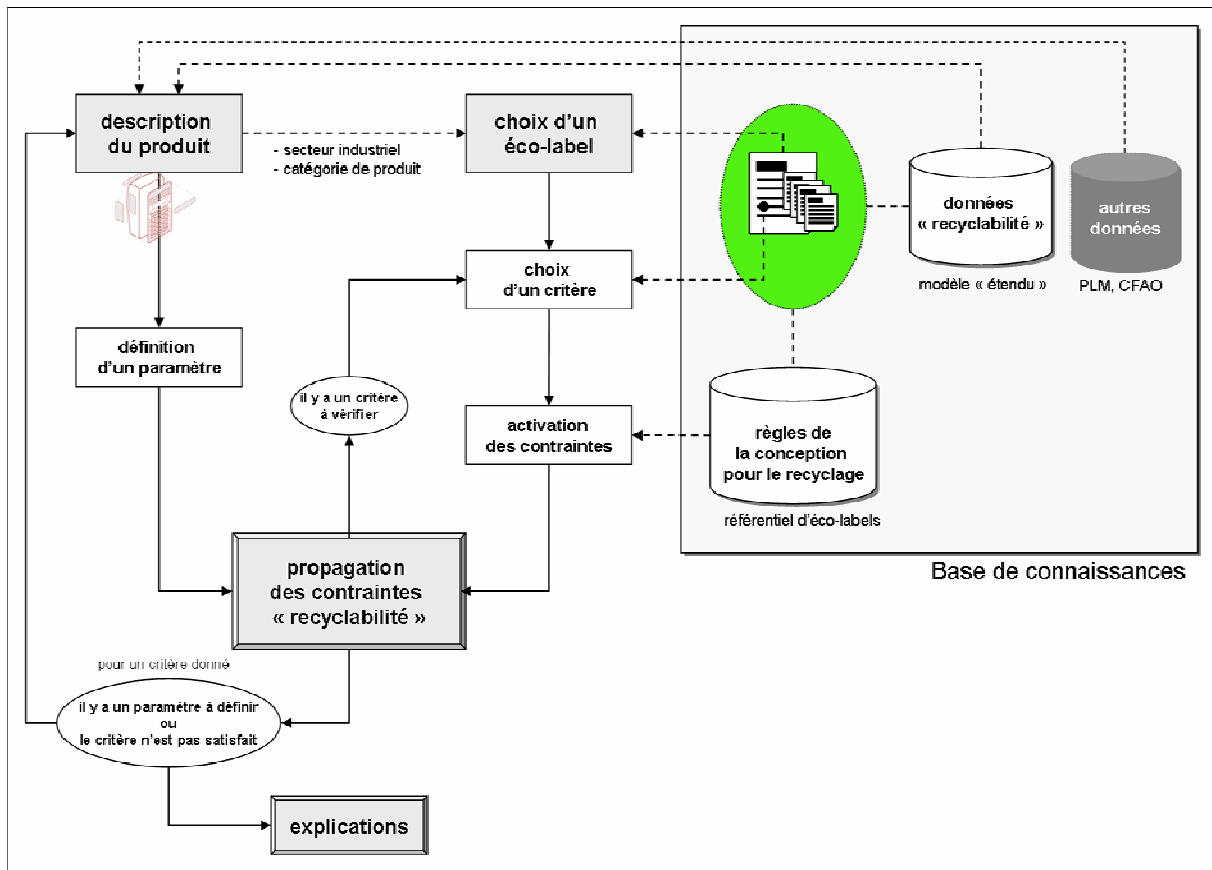


Figure 20 : Aperçu de la démarche d'aide proposée.

La démarche proprement dite consiste tout d'abord à définir le secteur industriel, puis la catégorie du produit à analyser (voir partie supérieure gauche de la Figure 20). Ceci permet de déterminer le ou les éco-labels applicables. Dans notre cas toutefois, seuls les éco-labels de la famille des PEE ont été considérés. Comme nous l'avons précédemment décrit et justifié, trois exemples représentatifs ont été retenus pour la définition de notre modèle « étendu ».

Un éco-label étant choisi par l'utilisateur, il s'agit alors d'évaluer le produit critère par critère, dans un ordre quelconque, ce qui donne la possibilité de vérifier une « zone » particulière du produit. Le principe retenu consiste à déclencher une analyse automatique du produit à partir de sa description telle que fournie par le concepteur. Une interaction entre ce dernier et le système permet de modifier un paramètre puis de solliciter une nouvelle analyse qui prend en compte cette modification. Ce qui est facilité par la définition de notre problématique à partir des approches de satisfaction de contraintes dont nous avons ici souligné la flexibilité.

Précisons toutefois que pour l'exemple retenu, les paramètres ont été progressivement saisis, en commençant par les pièces élémentaires du plus bas niveau de la nomenclature jusqu'au produit complet ; chaque pièce a été individuellement analysée. Une telle démarche ne peut naturellement être préconisée par rapport à la combinatoire. Mais d'après le principe proposé, un mécanisme d'interaction conviviale entre l'utilisateur et le système doit permettre de gérer au mieux cette combinatoire.

Les paramètres du produit étant saisis, l'analyse peut être déclenchée à la demande de l'utilisateur. Une partie des contraintes « recyclabilité » est alors activée à partir de notre base de règles (voir partie médiane de la Figure 20). Toutes les contraintes étant par défaut inactives, comme nous l'avons précédemment souligné, celles qui sont effectivement activées dépendent de l'instanciation fournie et du critère choisi. Les contraintes actives sont ensuite propagées dans la structure du produit. Dans la version par défaut du solveur, plusieurs informations sur la résolution peuvent être obtenues. Nous en présenterons quelques unes plus loin. Notons toutefois que la littérature sur les approches par contraintes propose un mécanisme d'explications avancées qui permet notamment de détecter des causes de non satisfaction d'une contrainte (voir par exemple [Junker, 2001] ou [Narendra, 2001]). Une implémentation sous forme de module a été réalisée avec CLAIRE [Narendra, 2000] [McDonald et Prosser, 2002].

Dans les tests que nous avons réalisés, les explications n'ont toutefois pas été implémentées. Nous nous bornerons ici à préciser que les causes de conflit détectées par ce mécanisme (représenté dans la partie inférieure gauche de la Figure 20) peuvent être utiles pour redéfinir certains paramètres afin de relancer une nouvelle résolution. Cela permet ainsi de mieux contrôler la propagation des contraintes en offrant une bonne maîtrise de la combinatoire.

La démarche d'aide proposée étant ainsi brièvement présentée, nous décrivons dans la suite un exemple d'implémentation basé sur un produit (un combiné téléphonique) présenté dans un guide pour la conception pour le recyclage réalisé par le *Georgia Institute of Technology (GIT)*²³. Bien que le point de vue adopté dans ce document soit différent du nôtre (l'objectif

²³ <http://www.srl.gatech.edu/education/ME4171/DFR-Improve.ppt>.

étant la recherche des meilleures stratégies et processus de recyclage au sens de certains critères), de nombreuses données du produit nécessaires à notre étude y sont toutefois précisées (types de liaison, matières, outils nécessaires au démontage, etc.).

3. Exemple

Compte tenu du périmètre des éco-labels retenus, nous avons tout naturellement porté le choix d'un exemple sur un PEE. Un objectif de ce choix était de trouver un produit suffisamment complexe pour pouvoir définir une variété de paramètres, mais relativement simple pour faciliter l'évaluation. Le combiné téléphonique pris comme exemple nous semble correspondre à ces critères.

3.1. Description du produit choisi

Comme le montre la Figure 21, le combiné possède une nomenclature à cinq niveaux, ce qui nous semble correspondre à une complexité raisonnable. Le nombre de constituants élémentaires relativement faible (quatorze de types différents) semble en outre correspondre à notre besoin de simplicité.

Au premier niveau de la nomenclature, le combiné est constitué de deux fils et d'un entonnoir. Ces pièces élémentaires sont reliées, au second niveau, à un microphone qui lui-même est inséré (au troisième niveau) dans un cadre. Deux autres fils ainsi qu'un isolant font également partie du second niveau. Ils sont rattachés (au troisième niveau) à un circuit imprimé.

Sept pièces du troisième niveau, à savoir un circuit imprimé et un cadre (que nous venons de citer), ajoutés à un tampon, un serre-joint, une tour de sûreté, une étiquette et un levier, sont à leur reliés (au quatrième niveau) à la base du combiné. Deux autres pièces, un cadre contenant les touches du combiné ainsi qu'une seconde étiquette composent également ce niveau, et sont rattachées à la façade du combiné.

Le cinquième et dernier niveau est constitué du produit complet (le combiné téléphonique) relié à la base et la façade précédemment décrites.

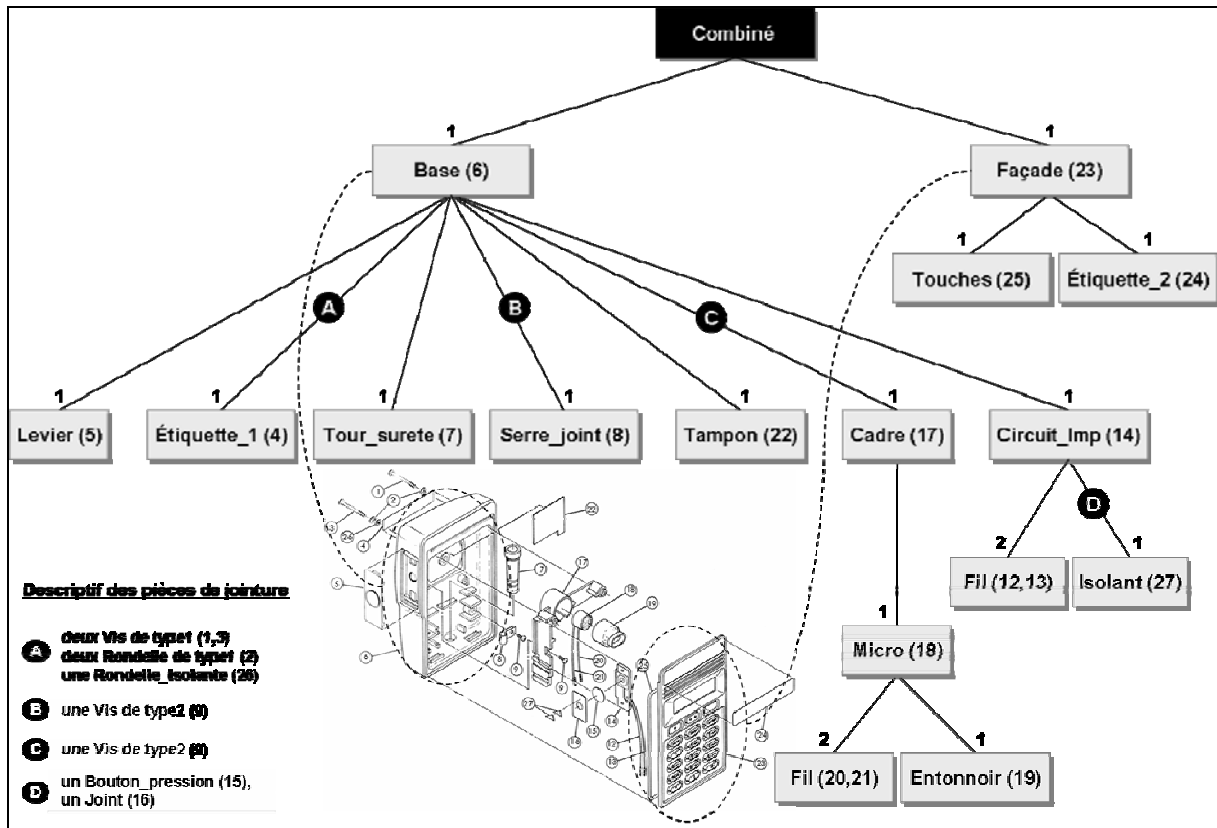


Figure 21 : Exemple traité - source: <http://www.srl.gatech.edu/education/ME4171/DFR-Improve.ppt>.

Les quantités de certaines pièces élémentaires formant la nomenclature sont également précisées (voir les repères A, B, C et D et la légende associée).

Les données relatives à ce produit sont fournies dans le Tableau 10 qui est composé de trois parties. Dans la partie gauche sont renseignées les activités concernant le démontage du produit. Ces données ne nous intéressent pas directement. La partie centrale concerne les données relatives à l'évaluation du degré de démontabilité des pièces, calculé en tenant compte du niveau d'accessibilité de la pièce à démonter, de l'outil utilisé, de la force et du temps de démontage. L'indice de démontabilité est calculé sur une échelle de 1 à 5. Cette évaluation nous a servi à définir la variable *separabilite_lien* de notre problème (tel que décrit au chapitre précédent pour le critère A1 de *Blue Angel*). Nous avons choisi d'attribuer la modalité « facile » pour un indice inférieure ou égal à 2, et la modalité « difficile » pour un indice strictement supérieur à deux.

Disassembly activity				Disassembly					Material recyclability				
No.	Name	Quantity	Type	Access	Tool	Force	Time (sec.)	Rating (1-5)	Material	Mass	Rating (1-4)	Rating (1-5)	Marked (y/n)
1	Disconnect mic. from base	1	CE	4	-	4	1	1	-	0	-	-	N
Microphone Disassembly													
2	Remove screws #1 Phillips	2	CE	3	#1 PS	4	24	1	Stainless Steel	0.00000	4	2	N
3	From No. 1 Washer	2	SP	4	-	4	1	1	Plastic PP	0.00000	2	3	N
4	From No. 2 Washer	2	SP	4	-	4	1	1	Plastic PP	0.00010	2	3	N
6	Remove keypad subassembly	1	SUB	4	Files	2	6	1	Mx	0.00000	1	4	N
6	From No. 6 O-rings	1	SP	4	-	4	1.0	1	Rubber	0.00000	3	2	N
7	From No. 6 Break H-S Tabs	0	CE	1	Knife	1	200	3	-	0.00000	-	-	N
9	From No. 6 Keypad PCB/LCO	1	SUB	4	Fry	4	2	1	Mx	0.00000	1	4	Y
9	From No. 3 Under metal Lids.	0	CE	3	Files	3	20	1	-	0.00000	-	-	N
10	From No. 3 Remove. Disp. Sub.	1	SUB	3	-	4	1	1	Mx	0.00000	1	4	Y
11	From No. 10 LCD Cover	1	SP	4	-	4	1	1	Plastic HDPE	0.00030	2	3	Y
12	From No. 10 LCD	1	SP	4	-	4	1	1	Mx	0.00000	1	4	Y
13	From No. 10 Condenser	2	SP	4	-	4	1	1	Mx	0.00000	1	4	Y
14	From No. 10 LCD Base	1	SP	4	-	4	1	1	Aluminum	0.00120	4	2	Y
15	From No. 6 PCB	1	SP	4	-	4	1	1	Mx Cu, Au	0.01000	1	4	Y
16	From No. 5 Keypad	1	SP	4	-	4	2	1	Rubber	0.00000	3	2	Y
17	From No. 5 LCD Prot. Scm.	1	SP	1	Fry out	1	5	1	Plastic HDPE	0.00000	2	3	N
18	From No. 4 Foam	1	SP	2	Rolls	4	1	1	Foam	0.00000	1	4	N
19	From No. 5 Inserts	2	SP	1	Saw	1	30	1	Brass	0.00000	4	2	N
20	From No. 4 Keypad base	1	SP	4	-	4	1	1	Plastic ABS	0.01000	3	2	Y
21	12 pin connector housing	1	CF	2	File	4	60	4	Plastic HDPE	0.00000	2	3	Y
22	Microphone subassembly	1	SUB	3	Files	3	7.5	1	Mx	0.00000	1	4	Y
23	From 22 Mic. 4 wires	1	SP	2	-	3	7	1	Mx Cu, Al	0.00000	1	4	Y
24	From 22 Microphone back	1	SP	4	-	4	1	1	Rubber	0.00120	3	2	N
25	FTT Contact 4 wires	1	SUB	1	Files	3	5	1	Mx Cu, Au	0.00100	1	4	Y
26	Screw - mic. cord/bracket	1	CE	4	#1 PS	3	10	1	Steel	0.00000	4	2	N
27	Mic. cord bracket	1	SP	3	Files	2	0	1	Stainless Steel	0.00000	4	2	Y
28	Microphone cord	1	SUB	2	-	2	25	1	Mx Cu, AL, PL	0.00000	1	4	Y
29	Mic. cord box	1	SP	4	-	2	5	1	Rubber	0.00100	3	2	N
30	Spacer	2	SP	4	-	3	3	1	Plastic PP	0.00010	2	3	N
31	Screw - mic. FTT lever mount	1	CE	4	#1 PS	4	10	1	Steel	0.00000	4	2	N
32	Microphone/FTT mount bracket	1	SP	3	Files	2	4	1	Plastic ABS	0.00000	1	4	Y
33	Rubber pad	1	SP	3	-	3	2	1	Rubber	0.00000	3	2	N
34	Microchip label	1	SP	2	-	3	5	1	Plastic HDPE	0.00000	2	3	N
35	FTT lever	1	SP	1	Files	2	3	1	Plastic ABS	0.00000	2	3	Y
36	FTT base	1	SP	2	Files	2	3	1	Plastic ABS	0.00000	2	3	Y
37	FTT vibrator	1	SP	2	-	4	1	1	Rubber	0.00100	3	2	Y
38	Microphone Hanger	1	SP	4	Chill	1	40	2	Stainless Steel	0.00022	4	2	N
39	Microphone base	1	SP	4	-	4	1	1	Plastic ABS	0.00077	2	3	Y

Tableau 10 : Données de l'exemple - source: <http://www.srl.gatech.edu/education/ME4171/DFR-Improve.ppt>.

La partie droite du tableau recense quant à elle des données relatives à la recyclabilité des matières utilisées dans chaque pièce. Dans cette partie, seules la matière, la masse et l'identification (voir colonne « Marked » i.e marquage) correspondent à des variables de notre problème.

3.2. Implémentation de l'exemple

3.2.1. Schéma général

Pour une implémentation complète de la démarche d'aide, une structuration possible consiste à définir quatre parties distinctes dédiées respectivement :

- (1) à la création des données du problème,
- (2) à la génération de données à partir des fichiers externes ou d'une base de données,

(3) à la construction du modèle correspondant au problème de satisfaction de contraintes, et

(4) à la définition des stratégies de recherche et de contrôle de la résolution.

Ces quatre parties sont brièvement commentées dans la suite, illustrées par quelques tests effectués pour notre contexte. Un extrait de code correspondant est quant à lui présenté en Annexe 3 (cf. Extrait 1).

3.2.2. Tests effectués

Seule, la partie (3) de la structure décrite plus haut a été testée sur l'exemple étudié. Nous la décrivons brièvement dans la suite. Notons toutefois que l'utilisation d'une interface provisoire de saisie des variables du problème à travers un formulaire web a été décrite [Houé et Grabot, 2007] ; cela correspond au point (2) de la structuration proposée. Nous nous bornerons ici à préciser que les différentes modalités de chacune des variables sont présentées dans des menus déroulants, ce travail étant rendu possible par la couche `webclaire` précédemment décrite. L'exemple pour la saisie des paramètres du critère A2 est illustré par la Figure 22. Il est représentatif des autres critères qui suivent un principe similaire.



Instanciation des variables : Blue Angel (A2)

Pour le composant courant, indiquer les valeurs des paramètres suivants

son type

son mode d'extraction

son mode d'identification

Figure 22 : Interface provisoire de saisie des paramètres d'un critère.

Pour les tests décrits dans ce mémoire, les descriptions qui suivent sont basées sur des saisies en dur des paramètres.

1) Exemple du critère A2 de *Blue Angel*

Pour cet exemple, on renseigne le type, le mode d'extraction, et le mode d'identification d'un composant donné. Les valeurs possibles de ces paramètres sont données dans le Tableau

11. Comme nous l'avons dit, une valeur entière a été affectée à chacune de valeurs possibles de ces variables afin de respecter la syntaxe CHOCO : par exemple, pour la variable « type de produit » (voir colonne gauche du Tableau 11) la valeur 1 correspond à un produit de type « module électrique », la valeur 2 à un « boîtier », etc.

DOMAINE DES VARIABLES DE LA CONTRAINTE ASSOCIEE AU CRITERE A2

<u>Type de produit</u>	<u>Mode d'extraction</u>	<u>Mode d'identification</u>
1 = « module électrique »	1 = « extractible avec outil standard »	1 = « marquage »
2 = « boîtier »	2 = « extractible avec outil spécial »	2 = « étiquetage »
3 = « châssis »	3 = « extractible sans outil »	3 = « autre mode d'identification »
4 = « partie mécanique »	4 = « non extractible »	3 = « aucune identification »
5 = « autre type »		

Tableau 11 : Domaines respectifs des variables utilisées dans les contraintes du critère A2.

D'après la nature des pièces formant la nomenclature de l'exemple étudié, l'activation de cette contrainte n'est déclenchée que pour le microphone et le circuit imprimé que l'on peut assimiler à des modules électriques.

Comme le montre la ligne 15 du Tableau 10, le circuit imprimé est démontable sans outil (voir la colonne « *Tool* » du Tableau 10) et est marqué (voir colonne « *Marked* » du Tableau 10). Ceci correspond respectivement aux valeurs 3 et 1 des variables « mode d'extraction » et « mode d'identification » pour le circuit imprimé. De façon analogue, pour le microphone, on fixe à 1 la valeur du mode d'extraction, les pinces utilisées pour son démontage pouvant être assimilées à un outil standard, tandis que la valeur du mode d'identification est fixée à 1 (i.e. marquage, d'après la dernière colonne du Tableau 10).

2) Implémentation sous CLAIRE

Deux modes d'implémentation peuvent être envisagés. Comme le montre le réseau de contraintes formant notre CSP qui met en exergue les trois vues de notre modèle « étendu » (figurées par les variables grisées de la Figure 14), on peut considérer l'analyse séparément sur chacune de ces vues, l'arc-cohérence étant locale. Cela est en effet possible pour certains critères, par exemple A2, pour lequel les variables rattachées au nœud « produit » (en dehors des

variables « matière » et « lien »), ne sont rattachées à aucune variable. Un extrait d'implémentation correspondant à cette description est présentée en Annexe 3 (cf. extrait 2). Il correspond à l'illustration décrite dans la Figure 18.

Le second mode d'implémentation, le plus complet, consiste à créer une boucle qui permet d'activer puis propager les contraintes. Cela correspond à l'extrait 3 de code présenté en Annexe 3.

3) Quelques résultats

Pour le critère A2 dont nous venons de décrire l'implémentation, le combiné satisfait la contrainte associée. Résultat facilement vérifiable compte tenu de la simplicité de l'exemple. Précisons toutefois que l'instruction correspondant à l'activation des contraintes a été décrite dans la partie 1.1.5 de ce chapitre.

L'implémentation des autres critères ne nécessite pas de commentaires particuliers. Nous nous bornons à reprendre les résultats obtenues avec deux exemples de critères tels que nous les avons décrits dans [Houé et Grabot, à paraître en 2007] :

Le critère A3 stipule que tout lien à séparer et qui correspond à une pièce du boîtier ou du châssis doit être facilement identifiable. Notons que pour le produit considéré, les données disponibles ne correspondent pas forcément aux variables définies dans notre CSP. Nous assimilerons ainsi le marquage d'une pièce (seule donnée concernant l'identification) à une identification « facile », le combiné à un boîtier. Par conséquent, toutes les pièces de la nomenclature sont concernées par ce critère. D'après l'implémentation réalisée, A3 n'est pas satisfait. Rappelons que les pièces concernées par la non satisfaction de ce critère peuvent être détectées à partir du mécanisme d'explications qui n'a pas toutefois pas été testé.

Les données nécessaires à l'évaluation du critère A7 sont disponibles. Ce critère stipule que les liaisons à vis doivent être démontées par moins de trois outils. L'implémentation réalisée montre que ce critère est satisfait.

Bilan du chapitre

Ce chapitre nous a permis d'étudier la faisabilité de l'implémentation de notre proposition, à savoir la spécification d'une démarche d'aide visant à vérifier la compatibilité d'un produit en cours de conception avec un éco-label.

Le langage `CLAIRE` que nous avons décrit ici nous a semblé être un bon choix correspondant à notre contexte. Comme nous pensons l'avoir montré, il comporte en effet de nombreuses caractéristiques intéressantes pour la résolution des problèmes de satisfaction de contraintes, choix adopté pour la représentation de la résolution de notre problème (choix qui a été décrit et justifié dans les chapitres précédents). Au contraire de la logique propositionnelle, il permet d'implémenter des mécanismes conviviaux d'interaction utile pour contrôler la résolution : les explications avancées constituent en effet une originalité des techniques de filtrage qui fournissent des informations pertinentes sur la résolution d'un problème, notamment les causes d'une incohérence. Ces informations peuvent ainsi aider le concepteur à proposer une description du produit conforme aux exigences du label considéré.

Un exemple de produit relativement simple a été choisi pour réaliser des tests de notre implémentation. Nous nous sommes contentés de tests unitaires pour valider cette implémentation. Ces derniers étant représentatifs, comme nous pensons l'avoir justifié, de notre contexte, la faisabilité de notre proposition nous paraît établie.

Des essais supplémentaires, avec d'autres exemples doivent tout naturellement être réalisés afin de conforter notre proposition, une connexion du système proposé avec un outil de gestion de données techniques ou de CFAO mérite également d'être implémentée et testée.

Conclusion et perspectives

Dans le contexte actuel du Développement Durable, la sensibilité de la société sur les questions environnementales est grandissante. Celles-ci tendent à devenir un problème crucial pour les entreprises. Dans le domaine de la production des biens, on peut ainsi noter l'élaboration de réglementations de plus en plus nombreuses et strictes, imposées aux entreprises qui sont dorénavant tenues de réduire l'impact environnemental lié à la production et à l'utilisation de leurs produits, ainsi que leur mode de recyclage et les filières associées.

La mise à disposition d'outils permettant d'aider à la vérification de la satisfaction de ces exigences va rapidement s'avérer nécessaire. Pour aborder ce problème, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à l'intégration des contraintes de recyclabilité lors de la conception d'un produit. Un exemple représentatif de cette problématique est la vérification de la compatibilité d'un produit avec les éco-labels, la prise de conscience du grand public commençant à se répercuter dans les chaînes logistiques. Une conséquence directe est que le respect des critères environnementaux n'est plus uniquement un problème de contrainte, mais devient progressivement un atout concurrentiel.

Dans le cadre cette thèse, nous avons proposé une démarche de traduction des connaissances normatives contenues dans les éco-labels sous une forme exploitable par un système informatisé en vue d'une évaluation de la recyclabilité d'un produit en cours de conception.

Dans cette optique, nous avons tout d'abord analysé un échantillon d'éco-labels choisi parmi un large panel accessible dans la littérature. Cette analyse a abouti à l'identification de données supplémentaires, spécifiques au domaine de la recyclabilité d'un produit. Ces données ont ensuite été exploitées pour enrichir la nomenclature du produit, conduisant à un modèle « étendu » : nous avons pour cela utilisé un langage de modélisation à base d'ontologies (NIAM/ORM) dont nous pensons avoir montré l'intérêt pour notamment gérer les problèmes d'interprétation linguistique posés par la nature des éco-labels qui sont rédigés en langage naturel. Le modèle ORM ainsi obtenu caractérise non seulement des données correspondant à ce qui est proscrit ou toléré par un éco-label, mais aussi une panoplie de conseils et règles de conception pour le recyclage, figurés par des liens entre les données identifiées. Cette

modélisation nous a semblé globalement satisfaisante, car une faible proportion des critères n'a pu être traduite.

Après avoir modélisé des connaissances (critiques) extraites des éco-labels par des contraintes, nous avons ensuite étudié la faisabilité de leur propagation de manière semi automatique dans notre modèle « étendu » de produit. Un essai d'implémentation a alors été effectué sous CLAIR qui est un langage à objets de haut niveau, doté d'un solveur (CHOCO) contenant des algorithmes de résolution efficace pour la gestion de la combinatoire qui caractérise notre problématique. Nous pensons ainsi avoir montré à travers à cette tentative l'intérêt de notre proposition. Celle-ci mérite tout naturellement d'être évaluée en considérant d'autres exemples de produits et en intégrant une implémentation complète des mécanismes d'explications avancées (non testés dans ce mémoire) qui sont utiles pour faciliter l'interaction.

En perspectives à notre étude, une connexion du système proposé avec un outil de gestion de données techniques ou de CFAO peut être envisagée. L'objectif étant de récupérer certaines données produit déjà renseignées dans ces systèmes : cela nous semble réalisable compte tenu de certains choix techniques évoqués, notamment la possibilité d'intégrer un système de gestion des données.

Dans notre démarche, le principe de mise en conformité d'un produit avec un éco-label peut être perçu comme un problème de configuration : ici, le concepteur est le client, tandis que les critères à satisfaire sont les options proposées. De ce point de vue, il nous semble intéressant de pouvoir intégrer notre proposition dans un configurateur. Notre principal apport consisterait alors à intégrer le modèle de connaissances spécifiques à la recyclabilité (tel que nous l'avons défini) absent de ces outils.

Enfin, bien que le contexte de cette étude porte sur les éco-labels, ces derniers étant toutefois représentatifs du cadre plus général de la modélisation des connaissances normatives, la transposition de la démarche proposée à d'autres domaines relevant de l'ingénierie concourante nous semble par conséquent possible.

Annexes

Annexe 1 : modélisation des critères

1) Expression à l'aide de la logique propositionnelle

A4. Le démontage de tout produit doit se faire exclusivement à l'aide d'outils « standards » (critère obligatoire)		Boîtier, châssis, module électrique
Les outils « standards » sont ceux qui sont facilement accessibles dans le commerce.		
F5	type_produit (p, « boîtier »)	
F6	type_produit (p, « module électrique »)	
F7	type_produit (p, « châssis »)	
F9'	extraction_produit (p, « outil standard ») // le produit p est extractible à l'aide d'outil standard	
R4	Si (F5 ou F6 ou F7) Alors F9'	

A5. Il faut prévoir des points de démontage et des espaces suffisants pour faciliter la manipulation des outils		Composants du boîtier, châssis, module électrique
F1	compose_lien (l, p)	
F5	type_produit (p, « boîtier »)	
F6	type_produit (p, « module électrique »)	
F7	type_produit (p, « châssis »)	
F13	point_demontage (l) // présence de point de démontage dans le lien l	
F14	espace_manipulation (l, « suffisant ») // présence espace manipulation « suffisant » dans le lien l	
R5	Si (F1 et (F5 ou F6 ou F7)) Alors (F13 et F14)	

A6. Tous les liens « à séparer » doivent être accessibles « axialement » (critère non obligatoire)		Composants du boîtier, châssis, module électrique
F1	compose_lien (l, p)	
F5	type_produit (p, « boîtier »)	
F6	type_produit (p, « module électrique »)	
F7	type_produit (p, « châssis »)	
F11	type_lien (l, « à séparer »)	
F15	accessibilite_lien (l, « axiale ») // le lien l est accessible « axialement »	
R6	Si (F1 et (F5 ou F6 ou F7) et F11) Alors F15	

A7. Les liens « à vis » ne doivent pas nécessiter plus de trois outils lors du démontage (critère obligatoire)		Composants du boîtier, châssis, module électrique
F1	compose_lien (l, p)	
F5	type_produit (p, « boîtier »)	
F6	type_produit (p, « module électrique »)	
F7	type_produit (p, « châssis »)	
F16	categorie_lien (l, « à vis »)	
F17	nombre_outil_lien (l, « au plus trois »)	
R7	Si (F1 et (F5 ou F6 ou F7) et F16) Alors F17	

A8. Au moins 50% de connexions entre produits plastiques doivent être de type « clipsage » (critère non obligatoire)		Composants du boîtier, châssis
F1	compose_lien (l, p1)	
F1'	compose_lien (l, p2)	
F5	type_produit (p1, « boîtier »)	
F5'	type_produit (p2, « boîtier »)	

F7	type_produit (p1, « châssis »)
F7'	type_produit (p2, « châssis »)
F2	matiere_produit (p1, m1)
F2'	matiere_produit (p2, m2)
F3	classe_matiere (m1, c1)
F3'	classe_matiere (m2, c2)
F18	famille_matiere (c1, « plastique »)
F18'	famille_matiere (c2, « plastique »)
F19	categorie_lien (1, « clipsage »)
F20	pourcentage_lien (1, « au moins 50% »)
R8	Si ((F1 et F1') et (F3 et F3') et (F5 ou F5' ou F7 ou F7') et (F2 et F2') et (F18 et F18') et F19) Alors F20

A9. Le démontage de tout produit ne doit pas nécessiter plus d'une personne (critère obligatoire)		Le système complet
F9	extraction_produit (p, .) // le produit p est extractible	
F21	nombre_operateur_extraction (p, 1)	
R9	Si F9 Alors F21	

A11. Tout boîtier ne doit pas contenir de module électrique (critère obligatoire)		Composants du boîtier
F5	type_produit (p, « boîtier »)	
F22	compose_produit (p, p1)	
F6	type_produit (p1, « module électrique »)	
R11	Si (F5 et F22) Alors (non F6)	

<p>B1. La variété des matières constituant des produits ayant des fonctions comparables doit être limitée à un seul type de matière (critère obligatoire)</p>		<p>Composants du boîtier, châssis, partie mécanique pesant plus de 25g</p>
F2	matiere_produit (p, m)	
F3	classe_matiere (m, c)	
F5	type_produit (p, « boîtier »)	
F6	type_produit (p, « châssis »)	
F23	type_produit (p, « partie mécanique »)	
F24	masse_produit (p, « plus de 25g »)	
F25	famille_fonction_produit(p, f) // p a une fonction correspondant à la fonction f	
F26	variete_matiere (c, 1)	
R13	Si (F2 et F3) et (F5 ou F6 ou F23) et F24 et F25) Alors F26	

<p>B2. Les produits constitués d'un même type de plastique doivent être coloriés uniformément, sinon de manière « compatible » (critère non obligatoire)</p>		<p>Composants du boîtier, châssis</p>
<p>Un coloriage « compatible » correspond à la comparaison des niveaux d'une même couleur (tels que par exemple le gris et l'anthracite).</p>		
F2	matiere_produit (p, m)	
F3	classe_matiere (m, c)	
F18	famille_matiere (c, « plastique »)	
F5	type_produit (p, « boîtier »)	
F6	type_produit (p, « châssis »)	
F27	coloriage_produit (p, « uniforme »)	
F28	coloriage_produit (p, « compatible »)	
R14	Si (F2 et F3) et F18 et (F5 ou F6)) Alors (F27 ou F28)	

B3. Le recouvrement de tout produit plastique doit être limité au minimum (critère obligatoire)		Composants du boîtier
F2	matiere_produit (p, m)	
F3	classe_matiere (m, c)	
F5	type_produit (p, « boîtier »)	
F18	famille_matiere (c, « plastique »)	
F29	recouvrement_produit (p, « minimum »)	
R15	Si (F2 et F3) et F5 et F18) Alors F29	

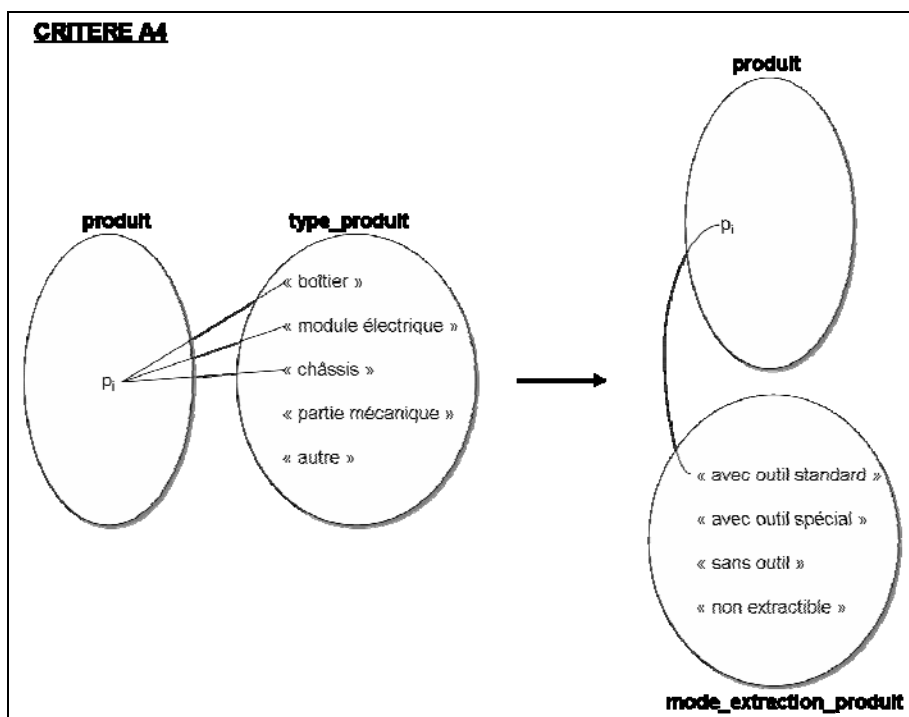
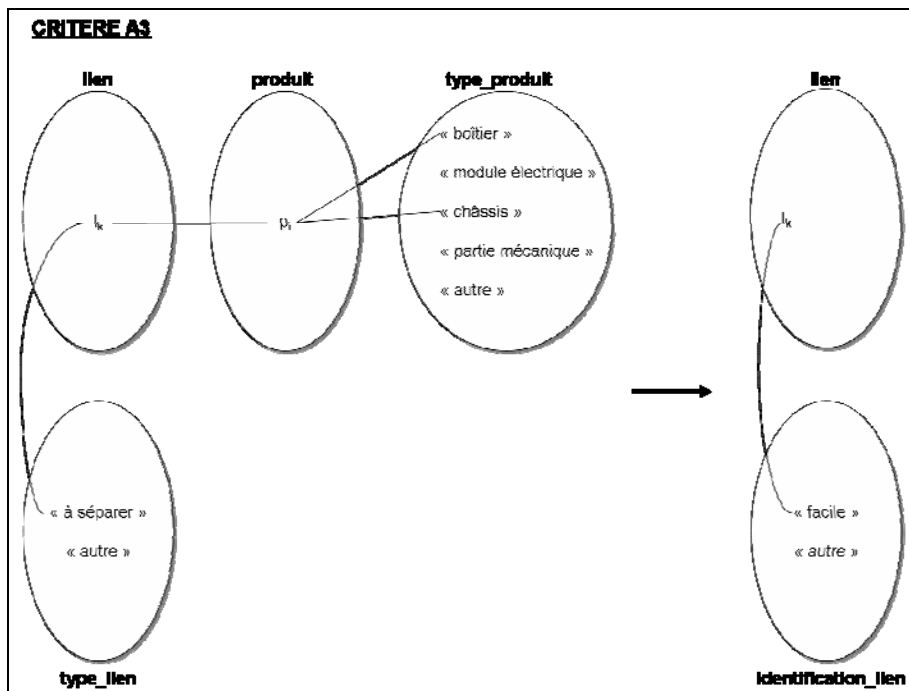
B4. Les matières et matières composites utilisées doivent être recyclés en matériaux à un « haut niveau » (critère obligatoire)		Composants du boîtier, châssis
<p>Il est précisé que la dénomination « recyclés en matériaux » s'applique à des matières recyclables à une échelle « industrielle », c'est-à-dire que le recyclage envisagée doit être technologiquement et économiquement viable ; un « haut niveau » de recyclage signifie que la matière recyclée « comparable » à la matière d'origine, doit pouvoir satisfaire un besoin similaire.</p>		
F2	matiere_produit (p, m)	
F4	type_produit (p, « boîtier »)	
F5	type_produit (p, « châssis »)	
F30	niveau_recyclabilite (m, « industriel »)	
F31	degre_recyclabilite (m, « haut »)	
R16	Si (F2 et (F4 ou F5)) Alors (F30 et F31)	

B5. L'utilisation d'une proportion de matériau recyclé est-elle permise ? (critère obligatoire)		Composants du boîtier, châssis
R17	Modélisé sous forme de QUESTION/REPONSE	

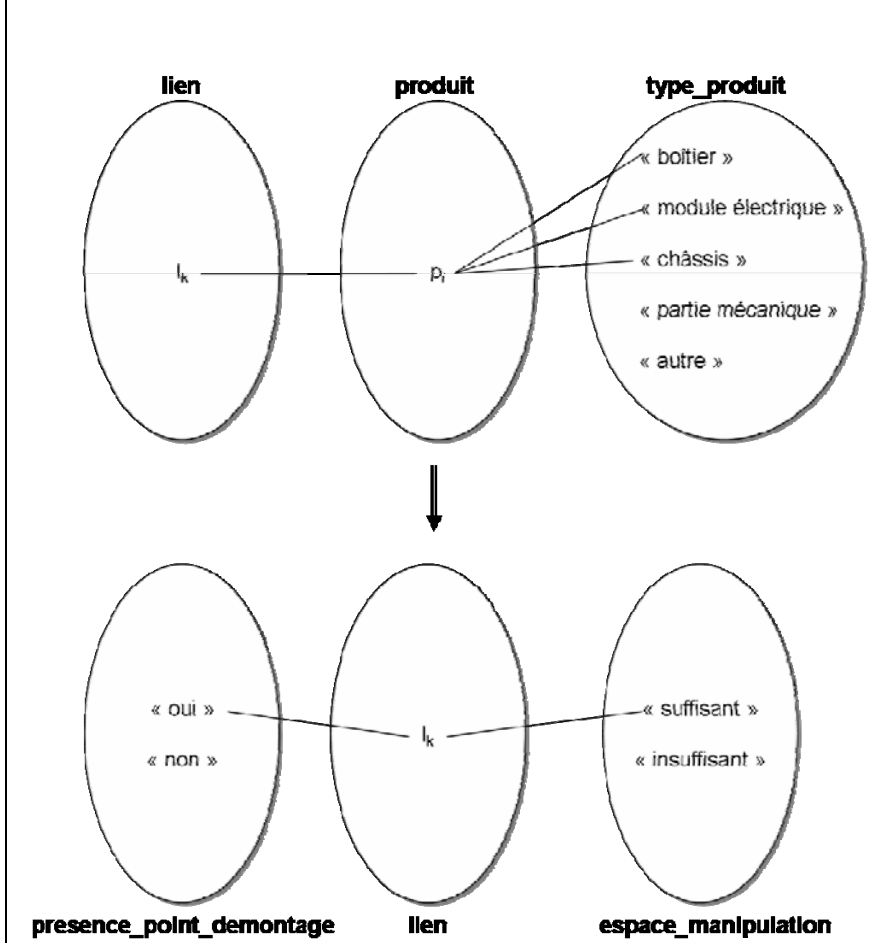
B6. Les matières plastiques recyclées doivent constituer au moins 5% du plastique utilisé (critère non obligatoire)		Composants du boîtier, châssis
F2	matiere_produit (p, m)	
F3	classe_matiere (m, c)	
F18'	famille_matiere (c, fm)	
F18''	famille_matiere (fm, « plastique »)	
F32	categorie_famille_matiere (fm, « recyclé »)	
F33	pourcentage_matiere (m, « au moins 5% »)	
R18	Si (F2 et F3 et F18 et F18' et F18'' et F32) Alors F33	

B8. Les matières plastiques doivent être marquée selon la norme ISO 11469 (critère obligatoire)		Produit pesant au moins 25g
F2	matiere_produit (p, m)	
F3	classe_matiere (m, c)	
F18	famille_matiere (c, « plastique »)	
F24	masse_produit (p, « au moins 25g »)	
F34	marquage_produit (p, « ISO 11469 »)	
R20	Si ((F2 et F3) et F18 et F24) Alors F34	

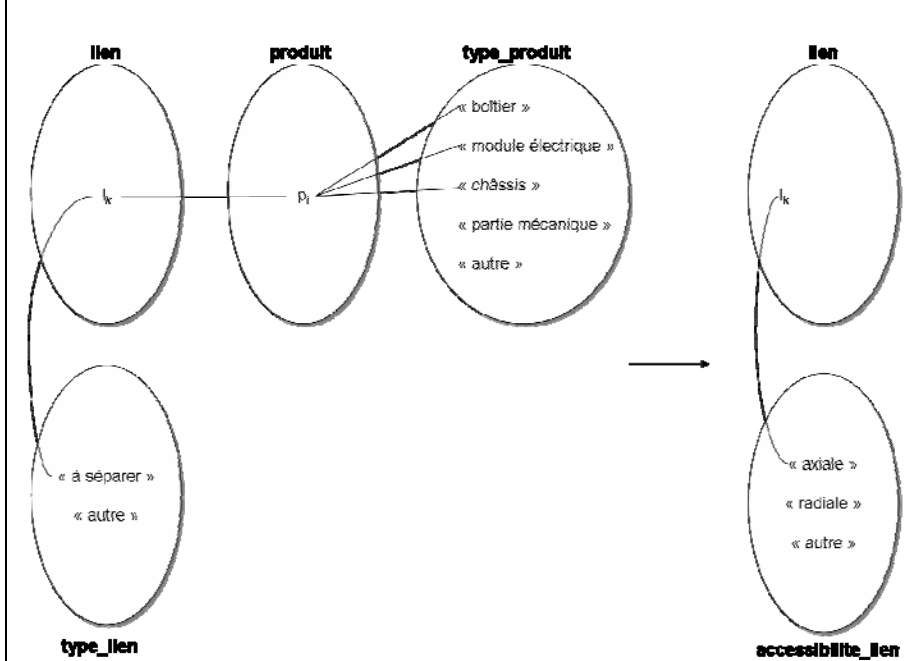
2) Expression sous forme de contraintes



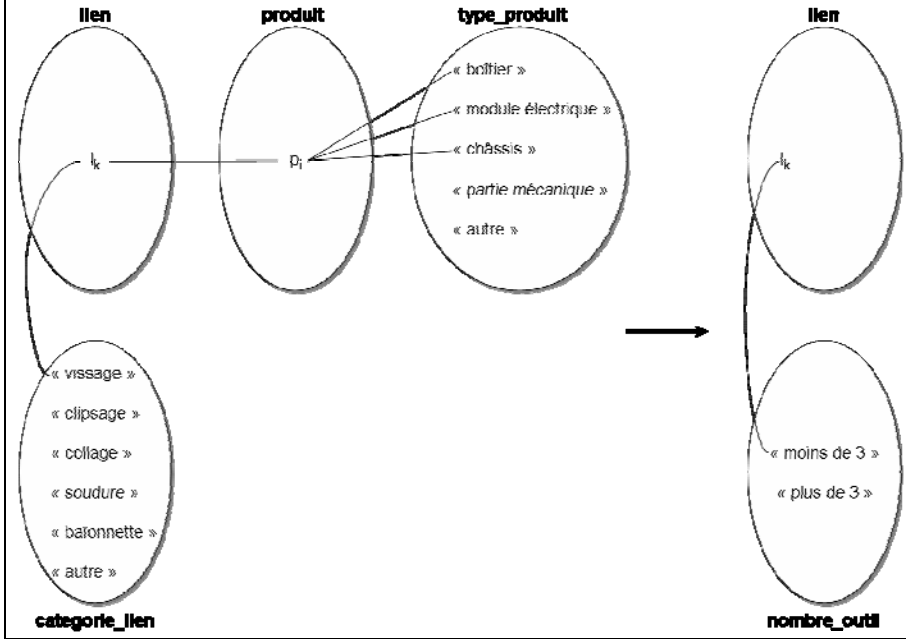
CRITERE A6



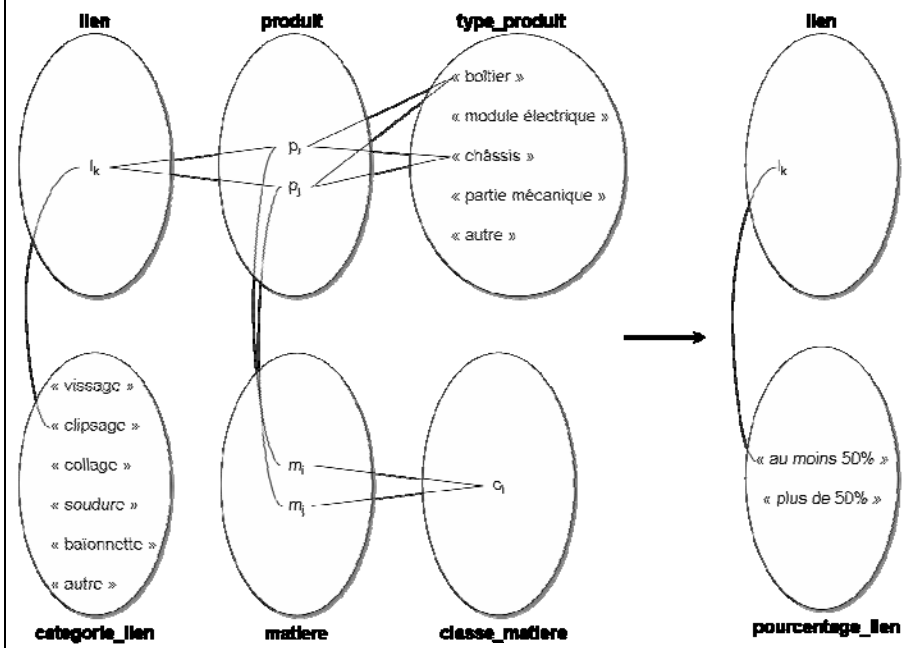
CRITERE A6

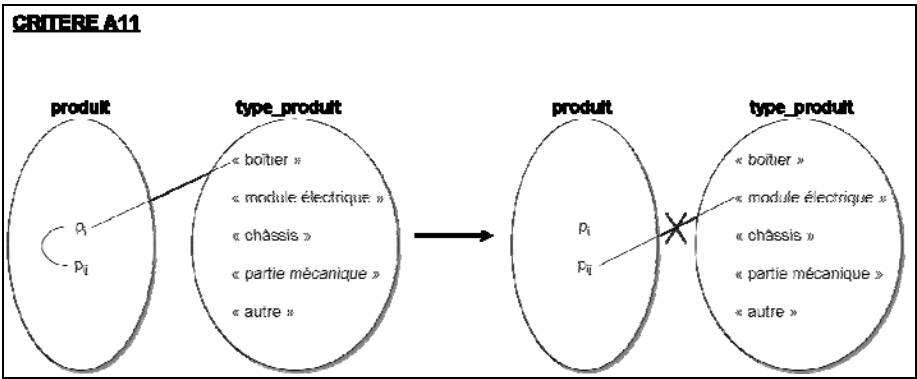
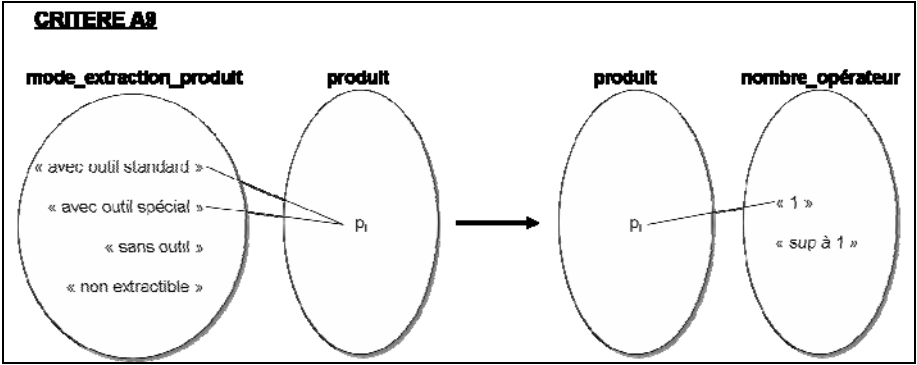


CRITERE A7

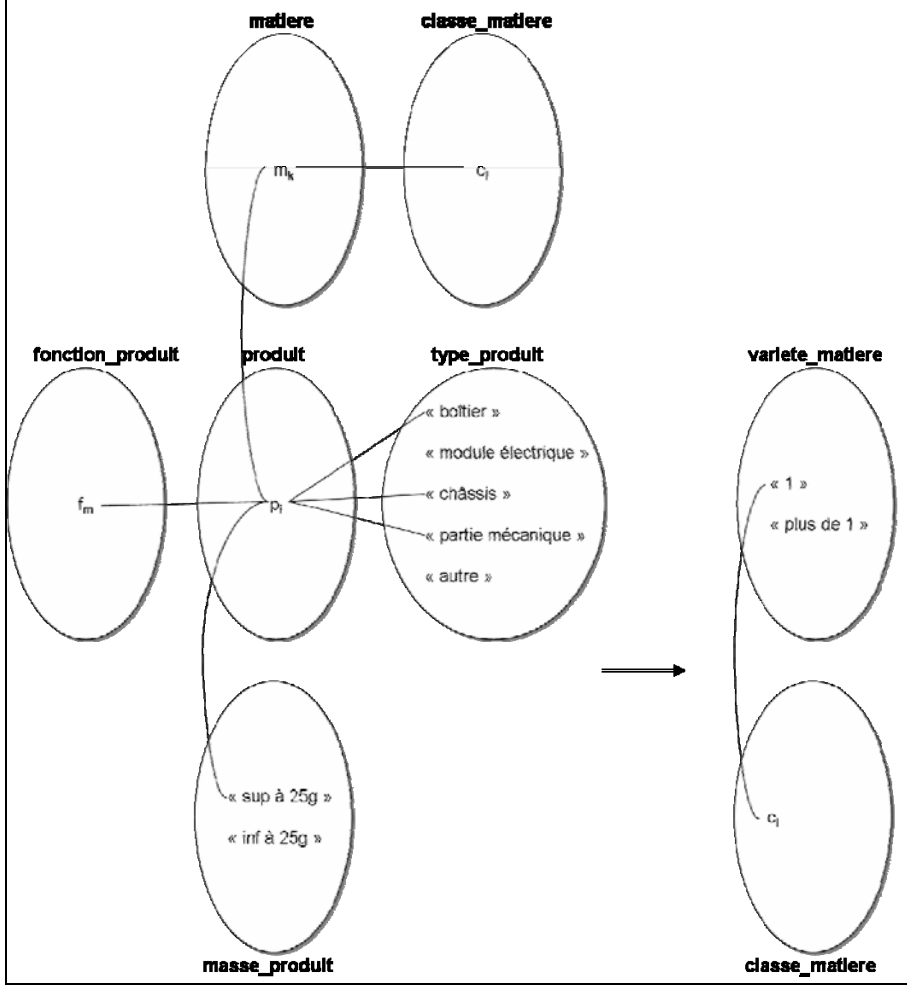


CRITERE A8

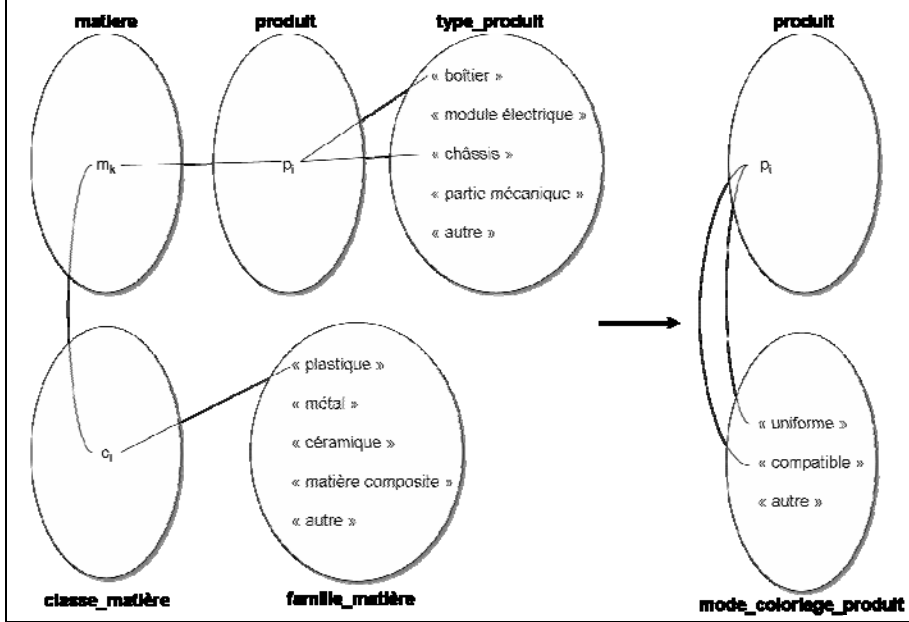




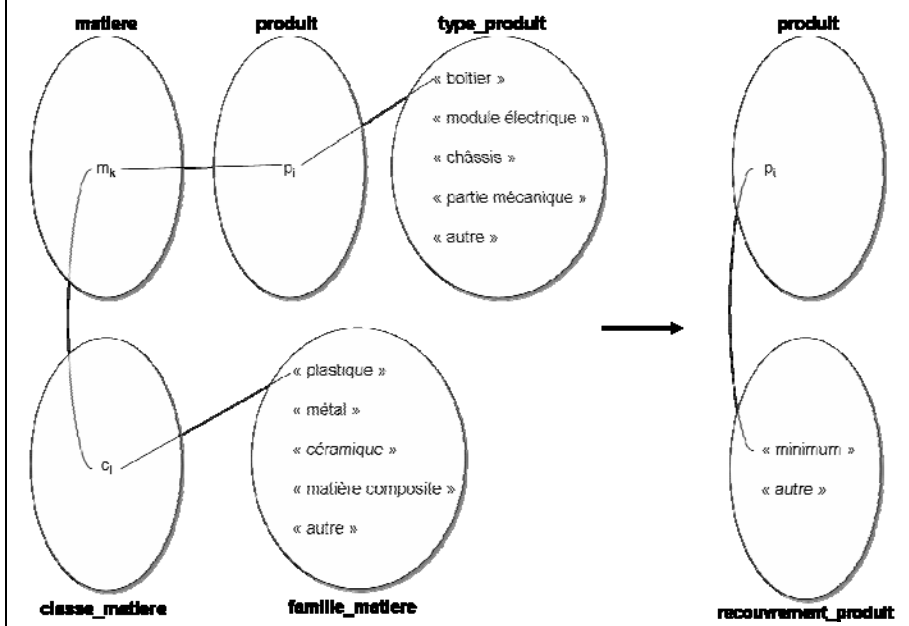
CRITERE B1



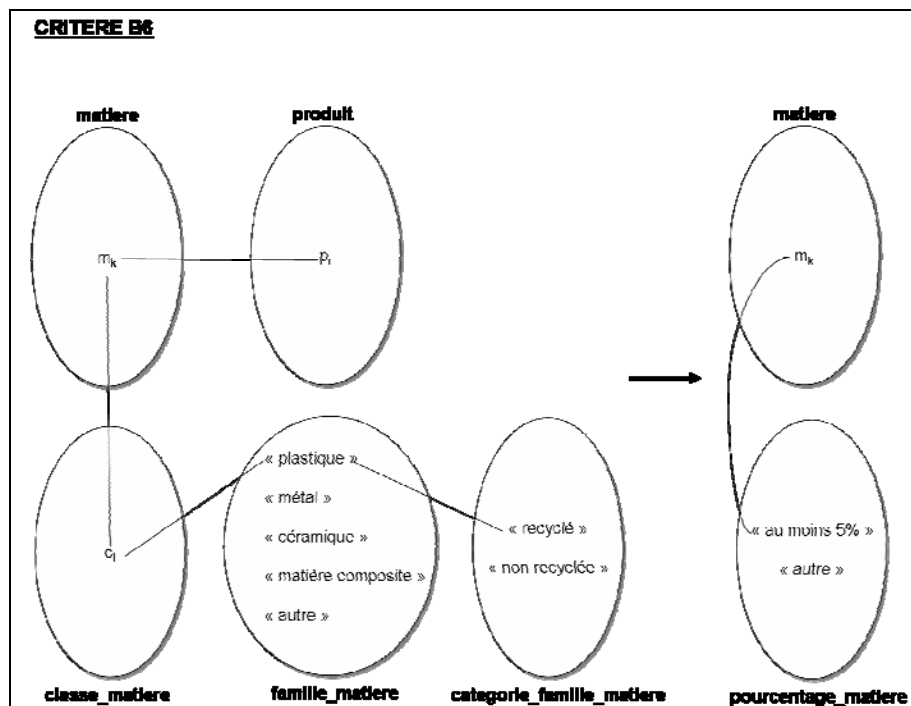
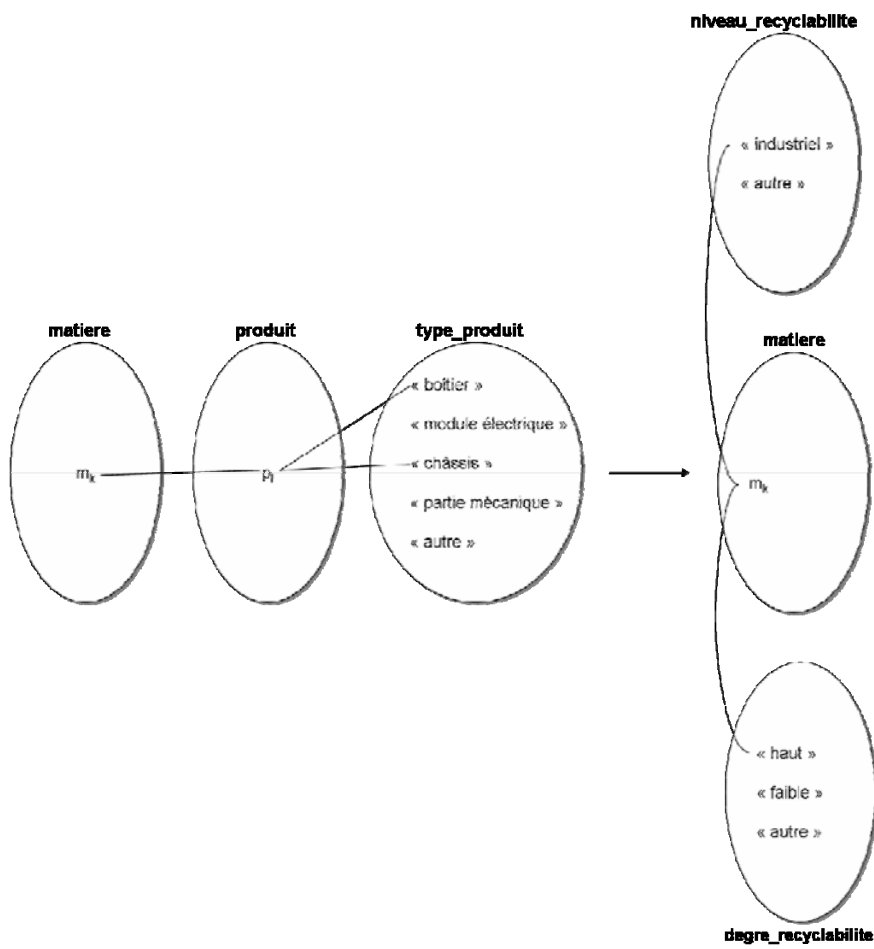
CRITERE B2



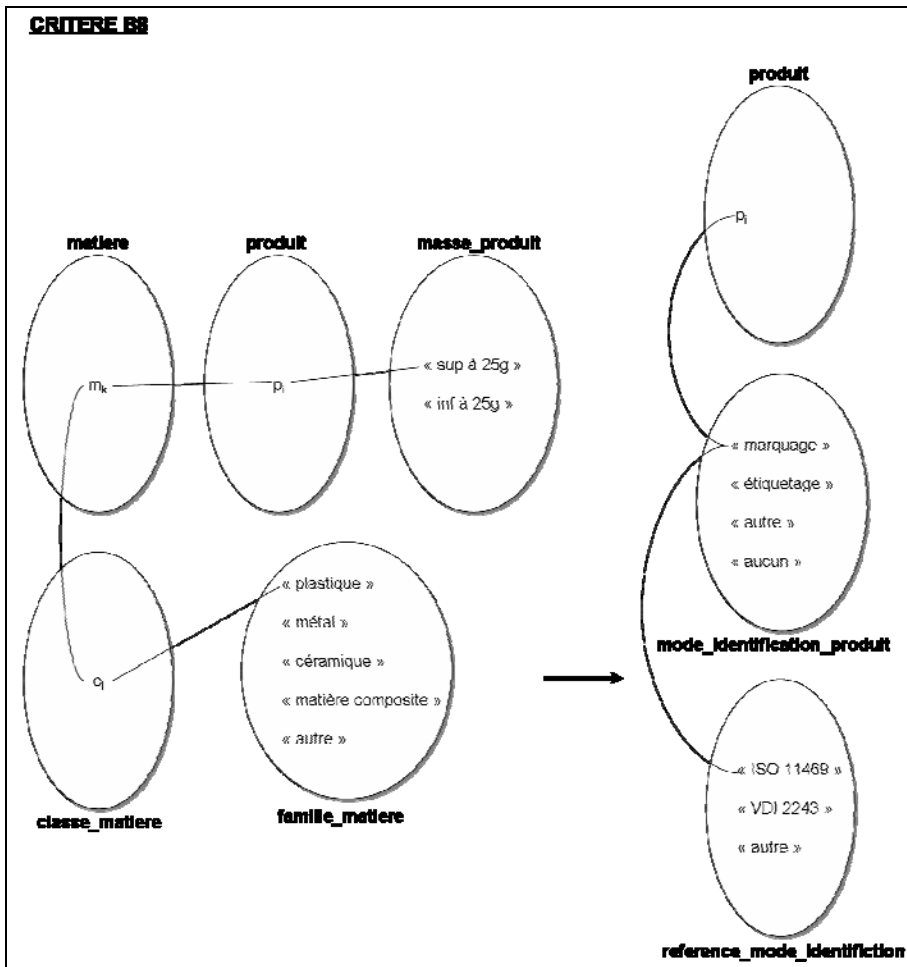
CRITERE B3



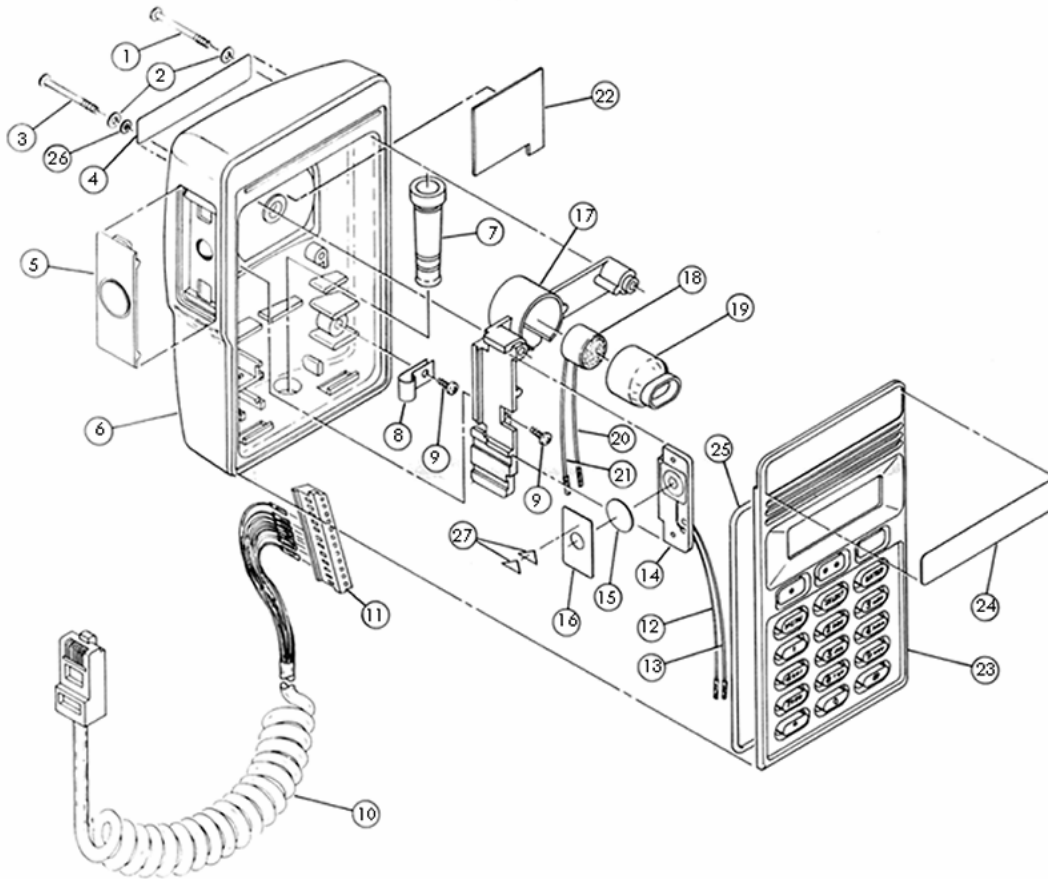
CRITERE B4



CRITERE B8



Annexe 2 : nomenclature complète de l'exemple étudié



ITEM NO.	DESCRIPTION
1	SCREW
2	WASHER (2 req'd)
3	SCREW
4	LABEL
5	LEVER, PTT (part of item 6)
6	ASSEMBLY, Housing (includes item 5)
7	STRAIN RELIEF
8	CLAMP
9	SCREW (2 req'd)
10	CORD, Coil
11	HOUSING, Header
12	WIRE, Receptacle
13	WIRE, Receptacle
14	PRINTED CIRCUIT BOARD, PTT
15	CONTACT, Snap
16	SEAL, Dome
17	FRAME
18	MICROPHONE
19	BOOT, Microphone
20	WIRE, Receptacle
21	WIRE, Receptacle
22	PAD
23	ASSEMBLY, Display Cover
24	LABEL, Nameplate
25	O-RING
26	WASHER, Insulator
27	INSULATOR

Annexe 3 : extraits de code **CLAIRE**

Extrait 1

```
////////////////////////////////////  
// Partie 1 : modèle des données « recyclabilité »  
////////////////////////////////////  
  
// déclarations avancées d'objets pouvant ainsi être utilisés comme types  
  
Produit <: object  
  
Matiere <: object  
  
Substance <: object  
  
Lien <: object  
  
Identification <: object  
  
Ressource <: object  
  
Parametre <: object  
  
ListeParametre <: list<Parametre>  
  
...  
  
// autres déclarations (utilisation de la déclaration avancée comme type)  
  
// déclaration de paramètres quantitatifs et qualitatifs  
  
// un paramètre quantitatif pouvant avoir une valeur,  
  
// et une description i.e. un paramètre quantitatif  
  
ParametreQualitatif <: Parametre(description:string)  
  
ParametreQuantitatif <: Parametre(valeur:float, descriptions:list<ParametreQualitatif>)  
  
// déclaration d'un type de produit qui formé d'une liste de produits, et  
  
// d'une liste de paramètres (quantitatifs et qualitatifs)  
  
TypeProduit <: object(produits:list<Produit>,  
  
    parametres:list<ListeParametre>(list<ParametreQualitatif>,  
  
    list<ParametreQualitatif>))
```

```

// les déclarations suivantes sont similaires à la précédente

ClasseMatiere <: object(matieres:list<Matiere>,

    parametres:list<ListeParametre>(list<ParametreQualitatif>,

        list<ParametreQualitatif>))

FamilleMatiere <: object(classematieres:list<ClasseMatiere>,

    parametres:list<ListeParametre>(list<ParametreQualitatif>,

        list<ParametreQualitatif>))

TypeSubstance <: object(substances:list<Substance>,

    parametres:list<ListeParametre>(list<ParametreQualitatif>,

        list<ParametreQualitatif>))

TypeIdentification <: object(identifications:list<Identification >,

    parametres:list<ListeParametre>(list<ParametreQualitatif>,

        list<ParametreQualitatif>))

TypeIdentification <: object(identifications:list<Identification >,

    parametres:list<ListeParametre>(list<ParametreQualitatif>,

        list<ParametreQualitatif>))

Noeud <: oject(liens:list<Lien>,

    parametres:list<ListeParametre>(list<ParametreQualitatif>,

        list<ParametreQualitatif>))

Etiquette <: object(substances:list<Substances>, matieres:Matiere,

    parametres:list<ListeParametre>(list<ParametreQualitatif>,

        list<ParametreQualitatif>))

Reference < : object(parametres:list<ListeParametre>(list<ParametreQualitatif>,

        list<ParametreQualitatif>))

...

```

```

////////////////////////////////////
// Partie 2 : récupération de données à partir de fichiers
////////////////////////////////////
// une partie peut être récupérée à partir d'un fichier en utilisant
// a) la fonction fopen("fichier", "r") ;
// b) une autre partie pouvant être extraite d'une base de données MySQL
...
////////////////////////////////////
// Partie 3 : construction du problème
////////////////////////////////////
// le CSP, ses variables, ses contraintes
////////////////////////////////////
// Partie principale : implémentation de la démarche d'aide
////////////////////////////////////
// a) stratégies de recherche / contrôle de la propagation
// b) explications
...

```

Extrait 2

```

// création d'un CSP dénommé p, ayant au plus 20 variables
p := choco/makeProblem("Test1 Blue Angel", 20)
// déclaration des variables du problème : domaines d'entiers avec valeurs respectives
// définies comme ci-dessus
typeProd := choco/makeIntVar(p, "typeProd", 1, 5)
identificationProd := choco/makeIntVar(p, "identificationProd", 1, 4)
extractionProd := choco/makeIntVar(p, "extractionProd", 1, 3)
// définition de la contrainte pour le critère A2, la contrainte stipule que
// si la variable type de produit vaut 1 alors

```

```

// la variables identification produit vaut 1 ou 2,

// tandis que la variable extraction produit doit être différente de 4

// i.e égale à 1 ou 2 ou 3

post(p, implies(typeProd == 1, and(identificationProd in (1 .. 2), extractionProd != 4)))

// instantiation pour le circuit imprimé

choco/setVal(typeProd, 1)

choco/setVal(identificationProd, 1)

choco/setVal(extractionProd, 3)

// propagation

choco/propagate(p)

```

Extrait 3

```

// déclaration (avancée) de types

TypeProduit <: list<integer>{i | i in (1 .. 5)}

IdentificationProduit <: list<integer>{i | i in (1 .. 4)}

ExtractionProduit <: list<integer>{i | i in (1 .. 3)}

// déclaration du type Produit à partir des déclarations avancées

Produit <: object(type:TypeProduit, identification:IdentificationProduit,

                 extraction:ExtractionProduit)

// définition de la contrainte

[testBlueAngel(monProduit:list<Produit>) : void

  -> let p := choco/makeProblem(("Test2 Blue Angel", 20),

    typeProd := choco/makeIntVar(p, "typeProd", 1, 5),

    identificationProd := choco/makeIntVar(p, "identificationProd", 1, 4),

    extractionProd := choco/makeIntVar(p, "extractionProd", 1, 3)

  in

  (

    for pr in monProduit

```

```

    (
        // contrainte

        choco/post(p, implies(pr.type == 1,
            and(pr.identification in (1 .. 2), pr.extraction != 4))
        )

        // propagation

        choco/propagate(p)
    )
]

// instantiation (le cas décrit dans la suite concerne une saisie en dur)

// ces valeurs peuvent toutefois être renseignées à partir d'une interface web
circuitImprime :: Produit(1, 1, 3)
microphone :: Produit(1, 1, 1)
levier :: Produit(4, 1, 1)
...
combineTelephonique :: list<Produit>(circuitImprime, microphone, levier, ...)

// test (appel de la fonction testBlueAngel)
testBlueAngel(combineTelephonique)
...

```


Bibliographie

- [Ackoff, 1989] R. L. Ackoff, "From Data to Wisdom", *Journal of Applied Systems Analysis*, 16, pp. 3-9 (1989).
- [Agard, 2004] B. Agard, *Modélisation des familles de produits : Etat de l'art*, *Mécanique & Industries*, 5, pp. 275-288 (2004).
- [Ashby et Cebon, 2003] M. Ashby et D. Cebon, *News Approaches to Materials Education for Students Engineering.*, (2003).
- [Aussenac-Gilles et al., 2004] N. Aussenac-Gilles, B. Biébow et S. Szulman, *Modélisation du domaine par une méthode fondée sur l'analyse de corpus*, in R. Teulier, J. Charlet et P. Tchounikine, eds., *Ingénierie des Connaissances*, Eyrolles, Paris (2004).
- [Bachimont, 2000] B. Bachimont, *Engagement sémantique et engagement ontologique : conception et réalisation d'ontologies en Ingénierie des connaissances*, in J. Charlet, M. Zacklad, G. Kassel et D. Bourigault, eds., *Ingénierie des connaissances, évolutions récentes et nouveaux défis*, Eyrolles, Paris (2000).
- [Bachimont, 2004] B. Bachimont, *Pourquoi n'y a-t-il pas d'expérience en ingénierie des connaissances ?* in N. Matta, ed., *Actes de la conférence "Ingénierie des connaissances" (IC2004)*, Presses Universitaires de Grenoble, Lyon (2004).
- [Barnabé et al., 2003] F. Barnabé, M. Ganier, B. Lafleur, R. Malosse, V. Moulin et P. Schiesser, *L'éco-conception pour les mécaniciens*, Editions du CETIM, (2003).
- [Behrendt et al., 1997] S. Behrendt, C. Jasch, M. C. Peneda et H. VanWeenen, *Life cycle design: A manual for small and medium-sized enterprises*, Springer-Verlag, Berlin, (1997).
- [Bekthi et Matta, 2004] S. Bekthi et N. Matta, *Traçabilité et mémorisation des connaissances au fil de l'eau en mémoire de projet*, *Gestion dynamique des connaissances industrielles. Traité IC2 Information - Commande - Communication*, Lavoisier, Paris (2004).
- [Boeglin, 1998] N. Boeglin, *La promotion de la qualité écologique des produits et écolabels*, Techniques de l'Ingénieur, G3, (1998).
- [Brachman, 1977] R. Brachman, *What's in a concept: structural foundations for semantic networks*, *Int. Journal of Man-Machine Studies*, 9 (1977).
- [Breuker et Van de Velde, 1994] J. Breuker et W. Van de Velde, *CommonKADS Library for Expertise Modelling, Reusable Problem Solving Components*, IOS Press, Amsterdam, (1994).
- [Brezet et VanHemel, 1997] H. Brezet et C. VanHemel, *Ecodesign - A promising approach to sustainable production and consumption*, United Nations Publication, (1997).
- [Brun et Sallet, 2005] E. Brun et F. Sallet, *Etude sur l'éco-conception*, AFNOR, (2005).

- [Brundtland, 1987] Brundtland, *Development and International Economic co-operation*, World Commission on Environment and Development, A/42/427, (1987).
- [Butel-Bellini et Janin, 1999] B. Butel-Bellini et M. Janin, *Ecoconception : état de l'art des outils disponibles*, Techniques de l'Ingénieur, G3, (1999).
- [Cali et al., 2005] A. Cali, D. Calvanese, B. Cuencaa Grau, G. De Giacomo, D. Lembo, M. Lenzerini, C. Lutz, D. Milano, R. Möller, A. Poggi et U. Sattler, *State of the Art, Deliverable D01, Thinking ONtologiES project (TONES)*, (2005).
- [Cawsey, 1997] A. Cawsey, *Essence of Artificial Intelligence*, Prentice Hall, (1997).
- [Clay, 2002] J. W. Clay, *Ecolabels: where are we going?*, Conference on Ecolabels and the Greening of the Food Market, Tufts University, Boston, USA, (2002).
- [Colombet, 2004] N. Colombet, *Inventaire des textes réglementaires en environnement : bilan 2004*, Dossier Techniques de l'ingénieur, G 1 0001-1 (2004).
- [Condamines, 2003] A. Condamines, *Sémantique et corpus spécialisés : constitution de bases de connaissances terminologiques. Carnets de grammaire 13* Equipe de Recherche en Syntaxe et Sémantique, UMR 5610 - CNRS & Université de Toulouse-Le Miral, Toulouse, France (2003).
- [Corbel, 1997] J. C. Corbel, *Méthodologie de retour d'expérience : démarche MEREX de Renault*, in J. C. Fouet, ed., *Connaissances et savoir-faire en entreprise*, Hermès (1997).
- [Dechter, 2003] R. Dechter, *Constraint Processing*, Morgan Kaufmann Publishers, (2003).
- [Derigent et Lombard, 2006] W. Derigent et M. Lombard, *Contribution à la conception de système d'information produit: méthode pour une approche par modélisation multipoints de vue*, *Ingénierie de la conception et cycle de vie des produits*, Hermès-Lavoisier, pp. 343-370 (2006).
- [Dieng et al., 1998] R. Dieng, O. Corby, A. Giboin et M. Ribière, *Methods and Tools for Corporate Knowledge Management*, *Rapport de recherche n° 3485*, INRIA (1998).
- [Dowie, 1994] T. Dowie, *Design for Disassembly*, Technical Report, Manchester Metropolitan University (1994).
- [Faltings, 1994] B. Faltings, "Arc consistency for continuous variables", *Artificial Intelligence*, 65, pp. 363-376 (1994).
- [Feldmann et Meedt, 1995] K. Feldmann et O. Meedt, *Recycling and disassembly of electronic devices*, IFIP WG5.3 International Conference on Life Cycle Modelling for Innovative Products and Processes, Berlin, Allemagne, (1995).
- [Feldmann et al., 1999] K. Feldmann, O. Meedt, S. Trautner, H. Scheller et W. Hoffmann, *The "Green Design Advisor": a tool for design for environment*, *Journal of Electronics Manufacturing*, (1999).

- [Fernandez et al., 1997] M. Fernandez, A. Gomez-Perez et A. Juristo, *METHONDOLOGY: From Ontological Art Towards Ontological Engineering*, Workshop on Ontological Engineering, Spring Symposium Series AAAI97, Stanford, USA (1997).
- [Fiksel, 1996] J. Fiksel, *Design for environment: creating eco-efficient products and processes*, McGraw-Hill, (1996).
- [Fisher, 2000] X. Fisher, *Stratégie de conduite du calcul pour l'aide à la décision en conception mécanique intégrée : application aux appareils à pression*, Thèse de Doctorat, ENSAM (2000).
- [Fox et al., 1985] M. Fox, J. Wright et D. Adam, *Experiences with SRL: An analysis of a frame-based knowledge representation*. *Expert Database Systems*, Benjamin/Cummings, (1985).
- [Gaillard, 1994] F. Gaillard, *Sur la modélisation des connaissances et l'utilisation de bases de données objet en productique*, Thèse de l'Université de Technologie de Compiègne (1994).
- [Gelle, 1998] E. Gelle, *On the generation of locally consistent solution spaces in mixed dynamic constraint problems*, Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique, Lausanne (1998).
- [Gruber, 1993] T. R. Gruber, *A translation approach to portable ontologies*, *Knowledge Acquisition*, 5(2), pp. 199-222 (1993).
- [Grundstein, 2002] M. Grundstein, *De la capitalisation des connaissances au renforcement des compétences dans l'entreprise étendue 1er colloque du groupe de travail "Gestion des Compétences et des Connaissances en Génie Industriel"*, Nantes (2002).
- [Grundstein et Rosenthal-Sabroux, 2004] M. Grundstein et C. Rosenthal-Sabroux, *Une aide à la décision pour le repérage des connaissances potentiellement cruciales dans un projet de conception, Application du cadre directeur GAMETH*, in B. Eynard, M. Lombard, N. Matta et J. Renaud, eds., *Gestion dynamique des connaissances industrielles*, Hermès-Lavoisier (2004).
- [Guarino, 1998] N. Guarino, *Formal Ontology and Information Systems*, *Proceedings of FOIS'98*, Amsterdam, IOS Press, Trento, Italy, pp. 3-15 (1998).
- [Guarino, 2002] N. Guarino, *Ontology-Driven Conceptual Modelling*, *Tutorial at 21st International Conference on Conceptual Modelling (ER'02)*, Tampere, Finland (2002).
- [Gungor et Gupta, 1999] A. Gungor et S. Gupta, *Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey*, *Computer & Industrial Engineering* pp. 811-853 (1999).
- [Habert et al., 1997] B. Habert, A. Nazarenko et A. Salem, *Les linguistiques de corpus. U Linguistique*, Armand Colin/Masson, Paris, (1997).
- [Habrias, 1998] H. Habrias, *Le Modèle Relationnel Binaire. Méthode I.A. (NIAM)*, Eyrolles, (1998).
- [Hadj-Hamou, 2002] K. Hadj-Hamou, *Contribution à la conception de produits à forte diversité et leur chaîne logistique : une approche par contrainte*, Thèse de Doctorat, INP, Toulouse (2002).

- [Halpin, 1998] T. Halpin, *Object-Role Modeling (ORM/NIAM)*. *Handbok of Architectures of Information Systems*, eds P. Bernus, K. Mertins & G. Schmidt, Springer-Verlag, Berlin (1998).
- [Halpin, 1999] T. Halpin, *Data modelling in UML and ORM: a comparison*, *Journal of Database Management*, Idea Group Publishing, Hershey PA, USA, 10, n°4, pp. 4-13 (1999).
- [Harani, 1997] Y. Harani, *Une approche multi-modèles pour la capitalisation des connaissances dans le domaine de la conception* Thèse de doctorat de l'INPG (1997).
- [Horrocks et al., 2003] I. Horrocks, P. F. Patel-Schneider et F. vanHarmelen, *From SHIQ and RDF to OWL: The making of a web ontology language*, *Journal of Web Semantics*, 1, n°1 (2003).
- [Houé et al., 2006] R. Houé, B. Grabot et P. Zaraté, *Représentation des connaissances normatives en vue de l'évaluation de la recyclabilité en conception : des normes aux contraintes*, SIMO'06, Toulouse (2006).
- [Houé et Grabot, 2007] R. Houé et B. Grabot, *Knowledge Modelling for Eco-Design (accepté)*, Special Issue on Knowledge Management in Design, *International Journal on Concurrent Engineering Research and Applications (CERA)*, SAGE Publications, London (2007).
- [Houé et Grabot, à paraître en 2007] R. Houé et B. Grabot, *Knowledge Modelling for Eco-Design (accepté)*, Special Issue on Knowledge Management in Design, *International Journal on Concurrent Engineering Research and Applications (CERA)*, SAGE Publications, London (à paraître en 2007).
- [Hundal, 2000] M. Hundal, *Design For Recycling and Remanu-facturing*, *International Design Conference - DESIGN 2000*, Dubrovnik (2000).
- [Ishii et Lee, 1996] K. Ishii et B. Lee, *Reverse Fishbone Diagram: A Tool in Aid of Design for Product Retirement*, ASME Design Technical Conference (1996).
- [Ishii, 1998] K. Ishii, *Design for Environment and Recycling: Overview of Research in the United States*, *CIRP 5th International Seminar on Life-cycle Engineering*, pp. 16-18 (1998).
- [ISO, 1994] ISO, *ISO 10303-42, STEP Product Data Representation and Exchange, Part 42, Integrated Generic Resources: Geometric and Topological Representation*, International Organisation for Standardization, Subcommittee, NIST (1994).
- [ISO, 2002] ISO, *Application of the ISO 14000 family*, *Environmental Management*, pp. 1,10-11 (2002).
- [Johansson, 1997] G. Johansson, *Design for disassembly - A framework*, Graduate School of Management and Industrial Engineering, Linköping Universitet, Linköping (Suède), pp. 108 (1997).
- [Josset, 2002] F.-X. Josset, *Spécification et compilation d'un langage de haut niveau pour l'Optimisation Combinatoire : CLAIRE vers Java*, Université de Versailles, Saint-Quentin-en-Yvelines (2002).

- [Junker, 2001] U. Junker, *Quickxplain: Conflict Detection for Arbitrary Constraint Propagation Algorithms*, *IJCA'01 workshop on Modelling and Solving Problems with Constraints*, pp. 81-88 (2001).
- [Kärnä, 1998] A. Kärnä, *Environmentally Oriented Product Design*, *Federation of Finnish Electrical and Electronics Industry, Helsinki.*, (1998).
- [Labrousse, 2004] M. Labrousse, *Proposition d'un modèle conceptuel unifié pour la gestion dynamique des connaissances d'entreprise*, *Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale et de l'Université de Nantes* (2004).
- [Laburthe, 2000] F. Laburthe, *CHOCO : implémentation du noyau d'un système de contraintes*, *Actes de JPNC'00*, pp. 151-165 (2000).
- [Lee et Ishii, 1998] B. H. Lee et K. Ishii, *The recyclability map: application of demanufacturing complexity metrics to design for recyclability* *The Journal of Sustainable Product Design*, 5, pp. 38-48 (1998).
- [Mackworth, 1977] A. Mackworth, *Consistency in networks of relations*, *Artificial Intelligence*, 8(1), pp. 99-118 (1977).
- [Maedche, 2003] A. D. Maedche, *Ontology Learning for the Semantic Web*, *Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts*, (2003).
- [Masini et al., 1997] G. Masini, A. Napoli, D. Colnet, D. Léonard et K. Tombre, *Les langages à Objets, Langages de classes, langages de frames, langages d'acteurs*, *Interéditions*, (1997).
- [Mathieux, 2002] F. Mathieux, *Contribution à l'intégration de la valorisation en fin de vie dès la conception d'un produit. Une méthode basée sur l'évaluation multi-critères de la recyclabilité du produit et sur l'identification de ses points faibles de conception*, *Spécialité Génie Industriel, Thèse de Doctorat, ENSAM, Chambéry* (2002).
- [McDonald et Prosser, 2002] K. McDonald et P. Prosser, *A case study of constraint programming for configuration problems*, <http://www.dcs.st-and.ac.uk/~apes-45-2002.ps.gz> (2002).
- [Meadows et al., 1972] D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers et W. W. Behrens, eds., *The limits of Growth. A report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*, *Universe Books, New York* (1972).
- [Meyer et al., 1992] I. Meyer, D. Skuce, L. Bowker et K. Eck, *Towards a new generation of terminological resources : an experiment in building a terminological knowledge base*, *Proceedings of the 15th International Conference on Computational Linguistics (COLING'92)*, *Nantes, France*, pp. 956-960 (1992).
- [Millon et al., 1998] O. Millon, M. Picavet et M. Lombard, *Démarche de conception des systèmes d'information dans le cadre de la modélisation multipoints de vue des données techniques*, *XVIème congrès INFormatique des ORganisation et Systèmes d'Information et de Décision (INFORSID)*, *Montpellier*, pp. 251-267 (1998).

- [Minsky, 1981] M. A. Minsky, *Framework for Representing Knowledge*. Mind Design, MIT Press, (1981).
- [MML Working Group, 2000] MML Working Group, *Methodology and tools Oriented to Knowledge-based engineering Applications*, MOKA User Guide (MOKA Modeling Language Core Definition), MOKA project - ESPRIT 25418, Deliverable D1.3 - Annex B (2000).
- [Mohr et Hendersen, 1986] R. Mohr et T. C. Hendersen, *Arc and path consistency revisited*, Artificial Intelligence, 28, pp. 225-233 (1986).
- [Montanari, 1974] U. Montanari, *Networks of constraints: fundamental properties and application to picture processing*, Information sciences, 7, pp. 95-132 (1974).
- [Morel et al., 2001] G. Morel, J. F. Petin et P. Lamboley, "Formal specification for manufacturing systems automation", 10th IFAC INCOM Symposium, Vienna, AUSTRIA (2001).
- [Mostefai et al., 2005] S. Mostefai, A. Bouras et M. Batouche, *Effective Collaboration in Product Development via a Common Sharable Ontology*, International Journal of Computational Intelligence, 2, pp. 1304-4508 (2005).
- [Mostefai et Bouras, 2006] S. Mostefai et A. Bouras, *What ontologies for PLM : a critical analysis*, International Conference on Concurrent Enterprising (ICE), Milano (2006).
- [Mulyanto, 2002] T. Mulyanto, *Utilisation des techniques de propagation pour la conception d'avions*, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, Toulouse (2002).
- [Narendra, 2000] J. Narendra, *The PaLM system: explanation-based constraint programming*, Proceedings of TRICS: Techniques For Implementing Constraint Programming Systems, a post-conference workshop of CP'00, pp. 118-133 (2000).
- [Narendra, 2001] J. Narendra, *e-constraints: explanation-based Constraint Programming*, CP'01 workshop on user-interaction in constraint satisfaction (2001).
- [Navin-Chandra, 1993] D. Navin-Chandra, *ReSar: A design tool for environment recovery analysis*, 9th International Conference on Engineering Design, The Hague, Heurista, Zurich, Switzerland, pp. 780-787 (1993).
- [Nazarenko, 1994] A. Nazarenko, *Compréhension du Langage Naturel : le problème de la causalité*, Thèse d'Informatique à l'Université de Paris-Nord XIII (1994).
- [Newell, 1982] A. Newell, *The Knowledge Level*, Artificial Intelligence, 18, pp. 87-127 (1982).
- [Pnuelli et Zussman, 1997] Y. Pnuelli et E. Zussman, *Evaluating the end-of-life value of a product and improving it by redesign*, IJ of Production Research, 35(4), pp. 921-942 (1997).
- [Polanyi, 1966] M. Polanyi, *The tacit dimension*, Routledge & Kegan Paul Ltd, London, (1966).
- [Prahinski et Kocabasoglu, 2006] C. Prahinski et C. Kocabasoglu, *Empirical research opportunities in reverse supply chains*, Omega, 34, pp. 519-532 (2006).

- [Puyou, 1999] J. B. Puyou, *Démarches d'éco-conception en entreprise, Techniques de l'Ingénieur* (1999).
- [RAL German Institute for Quality Assurance and Certification, 2004] RAL German Institute for Quality Assurance and Certification, *Basic Criteria for Award of the Environmental Label - Workstation Computers*, (2004).
- [Reyes et al., 2006] T. Reyes, D. Millet et D. Brissaud, *De la nécessité de définir des modèles de trajectoires d'intégration de l'environnement pour les entreprises*, in Productique, ed., *Ingénierie de la conception et cycle de vie des produits - Traité IC2*, Hermes Lavoisier (2006).
- [Rose et al., 2000] C. M. Rose, A. Stevels et K. Ishii, *A new approach to end-of-life design advisor (ELDA)*, *Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment.*, San Francisco, USA (2000).
- [Salamitou, 2004] J. Salamitou, *Management Environnemental : Application à la norme ISO 14001 révisée*, Dunod/L'Usine Nouvelle, (2004).
- [Schreiber et al., 1994] A. T. Schreiber, B. J. Wielingea, R. De Hoog, H. Akkermans et W. Van de Velde, *CommonKADS: A Comprehensive Methodology for KBS Development*, *IEEE Expert*, pp. 28-37 (1994).
- [Simon, 1996] G. Simon, *Knowledge Acquisition and Modeling for Corporate Memory: Lessons learnt from Experience.*, *Proc. of KAW'96*, Banff, Canada, pp. 41-1 41-18 (1996).
- [Sohlenius, 1992] G. Sohlenius, *Concurrent Engineering*, *Annals of the CIRP*, 41/2 (1992).
- [Sowa, 1984] J. F. Sowa, *Conceptual Structures. Information Processing in Mind and Machine*, Addison-Wesley Publishing, (1984).
- [Sowa, 1991] J. F. Sowa, *Towards the Expressive Power of Natural Language*, Chap. 5, in J. F. Sowa, ed., *Principles of Semantic Networks: Exploration in the Representation of Knowledge*, Morgan Kaufman Publishing (1991).
- [Srinivasan, 2005] V. Srinivasan, *Open Standards for Product Lifecycle Management, Product Lifecycle Management Emerging solutions and challenges for Global Networked Enterprise*, Coordonateurs: Bouras A. Gurumorthy B., Sudarsan R., Interscience Enterprise Ltd, pp. 475-484 (2005).
- [Studer, 1998] R. Studer, *Knowledge Engineering, principles and methods*, *Data and Knowledge Engineering*, 25, pp. 161-197 (1998).
- [Sure et Studer, 2002] Y. Sure et R. Studer, *On-To-Knowledge: Content-Driven Knowledge Tools through Evolving Ontologies*, *EU IST-1999-10132 Project Deliverable (WP5)*, University of Karlsruhe (2002).
- [Svoboda, 1995] S. Svoboda, *Note on Life Cycle Analysis*, *University of Michigan Corporate Environmental Management Program (CEMP), LCA Note (9)*, (1995).

- [Thomas et Kox, 1996] A. G. Thomas et F. A. J. M. Kox, *Technical description and final evaluation of the recycling and industrial outlets, module of the DEMROP-project*, in r. T.-G. 96.30, ed., *Report of the Philips Centre for Manufacturing Techn.*, EcoDesign Group. TU, Delft, Netherlands, pp. 2 (1996).
- [Trigano, 1994] P. Trigano, *Automatic Indexation and Knowledge Storing*, *Proceedings of the 2nd International Symposium on the Management of Industrial and Corporate Knowledge (ISMICK'94)*, Compiègne, pp. 223-235 (1994).
- [Tsang, 1993] E. Tsang, *Foundations of Constraint Satisfaction*, Academic Press, London and San Diego, (1993).
- [Tsuchiya, 1993] S. Tsuchiya, *Improving Knowledge Creation Ability through Organizational Learning.*, *ISMICK'93 Proceedings, International Symposium on the Management of Industrial and Corporate Knowledge*, UTC, Compiègne (1993).
- [VDI, 1993] VDI, *VDI 2243 - Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte. V. D. Ingenieure. Düsseldorf: Verlag*, (1993).
- [Vezzoli, 1999] C. Vezzoli, *An overview of life cycle and information technology tools*, *The Journal of Sustainable Product Design*, 9 (1999).
- [Wegner, 1987] P. Wegner, *Dimensions of Object-Based Language Design*, *OOPSLA'87 Object-Oriented Programming Systems, Languages and Applications*, Orlando, USA (1987).
- [Welty, 1995] C. A. Welty, *An Integrated Representation for Software Development and Discovery*, Ph.D. Thesis of Rensselaer Polytechnic Institute, USA (1995).
- [WEPSI, 2001] WEPSI, *Overview of DfE Assessment Standards*, 12/24/01, (2001).
- [Woods, 1975] W. Woods, *What's in a Link: Foundations for Semantic Networks. Representation and Understanding: Studies in Cognitive Science*, Academic Press (1975).

**Modélisation des connaissances normatives en vue de
l'évaluation de la recyclabilité d'un produit en conception :
des normes aux contraintes.**

Résumé

Un des principes de l'ingénierie concurrente consiste à prendre en compte des contraintes liées à des étapes aval du cycle de vie d'un produit. Une meilleure prise en compte de ces exigences peut être obtenue par la mise à disposition d'outils d'aide à la décision permettant de vérifier rapidement la satisfaction des contraintes sur l'état actuel de description du produit. L'intégration des contraintes environnementales lors de la conception d'un produit est un excellent exemple de cette problématique, car représentative du problème général de la modélisation des connaissances, puis de leur interprétation au sein d'un système informatisé. En effet, les critères que le produit doit satisfaire sont contenus dans des normes et standards rédigés en langage naturel ; ces derniers peuvent être parfois ambigus, donc difficiles à interpréter, aussi bien par un humain que par un logiciel.

Dans cette thèse, notre travail vise à proposer puis valider une démarche de traduction des connaissances normatives sous une forme exploitable pour l'évaluation de la recyclabilité d'un produit lors de sa conception. Nous proposons tout d'abord de définir un modèle « étendu » de produit à partir de l'analyse d'un échantillon représentatif d'éco-labels ; ces derniers étant considérés comme corpus de connaissances contenant des règles permettant d'évaluer la recyclabilité. Un langage de modélisation à base d'ontologies est pour cela utilisé afin de faciliter le passage du langage naturel à un modèle semi-formel. Il s'agit ensuite de propager les contraintes de recyclabilité extraites du corpus considéré dans la nomenclature du produit ; celle-ci étant choisie comme cadre de définition des paramètres de la recyclabilité. La démarche proposée est alors validée à partir d'un algorithme basé sur des techniques de CSP, tandis qu'une implémentation à l'aide du langage objet CLAIRE est décrite.

Mots-clés : aide à la décision, gestion du cycle de vie produit, ingénierie des connaissances, contraintes, normes.

**Modelling normative knowledge for the recyclability
assessment of a product during its design stage:
from norms to constraints.**

Abstract

One of the principles of the concurrent engineering consists in taking into account constraints related to the downstream stages of a product lifecycle. Taking these constraints into account can be facilitated by providing a decision support tool capable of quickly checking the satisfaction of the constraints on the current state of the description of the product. The integration of environmental constraints when designing a product is an excellent example of this issue, since it is representative of the generic problem of knowledge modelling and their use by a software agent. Indeed, the criteria that a product must satisfy are expressed in norms and standards written in natural language which can be sometimes ambiguous, and therefore difficult to interpret, by a human or by a software.

In this thesis, our work aims at suggesting then validating a methodology of the translation of normative knowledge into an exploitable form in order to assess the recyclability of a product during its design stage. We first propose to define an "extended" product model, based on the analysis of some representative eco-labels, considered as a corpus of knowledge containing the rules allowing to assess the recyclability. An ontology-based modelling language is used in order to facilitate the translation, from the natural language to a semi-formal model. The question is then to propagate the recyclability constraints extracted from the considered corpus within the product bill of material, used as a definition framework of the recyclability parameters. The suggested methodology is then validated with a CSP-based algorithm, and an implementation with the CLAIRE object programming language is described.

Keywords: decision support, product lifecycle management, knowledge engineering, constraints, norms.