



HAL
open science

Outils d'élaboration de stratégie de recyclage basée sur la gestion des connaissances : application au domaine du génie des procédés

Philippe Chazara

► To cite this version:

Philippe Chazara. Outils d'élaboration de stratégie de recyclage basée sur la gestion des connaissances : application au domaine du génie des procédés. Génie des procédés. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2015. Français. NNT : 2015INPT0141 . tel-04240316

HAL Id: tel-04240316

<https://theses.hal.science/tel-04240316>

Submitted on 13 Oct 2023

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

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



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

Discipline ou spécialité :

Genie industriel

Présentée et soutenue par :

M. PHILIPPE CHAZARA

le vendredi 6 novembre 2015

Titre :

OUTILS D'ELABORATION DE STRATEGIE DE RECYCLAGE BASEE
SUR LA GESTION DES CONNAISSANCES: APPLICATION AU
DOMAINE DU GENIE DES PROCEDES

Ecole doctorale :

Systemes (Systemes)

Unité de recherche :

Laboratoire de Génie Chimique (L.G.C.)

Directeur(s) de Thèse :

M. STEPHANE NEGNY

Rapporteurs :

M. MAURICIO CAMARGO PARDO, UNIVERSITE DE LORRAINE

M. NICOLAS PERRY, ENSAM BORDEAUX

Membre(s) du jury :

M. FLORENT BOURGEOIS, INP TOULOUSE, Président

M. JACQUES VILLENEUVE, BUREAU RECHERCHES GEOLOGIQUES MINIERES, Membre

M. LUDOVIC MONTASTRUC, INP TOULOUSE, Membre

M. STEPHANE NEGNY, INP TOULOUSE, Membre

RÉSUMÉ

OUTILS D'ÉLABORATION DE STRATÉGIE DE RECYCLAGE BASÉE SUR LA GESTION DES CONNAISSANCES : APPLICATION AU DOMAINE DU GÉNIE DES PROCÉDÉS

Dans ce travail, une étude est réalisée sur le développement d'une méthodologie permettant la génération et l'évaluation de nouvelles trajectoires de valorisation pour des déchets. Ainsi, pour répondre à cette problématique, trois sous problèmes ont été identifiés. Le premier concerne un cadre de modélisation permettant la représentation structurée et homogène de chaque trajectoire, ainsi que les indicateurs choisis pour l'évaluation de ces dernières, permettant une sélection ultérieure. Le deuxième se concentre sur le développement d'une méthodologie puis la réalisation d'un outil permettant la génération de nouvelles trajectoires en s'appuyant sur d'autres connues. Enfin, le dernier sous problème concerne le développement d'un second outil développé pour modéliser et estimer les trajectoires générées.

La partie de création d'un cadre de modélisation cherche à concevoir des structures globales qui permettent la catégorisation des opérations unitaires sous plusieurs niveaux. Trois niveaux de décomposition ont été identifiés. La *Configuration générique* de plus haut niveau, qui décrit la trajectoire sous de grandes étapes de modélisation. Le second niveau, *Traitement générique* propose des ensembles de structures génériques de traitement qui apparaissent régulièrement dans les trajectoires de valorisation. Enfin, le plus bas niveau se focalise sur la modélisation des opérations unitaires. Un second cadre a été créé, plus conceptuel et comportant deux éléments : les blocs et les systèmes. Ces cadres sont ensuite accompagnés par un ensemble d'indicateurs choisis à cet effet. Dans une volonté d'approche de développement durable, un indicateur est sélectionné pour chacune de des composantes : économique, environnemental et social. Dans notre étude, l'impact social se limite à l'estimation du nombre d'emplois créés. Afin de calculer cet indicateur, une nouvelle approche se basant sur les résultats économiques d'une entreprise a été proposée et validée.

L'outil de génération de nouvelles trajectoires s'appuie sur l'utilisation de la connaissance en utilisant un système de raisonnement à partir de cas (**RàPC**). Pour être adapté à notre problématique, la mise en œuvre de ce dernier a impliqué la levée de plusieurs points délicats. Tout d'abord, la structuration des données et plus largement la génération de cas sources sont réalisées par un système basé sur des réseaux sémantiques et l'utilisation de mécanismes d'inférences. Le développement d'une nouvelle méthode de mesure de similarité est réalisé en introduisant la notion de *définition commune* qui permet de lier les états, qui sont des descriptions de situations, à des états représentant des définitions générales d'un ensemble d'états. Ces définitions communes permettent la création d'ensembles d'états sous différents niveaux d'abstraction et de conceptualisation. Enfin, un processus de décompositions des trajectoires est réalisé afin de résoudre un problème grâce à la résolution de ses sous-problèmes associés. Cette décomposition facilite l'adaptation des trajectoires et l'estimation des résultats des transformations. Basé sur cette méthode, un outil a été développé en programmation logique, sous Prolog.

La modélisation et l'évaluation des voies de valorisation se fait grâce à la création d'outil spécifique. Cet outil utilise la méta-programmation permettant la réalisation dynamique de modèle de structure. Le comportement de ces structures est régi par la définition de contraintes sur les différents flux circulants dans l'ensemble de la trajectoire. Lors de la modélisation de la trajectoire, ces contraintes sont converties par un *parser* permettant la réalisation d'un modèle de programmation par contraintes cohérent. Ce dernier peut ensuite être résolu grâce à des solveurs via une interface développée et intégrée au système. De même, plusieurs greffons ont été réalisés pour analyser et évaluer les trajectoires à l'aide des critères retenus.

Les deux méthodes sont ensuite testées et validées par une série de tests permettant ainsi de vérifier leurs comportements, leurs possibilités et leurs limites. Pour ces tests, une base de cas sur des déchets a été créée. Pour la partie modélisation et évaluation, un cas d'étude est réalisé concernant la valorisation matière des pneus usés en granulats et poudrettes.

MOTS CLÉS. TRAITEMENT DES DÉCHETS, VALORISATION, RAISONNEMENT À PARTIR DE CAS, PROGRAMMATION LOGIQUE, MÉTA-PROGRAMMATION, INFÉRENCES, PROGRAMMATION PAR CONTRAINTES, ANALYSE DU CYCLE DE VIE

ABSTRACT

TOOLS OF ELABORATION OF STRATEGY OF WASTE RECYCLING BASED ON KNOWLEDGE MANAGEMENT : APPLICATION ON PROCESS ENGINEERING

In this work, a study is realised about the creation of a new methodology allowing the generation and the assessment of new waste recovery processes. Three elements are proposed for that. The first one is the creation of a modelling framework permitting a structured and homogeneous representation of each recovery process and the criteria used to assess them. The second one is a system and a tool generating new recovery processes from others known. Finally, the last element is another tool to model, to estimate and to assess the generated processes.

The creation of a modelling framework tries to create some categories of elements allowing the structuring of unit operations under different levels of description. Three levels have been identified. In the higher level, the *Generic operation* which describes global structure of operations. The second one is *Generic treatment* which is an intermediate level between the two others. It proposes here too categories of operations but more detailed than the higher level. The last one is the *Unit operation*. A second framework has been created. It is more conceptual and it has two components : blocs and systems. These frameworks are used with a set of selected indicators. In a desire of integrating our work in a sustainable development approach, an indicator has been chosen for each of its components: economical, environmental and social. In our study, the social impact is limited to the number of created jobs. To estimate this indicator, we proposed a new method based on economical values of a company.

The tool for the generation of new waste recovery processes used the methodology of case-based reasoning **CBR** which is based on the knowledge management. Some difficult points are treated here to adapt the CBR to our problem. The structuring of knowledge and generally the source case generation is realised by a system based on connections between data and the use of inference mechanisms. The development of a new method for the similarity measure is designed with the introduction of *common definition* concept which allows linking states, simply put description of objects, to other states under different levels of conceptualizations and abstractions. This point permits creating many levels of description. Finally, recovery process is decomposed from a main problem to some sub-problems. This decomposition is a part of the adaptation mechanism of the selected source case. The realisation of this system is under logic programming with Prolog. This last one permits the use of rules allowing inferences and the backtracking system allowing the exploration to the different possible solution.

The modelling and assessment of recovery processes are done by a tool programmed in Python. It uses the meta-programming to dynamically create model of operations or systems. Constraint rules define the behaviour of these models allowing controlling the flux circulating in each one. In the evaluation step, a parser is used to convert these rules into a homogeneous system of constraint programming. This system can be solved by the use of solvers with an interface developed for that and added to the tool. Therefore, it is possible for the user to add solvers but also to add plug-ins. This plug-ins can make the assessment of the activity allowing to have different kinds of evaluation for the same criteria. Three plug-ins are developed, one for each selected criterion.

These two methods are tested to permit the evaluation of the proposed model and to check the behaviour of them and their limits . For these tests, a case-base on waste has been created Finally, for the modelling and assessment tool, a study case about the recovery process of used tyres in new raw material is done.

KEYWORDS. WASTE TREATMENT, RECOVERY PROCESS, CASE-BASED REASONING, LOGICAL PROGRAMMING, META-PROGRAMMING, INFERENCE, CONSTRAINT PROGRAMMING, LIFE CYCLE ASSESSMENT

RESUMEN

ÚTILES PARA LA ELABORACIÓN DE ESTRATEGIAS DE RECICLAJE BASADO EN GESTIÓN DE LOS CONOCIMIENTOS : APLICACIÓN AL SECTOR DEL LA INGENIERÍA DE PROCESOS

En este trabajo, un estudio ha sido realizado sobre el desarrollo de un método que permite la generación y la evaluación de nuevas trayectorias de valorización de los desechos. Tres elementos están propuestos aquí. El primero es un marco de trabajo que permite la representación de cada trayectoria de manera estructurada y homogénea y, los indicadores para la evaluación y la selección de la mejor solución. El segundo es el desarrollo de un sistema y su realización de una herramienta que permite la generación de nuevas trayectorias basándose en casos conocidos. Por fin, el último punto es a propósito de un útil para modelar y evaluar las trayectorias generadas.

La parte de la creación de un marco de trabajo permite el diseño de estructuras globales y la categorización de operaciones unitarias bajo varios niveles. Tres niveles han sido identificados. El de más alto nivel es el de la *Configuración genérica* que describe la trayectoria bajo grandes etapas de la creación del modelo. El segundo nivel, *Tratamiento genérico*, constituye un nivel intermediario a los dos otros. Propone estructuras que se encuentran con frecuencia. Por fin, el último nivel es el de las *Operaciones unitarias*. Un segundo marco ha sido realizado, más conceptual y que contiene dos elementos: los bloques y los sistemas. Con la voluntad de acercarse al desarrollo sostenible, un indicador ha sido elegido por cada parte de este desarrollo : económico, ambiental y social. En nuestro estudio, el impacto social es limitado a la estimación de la cantidad de empleos creados. Para evaluarlo, un nuevo método ha sido propuesto y validado que se basa en resultados económicos de la empresa.

El útil de generación de nuevas trayectorias se basa sobre el uso del conocimiento usando un sistema de razonamiento a base de casos (**RBC**). Este implica la realización de varios puntos importantes. La estructuración de los datos y la generación de los casos está hecha con un sistema basado en conexiones y el uso de mecanismos de inferencias. El desarrollo de un nuevo método de estimación de la similitud está hecho con la introducción de la noción de *definición común* que permite relacionar estados, que son la descripción de un objeto y compone un caso, con otros estados que representan definiciones generales de un grupo de estados. Esto permite la creación de conjunto de estados bajo diferentes niveles de abstracción y de conceptualización. Por fin, un proceso de descomposición de las trayectorias es realizado y permite resolver un problema a partir de varios problemas. Esto permite la adaptación de las trayectorias y la estimación del resultado de las transformaciones. La realización de este sistema está hecha en programación lógica con Prolog, que ofrece la posibilidad de usar reglas que permite las inferencias y el backtracking que explora toda las soluciones posibles.

La realización del modelo y la evaluación de las trayectorias de valorización se hace a través de un útil programado bajo Python. Ese usa la meta-programación que permite la realización dinámica de modelos de estructura. La definición de restricciones sobre cada flujo que las atraviesan rige el comportamiento de cada una de esas estructuras. Durante la simulación de las trayectorias, esas restricciones están convertidas por un parser que permite la creación de un modelo de programación por restricciones coherente. Este modelo puede estar resuelto por un solver que tiene una interfaz con el sistema y, que de por hecho, ha sido realizada a propósito. Bajo la misma idea, varios complementos (plug-ins) han sido añadidos para realizar análisis y evaluaciones de trayectorias. Tres complementos han sido hechos representando cada uno de los criterios elegidos.

Los dos métodos están después comprobados por diferentes casos que permiten verificar sus comportamientos, sus posibilidades y sus límites. Para esas pruebas, una base de casos sobre los desechos ha sido realizada. Por fin, con el útil de creación de modelos y de evaluación, un caso de estudio ha sido hecho y representa la valorización de neumáticos usados en granulados.

PALABRAS CLAVES. TRATAMIENTO DE LOS DESECHOS, VALORIZACIÓN, RAZONAMIENTO A BASE DE CASOS, PROGRAMACIÓN LÓGICA, META-PROGRAMACIÓN, INFERENCIAS, PROGRAMACIÓN POR RESTRICCIONES, ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

REMERCIEMENTS

Je souhaite adresser mes remerciements aux deux rapporteurs de mon jury de thèse, M. Mauricio Camargo et M. Nicolas Perry qui ont lu mon manuscrit et évalué mon travail de recherche de ces trois années de thèse. De même, je souhaite remercier l'ensemble des membres de mon jury qui m'ont permis d'avoir un dialogue intéressant durant ma soutenance et qui ont apporté leurs points de vue concernant la problématique soulevée. J'espère que nous pourrons avoir d'autres échanges dans l'avenir.

Enfin, et d'une manière générale, je souhaite remercier tous ceux et celles qui m'ont aidé à réaliser ce travail, comme mon directeur M. Stéphane Negny.

Philippe Chazara
19/11/2015

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	3
ABSTRACT	5
RESUMEN	7
REMERCIEMENTS	9
TABLE DES MATIÈRES	11
TABLE DES FIGURES	17
LISTE DES TABLEAUX	18
ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES	21
CARTE MENTALE DE LA THÈSE	23
1 INTRODUCTION	25
1.1 CONTEXTE DE RECHERCHE	25
1.2 INTRODUCTION DE LA PROBLÉMATIQUE	26
1.3 DÉTAILS SUR LES QUESTIONS ABORDÉES	26
1.3.1 POURQUOI LA QUESTION DU TRAITEMENT DES DÉCHETS EST INTÉRESSANTE ?	26
1.3.2 AUJOURD'HUI, QUELS SONT LES CRITÈRES IMPORTANTS POUR LA RÉALISATION D'UNE ACTIVITÉ INDUSTRIELLE ?	27
1.3.3 COMMENT GÉNÉRER DE NOUVELLES TRAJECTOIRES ?	27
1.3.4 COMMENT FAIRE RAPIDEMENT UNE PREMIÈRE ÉVALUATION D'UNE TRAJECTOIRE ?	28
1.4 STRUCTURATION DU MANUSCRIT	28
1.4.1 CONTEXTE DE L'ÉTUDE ET ÉTAT DE L'ART	29
1.4.2 PROPOSITION D'UN CADRE DE MODÉLISATION ET UN ENSEMBLE DE CRITÈRES D'ÉVALUATION	29
1.4.3 RÉALISATION D'UN OUTIL DE CONCEPTION DE NOUVELLE TRAJECTOIRE	29
1.4.4 MODÉLISATION, QUANTIFICATION ET ÉVALUATION DE CES TRAJECTOIRES	29
1.4.5 ÉVALUATION DES MÉTHODES DÉVELOPPÉES	30
1.4.6 CONCLUSIONS, DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES	30
2 ÉTAT DE L'ART DES THÈMES ABORDÉS	31
2.1 PROBLÉMATIQUE DE VALORISATION DES DÉCHETS	31
2.1.1 PROBLÉMATIQUE ÉCOLOGIQUE	32
2.1.2 PROBLÉMATIQUE DES RESSOURCES EN MATIÈRES PREMIÈRES	32
2.1.3 PROBLÉMATIQUE ÉCONOMIQUE	32
2.2 QUE FAIRE DES DÉCHETS ?	33
2.2.1 QU'EST CE QU'UN DÉCHET ?	33
2.2.2 COMMENT SONT TRAITÉS ACTUELLEMENT LES DÉCHETS	33
2.2.2.1 QU'EST CE QUE LA VALORISATION	34
2.2.2.2 LE RECYCLAGE FONCTIONNEL	35
2.2.2.3 LA VALORISATION ÉNERGÉTIQUE	35
2.2.2.4 LA VALORISATION MATIÈRE	35
2.2.2.5 LA RÉUTILISATION	36
2.2.2.6 LE STOCKAGE	36
2.3 CONSÉQUENCES	36
2.4 MÉTHODES DÉVELOPPÉES	37
2.4.1 PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE	37
2.4.2 DÉSASSEMBLAGE OU DÉMANTÈLEMENT	37
2.4.3 CHOIX DE STRATÉGIES	38
2.4.3.1 ECO-CONCEPTION	38
2.4.3.2 RÉDUCTION DES COÛTS	38
2.4.3.3 ANALYSE DU CYCLE DE VIE	38

TABLE DES MATIÈRES

2.4.3.4	SYNTHÈSE DE QUELQUES MÉTHODES	39
2.5	ANALYSE ET LIMITE DES MÉTHODES DÉVELOPPÉES	39
2.6	ÉTUDE D'ÉLÉMENTS D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE PERTINENTS POUR LA RÉOLUTION DU PROBLÈME DES DÉCHETS	40
2.6.1	QU'EST CE QUE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE	40
2.6.2	SYSTÈME DE RÉOLUTION DE PROBLÈMES	41
2.6.2.1	RAISONNEMENT À PARTIR DE CAS	41
2.6.2.2	APPROFONDISSEMENT DE CERTAINS POINTS DU RÀPC	42
2.6.2.3	CRITIQUE DU RÀPC	43
2.6.2.4	SYSTÈME MULTI-AGENTS	44
2.6.2.5	APPROFONDISSEMENT DE CERTAINS POINTS DU SYSTÈME MULTI-AGENTS	44
2.6.2.6	COMPARATIF DU RÀPC ET DU SYSTÈME MULTI-AGENTS	45
2.7	DESCRIPTION ET DÉVELOPPEMENT DE CONCEPTS, MÉTHODES ET MÉCANISMES PERTINENTS POUR LA CONCEPTION D'UN RÀPC	46
2.7.1	REPRÉSENTATION	46
2.7.1.1	REPRÉSENTATION DE L'INFORMATION	47
2.7.1.2	REPRÉSENTATION ÉVOLUÉE	48
2.7.1.3	INFORMATIONS ET INFORMATIONS INCOMPLÈTES	48
2.7.2	MÉCANISMES PERTINENTS MIS EN ÉVIDENCE	48
2.7.2.1	SIMILARITÉ	49
2.7.2.2	APPRENTISSAGE	50
2.7.2.3	FONCTIONNEMENTS MENTAUX POUR LA RÉOLUTION DE PROBLÈME	51
2.7.2.4	ANALOGIE	52
2.7.2.5	ABSTRACTION	53
2.7.3	RÉCAPITULATIF DES MÉTHODES ET SYSTÈMES D'IA	54
2.8	CONCLUSION DU CHAPITRE	54
3	MODÉLISATION DES TRAJECTOIRES DE VALORISATION DES DÉCHETS	57
3.1	OBJECTIFS DE LA MODÉLISATION	57
3.2	QU'EST CE QU'UNE TRAJECTOIRE DE VALORISATION	57
3.3	MODÉLISATION D'UNE TRAJECTOIRE PAR ÉLÉMENTS SPÉCIFIQUES	58
3.3.1	DESCRIPTION DES DIFFÉRENTS NIVEAUX DE MODÉLISATION	58
3.3.1.1	CONFIGURATION GÉNÉRIQUE	58
3.3.1.2	TRAITEMENT GÉNÉRIQUE	59
3.3.1.3	OPÉRATIONS UNITAIRES	60
3.4	MODÉLISATION D'UNE TRAJECTOIRE PAR ÉLÉMENTS CONCEPTUELS	60
3.4.1	LES BLOCS	61
3.4.2	LES SYSTÈMES	61
3.4.3	DIMENSION DE DESCRIPTION : NIVEAUX ET VUES	62
3.4.4	AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DU SECOND CADRE DE MODÉLISATION	62
3.5	CHOIX DES INDICATEURS ET MODES DE CALCUL	62
3.5.1	INDICATEURS ÉCONOMIQUES	63
3.5.1.1	INDICATEURS ANNUELS	64
3.5.1.2	INDICATEURS PROJETS (SUR L'ENSEMBLE DE LA VIE DE L'ACTIVITÉ)	64
3.5.2	INDICATEURS ENVIRONNEMENTAUX	65
3.5.2.1	EMPREINTE CARBONE	65
3.5.2.2	ECO-COST	65
3.5.3	INDICATEURS SOCIAUX	66
3.5.3.1	NOMBRE D'EMPLOIS DIRECTS	66
3.5.3.2	NOMBRE D'EMPLOIS INDIRECTS	67
3.5.3.3	NOMBRE D'EMPLOIS INDUITS	67
3.5.4	INDICATEURS DE RECYCLAGE	67
3.6	MODE DE CALCUL	69
3.6.1	PARTIE ÉCONOMIQUE	69
3.6.2	DONNÉES ÉCONOMIQUES	69
3.6.3	PARTIE ENVIRONNEMENTALE	70
3.6.4	PARTIE SOCIALE ¹	70
3.7	EXEMPLE : VALORISATION DES PNEUS USÉS EN GRANULATS ET POUDRETTES	71

1. Cette partie est poursuivie dans le chapitre 4

3.7.1	CONTEXTE	72
3.7.2	HYPOTHÈSES	72
3.7.3	PARTIE ÉCONOMIQUE	73
3.7.4	PARTIE ENVIRONNEMENTALE	74
3.7.5	PARTIE SOCIALE	74
3.7.6	PARTIE VALORISATION	74
3.8	CONCLUSION	74
4	UTILISATION DES DONNÉES ÉCONOMIQUES POUR L'ÉVALUATION DU NOMBRE D'EMPLOIS D'UNE ACTIVITÉ	75
4.1	OBJECTIF DE L'ÉTUDE	75
4.2	MÉTHODE GÉNÉRALE	75
4.2.1	ÉLÉMENT ÉCONOMIQUE CHOISI	75
4.3	HYPOTHÈSES	76
4.4	PARTIE EXPÉRIMENTALE : CONTEXTE	77
4.4.1	MÉTHODOLOGIE	77
4.4.2	CORRÉLATIONS	78
4.4.3	DONNÉES POUR L'ÉTUDE	78
4.5	PARTIE EXPÉRIMENTALE : ÉTUDE PAR RÉGRESSION	78
4.5.1	1 ^{RE} FORMULE : $\alpha * CA + \beta \approx$ Nombre d'emplois	78
4.5.2	2 ^E FORMULE : $\alpha * (VA - EBE) + \beta \approx$ Nombre d'emplois	80
4.5.3	3 ^E FORMULE : $\alpha * VA + \beta * EBE + \gamma \approx$ Nombre d'emplois	82
4.6	CONCLUSION INTERMÉDIAIRE SUR LA PREMIÈRE PARTIE EXPÉRIMENTALE	84
4.7	PARTIE EXPÉRIMENTALE : ÉTUDE PAR RÉSEAU DE NEURONES	84
4.7.1	DÉTERMINATION DE L'EFFECTIF AVEC <i>VA</i> ET <i>EBE</i>	85
4.7.2	DÉTERMINATION DE L'EFFECTIF AVEC <i>CA</i>	86
4.7.3	DÉTERMINATION DE L'EFFECTIF <i>EFF2</i> AVEC <i>CA1, EFF1, CA2</i>	87
4.8	PROPOSITION	88
4.8.1	PROPOSITION SUR LE CALCUL DES EMPLOIS DIRECTS	89
4.8.2	PROPOSITION SUR LE CALCUL DES EMPLOIS INDIRECTS	89
4.8.3	PROPOSITION SUR LE CALCUL DES EMPLOIS INDUITS	89
4.9	CONCLUSION	89
5	MÉTHODOLOGIE DE GÉNÉRATION DE NOUVELLES TRAJECTOIRES BASÉE SUR LE RAISONNEMENT À PARTIR DE CAS	91
5.1	OBJECTIFS DE LA MÉTHODOLOGIE ET DESCRIPTION DU PROBLÈME	91
5.1.1	PROBLÈME SOULEVÉ	91
5.1.2	NATURE DU PROBLÈME	92
5.1.3	TROIS APPROCHES DU PROBLÈME	92
5.2	POURQUOI UTILISER UN SYSTÈME DE RAISONNEMENT À PARTIR DE CAS (RÀPC)	94
5.3	DÉFINITION GÉNÉRALE DU SYSTÈME RÀPC	94
5.3.1	STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT GÉNÉRALE D'UN RÀPC	95
5.3.1.1	CAS	95
5.3.1.2	ÉTAPE 0 : REPRÉSENTATION DU PROBLÈME	95
5.3.1.3	ÉTAPE 1 : LA REMÉMORATION DU CAS	95
5.3.1.4	ÉTAPE 2 : L'ADAPTATION	96
5.3.1.5	ÉTAPE 3 : ÉVALUATION ET RÉVISION	96
5.3.1.6	ÉTAPE 4 : APPRENTISSAGE	96
5.4	DESCRIPTION DU CAS, UN ÉLÉMENT ABSENT DU SYSTÈME	96
5.4.1	REPRÉSENTATION DES DONNÉES PAR UN RÉSEAU SÉMANTIQUE	96
5.4.2	TRAITEMENT LOGIQUE DE L'INFORMATION	97
5.4.3	DES CAS DYNAMIQUES	97
5.4.4	STRUCTURATION D'UN CAS	97
5.5	DESCRIPTION D'UN ÉTAT	98
5.5.1	DÉFINITION D'UN ÉTAT	98
5.5.2	UNE DESCRIPTION NON STRUCTURÉE	99
5.5.3	RÉSEAU CONCEPTUEL : REPRÉSENTATION SOUS FORME DE RÉSEAU	99
5.5.4	UN NŒUD RACINE UNIQUE	101
5.5.5	DESCRIPTION DE RELATION	101
5.6	SIMILARITÉ	102

TABLE DES MATIÈRES

5.6.1	UN CALCUL DE DISTANCE : DÉFINITION COURANTE	102
5.6.2	SIMILARITÉ PAR DÉFINITION COMMUNE	103
5.6.2.1	LES GROUPES DE DÉFINITION COMMUNE	103
5.6.2.2	DES GROUPES DE DÉFINITION PAR TYPE DE CAS POSSIBLE	104
5.6.3	TROIS ÉTAPES CLÉS DANS LA RECHERCHE D'UN CAS	104
5.6.3.1	SIMILARITÉ PARTIELLE	104
5.6.3.2	SÉLECTION	106
5.6.3.3	REGROUPEMENT	106
5.6.4	AVANTAGES DE CETTE MÉTHODE DE RECHERCHE DE CAS SIMILAIRE	107
5.6.5	DÉSAVANTAGES DE LA MÉTHODE	107
5.7	MÉMORISATION DES ÉTATS	108
5.7.1	MÉMORISATION D'UN ÉTAT	108
5.7.2	APPRENTISSAGE : CRÉATION PROGRESSIVE D'UNE TAXONOMIE	108
5.7.3	INDEXATION ET SIMILARITÉ	109
5.7.3.1	CRÉATION DE NIVEAUX D'ABSTRACTION ET DE CONCEPTUALISATION	109
5.7.3.2	CRÉATION DE FILTRE	109
5.7.3.3	UNE MÉMORISATION NON DÉTERMINÉE : INTRODUCTION DE L'ALÉATOIRE	110
5.7.4	MÉMORISATION DES MÉCANISMES DE TRANSFORMATION : 2 POSSIBILITÉS	110
5.8	FLUIDITÉ DU SYSTÈME ET CONCEPTUALISATION, UTILISATION D'UNE TAXONOMIE DE CONCEPTS	110
5.8.1	FLUIDITÉ GRÂCE À L'UTILISATION DU MÉCANISME D'ABSTRACTION	111
5.8.2	FLUIDITÉ GRÂCE À L'UTILISATION DU MÉCANISME DE CONCEPTUALISATION ET L'UTILISATION DE TAXONOMIE	111
5.8.3	FLUIDITÉ SUR LES VALEURS NUMÉRIQUES	112
5.9	MÉTHODE DE FONCTIONNEMENT ET DE RÉOLUTION	113
5.9.1	TECHNIQUE DE RÉOLUTION POUR LE STRUCTURES 1 ET 2	113
5.9.2	TECHNIQUE DE RÉOLUTION POUR LA STRUCTURE 3	113
5.9.3	LE CAS SIMPLE	113
5.9.4	PROPAGATION DU PROBLÈME, MÉTHODE RÉCURSIVE ET DÉCOMPOSITION DU PROBLÈME	114
5.10	MISE EN PLACE ET DÉVELOPPEMENT	114
5.10.1	CHOIX D'UN PARADIGME ET D'UN LANGAGE : PROLOG	114
5.10.2	FONCTIONNEMENT GÉNÉRALE DE PROLOG	116
5.10.3	PRINCIPE DE DÉVELOPPEMENT : LE PRINCIPE KISS	117
5.10.4	MISE EN PLACE DU SYSTÈME	117
5.11	CONCLUSION	117
6	CRÉATION D'UN OUTIL DE REPRÉSENTATION ET D'ÉVALUATION DE TRAJECTOIRES DE VALORISATION	119
6.1	BESOINS ET RÔLES DE L'OUTIL	119
6.1.1	INTÉRÊT	119
6.1.2	BESOIN ET JUSTIFICATION	119
6.2	MODÉLISATION DE L'OUTIL : APPROCHE THÉORIQUE	120
6.2.1	PROPOSITION DE REPRÉSENTATION DES OPÉRATIONS	120
6.2.2	PROPOSITION DE REPRÉSENTATION DES FLUX MATIÈRES ET AUTRES	121
6.2.3	PROPOSITION DE REPRÉSENTATION DES CONNECTEURS	122
6.2.4	PROPOSITION DE REPRÉSENTATION D'OPÉRATIONS DE NIVEAUX SUPÉRIEURS	122
6.2.5	UTILISATION DE SIMULATIONS ET DU PROJET	123
6.3	MODÉLISATION DE L'OUTIL : RÉALISATION	124
6.3.1	RÉALISATION DE L'OUTIL : PROGRAMMATION	124
6.3.1.1	CONTRAINTES LIÉES AU MODÈLE PROPOSÉ	124
6.3.1.2	PARADIGME DE PROGRAMMATION	124
6.3.1.3	LE CHOIX DU LANGAGE	124
6.3.2	STRUCTURE GÉNÉRALE DU PROGRAMME	125
6.3.3	MODÉLISATION DES OPÉRATIONS/CONTENEURS	125
6.3.3.1	POINT DE VUE GÉNÉRAL	125
6.3.3.2	UTILISATION DE MÉTA-CLASSE	126
6.3.4	MODÉLISATION DES CONNECTEURS	126
6.3.5	MODÉLISATION DES FLUX	127
6.3.6	MODÉLISATION DES SYSTÈMES	127
6.3.7	BASE DE DONNÉES ASSOCIÉE	127
6.3.8	UTILISATION DE GREFFONS	127

6.3.8.1	MULTI-SOLVEURS	127
6.3.8.2	INTÉGRATION DE MODULE D'ÉVALUATION DYNAMIQUE	128
6.4	MÉTHODE DE CALCUL ET D'ÉVALUATION	128
6.4.1	UNE APPROCHE PAR CONTRAINTES	129
6.4.2	CALCUL DES DIFFÉRENTS TYPES DE FLUX	129
6.4.3	TRANSFORMATION DES CONTRAINTES LOCALES EN UN MODÈLE UNIFIÉ	130
6.4.4	TRANSFORMATION DES CONTRAINTES POUR FACILITER LEUR UTILISATION PAR LES MODULES DE SOLVEUR	130
6.4.5	INTRODUCTION DES SYSTÈMES ET ÉVALUATION DES STRUCTURES	130
6.4.6	FONCTIONNEMENT DES MODULES D'ÉVALUATION	130
6.5	AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'OUTIL DÉVELOPPÉ	131
6.5.1	AVANTAGES	131
6.5.2	INCONVÉNIENTS	131
6.5.3	CONCLUSION	131
7	ANALYSE, ÉVALUATION ET COMMENTAIRES SUR LA RÉALISATION	133
7.1	ÉVALUATION DE LA MÉTHODE DE RECHERCHE DE NOUVELLES TRAJECTOIRES BASÉE SUR LA GESTION DES CONNAISSANCES	133
7.1.1	OBJECTIFS DE L'ANALYSE	133
7.1.2	COMMENTAIRES SUR LES LIMITES DE L'ANALYSE	134
7.1.3	1 ^{RE} ÉTUDE	134
7.1.3.1	DESCRIPTION DES DONNÉES	134
7.1.3.2	PHASE DE TESTS ET COMMENTAIRES AVEC LES DONNÉES 1	139
7.1.4	2 ^E ÉTUDE	151
7.1.4.1	DESCRIPTION DES DONNÉES	151
7.1.4.2	PHASE DE TESTS ET COMMENTAIRES AVEC LES DONNÉES 2	151
7.1.5	3 ^E ÉTUDE	153
7.1.5.1	DESCRIPTION DES DONNÉES	153
7.1.6	CONCLUSION SUR L'ÉVALUATION DE LA MÉTHODE DE RECHERCHE DE NOUVELLES TRAJECTOIRES	154
7.2	ÉVALUATION DE L'OUTIL DE MODÉLISATION ET D'ÉVALUATION DES TRAJECTOIRES	155
7.2.1	OBJECTIFS DE L'ÉVALUATION	155
7.2.2	MÉTHODOLOGIE	155
7.2.2.1	CONTEXTE DU MODÈLE	156
7.2.2.2	RÉALISATION DU MODÈLE EN VUE DE LA SIMULATION	156
7.2.2.3	COMMENTAIRES SUR LES CHOIX DE MODÉLISATION ET SUR LES ALTERNATIVES POSSIBLES PAR LE SYSTÈME	159
7.2.3	RÉSULTATS	159
7.2.3.1	PARTIE MODÉLISATION	159
7.2.4	CONCLUSION	165
8	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	167
8.1	CONCLUSIONS SUR L'ENSEMBLE DES SUJETS ABORDÉS PAR LA THÈSE	167
8.1.1	INTRODUCTION ET ÉLÉMENTS DE LA LITTÉRATURE	167
8.1.2	CADRE DE MODÉLISATION ET CHOIX DES CRITÈRES D'ÉVALUATION	168
8.1.3	GÉNÉRATION DE NOUVELLES TRAJECTOIRES	168
8.1.4	MODÉLISER ET ESTIMER CES TRAJECTOIRES	169
8.1.5	TESTER LES CAPACITÉS DE LA MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE	170
8.2	DISCUSSION	170
8.2.1	DISCUSSION SUR LA PARTIE MODÉLISATION	170
8.2.2	DISCUSSION SUR LA PARTIE GÉNÉRATION DE TRAJECTOIRE	170
8.2.3	DISCUSSION SUR LA PARTIE MODÉLISATION ET ÉVALUATION	171
8.2.4	DISCUSSION SUR L'ENSEMBLE DES TROIS PARTIES	171
8.3	PERSPECTIVES	172
8.3.1	APPLICATION DE LA MÉTHODE SUR UN CAS RÉEL	172
8.3.2	AMÉLIORATION DU SYSTÈME DE GÉNÉRATION DE NOUVELLES TRAJECTOIRES	172
8.3.3	RÉSOLUTION DE LA PARTIE MANQUANTE ⇒ MÉTHODE PERMETTANT LA GÉNÉRATION D'UNE INSTALLATION COHÉRENTE ET RÉALISTE	173
8.3.4	UTILISATION DE SYSTÈME MULTI-AGENTS POUR LA CRÉATION DE PROCESSUS	173
8.3.5	DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE QUI TRANSCENDE LE RAISONNEMENT À PARTIR DE CAS	173

TABLE DES MATIÈRES

BIBLIOGRAPHIE	175
A ANNEXE : FORMULES UTILISÉES POUR LA CALCUL DES INDICATEURS ÉCONOMIQUES	185
B ANNEXE : DONNÉES POUR L'ÉVALUATION DE LA GÉNÉRATION DE TRAJECTOIRE	189
A TRAJECTOIRES DE VALORISATION	189
B TAXONOMIES UTILISÉES	196
C SCRIPT UTILISÉ POUR INITIALISER LA BASE DE CAS	198
C ANNEXE : DONNÉES SUR LA MODÉLISATION DE LA TRAJECTOIRE DE VALORISATION DU PNEU USÉ	213
A SCRIPT PYTHON UTILISÉ POUR LA MODÉLISATION	213
INDEX	227

TABLE DES FIGURES

1	CARTE MENTALE DES PRINCIPAUX CONCEPTS ABORDÉS DANS LA THÈSE (RÉALISÉE AVEC TIKZ, LICENCE GPLv2 http://sourceforge.net/projects/pgf/).	23
1.1	CONCEPTS CLÉS DU DÉVELOPPEMENT DURABLE	27
1.2	STRUCTURE DE LA THÈSE	28
2.1	RÀPC TRADITIONNEL	41
3.1	MODÉLISATION SELON PLUSIEURS NIVEAUX	58
3.2	EXEMPLE DE MODÉLISATION AU NIVEAU TRAITEMENT GÉNÉRIQUE : VOIES DE VALORISATION DU PNEU	59
3.3	DESCRIPTION D'UNE BOÎTE GRISE UTILISÉE AU NIVEAU DES OPÉRATIONS UNITAIRES	60
3.4	MODÉLISATION SOUS PLUSIEURS NIVEAUX GÉNÉRIQUES	61
3.5	EXEMPLE DE LA REPRÉSENTATION D'UN BLOC	61
3.6	EXEMPLE DE LA REPRÉSENTATION DE DIFFÉRENTS NIVEAUX GRÂCE AUX SYSTÈMES	62
3.7	EXEMPLE DE LA REPRÉSENTATION DE DIFFÉRENTES VUES	62
3.8	MODÈLE CIRCULAIRE	67
3.9	EXEMPLE USINE : ÉVOLUTION DE LA VAN SUR 10 ANS	73
4.1	SCHÉMA MONTRANT QUE POUR LE MÊME CHIFFRE D'AFFAIRES, LES PROCÉDÉS PEUVENT ÊTRE DIFFÉRENTS	79
4.2	DANS LE SECTEUR SIDÉRURGIQUE, RÉGRESSION LINÉAIRE AVEC LES MOINDRES CARRÉES	81
4.3	DANS LE SECTEUR SIDÉRURGIQUE, RÉGRESSION LINÉAIRE AVEC LES MOINDRES CARRÉS POUR DES VALEURS VA-EBE $< 3 * 10^6$	81
4.4	ESTIMATION DE L'EFFECTIF DANS LE SECTEUR SIDÉRURGIQUE	81
4.5	VALEURS RÉSIDUELLES VS VALEURS ESTIMÉES DANS LE SECTEUR SIDÉRURGIQUE	81
4.6	ÉCART RELATIF PAR RAPPORT À L'EFFECTIF TOUT SECTEUR	81
4.7	ÉCART RELATIF PAR RAPPORT À L'EFFECTIF TOUT SECTEUR POUR UN EFFECTIF COMPRIS ENTRE 15 ET 100 PERSONNES	81
4.8	ÉCART RELATIF PAR RAPPORT À L'EFFECTIF TOUT SECTEUR POUR UN EFFECTIF COMPRIS ENTRE 15 ET 100 ET DONT L'ÉCART EST COMPRIS ENTRE +/- 50%	82
4.9	ESTIMATION DU NOMBRE D'EMPLOYÉS DANS LE SECTEUR DES PLASTIQUES AVEC LA PREMIÈRE MÉTHODE	83
4.10	ESTIMATION DE L'EFFECTIF, PAR LA TROISIÈME FORMULE, PREMIÈRE MÉTHODE, POUR TOUS LES SECTEURS	83
4.11	ÉCART RELATIF PAR RAPPORT À L'EFFECTIF TOUT SECTEUR AVEC LA TROISIÈME FORMULE	84
4.12	ÉCART RELATIF PAR RAPPORT À L'EFFECTIF TOUT SECTEUR AVEC LA TROISIÈME FORMULE POUR UN EFFECTIF COMPRIS ENTRE 15 ET 100 PERSONNES	84
4.13	EXEMPLE D'UN PERCEPTRON MULTI-COUCHES	85
4.14	RÉSULTAT OBTENU LORS DE LA PHASE D'APPRENTISSAGE AVEC VA ET EBE COMME ENTRÉES : ÉCHELLE 1->40	86
4.15	RÉSULTAT OBTENU LORS DE LA PHASE DE TEST AVEC VA ET EBE COMME ENTRÉES : ÉCHELLE 1->40	86
4.16	ESTIMATION DE L'EFFECTIF EN UTILISANT LE CA, PHASE D'APPRENTISSAGE : ÉCHELLE 1->40	87
4.17	ESTIMATION DE L'EFFECTIF EN UTILISANT LE CA, PHASE DE TEST : ÉCHELLE 1->40	87
4.18	PHASE D'APPRENTISSAGE, ESTIMATION DE EFF2 EN UTILISANT CA1,EFF1,CA2 : ÉCHELLE 1->172	88
4.19	PHASE DE TEST, ESTIMATION DE EFF2 EN UTILISANT CA1,EFF1,CA2 : ÉCHELLE 1->172	88
5.1	PROBLÉMATIQUES	91
5.2	VALORISATION DES DÉCHETS	92
5.3	DEUX APPROCHES DE RAISONNEMENT	93

5.4	FONCTIONNEMENT GÉNÉRAL D'UN RÀPC	95
5.5	DISTANCES	95
5.6	GÉNÉRATION DYNAMIQUE DE CAS	98
5.7	EXEMPLE DE TAXONOMIE	100
5.8	EXEMPLE DE TAXONOMIE EN RELATION AVEC LA PROBLÉMATIQUE DES DÉCHETS. SOURCES : RES- SOURCES NATURELLES CANADA https://www.rncan.gc.ca/forets/industrie/demandes/14511	101
5.9	EXEMPLE ILLUSTRANT LES RELATIONS, OÙ E1, E ET E3 SONT DES ÉTATS	101
5.10	DISTANCE DE WU & PALMER	103
5.11	DÉFINITION COMMUNE	103
5.12	EXPLORATION DES DÉFINITIONS	105
5.13	EXPLORATION DES CAS POSSIBLES	105
5.14	STRUCTURE DES DÉFINITIONS COMMUNES	106
5.15	EXPLICATION DU REGROUPEMENT	107
5.16	PREMIÈRE PHASE D'INDEXATION	109
5.17	SECONDE PHASE D'INDEXATION	109
5.18	EXEMPLE DE FLUIDITÉ PAR CONCEPTUALISATION	112
5.19	ALGORIGRAMME DE LA MÉTHODE DE DÉCOMPOSITION ET DE RÉOLUTION DU PROBLÈME	115
6.1	ÉLÉMENTS PERMETTANT LE CALCUL DES FLUX	120
6.2	BESOINS	120
6.3	UNE OPÉRATION ⇒ UNE BOITE	120
6.4	CONTRAINTES ENTRE LES ÉTATS	121
6.5	REPRÉSENTATION D'UNE OPÉRATION	121
6.6	CONNECTEURS	122
6.7	VUE GRANULARITÉ	122
6.8	ILLUSTRATION DE REGROUPEMENTS POSSIBLES	123
6.9	LES SIMULATIONS FORMENT UN PROJET	123
6.10	DIAGRAMME DE CLASSES PARTIEL DU SYSTÈME	125
6.11	GÉNÉRATION DYNAMIQUE DE CLASSES OPÉRATIONS	126
6.12	INTERACTIONS ENTRE LE SYSTÈME ET LE SOLVEUR POUR LA MODÉLISATION D'UN PROCESSUS	128
7.1	CHAÎNE DE PRODUCTION - FLUX MATIÈRES ET FINANCIERS	157
7.2	CHAÎNE DE PRODUCTION - FLUX RESSOURCES NATURELLES, ÉNERGÉTIQUES ET ÉMISSIONS	157
7.3	REPRÉSENTATION DE L'ENSEMBLE DE LA SIMULATION AVEC LE CALCUL DES FLUX	160
7.4	TRACÉ DE LA VAN RÉALISÉ PAR LE GREFFON	162
7.5	ECO COST PAR TYPE ET PAR SOURCE	163
7.6	ECO COST PAR TYPE ET PAR SOURCE EN POURCENTAGE CUMULÉ	163
7.7	RÉPARTITION DES EMPLOIS DIRECTS, INDIRECTS ET INDUITS PAR ZONE ET ACTIVITÉ	165
B.1	TRAJECTOIRE DE REVALORISATION DU POLYPROPYLENE	190
B.2	TRAJECTOIRE DE RECYCLAGE DE TÉLÉVISEUR CATHODIQUE	191
B.3	TRAJECTOIRE DE RECYCLAGE DE TUBE NÉON	192
B.4	TRAJECTOIRE DE RECYCLAGE DE BOUTEILLE EN VERRE	193
B.5	TRAJECTOIRE DE REVALORISATION DE L'ALUMINIUM	194
B.6	TRAJECTOIRE DE RECYCLAGE BATTERIE	195
B.7	TAXONOMIE DES OPÉRATIONS	196
B.8	TAXONOMIE DES CONCEPTS	197

LISTE DES TABLEAUX

2.1	SYNTHÈSE DE QUELQUES MÉTHODES ET APPROCHES DÉVELOPPÉES	39
-----	--	----

3.1	COÛTS DES TRANSPORTS PAR KM	69
3.2	DONNÉES SUR LES TRANSPORTS	70
3.3	PRIX DE VENTE DES PRODUITS ISSUS DE LA VALORISATION DES PNEUS	73
4.1	ESTIMATION DU NOMBRE D'EMPLOIS EN UTILISANT LE CA AVEC LA PREMIÈRE MÉTHODE	78
4.2	ESTIMATION DU NOMBRE D'EMPLOIS EN UTILISANT LE CA AVEC LA SECONDE MÉTHODE	79
4.3	RÉSULTATS DE L'ESTIMATION DE L'EFFECTIF AVEC LA PREMIÈRE MÉTHODE	80
4.4	RÉSULTATS DE L'ESTIMATION DE L'EFFECTIF AVEC LA SECONDE MÉTHODE	80
4.5	RÉSULTATS OBTENUS AVEC LA TROISIÈME FORMULE PREMIÈRE MÉTHODE	82
4.6	RÉSULTAT DE L'ESTIMATION DE L'EFFECTIF AVEC VA ET EBE PAR LA TROISIÈME FORMULE, DEUXIÈME MÉTHODE	83
7.1	NOMBRE DE RELATIONS PAR VOIE ET PAR NIVEAU	138
7.2	EXPLICATION DE LA SORTIE OBTENUE PAR LE PROTOTYPE	140
7.3	COMPOSANTS DES FLUX	158
7.4	RÉSULTAT DE L'ANALYSE ÉCONOMIQUE DU SYSTÈME <i>USINE</i> . LES ANNÉES 2017 À 2033 SONT SIMILAIRES SAUF POUR L'AMORTISSEMENT QUI SE TERMINE 15 ANS PLUS TARD EN 2029 ET LA VAN QUI PASSE EN POSITIF 16 ANS PLUS TARD	162
7.6	RÉSULTAT DÉTAILLÉ DE L'ÉVALUATION SOCIALE DE LA NOUVELLE ACTIVITÉ	164
7.5	RÉSULTATS OBTENU PAR L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE BASÉE SUR EcoCOST DE LA NOUVELLE ACTIVITÉ	166
8.1	RELATIONS ENTRE LES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS DE CETTE THÈSE	171

ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

Symbole	Description	Définition
<i>ACV</i>	Analyse du cycle de vie	Méthodes d'analyse des impacts d'une activité
<i>BSD(Licence)</i>	Berkeley Software Distribution License	Licence libre
<i>CA</i>	Chiffre d'affaire	En comptabilité, représente le total des ventes
<i>CBR</i>	Case-Based reasoning	RàPC en anglais
<i>DRC</i>	Délai de récupération du capital	Durée pour que la VAN soit égale à zéro
<i>EBE</i>	Excédent brut d'exploitation	« L'excédent brut d'exploitation est le solde du compte d'exploitation, pour les sociétés. Il est égal à la valeur ajoutée, diminuée de la rémunération des salariés, des autres impôts sur la production (voir Impôts sur la production et les importations) et augmentée des subventions d'exploitation. » (<i>source : Insee</i> ²)
<i>FSF</i>	Free software foundation	Organisation défendant le logiciel libre et les utilisateurs
<i>GLPK</i>	GNU Linear Programming Kit	Ensemble de solveur sous licence GNU GPL
<i>GNU</i>	GNU's Not UNIX	Système d'exploitation libre
<i>GNU GPL</i> ou <i>GPL</i>	GNU General Public License	Licence définissant les conditions légales de distributions des logiciels libres
<i>IA</i>	Intelligence artificielle	Méthodes permettant de créer l'intelligence (à l'aide de machines, programmes...)
<i>Insee</i>	Institut national de la statistique et des études économiques	
<i>KISS</i>	Keep it simple and stupid	Principe de conception basé sur la simplicité
<i>LGC</i>	Laboratoire de Génie Chimique	
<i>LGPL</i>	Library General Public License	Licence libre semblable à la licence GPL mais limitée
<i>PIB</i>	Produit intérieur brut	Indicateur économique
<i>POO</i>	Programmation orienté objet	Paradigme de programmation
<i>PSI</i>	Procédé et Système Industriels	Département du LGC
<i>RàPC</i>	Raisonnement à partir de cas	Outil d'intelligence artificielle basé sur la réutilisation des connaissances
<i>TRI</i>	Taux de rentabilité interne	En économie, valeur du taux d'actualisation pour que la VAN soit égale à zéro
<i>VA</i>	Valeur ajoutée	« Solde du compte de production. Elle est égale à la valeur de la production diminuée de la consommation intermédiaire. » (<i>source : Insee</i> ³)
<i>VAN</i>	Valeur actuelle nette	Flux de trésorerie actualisé

2. <http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/excedent-brut-exploitation.htm>

3. <http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/valeur-ajoutee.htm>

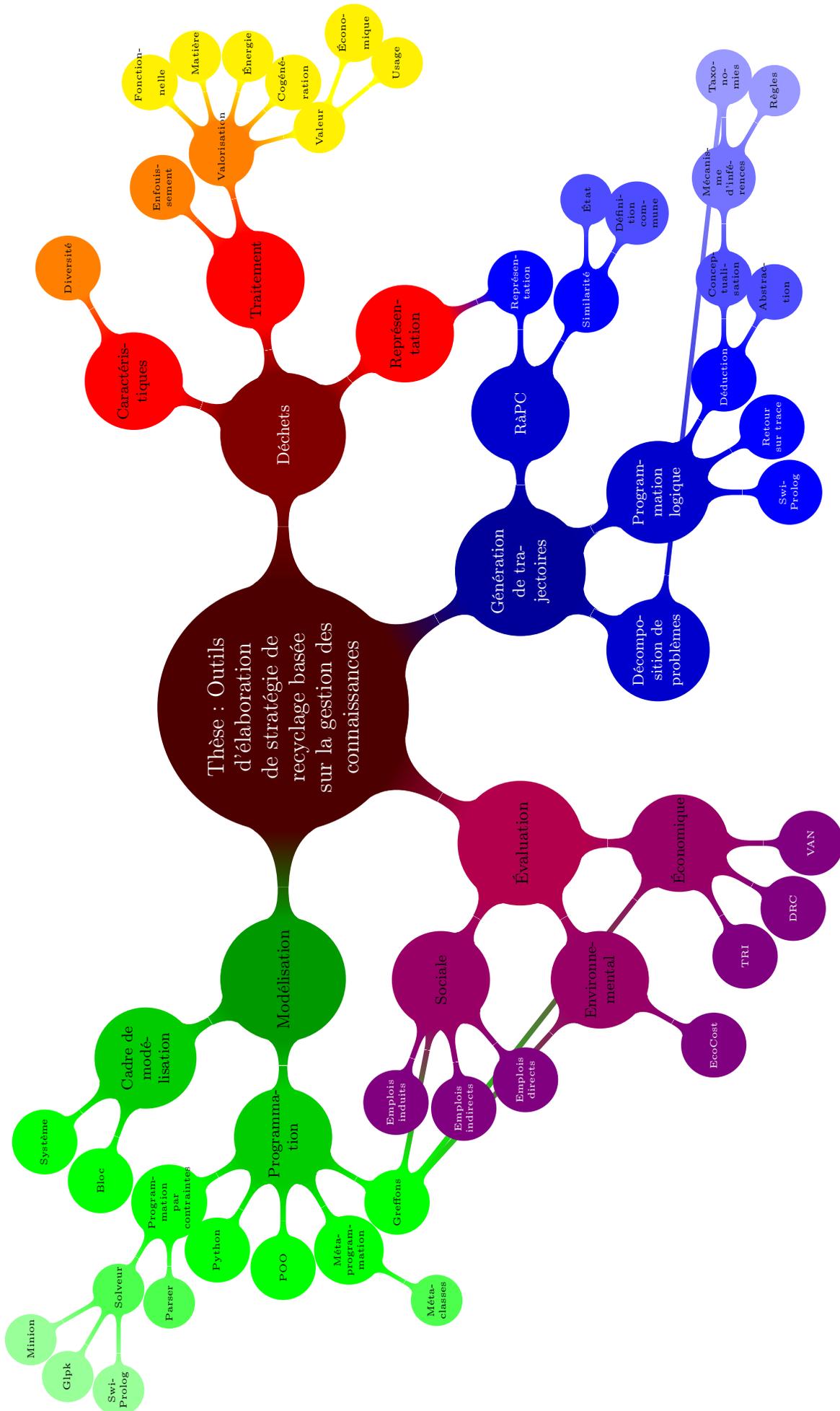


FIGURE 1- CARTE MENTALE DES PRINCIPAUX CONCEPTS ABORDÉS DANS LA THÈSE (RÉALISÉE AVEC TIKZ, LICENCE GPLV2 <http://sourceforge.net/projects/pgf/>).

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

La violence est le dernier refuge de l'incompétence
SALVOR HARDIN – FONDATION, 1951 – ISAAC ASIMOV

Le rapport du JRC (Journal Research Centre) du Setis (Strategic Energy Technologies Information System) de la commission européenne publié le 23/09/2013¹, fait état du risque de pénurie de certains métaux stratégiques pour le secteur énergétique. Ces métaux, nécessaires pour la réalisation des nouvelles technologies comme les voitures électriques, prennent une place cruciale dans la stratégie énergétique européenne de *décarbonisation*. Cependant, selon le rapport, l'offre ne permettra pas de répondre à la demande d'ici 2020 à 2030 suite à la hausse de cette dernière. Face à cette situation, le document préconise le déploiement de certaines stratégies visant à réduire la demande de certaines matières premières de l'Union Européenne vis-à-vis des pays exportateurs. Une autre stratégie à privilégier est celle du recyclage. Néanmoins, le rapport souligne qu'actuellement, certains matériaux ont un taux de recyclage extrêmement faible, par exemple le lithium.

Ce rapport, qui n'est qu'un exemple, illustre un des phénomènes mondiaux inquiétant qui est la disparition (ou du moins l'appauvrissement) de certaines ressources en matières premières. Parmi les solutions envisagées, le recyclage cherche à diminuer ou annuler les pertes des matières réutilisables. Une volonté politique fait écho à ce constat. Ainsi, un ensemble de lois et de directives ont été prises en ce sens, par exemple la loi **Grenelle 2**² qui souligne une volonté de maîtriser les risques, de traiter les déchets et de préserver la santé. Le recyclage est donc une manière de préserver la ressource mais, comme le souligne ce rapport, il n'est actuellement pas réalisé sur l'ensemble des déchets. Les raisons peuvent être multiples, par exemple, un coût trop élevé, des verrous technologiques ou tout simplement le manque de connaissances quant aux méthodes permettant le recyclage. Ce dernier point nous conduit au sujet de cette thèse :

OUTILS D'ÉLABORATION DE STRATÉGIE DE RECYCLAGE BASÉE SUR LA GESTION DES CONNAISSANCES : APPLICATION AU DOMAINE DU GÉNIE DES PROCÉDÉS

1.1 CONTEXTE DE RECHERCHE

Ce travail de recherche s'est déroulé au sein du **LGC**, le Laboratoire de Génie Chimique de Toulouse³, dans le département **PSI** - Procédés et Systèmes Industriels, qui est structuré autour des thèmes de recherche suivants⁴ :

- Analyse fonctionnelle des produits et procédés : méthodes et outils génériques pour la modélisation et la simulation
- Aide à la conception innovante des procédés
- Optimisation multi-objectif pour l'éco-conception des procédés et systèmes industriels
- Pilotage et contrôle des systèmes industriels

Cette recherche se positionne principalement dans l'aide à la conception innovante ainsi que dans l'éco-conception de systèmes industriels.

1. <http://www.actu-environnement.com/ae/news/JRC-rapport-metaux-strategiques-terres-rares-europe-penurie-energie-19901.php4>, <https://setis.ec.europa.eu/publications/jrc-setis-reports/jrc-report-critical-metals-energy-sector>
2. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Grenelle_Loi-2.pdf
3. Laboratoire de Génie Chimique UMR CNRS/INPT/UPS 5503, BP 34038, 4 allée Emile Monso, 31030 Toulouse Cedex 4, France
4. <http://lgc.inp-toulouse.fr/spip.php?article621>

1.2 INTRODUCTION DE LA PROBLÉMATIQUE

L'objet de la thèse est de proposer une méthode et un outil permettant de générer de nouvelles trajectoires de valorisation des déchets et dans un second temps, d'évaluer ces trajectoires afin de sélectionner la plus intéressante. Il s'agit donc de générer des processus, aussi finement que possible et d'être capable de les évaluer. Cependant, ces objectifs soulèvent de nombreuses interrogations. En premier lieu, il est nécessaire de définir ce qu'est une trajectoire de valorisation. Autrement, dit qu'est ce qui fait qu'un processus de transformation puisse être qualifié comme trajectoire de valorisation. Dans ce qui suit, on parlera de trajectoire de valorisation comme étant un processus conduisant à un produit valorisé à partir d'un déchet. Par extension, la notion de valorisation doit être définie, ainsi que la notion de *valeur*. Ensuite, il s'agit d'expliquer pourquoi le thème abordé est important. Une première réponse a été fournie au-travers de l'exemple de l'introduction. Néanmoins, la portée de ce thème va bien plus loin comme nous allons le démontrer. Une autre question soulevée est celle de l'évaluation des trajectoires. Il s'agit de s'interroger sur les critères qui peuvent être choisis et qui déterminent si une trajectoire répond aux attentes. Enfin et dans la continuité de la remarque précédente, un autre problème est comment réaliser cette évaluation. Par conséquent, les principales questions auxquelles cette thèse va apporter des réponses sont :

1. Que faire des déchets, comment peut-on les valoriser ?
2. Qu'est ce qu'une trajectoire de valorisation des déchets ?
3. Comment représenter l'ensemble des étapes conduisant un déchet à sa valorisation ?
4. Comment la modéliser ?
5. Comment choisir la meilleure trajectoire, et par extension, qu'est ce qui permet de dire qu'une trajectoire répond aux différentes attentes ?
6. Comment proposer de nouvelles trajectoires, ce qui revient à comment générer de nouveaux processus ?
7. Comment évaluer ces trajectoires, comment calculer les indicateurs ?

1.3 DÉTAILS SUR LES QUESTIONS ABORDÉES

1.3.1 POURQUOI LA QUESTION DU TRAITEMENT DES DÉCHETS EST INTÉRESSANTE ?

La diminution des ressources en matières premières devient problématique pour certaines d'entre elles. Plus globalement, c'est un problème qui prend de l'ampleur et qui est accentué par différents phénomènes tels que :

- L'explosion démographique au niveau mondial
- Une société basée sur la consommation
- L'augmentation de la production de bien comportant énormément de matières différentes, comme les équipements électroniques
- ...

De plus, la diminution de l'offre a pour conséquence directe d'engendrer une hausse des prix de certaines matières durant les dernières années. Ce fait s'explique entre autre par la loi de l'offre et de la demande, mais aussi par des coûts d'exploitation des gisements de plus en plus élevés à cause de difficultés d'extraction. De plus, le thème des déchets s'intègre comme une question de société. En effet, les sociétés doivent répondre, vis-à-vis de leurs concitoyens, à la constante augmentation des quantités de déchets produits. Par conséquent, cette question renforce l'idée que de nouvelles méthodes de traitements doivent être trouvées. Pour l'industriel, cette question s'intègre pleinement dans une politique d'amélioration. Ainsi, pour ce dernier, la production de déchets se traduit par un coût supplémentaire qui est engendré par deux phénomènes : une perte sèche de matières premières et des frais de traitement des déchets émis. Enfin, au niveau politique la question prend toute sa place dès lors qu'il y a une volonté de passer d'une économie actuelle à une économie circulaire, c'est-à-dire à une économie qui s'inscrit dans le modèle de développement durable Fig :1.1, qui tient compte des critères suivants :

- Les critères économiques
- Les critères environnementaux
- Les critères sociaux

Enfin, l'aspect législatif entre en compte puisque de nouvelles normes sont progressivement imposées dans certains domaines. Néanmoins, cette législation n'est pas homogène pour tous les secteurs et par conséquent s'applique au cas par cas.

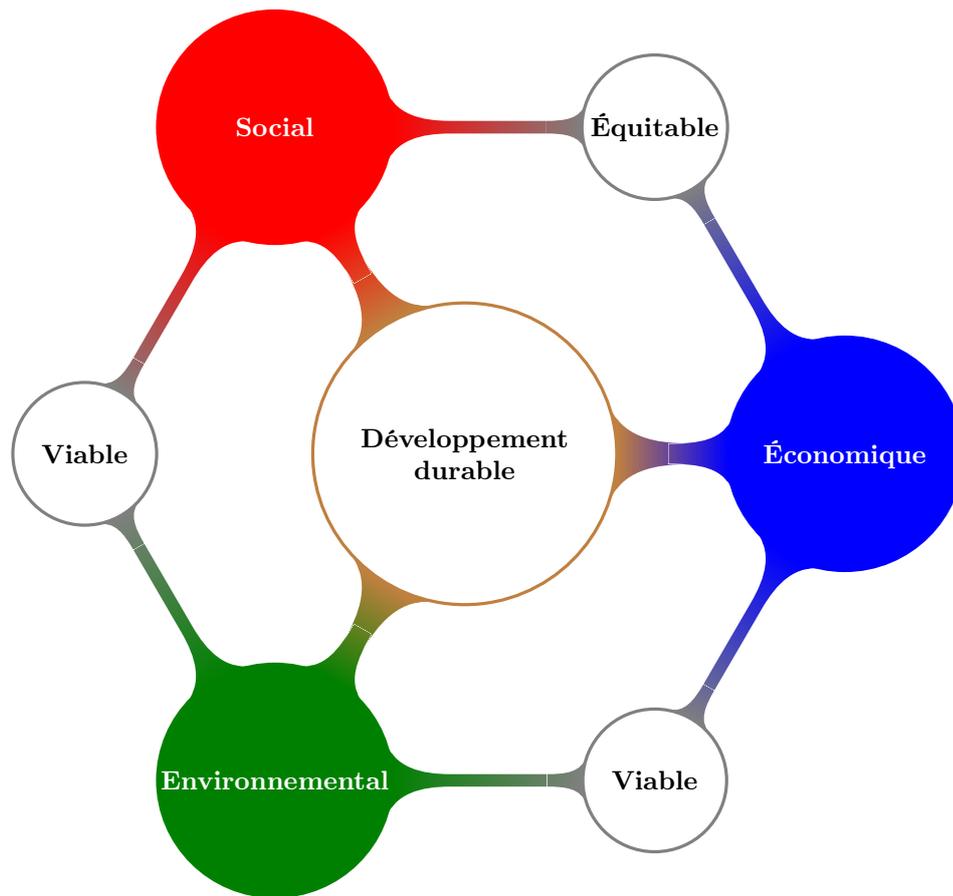


FIGURE 1.1- CONCEPTS CLÉS DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

1.3.2 AUJOURD'HUI, QUELS SONT LES CRITÈRES IMPORTANTS POUR LA RÉALISATION D'UNE ACTIVITÉ INDUSTRIELLE ?

Une autre question soulevée par notre problématique est le choix des indicateurs. Ainsi, pour pouvoir évaluer une trajectoire de valorisation, un ensemble de critères doit être sélectionné permettant de s'intégrer dans le modèle de développement durable ou, du moins, de s'en approcher le plus. Ces indicateurs vont donc être en relation avec les trois composantes de ce modèle. Si les composantes économique et environnementale sont bien intégrées dans l'étude des procédés et ont atteint un certain niveau de maturité, la composante sociale est plus délicate pour de nombreuses raisons. Il est à noter que ces critères sont pour certains récents (sociaux) et bien que clairement définis comme objectifs, leur mise en pratique reste complexe. Nous nous proposons donc de déterminer comment peut être composé ce critère social une fois défini et comment le calculer facilement à partir des données disponibles.

1.3.3 COMMENT GÉNÉRER DE NOUVELLES TRAJECTOIRES ?

Le cœur du sujet, et qui constitue la problématique majeure de cette thèse, est comment utiliser la connaissance que nous avons sur le traitement des déchets pour en générer de nouvelles connaissances sur les possibilités de traitement, qui bien sûr s'appliqueront à d'autres types de déchets. La principale approche que laisse supposer le titre de cette thèse est l'utilisation d'un outil de gestion de la connaissance, et plus précisément un système de raisonnement à partir de cas (**RàPC**). Il s'agit donc, dans un premier temps de montrer comment nous pouvons utiliser un tel système à cette fin. Ceci implique de résoudre un ensemble de sous-problèmes qui lui sont directement liés. Il faudra déterminer comment structurer et conserver la connaissance, mais aussi comment définir un élément central de ce type de système qu'est le *cas*. De même, cela suppose la nécessité de créer des méthodes adaptées à ce type d'approche. Pour ce faire, il est nécessaire de définir chaque étape d'un tel système, c'est-à-dire de produire des méthodes adaptées au type de problème. Ainsi, une des parties délicates est la mise en place d'une méthode permettant de déterminer la *similarité* entre deux cas et par extension de permettre la sélection de cas connus conduisant à une possible solution. Enfin, outre la problématique de l'adaptation de

la connaissance, il pourra être envisagé d'introduire des mécanismes permettant la flexibilité du raisonnement, ainsi que la créativité.

1.3.4 COMMENT FAIRE RAPIDEMENT UNE PREMIÈRE ÉVALUATION D'UNE TRAJECTOIRE ?

Il est nécessaire de créer une méthode permettant l'évaluation rapide d'une trajectoire. Ainsi, l'une des premières questions est de déterminer comment représenter un processus, et ce de manière simple. De ce fait, une modélisation doit être mise en place permettant d'estimer cette trajectoire, c'est-à-dire déterminer les flux qui seront associés aux opérations composant la trajectoire, puis comment appliquer les méthodes de calculs des indicateurs. Enfin, il s'agira de créer un système simple d'utilisation et générique par rapport au type de déchet traité.

1.4 STRUCTURATION DU MANUSCRIT

Pour répondre à ces problématiques, cette thèse a été divisée en six parties qui scindent le manuscrit selon des ensembles qui répondent chacune à une partie de la problématique. Ainsi, les six parties sont (Fig. 1.2) :

1. Contexte de l'étude et état de l'art ⇒ Chapitre II
2. Proposition d'un cadre de modélisation et d'un ensemble de critères d'évaluation ⇒ Chapitre III et IV
3. Réalisation d'un outil de conception de nouvelle trajectoire ⇒ Chapitre V
4. Modélisation, quantification et évaluation de ces trajectoires ⇒ Chapitre VI
5. Évaluation des méthodes développées ⇒ Chapitre VII
6. Conclusions, discussions et perspectives ⇒ Chapitre VIII

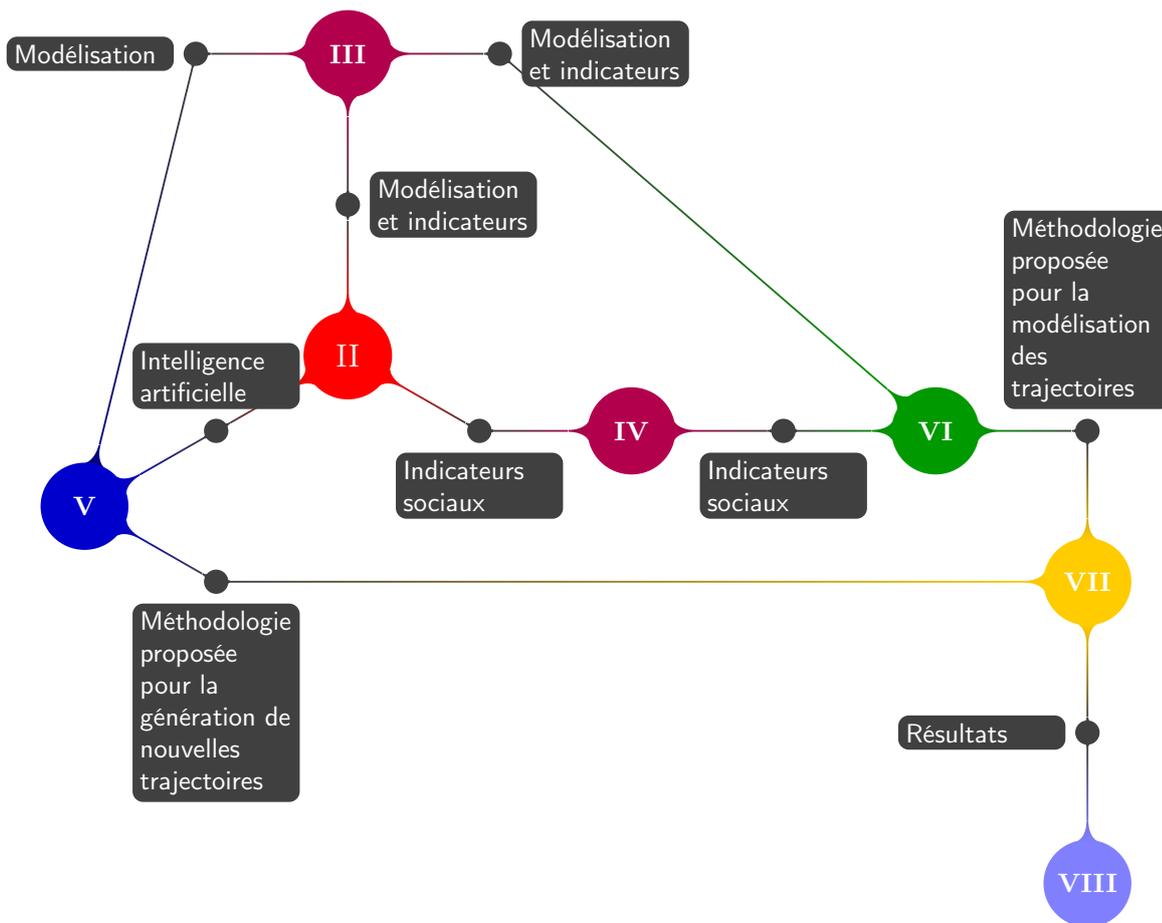


FIGURE 1.2- STRUCTURE DE LA THÈSE

Chacune de ces parties peut être divisée en différents chapitres. Ces derniers représentent généralement une des questions que nous avons abordées. Dans ce qui suit, nous nous proposons d'introduire chacune d'elles.

1.4.1 CONTEXTE DE L'ÉTUDE ET ÉTAT DE L'ART

Cette partie a pour but d'introduire la thèse, c'est-à-dire en définir son contexte et ses enjeux. Outre ce chapitre, **Introduction**, elle comporte un autre chapitre intitulé : **État de l'art des thèmes abordés** qui se centre principalement sur deux points. Le premier vise à faire une première introduction concernant les déchets, leurs traitements et de leurs valorisations, mais aussi à l'ensemble des questions portant sur les indicateurs. Ainsi, nous verrons les différentes approches qui ont été envisagées pour résoudre le problème de valorisation des déchets, et nous citerons quelques travaux marquants en rapport avec notre sujet. Le deuxième point abordé est celui de l'intelligence artificielle et plus particulièrement celui du raisonnement à partir de cas. Ici, nous présentons brièvement certaines méthodes et outils pouvant être utilisés, mais aussi des notions clés qui seront traitées par la suite. Enfin, nous abordons certains thèmes de discussion sur ces méthodes et notamment les interrogations les concernant que nous avons trouvé dans la littérature. Ceci nous permet de faire une analyse critique des méthodologies trouvées, de positionner notre contribution mais aussi de définir nos objectifs en explicitant les verrous que l'on se propose de lever.

1.4.2 PROPOSITION D'UN CADRE DE MODÉLISATION ET UN ENSEMBLE DE CRITÈRES D'ÉVALUATION

La seconde partie constitue une première approche concernant la question de la modélisation de la trajectoire puis de son évaluation. Dans le chapitre intitulé : **Modélisation des trajectoires de valorisation des déchets** nous définissons un ensemble d'éléments permettant la création d'un *cadre de modélisation*. Ce cadre se base sur l'utilisation de plusieurs points de vue permettant de définir une trajectoire selon plusieurs échelles, de la macro-structure aux opérations unitaires. La modélisation se positionne donc sur un aspect multi-échelle. De plus, dans cette partie nous définissons une méthodologie pour le calcul des indicateurs retenus. Ainsi, nous verrons avec quels indicateurs évaluer la partie économique d'une activité et comment réaliser les calculs à partir des données disponibles. De même, nous justifierons le choix des *EcoCost* pour l'estimation de l'impact environnemental, en détaillant la méthode pour son évaluation. L'analyse sociale est expliquée ainsi que ses limites. Enfin, dans cette partie nous consacrons un chapitre sur **l'Utilisation des données économiques pour l'évaluation du nombre d'emplois d'une activité** où nous réalisons une étude visant à déterminer le nombre d'emplois générés par une activité en se basant uniquement sur des données économiques.

1.4.3 RÉALISATION D'UN OUTIL DE CONCEPTION DE NOUVELLE TRAJECTOIRE

La troisième partie, **Outil de génération de nouvelles trajectoires basé sur le raisonnement à partir de cas**, concerne l'un des points centraux de la thèse. Il s'agit de l'établissement d'un modèle puis de la réalisation d'un outil permettant la génération de nouvelles trajectoires de valorisation à partir de la connaissance accumulée sur des trajectoires existantes. Cette partie va donc aborder plusieurs points importants qui définiront les différentes étapes du raisonnement à partir de cas. Ainsi, dans cette partie, nous allons proposer la représentation de la connaissance d'une manière non structurée. Nous intégrons par la suite, des mécanismes permettant à partir de cette connaissance de générer des cas en fonction de la requête soumise au système. Ensuite, nous introduisons un nouveau concept qui est celui de *définition commune* et par la proposition d'une méthode d'estimation de similarité qui ne se base pas sur la traditionnelle mesure de distance mais sur le partage d'éléments communs. Par la suite, nous abordons le mécanisme de recherche de cas qui s'appuie sur une conceptualisation des cas. Cette méthode, comme nous le verrons, offre à la fois une certaine efficacité de part sa structuration, mais permet aussi une très grande flexibilité du fait de l'intégration de mécanismes d'inférences et de mécanismes d'abstraction. La méthode s'appuie également sur des taxonomies, formes limitées d'ontologies, de concepts. Nous verrons également la méthode de résolution et d'adaptation des trajectoires qui se base sur une décomposition d'une trajectoire en sous-problèmes et sur une estimation des résultats des procédés simples. Pour finir, nous expliquons brièvement l'implémentation de cette proposition au travers d'un outil logiciel sous le paradigme de la programmation logique en Prolog.

1.4.4 MODÉLISATION, QUANTIFICATION ET ÉVALUATION DE CES TRAJECTOIRES

La quatrième partie présente l'outil développé pour modéliser et évaluer les trajectoires de valorisation et, plus généralement, des activités dans la partie intitulée **Création d'un outil de représentation et d'évaluation de trajectoires de valorisation**. Cet outil réalisé sous Python permet de définir des classes d'opérations qui serviront de modèles à la génération des différentes entités présentes dans une trajectoire. Cette fonctionnalité est rendue possible par la méta-programmation. Chaque élément permet de recevoir des flux (matière, économique ou autre) et d'en générer de nouveaux. De plus, la modélisation du comportement de chaque entité, c'est-à-dire de sa réaction par rapport aux flux le traversant est régie par un ensemble de règles qui forme un modèle de

CHAPITRE 1. INTRODUCTION

programmation par contraintes. La résolution de ces contraintes est assurée par des solveurs dont l'interface avec le système est assurée par des modules. De la même manière, des greffons ajoutés au système permettent l'implémentation de méthodes d'évaluation des trajectoires. Ainsi, il est possible d'ajouter des fonctions d'évaluations rendant le système flexible. Enfin, cette partie présente les greffons qui ont été développés réalisant les évaluations selon les différents critères que nous avons choisis.

1.4.5 ÉVALUATION DES MÉTHODES DÉVELOPPÉES

Ce dernier chapitre⁵ **Analyse, évaluation et commentaires sur la réalisation**, est une étude des solutions proposées pour résoudre les problèmes soulevés par la thèse. Dans un premier temps, l'objectif est d'analyser et d'évaluer les capacités de l'outil à générer de nouvelles trajectoires. Pour ce faire, une base de cas a été réalisée et plusieurs cas tests sont soumis au système. Le but de ces tests est de montrer que le système est, dans un premier temps capable de retourner des cas connus, dans un second temps de montrer que le système est flexible c'est-à-dire qu'il traite les fluctuations lors de la description des problèmes par l'utilisateur et qu'il est capable d'adapter des solutions provenant de diverses sources. La seconde partie vise quant à elle à l'évaluation de l'outil de modélisation. Pour ce faire, un cas d'étude a été réalisé avec comme thème *la valorisation des pneumatiques usés en granulats et poudrettes*. Dans ce cas d'étude, toute la chaîne de transformation depuis la récupération des pneus usés jusqu'à la livraison chez les clients a été modélisée. Ainsi, cette partie montre qu'il est possible de modéliser les interactions entre différentes entités, quel que soit le type de flux échangé. Enfin, nous réalisons une évaluation de ces trajectoires, selon les trois types de critères sélectionnés, à l'aide des greffons développés à cet effet.

1.4.6 CONCLUSIONS, DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES

La dernière partie de cette thèse permet de conclure sur l'ensemble des travaux réalisés. Intitulé **Conclusions et perspectives**, ce chapitre se divise en trois parties. La première est composée des bilans sur chacune des parties de cette thèse. La seconde propose une analyse critique des résultats obtenus par rapport aux objectifs fixés et montre les limites des méthodes et outils développés. Enfin, une dernière partie propose des perspectives d'amélioration et de poursuites de recherche. Ainsi, la première ouvre des voies d'amélioration des réalisations en se basant notamment des réflexions de la partie *Discussions*. La seconde propose un thème de recherche visant à compléter les méthodes réalisées dans cette thèse.

5. Hors conclusion

ÉTAT DE L'ART DES THÈMES ABORDÉS

Il serait trop long de parler de ceux qui ont passé toute leur vie à jouer aux échecs, à la paume, ou à exposer leur corps aux ardeurs d'un soleil brûlant. Ils ne sont point oisifs, ceux à qui les plaisirs donnent beaucoup d'affaires. Personne ne doute que ceux qui s'appliquent à d'inutiles études littéraires, ne se donnent beaucoup de peine pour ne rien faire : le nombre en est déjà assez grand chez nous autres Romains.

DE LA BRIÈVETÉ DE LA VIE – SÉNÈQUE – CHAPITRE XIII - 1 – TRADUCTION
M. CHARPENTIER, 1860

2.1 PROBLÉMATIQUE DE VALORISATION DES DÉCHETS

À partir de la révolution industrielle et de la maîtrise de nouveaux moyens techniques, la production de masse de produits de plus en plus complexes et composés de matières synthétiques a explosé. Véritable transformation de la société, cette évolution a permis un immense progrès au niveau technologique, économique et social. L'utilisation de composés synthétiques permet d'obtenir des produits à faible coût et à très grande utilité. Néanmoins, depuis la fin du XX^{ème} siècle, plusieurs problématiques apparaissent. Tout d'abord, la production de masse nécessite d'importante quantité de matières premières. Deuxièmement, la fabrication de matière synthétique entraîne l'apparition de nouvelle matière non naturelle et chimiquement complexe. Ainsi par exemple, les métaux sont souvent mélangés à d'autres composants : composés chimiques, alliages [111]. Enfin, un dernier facteur important est la durée de vie de ces produits. En effet, le modèle économique actuel, basé sur la consommation, accentue la brièveté d'utilisation de ces produits. À partir de ces trois constatations, il en découle plusieurs conséquences. En premier lieu, la forte consommation en matières premières provoque une diminution des ressources naturelles. Il en résulte une pénurie de certaines matières ainsi qu'une augmentation de leur prix [218]. Deuxièmement, la forte consommation de nouveaux produits accompagnée d'une durée de vie courte génère une quantité importante de déchets. En 2008, la production industrielle française a généré 868 millions de tonnes de déchets [63]. Troisièmement, la nature non naturelle de certains produits pose problème au niveau de leur élimination. Ainsi, même si avant l'ère industrielle la majorité des produits manufacturés ne représentait pas de problèmes environnementaux de par leur nature « biodégradable » ou naturel, il n'est plus possible de croire que les déchets vont s'éliminer de part eux-mêmes et recommencer depuis le commencement c'est-à-dire une planète sans déchet [173]. L'exploitation des ressources entraîne irrémédiablement l'introduction de nouveaux composés et la réduction des matières premières. Dans de plus en plus de pays, les déchets entraînent un important coût pour les sociétés et représentent une situation de moins en moins tolérée par l'opinion publique [26]. D'après le même auteur, 70 % des Français estiment que les déchets constituent un important problème. Par conséquent, il existe actuellement plusieurs problématiques liées au thème des déchets. L'un des principaux objectifs est d'assurer les besoins actuels tout en permettant aux générations futures de répondre aux leurs [17].

Bien que l'ensemble des acteurs, qu'ils soient industriels, politiques ou autres, sont conscients du problème, plusieurs stratégies sont envisagées. Ainsi bien que la majorité des acteurs se penche sur le traitement des déchets, d'autres pensent que la problématique des déchets passe par un changement du comportement des consommateurs et plus généralement des politiques de développement actuellement en place [218]. Bouyer préconise de faire deux analyses ; une analyse quantitative et une analyse spatio-temporelle permettant d'observer la répartition [33]. Dans ce qui suit, nous allons nous focaliser sur différents aspects de la problématique : l'aspect écologique, celui des ressources en matières premières et l'aspect économique.

CHAPITRE 2. ÉTAT DE L'ART DES THÈMES ABORDÉS

2.1.1 PROBLÉMATIQUE ÉCOLOGIQUE

Le besoin toujours plus important en matière première nécessite une exploitation intensive des ressources. Il en résulte une destruction progressive des zones exploitées. La raréfaction de certaines d'entre elles entraîne l'utilisation de matières premières se trouvant en faibles quantités, entraînant ainsi un coût d'exploitation et un volume de traitement plus important¹. Arnaud [17] exprime le fait, admis maintenant, qu'il est nécessaire de préserver les ressources naturelles. Le traitement et les transformations nécessaires de ces matières premières ont eux aussi un fort impact de part leur forte consommation énergétique par exemple. Il en découle une augmentation des besoins en combustible et une forte émission de déchets. Enfin, l'élimination de ces produits en fin de vie soulève d'importants problèmes écologiques. Par exemple, le fait qu'un grand nombre d'entre eux ne se dégradent pas seuls dans la nature et que d'autres, par leur composition chimique, peuvent libérer des éléments non initialement présents dans le milieu. Ainsi, certains matériaux peuvent constituer un danger important pour la santé et l'environnement, comme le cadmium des panneaux solaires s'il est mal traité [109]. Les quantités en question impactent fortement l'écosystème mais aussi les conditions de vie des populations se trouvant à proximité des zones de traitement [13]. Bertolini évoque le problème des Nimby : No In My Back Yard qui se traduit par le refus des populations de voir à proximité de leur lieu d'habitation l'installation de centre de traitement des déchets [26]. Bien que l'ensemble des acteurs soient sensibles à ces questions [79], leurs points de vue divergent quant aux solutions à adopter. Certains pensent qu'un système qui s'apparenterait à un système organique en circuit fermé est réalisable. Plus modérément, une intégration totale de l'usine dans son environnement est proposée [44]. Néanmoins, une grande partie des auteurs doute quant à la plausibilité d'une telle solution. Enfin, Stahel propose cinq points pour un développement durable qui se base sur le respect de l'environnement et les conditions humaines [218].

- premier pilier : protéger la nature et la capacité de celle-ci à maintenir l'homme sur la planète
- deuxième pilier : protéger la santé et la sécurité de l'homme contre les effets de sa propre activité industrielle
- troisième pilier : réduire les flux de matières et d'énergie à travers l'économie
- quatrième pilier : l'écologie sociale
- cinquième pilier : l'écologie culturelle

2.1.2 PROBLÉMATIQUE DES RESSOURCES EN MATIÈRES PREMIÈRES

L'utilisation massive des ressources naturelles entraîne une diminution de ces dernières qui se traduit de deux manières. Les ressources minérales ne sont pas détruites durant leurs utilisations (sauf pour le cas où des réactions nucléaires entre en jeu). Néanmoins, elles se retrouvent en faible concentration ou encore associées à d'autres éléments qui les rendent inexploitable en l'état. Par conséquent, elles sont souvent considérées comme perdues au profit des matières premières dont le coût de revient est plus faible. Les ressources organiques, comme les plastiques issus du pétrole, sont parfois complètement perdues car irrécupérables ou bien encore détruites (incinérées par exemple). La raréfaction de certains minerais posent des problèmes à d'autres niveaux. Hocquard et Guyonnet soulignent l'importance de certains métaux pour les produits de hautes technologies. Ces derniers étant contrôlés par des pays concurrents économiquement, le réapprovisionnement peut poser problème en cas de pénurie. Par conséquent, l'idée de réemployer la matière issue des déchets comme matière première dans les processus de fabrication semble être un moyen de résoudre, au moins en partie, le problème [111]. Néanmoins, le flux de matières premières n'est pas forcément en adéquation avec les besoins des consommateurs, de par l'immobilisation des éléments sur toute la phase de récupération des déchets. Par exemple, il est important de considérer la durée d'immobilisation des métaux entre leur mise en circulation et leur récupération dans les filières de valorisation [111].

2.1.3 PROBLÉMATIQUE ÉCONOMIQUE

La question économique est essentielle dans la problématique de gestion des déchets. En effet, les différents phénomènes liés à ce problème ont un impact plus ou moins direct sur des questions économiques qui vont à leur tour influencer les stratégies de recyclage adoptées. Comme il a été montré plus haut, l'utilisation massive des ressources naturelles entraîne une diminution de l'offre de ces dernières et par voie de conséquence, une augmentation des prix accentuée par la forte demande actuelle. D'un point de vue industriel, la question économique prend un autre aspect. Alors qu'il est nécessaire de tendre vers une production plus respectueuse de l'environnement, le seul critère de survie des entreprises se résume dans la rentabilité économique [224]. Or pour l'industriel le déchet, qu'il provienne directement du processus de transformation ou de l'obligation de traiter

1. <http://ecoinfo.cnrs.fr/article129.html>

la production en fin de vie, est une source de coût. Par conséquent, la gestion des déchets est nécessaire pour optimiser les coûts qui leur sont liés [221]. Or, comme le souligne Bertolini [25] d'un point de vue économique, un déchet n'en est pas un s'il a une utilité pour son propriétaire ou s'il a une quelconque valeur marchande. Par ce fait, l'industriel va chercher deux choses. La première est de réduire les coûts des déchets soit en diminuant leur quantité, soit en optimisant leur coût de traitement ainsi que leur durée [228]. La deuxième est de maximiser la valeur du bien recyclé. Comme le souligne Villalba [228], cette dernière doit nécessairement être supérieure à son coût de revient. Une des approches envisagée est l'écologie industrielle qui reprend non seulement l'aspect environnemental de la production, mais aussi l'ensemble des éléments d'une entreprise comme l'aspect économique, gestion etc [44]. Enfin, l'ingénierie verte désigne une solution viable écologiquement et économiquement [48].

Dans le milieu industriel, le concept de « Green Engineering » ou « ingénierie verte » définit une politique de conception visant à être satisfaisante écologiquement tout en respectant la viabilité et la rentabilité du produit [174]. L'un des axes principaux du « Green Engineering » est d'établir comment un nouveau produit peut être conçu en incluant la contrainte écologique [174]. Ainsi, la question se pose lors de la phase de conception en intégrant des méthodes qui visent à réduire l'impact sur l'environnement lors de la production du produit, mais qui intègre aussi la question du retraitement. Cet aspect est plus connu sous le nom de « Eco-conception ». L'intégration de l'éco-conception dans les entreprises passe par un ensemble d'outils et de méthodes visant à l'intégration progressive des nouvelles techniques [42]. Par exemple, les méthodes peuvent se baser soit sur la recherche de composants adéquates soit sur la conception du produit [174]. L'intégration de cette nouvelle politique dans les entreprises est lente et difficile de par le fait du nombre de contraintes qui s'appliquent au sujet. Néanmoins, Carillo pense qu'il existe des trajectoires favorisant l'intégration de l'éco-conception dans les entreprises [42].

2.2 QUE FAIRE DES DÉCHETS ?

2.2.1 QU'EST CE QU'UN DÉCHET ?

La principale définition d'un déchet est un objet qui n'a pas ou plus d'utilité et dont le propriétaire veut se débarrasser. Ainsi, Bouyer explique que le mot déchet vient de déchoir, qui signifie qui perd de la valeur [33]. Par conséquent un déchet peut prendre différentes formes. D'une manière légale on trouve la définition suivante selon la loi cadre du 15 juillet 1975 dans [193] :

« tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon »

Ensuite, il est possible de distinguer les déchets de matières organiques naturelles, comme le bois, les résidus végétaux et les déchets manufacturés avec d'autres composants naturels ou non. Ces déchets peuvent avoir une composition plus ou moins complexe en fonction de leur utilité d'origine et des propriétés attendues. Dans ce dernier cas, leur récupération devient plus compliquée [111]. Ce type de déchet peut ne pas présenter de dangers ou de risques en soi. Néanmoins, comme le souligne [179] bien que certains déchets ne représentent pas en soit de problèmes, une mauvaise gestion peut entraîner de graves accidents (incendie ...)

Un déchet peut être aussi un objet qui continue à fonctionner sous sa fonction première, ou encore en mode dégradé. Pour ce type de déchet, une des principales activités de leur traitement consiste dans leur collecte [179]. Un déchet peut enfin être un résidu d'exploitation ou de fabrication qui n'a pas été valorisé.

2.2.2 COMMENT SONT TRAITÉS ACTUELLEMENT LES DÉCHETS

Il y a deux principales questions qui peuvent être posées concernant un déchet et plus particulièrement son traitement. En premier lieu, comment doit-il être traité ? Ensuite, par quels moyens peut-on traiter le déchet pour atteindre la solution envisagée ? Enfin cette solution est-elle viable, c'est-à-dire réaliste et satisfaisant les contraintes précédentes. Comme un déchet est un objet qui n'a pas ou plus d'utilité pour son propriétaire, une voie possible d'élimination consiste à lui trouver une autre utilité. La seconde voie consiste à ne pas le traiter et à le stocker (dit stockage ultime). Parmi l'ensemble des traitements possibles, on peut distinguer néanmoins cinq principales formes de traitements :

- la réutilisation (qui ne nécessite pas de transformation)
- Le recyclage fonctionnel (qui nécessite des transformations permettant de passer du déchet au produit initial)
- la valorisation matière
- la valorisation énergétique
- le stockage ultime

CHAPITRE 2. ÉTAT DE L'ART DES THÈMES ABORDÉS

Historiquement, le stockage ultime était principalement réalisé de par la facilité de mise en œuvre et du peu d'intérêt porté à l'écologie. Néanmoins, les problèmes d'approvisionnement en matières premières, les questions environnementales et la modification de la législation entraînent une réorganisation des filières au profit de méthodes de valorisation [143].

Bien que la finalité du processus de traitement des déchets puisse sembler facile à première vue, le traitement des déchets est complexe. En effet, outre les problèmes évoqués précédemment de nature écologique, économique ou encore législatif, un nombre important de problèmes techniques s'ajoutent. Ces derniers sont au cœur du problème car ils impactent directement les autres facteurs. Ainsi par exemple, Fraisse [94] constate que certains composés se dégradent au niveau chimique lors de leur vieillissement ou encore que c'est le processus de recyclage lui-même qui effectue ces modifications. De plus, pour un même type de produit, on peut retrouver des composants chimiquement différents ou du moins de qualité différente. Ainsi, d'après Chen [48], la capacité de recyclage d'un produit dépend de son mode de fabrication et de ses constituants. Néanmoins, et comme le montre le même auteur, il serait possible de recycler un produit en utilisant différentes voies.

Face à ces difficultés, certains auteurs constatent la prédominance de la rentabilité économique et des problèmes techniques sur les questions écologiques [67]. Le choix de la stratégie à adopter peut s'avérer complexe. Une manière de simplifier le problème est de choisir les meilleures règles de gestion permettant d'atteindre un résultat optimal [173]. De plus, l'organisation dans les entreprises vis-à-vis de ce type de problème semble importante [79]. Pour ce faire un des moyens simples de réduire les coûts des déchets est la réutilisation [12]. Néanmoins, la difficulté d'évaluer les besoins en nouveaux services et de créer de nouveaux ensembles cohérents avec l'existant est difficile [221].

Enfin, comme le soulignent Ayres et Ayres [67], maximiser le recyclage n'a d'intérêt que si l'impact environnemental est faible et que la rentabilité du processus est au rendez-vous. Ou encore comme le résume Naquin, ce qui est recyclable ce sont les produits issus des filières qui sont viables [171].

2.2.2.1 QU'EST CE QUE LA VALORISATION

La valorisation consiste en une transformation du produit, transformation qui peut être physique ou fonctionnelle (i.e. que l'on modifie son utilisation), ayant pour but de lui donner de la valeur (il n'est donc plus un déchet).

Dans le problème de valorisation, la question de la valeur d'un objet est importante. En effet, comme il a été défini auparavant, le processus de valorisation est l'action qui vise à redonner de la valeur à l'objet. Il est donc nécessaire de définir la notion de valeur. Une des principales définitions que l'on peut trouver est qu'il est possible de considérer la valeur comme une mesure d'échange ou encore la rapprocher de la notion d'utilité [66]. Ainsi comme le souligne Malleret, la notion de valeur peut recouvrir plusieurs idées et n'est pas clairement définie [156]. Pour les économistes, la valeur d'usage correspond au coût de production alors que la valeur économique est le prix qu'un client est prêt à déboursier pour satisfaire un besoin précis, tout en considérant la concurrence [156]. Enfin, pour Malleret, la valeur d'échange est en unité monétaire, celle d'usage en utilité. En contrepartie, la valorisation est définie d'après l'Article L. 541-1-1 du code de l'environnement [15] de la manière suivante :

La valorisation est « toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en substitution à d'autres substances, matières ou produits qui auraient été utilisés à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, y compris par le producteur de déchets. »

Ou encore d'après [63] :

« Toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en remplaçant d'autres matières qui auraient été utilisées à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, dans l'usine ou dans l'ensemble de l'économie. »

Il est à noter que la notion de recyclage est utilisée pour désigner la valorisation. Ainsi, on peut ainsi trouver la définition suivante du recyclage dans [63] :

« toute opération de valorisation par laquelle les déchets sont retraités en produits, matières ou substances aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Cela inclut le retraitement des matières organiques, mais n'inclut pas la valorisation énergétique, la conversion pour l'utilisation comme combustible ou pour des opérations de remblayage »

Ainsi comme le souligne Bertolini, la valorisation permet à la fois de diminuer les déchets non traités et ainsi de préserver l'environnement [26]. Ou encore la valorisation est une action qui permet d'économiser de la matière, de l'énergie ou des capitaux [139]. De plus, d'un point du développement durable, certains auteurs suggèrent qu'il est préférable de ne pas produire de déchets ou de les valoriser plutôt que de perfectionner les méthodes d'élimination [218]. L'avantage de la valorisation est double. En effet d'une part, elle supprime le

déchet et par conséquent solutionne la question du « Que faire avec ? » et d'autre part, elle diminue le manque de matières premières, en réduisant l'extraction des ressources naturelles [110], tout en pouvant réduire les coûts des entreprises et par conséquent améliorer la rentabilité.

Ainsi, en 2010, la valorisation des déchets a permis de produire 41 millions de tonnes de matière première recyclée [63]. Pour les entreprises, la réduction ou la valorisation des déchets se traduit par une optimisation des processus avec notamment une réduction des flux de matière et d'énergie [29]. On peut souligner que traditionnellement, pour les entreprises, l'optimisation consistait à diminuer les coûts de production par rapport au prix que le client est prêt à payer [156].

Les choix de valorisation sont multiples, pour Bouyer, il est possible de répartir les déchets valorisables en trois parties. Les déchets organiques qui peuvent être compostés ou utilisés dans la méthanisation, les déchets minéraux qui se revalorisent au travers du recyclage matière et les macromolécules qui sont valorisables par recyclage matière ou énergétique [33].

Enfin, la valorisation peut représenter un plus commercial intéressant comme dans l'étude d'Ortegon sur la question du traitement d'un champ d'éolienne en fin de vie [183]. Ainsi, ce dernier souligne que le processus de valorisation permet d'améliorer l'attractivité des énergies vertes par une diminution de leur coût.

2.2.2.2 LE RECYCLAGE FONCTIONNEL

Le recyclage fonctionnel d'un objet consiste à transformer ou modifier l'objet en question afin de produire un nouvel objet identique à celui recycler. Plus généralement, on cherche à le transformer de telle sorte qu'il redevienne identique au produit initial. Par conséquent, le recyclage fonctionnel permet de boucler le cycle de production et ainsi d'économiser des matières premières en intégrant les déchets générés par l'activité en début de cycle [183]. Il est possible, dans certains cas de distinguer le recyclage de la régénération. Ainsi, on trouve que le recyclage, dans le cas de procédés, consiste à réutiliser le flux dans un autre procédé alors que la régénération permet de réutiliser le flux sous sa fonction initiale [139].

L'ADEME souligne que le recyclage constituerait la voie royale du traitement des déchets [1]. Néanmoins, ce document souligne que, dans la communauté, certains autres auteurs pensent que ce n'est pas le cas. Par exemple, pour [33], le recyclage est techniquement possible pour tout système en fin de vie, mais économiquement et écologiquement non. Certains auteurs introduisent des indicateurs afin de quantifier la faisabilité de l'opération. Ainsi, Villalba introduit la notion de recyclabilité comme étant la capacité d'un composant à retrouver ses propriétés initiales [229].

2.2.2.3 LA VALORISATION ÉNERGÉTIQUE

La valorisation énergétique consiste à détruire la matière en question pour en extraire le plus d'énergie possible. Cette transformation est ainsi irréversible et par conséquent la matière originelle est perdue. Elle a l'avantage d'être facilement applicable à un grand nombre de déchets mais nécessite certaines précautions notamment avec les émissions qui peuvent en résulter. Elle est par exemple utilisée pour la valorisation des pneus usagés et plus généralement pour les produits issus du pétrole. Néanmoins, ce type de processus peut conduire à des sous-produits qui peuvent représenter un danger pour l'environnement et qui devront être traités [208].

Pour les entreprises, la valorisation énergétique se traduit par une optimisation des flux énergétiques internes ou entre plusieurs usines. Ainsi, l'analyse des flux matières et énergétiques permet la recherche de synergie entre différentes entreprises, ce qui permet une réduction de la demande en énergie ou en matière et ainsi la réduction des déchets produits [27].

Pour les entreprises, outre les bénéfices directs de ce type d'action, elles peuvent valoriser leur image en montrant leur implication dans les problématiques environnementales [27].

Néanmoins, la valorisation énergétique n'est considérée que comme une voie secondaire de par le fait qu'elle peut être polluante, son coût peut être élevé et enfin que la matière traitée est perdue, ce qui ne solutionne pas le problème des ressources naturelles. Par exemple, la valorisation énergétique des plastiques est de moins en moins acceptée [164].

2.2.2.4 LA VALORISATION MATIÈRE

Cette méthode peut se résumer comme un recyclage partiel de certains composants du produit initial, où la matière valorisée est utilisée dans d'autres usages que ceux initiaux. Dans une trajectoire de valorisation matière, les matériaux sont en partie réutilisés tels quels dans d'autres procédés. Par conséquent, l'utilisation de la matière est dégradée², comme la gomme des pneus peut être réutilisée pour faire des tapis de sol ou encore des objets moulés.

2. Elle n'a plus les propriétés originales

CHAPITRE 2. ÉTAT DE L'ART DES THÈMES ABORDÉS

Ainsi, dans certains cas la valorisation matière peut être réalisée uniquement pour les matières à forte valeur économique, aux dépens des matériaux à faible valeur [109]. Par exemple, pour les composants électroniques, les résines sont incinérées afin de libérer les métaux de haute valeur.

Généralement, le recyclage matière se traduit par une destruction plus ou moins poussée de l'objet initial [208]. Cette phase peut s'accompagner de désassemblage des constituants afin de pouvoir réunir les composants semblables qui pourront être réutilisés [199] [200]. Néanmoins, il existe des cas où l'objet recyclé est utilisé tel quel. Comme l'exemple du Pneusol, qui représente un autre usage du pneu usé. Dans ce cas, le déchet n'est pas en lui-même transformé, mais utilisé avec une autre fonction [208].

De plus, Boiral, dans le même document, explique qu'en plus de réduire les déchets, la réutilisation matière vise à maximiser l'utilisation des matières au sein du processus, même si le niveau zéro déchet semble impossible. Enfin, l'utilisation de déchets industriels comme matière première peut constituer un avantage significatif pour les entreprises en réduisant leurs coûts [29].

Pendant, cette méthode est loin d'être parfaite et intéressante pour les industriels. Ainsi, le coût de récupération des matériaux est parfois bien plus cher que le matériau issu des ressources naturelles. Par exemple, le Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie français montre que la récupération des métaux rares est actuellement difficile et que les coûts de récupération sont aussi élevés que le prix du métal naturel extrait [58]. Enfin, une des principales problématiques qui se pose sur certains matériaux est de savoir à quoi peuvent servir ces matières premières issues du processus de valorisation [26].

2.2.2.5 LA RÉUTILISATION

La réutilisation consiste en une réhabilitation du produit sans transformation. Veerakamolmal et Gupta soulignent le fait que beaucoup de produits considérés comme déchets sont tout ou partie en parfait état de fonctionnement [225]. Par conséquent, ce type de déchet peut être facilement valoriser en lui trouvant un nouveau propriétaire qui l'utilisera de la même manière ou dans un autre mode de fonctionnement que celui initialement prévu. Ainsi, le procédé de refabrication consiste à renvoyer certains composés en usine afin qu'ils soient reconditionnés pour un nouvel emploi [183]. D'après Stahel, la récupération soignée des déchets ménagers permettrait de pouvoir en réutiliser 80 % [218].

L'avantage de ce type de valorisation est que la réutilisation de tout ou partie d'un déchet permet non seulement de préserver la matière, mais aussi les coûts économiques et énergétiques nécessaires à leur première fabrication [12]. Pour ce type de processus, seuls trois facteurs sont à prendre en compte : économique, écologique et législatif [12]. Néanmoins, certaines sources considèrent que la réutilisation n'est pas une forme de valorisation, puisque l'objet n'est pas un déchet au sens strict car il possède de la valeur [15].

2.2.2.6 LE STOCKAGE

Le stockage est la solution ultime du traitement des déchets. Il consiste à stocker dans des lieux sûrs les déchets une fois stabilisés. Les zones de stockage viennent remplacer les décharges. Ces dernières disparaissent au profit des zones de stockage et des processus de valorisation suite à des modifications d'ordre sociales ou politiques [245]. Cette méthode, bien que simple, a le désavantage de ne pas revaloriser les éléments d'une part, mais aussi d'entraîner des coûts de traitement, d'enfouissement, de gestion des risques [245], et de ne pas régler les problèmes soulevés précédemment d'autre part (matières premières, coûts...). Néanmoins, cette solution est encore largement utilisée.

2.3 CONSÉQUENCES

La problématique des déchets soulève de nombreux problèmes comme vu précédemment. Deux niveaux de complexité se dégagent des éléments apportés par la littérature. Dans un premier temps, il s'agit de répondre à la question fondamentale de savoir comment le déchet va être valorisé. En d'autres termes, il est nécessaire de définir en quoi sera converti un déchet, pour quel usage et comment. Dans un second temps, une fois le « comment » établi, il s'agit de prendre en compte les différents indicateurs mesurant l'impact de l'activité de valorisation (engendré par ce « comment »). Ces éléments constituent un ensemble de contraintes ajoutant de la complexité à la question puisqu'ils éliminent de ce fait certaines voies et limitent par conséquent le nombre de possibilités. Comme on peut le constater, trouver de nouvelles voies de valorisation aux déchets est un problème complexe qui prend en compte un grand nombre de paramètres (les paramètres décrivant un déchet dans sa totalité représente déjà un défi). Par conséquent, sa résolution s'avère difficile. Pour résoudre ce type de problème, différentes stratégies ont vu le jour. Certaines tentent de trouver des solutions générales aux problèmes, d'autres ciblent un point précis de la problématique.

2.4 MÉTHODES DÉVELOPPÉES

Dans la littérature, les principaux travaux trouvés à ce jour peuvent se classer dans plusieurs catégories. Chaque catégorie se base principalement sur un point bien précis de la problématique de valorisation des déchets. Ainsi par exemple, on trouve un important travail sur la question du désassemblage.

2.4.1 PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE

L'une des premières questions soulevées est l'identification des problèmes et sous problèmes que pose la valorisation des déchets ou d'une manière générale leur traitement. Ainsi, le rapport de l'ADEME souligne plusieurs types de verrous, notamment les verrous technologiques. Ces verrous proviennent de la difficulté de traiter les déchets afin de pouvoir les réutiliser. Ce même rapport évoque le problème de la rentabilité économique qui est un critère important puisqu'il conditionne à lui tout seul, la faisabilité d'une trajectoire de valorisation. Enfin, il montre la difficulté technique soulevée par ce type de problème de par la diversité des différents produits à traiter et le manque d'information à leur sujet [2].

Les auteurs arrivent néanmoins à définir plusieurs grandes voies de valorisation qui ont été définies précédemment. Ainsi, l'ADEME définit six axes de recherche, dont notamment la caractérisation des déchets ainsi qu'une amélioration des trajectoires de valorisation [2]. Gonzalez et Adenso-Díaz proposent cinq alternatives pour le traitement des déchets : jeter, recycler, ré-utiliser, fabriquer ou désassembler [103]. Avec l'exemple du pneumatique, Sadaka montre les différentes voies de valorisation : énergétique, recyclage, recyclage matière tout en soulignant que la valorisation matière ou la valorisation énergétique présentent de grands avantages dans le recyclage des pneus et de matériaux à base de caoutchouc [208]. De même, dans [184] Ortolano et Steinemann présentent un système expert dédié au traitement des déchets tenant compte de l'impact sur l'environnement.

2.4.2 DÉSASSEMBLAGE OU DÉMANTÈLEMENT

Le désassemblage de composants ou le démantèlement de grands systèmes constituent une des premières difficultés dans les trajectoires de valorisation. Il consiste en effet à séparer plus ou moins profondément les divers éléments constituant le déchet à traiter afin de pouvoir isoler les éléments intéressants. Srinivasan et al. définissent le désassemblage comme le procédé de séparation des composants [217]. Ortegon explique que le démantèlement peut se traduire par une destruction, une réutilisation de certains composants ou la réutilisation totale des sous-systèmes [183]. Haoues définit le désassemblage comme le procédé qui permet de récupérer les matériaux en vue de leur valorisation [110]. De même, cet auteur précise que le désassemblage peut servir à récupérer des parties fonctionnelles ou de la matière. Enfin, on trouve dans la littérature le terme de *demanufacturing*, qui fait à la fois référence au désassemblage ainsi qu'à la valorisation [217], ce qui traduit le fait que le désassemblage est un élément central dans certains types de traitement des déchets.

Les difficultés associées sont nombreuses. Ainsi, il est nécessaire d'avoir la technologie suffisante pour séparer les constituants, tout en minimisant les coûts et les délais. Cette phase est l'une des plus complexes à mettre en œuvre tout en respectant les différentes contraintes. Elle constitue une part importante des coûts de valorisation et elle est parfois limitante d'un point de vue technologique. Comme le résume Boothroyd, les éléments importants lors de la réalisation d'un produit sont les coûts, le temps de production et l'efficacité [30].

Par conséquent, le choix de la ou des méthodes de désassemblage est difficile. Ainsi, lors de la recherche d'une solution, de nombreux éléments doivent être considérés comme les quantités, la dangerosité des éléments en question [103]. De même, l'accessibilité des composants et leurs positionnements sont des paramètres importants [135]. D'une manière plus générale, les différents critères de sélection sont la durée, le coût engendré et le bénéfice reçu [103]. De plus, Veerakamolmal mentionne le fait qu'il est souvent particulièrement difficile d'obtenir des données sur un produit à recycler de la part des constructeurs [225]. Enfin, Kroll souligne que la plupart des objets conçus sont très difficiles à désassembler [135].

Il existe, selon Gonzales, trois moyens de concevoir le désassemblage : l'utilisation de graphes, l'utilisation de diagrammes d'état ou graphes de conception et l'utilisation de méthodes ou d'heuristiques [103]. De même, Zhang présente une méthode heuristique basée sur les graphes qui a pour avantage de transformer le problème de désassemblage en un problème de graphes [246]. Godichaud dans sa thèse présente un outil d'aide à la décision pour le désassemblage principalement orienté pour le domaine aéronautique [101].

Dans une autre optique, certains auteurs tentent de choisir la meilleure stratégie de désassemblage en se basant sur les critères économiques et temporels. Ainsi, Kroll propose une méthode pour évaluer le temps nécessaire de désassemblage à partir de paramètres d'échelle et de coûts [135].

Face aux difficultés rencontrées de nombreux auteurs soulignent l'importance de la prise en compte du désassemblage lors de la conception du produit, comme Haoues [110].

CHAPITRE 2. ÉTAT DE L'ART DES THÈMES ABORDÉS

2.4.3 CHOIX DE STRATÉGIES

Un point important lors du choix des procédés de retraitement des déchets est la question de la stratégie adoptée. En effet, le traitement des déchets repose sur un ensemble de contraintes : économiques, environnementales, technologiques et législatives. Or, lors de la phase de conception de la trajectoire, il est essentiel de pouvoir estimer la valeur des critères choisis pour évaluer si les contraintes sont respectées. Par exemple, Zelfani souligne le besoin des différents acteurs sur des outils adaptés à leurs problèmes [245]. Ainsi, Rose et al. présentent les caractéristiques d'un outil web permettant de guider le choix de la stratégie de recyclage en créant une méthodologie à cet effet [206]. Dans la même idée, Lebard et al. proposent un outil d'aide à la décision pour la gestion des déchets [143]. Zelfani présente WASTEMAN, un outil permettant d'aider les acteurs à prendre des décisions en matière de traitement et de valorisation des déchets, à un niveau général, logistique et administratif [245].

Avec une autre approche, certains auteurs proposent une méthode basée sur des diagrammes afin de déterminer la meilleure voie. Ishii développe une méthode pour trouver des voies de recyclage à l'aide d'un diagramme d'Ishikawa inversé. Ce dernier souligne qu'il est nécessaire de comprendre à quoi correspond chaque élément de l'objet à recycler et que l'utilisation de la méthode doit se faire le plus tôt possible lors de la phase de conception [122]. De même, Rose dans [207] propose une méthode avec une base similaire.

2.4.3.1 ECO-CONCEPTION

L'éco-conception constitue une autre approche du problème. L'éco-conception cherche à faciliter la phase de traitement des déchets en vue d'une valorisation. Pour ce faire, elle intègre cette problématique dès la phase de conception. Comme la définit Bertrand, l'éco-conception est une démarche qui vise à intégrer les préoccupations environnementales dès la conception du produit. Elle vise à réduire les impacts sur l'environnement tout le long de la durée de vie du produit [27]. Ishii mentionne le « Life cycle design » qui vise à maximiser l'utilisation d'un produit tout en réduisant ou en limitant ses coûts et son impact sur l'environnement [123]. Par exemple, la meilleure façon de ne pas produire de déchets toxiques est d'éviter leur utilisation lors de la conception de produit [218].

Plusieurs méthodes ont été proposées. Une méthode basée sur l'évaluation multicritère des voies de recyclabilités en vue d'une éco-conception a été décrite dans [164]. Rose et al. décrivent leur outil permettant l'évaluation des trajectoires à partir des caractéristiques du produits lors de la phase de conception [207]. En plus des avantages cités, l'éco-conception peut représenter d'autres aspects intéressants pour les entreprises. Ainsi, en plus de l'image positive que reçoit l'entreprise, l'éco-conception permet de respecter les exigences législatives, ainsi que d'améliorer les processus de fabrication par une prise en compte de la problématique [27].

2.4.3.2 RÉDUCTION DES COÛTS

D'autres auteurs présentent une approche par les coûts. L'objectif est ici de trouver la meilleure stratégie en ciblant le critère économique. Ainsi, Chen présente un modèle d'analyse des coûts de recyclage, qui avec l'intégration de règles permettent leurs diminutions [48]. De même, Thomas et al. proposent un système expert capable d'évaluer les coûts liés à la gestion des déchets solides [221]. Ishii propose une méthode permettant de déterminer les coûts et d'évaluer la faisabilité de recyclage d'un produit. L'auteur souligne que le but de la méthode est de permettre au concepteur d'analyser le produit en fin de vie dès sa phase de conception. Il précise que connaître comment va évoluer un produit en fin de vie, permet au concepteur d'analyser les conséquences des modifications effectuées en phase de conception [123]. Pour finir, la réduction des coûts s'intègre parfaitement dans la problématique de valorisation puisqu'elle en est une conséquence intéressante pour certains produits.

2.4.3.3 ANALYSE DU CYCLE DE VIE

L'analyse du cycle de vie, comme son nom l'indique, consiste à analyser un produit depuis sa création jusqu'à son traitement en tant que déchet. Cette analyse se base essentiellement sur une évaluation de l'ensemble des flux, matières, énergétiques ou autres. Il est ensuite possible d'évaluer l'impact du produit sur l'environnement tout le long de sa vie [13], plus généralement d'évaluer la majorité des impacts d'un produit sur l'environnement depuis sa fabrication jusqu'à sa destruction [27]. Il est même possible d'optimiser la production en améliorant la synergie entre les flux par la mise en évidence des éléments ayant un fort impact dans les processus impliqués [27].

Ainsi, certaines méthodes se sont développées pour aider à la résolution du problème du retraitement des déchets. Par exemple Rose propose que le cycle de vie du produit et la technologie employée permettent de classer les produits en vue de leur recyclage [205].

Cette méthode à plusieurs avantages. Par exemple, elle permet à l'entreprise de valoriser son image sur les sujets environnementaux, mais aussi elle permet une amélioration du processus utilisé [27].

2.4.3.4 SYNTHÈSE DE QUELQUES MÉTHODES

Méthodes	Dans	Aspects traités	Basée sur
Waterman de Zelfani	[245]	Niveau général, administratif et logistique	Base de données, base de cas
Approche de Rose et al.	[207] [206]	Stratégique	Caractérisation par approche statistique, évaluation des trajectoires
Diagramme d'Ishikawa inversé de Ishii	[123]	Aide au recyclage et à la réutilisation	Diagramme d'Ishikawa, suite de tâches
Le modèle Nexpert Dec de Lebard et al.	[143]	Stratégique avec prise en compte de l'espace (logistique)	Système expert basé sur des règles
Méthode de Fabrice Mathieux	[164]	Recherche de faiblesse au niveau conception au niveau de la recyclabilité	Indicateurs et analyse multicritères
Méthode de Chen	[48]	Analyse de l'intérêt économique de trajectoire de valorisation	Une estimation des coûts
Système proposé par Thomas et al.	[221]	Déchets solides municipaux	Système expert

TABLEAU 2.1- SYNTHÈSE DE QUELQUES MÉTHODES ET APPROCHES DÉVELOPPÉES

2.5 ANALYSE ET LIMITE DES MÉTHODES DÉVELOPPÉES

Les méthodes ou approches expliquées précédemment montrent la démarche générale des études traitant ce sujet. Ainsi, ces approches sont pour la plupart focalisées sur une partie bien précise du problème et non pas sur l'intégralité de ce dernier. Ce point s'explique par la complexité de l'ensemble. En effet, chaque sous-structure du problème présente de sérieuses difficultés, par exemple le désassemblage des éléments. À ceci s'ajoute une volonté d'intégrer ces processus dans une politique de développement soutenable incluant un ensemble de critères d'évaluation. Cette prise en compte augmente le nombre de contraintes qui doivent être respectées lors de la résolution des problèmes qu'ils soient globaux ou ciblés.

Parallèlement, on constate, dans les façons de résoudre ces problèmes, deux approches. La première vise à résoudre un problème bien précis et limité en terme d'application. Ces approches ont l'avantage d'offrir des solutions adaptées mais qui ne sont pas applicables en dehors de la configuration initialement prévue. Autrement dit leur portée est limitée. À l'inverse, la seconde approche préconise une résolution générale des problèmes, adaptable à un large éventail d'entre eux, mais dont les solutions ne sont pas finement adaptées. Elles n'offrent donc pas de solutions « clés en main » mais donnent une première ébauche de solution.

Enfin, on constate que les méthodes employées et plus généralement les outils utilisés pour résoudre ce type de problème conduisent à l'emploi de l'intelligence artificielle. Une méthodologie fréquemment trouvée est celle du raisonnement à partir de cas (RàPC). Ainsi, on trouve dans la littérature la description de certains systèmes conçus pour résoudre la problématique des déchets ou, du moins, un de ses aspects. Par exemple, Kuo utilise le RàPC en construisant une méthode permettant d'évaluer l'indice de recyclage de certains composés à partir de cas connus [136]. Cet outil combine le RàPC avec une analyse hiérarchique afin de résoudre certains problèmes liés au recyclage des déchets dans la partie de démantèlement. Un autre exemple est celui donné par Yang qui présente un outil qui combine à la fois le RàPC avec la méthode Triz afin de faciliter l'étude préliminaire dans l'éco-conception [243]. Enfin, Liu propose un modèle de RàPC pour résoudre des problèmes de recyclage liés à l'environnement [152]. L'approche ciblée utilise aussi cette méthode. Ainsi, certains outils basés sur le RàPC sont dédiés à la question du démantèlement. Zeid propose un modèle de RàPC qui a pour objectif de trouver des séquences de désassemblage en vue du traitement des déchets [244]. De même, Veerakamolmal expose un autre modèle de système basé sur le RàPC afin de résoudre ces mêmes problèmes avec comme objectif de concevoir un système robuste qui réponde aux exigences économiques et environnementales [225].

L'utilisation du RàPC peut être justifiée par une non-connaissance des mécanismes clairs permettant de répondre aux questions soulevées par la valorisation des déchets. Il est donc possible de constater que la résolution de ce type de problème est non seulement très complexe de part les contraintes soulevées, mais aussi qu'une grande partie des travaux se limitent à une des deux approches mentionnées ci-dessus.

CHAPITRE 2. ÉTAT DE L'ART DES THÈMES ABORDÉS

Il s'avère donc intéressant et pertinent de prolonger la réflexion sur ce problème. Pour ceci, il s'agit donc d'évaluer si ces méthodes seraient à même de résoudre l'intégralité du problème avec ses contraintes. La prise en compte de l'intelligence artificielle dans la problématique n'est donc pas à ignorer et des méthodes comme le RàPC doivent être considérées.

2.6 ÉTUDE D'ÉLÉMENTS D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE PERTINENTS POUR LA RÉOLUTION DU PROBLÈME DES DÉCHETS

Dans cette partie sera traitée la question des outils et méthodes existants qui peuvent servir à la résolution du problème de la valorisation des déchets. Comme le souligne Hushon, la résolution de problème complexe demande un grand nombre d'experts dans des domaines différents [116]. Dans ce qui suit, une explication de l'intelligence artificielle sera donnée. Nous introduirons ensuite une brève description de trois systèmes que nous pensons capables de répondre à notre problématique. Enfin, après avoir justifié notre choix, nous nous proposons d'approfondir certains points, comme les méthodes et les concepts qui nous semblent pertinents pour la suite.

2.6.1 QU'EST CE QUE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

L'intelligence artificielle apparaît avec la création des premiers calculateurs puis grâce à l'essor de l'informatique. L'intelligence artificielle (IA) avait, à l'origine, la volonté de reproduire l'intelligence humaine [35]. Par conséquent, l'IA reprend certains concepts du raisonnement humain.

La définition même de l'intelligence, qu'elle soit relative à l'humain, aux animaux ou aux systèmes artificiels, est souvent complexe. Dans [8], Albus se propose de mettre en relation les systèmes naturels et artificiels. Ainsi, l'intelligence peut se définir comme la capacité de faire des bons choix au bon moment, ainsi que la capacité d'améliorer son comportement en fonction des expériences vécues [8]. Le même document souligne le besoin important pour l'intelligence de percevoir le monde extérieur puis de le reconnaître.

La question qui se pose ensuite est comment un système artificiel peut résoudre des problèmes. Par exemple dans [23], Ber et al. se demandent comment un système peut à partir de données d'entrée résoudre un problème en faisant preuve d'intelligence, en utilisant des stratégies et des méthodes adaptées.

Néanmoins, la conception d'une intelligence artificielle et notamment son mode de fonctionnement n'est pas définie et l'on trouve dans la littérature plusieurs types de raisonnements. Ainsi, dans [8] Albus pense que l'intelligence nécessite une interconnexion entre différentes facultés, comme la perception et la capacité de décider. Tandis que pour Brooks et Rodney [35], il n'est pas possible de décomposer l'intelligence humaine en sous-parties, et encore moins d'imaginer de les faire fonctionner correctement ensembles. Enfin, Jackson cite l'idée qu'il n'existe pas de règles pour penser [124], ce qui rend difficile la réalisation d'un système artificiel.

Ainsi, la majorité des systèmes d'intelligence artificielle sont dédiés à des tâches spécifiques, voire spécialisés à un domaine restreint. Certains visent uniquement à aider l'utilisateur à concevoir un raisonnement, plutôt que de réaliser le raisonnement [47].

Pour montrer la diversité de ces systèmes, on peut citer certains systèmes comme ceux simulant des phénomènes naturels. Par exemple, l'algorithme des colonies de fourmis qui est une méthode de résolution du problème du voyageur [68]. On trouve dans la littérature certains outils qui fonctionnent à l'aide d'heuristiques. Ainsi une méta-heuristique est une méthode basée à partir d'heuristiques et qui vise à chercher rapidement une solution de bonne qualité [36]. Pastre propose un système qui manipule les heuristiques comme des variables et ainsi permettre la création de nouvelles [187]. Enfin, certains systèmes ont une conception assez originale. Par exemple la Pandemonium theory qui est un système où des « démons » transmettraient une information en criant plus ou moins fort. Le système étant composé de plusieurs couches de démons [211]. Selfridge le décrit comme pouvant reconnaître des structures qui ne sont pas définies dès le départ et Jackson explique que les démons constituent un système d'analyse de perception [124].

D'une manière globale, la création de moyen de résolution de problème passe par une phase de conception. Ainsi, dans [23] l'auteur montre que pour réaliser un système à base de connaissance il est nécessaire de modéliser le problème puis d'utiliser des méthodes spécifiques pour le traiter.

Les systèmes experts sont des systèmes à base de règles qui ont l'avantage de représenter la connaissance de l'expert et de l'appliquer à des problèmes ciblés [23]. Hushon définit le système expert comme un ensemble homme-machine destiné à la résolution de problème [116]. Les systèmes experts font partie des systèmes à base de connaissance. Il n'a pas pour objectif de reproduire la pensée humaine mais uniquement de permettre de résoudre le problème auquel il est soumis [223]. Ainsi, un système expert est constitué d'une base de connaissances que vient manipuler un mécanisme d'inférence [61]. De plus, comme le souligne l'auteur précédent, tout système expert garde la trace de ses raisonnements. Thomas considère que le système expert utilise un moteur d'inférence qui permet de trouver des solutions nouvelles en fonction des paramètres connus [221]. Dans certains cas, l'efficacité

2.6. ÉTUDE D'ÉLÉMENTS D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE PERTINENTS POUR LA RÉSOLUTION DU PROBLÈME DES DÉCHETS

est telle, que l'auteur pense qu'un système expert peut, dans un domaine précis, rivaliser avec les connaissances humaines.

2.6.2 SYSTÈME DE RÉSOLUTION DE PROBLÈMES

Il existe une variété de méthodes et d'outils permettant la résolution de problèmes. Dans cette partie, le Raisonnement à Partir de Cas (RàPC) est présenté. Après une mise en exergue des principales limitations de ce type de système, une introduction aux systèmes multi-agents permettra de souligner certains mécanismes non présents dans le RàPC qui pourraient être pertinents dans la résolution du problème des déchets. Notre but ici est de sélectionner une méthode (et in fine un outil) pouvant proposer de nouvelles voies de valorisation en tenant compte des différentes contraintes associées. Il est cependant intéressant de remarquer, à ce niveau de l'étude, que la sélection d'un outil n'implique pas forcément le respect de structures déjà existantes. Ainsi, d'autres méthodes peuvent être étudiées afin de « personnaliser » l'outil que nous sélectionnerons.

2.6.2.1 RAISONNEMENT À PARTIR DE CAS

Le raisonnement à partir de cas (RàPC) est une méthode d'intelligence artificielle dont l'objectif est la résolution de problème. La méthodologie de résolution se base sur la connaissance d'un grand nombre de cas [53]. Un cas est une situation problématique résolue, c'est-à-dire la description d'un problème et la solution trouvée [150]. Un cas est une unité d'analyse qui doit être considérée dans son contexte [145]. La méthode de résolution d'un nouveau problème consiste à rechercher des problèmes résolus connus et stockés dans la base de cas ayant une similarité forte avec ce dernier. Puis, elle consiste à adapter les solutions connues au nouveau problème. Enfin, si la solution générée est correcte et si celle-ci est pertinente pour la résolution d'autre cas, cette solution est sauvegardée en mémoire afin de pouvoir être réutilisée (Fig.2.1) [81] [142] [150] [196] [242].

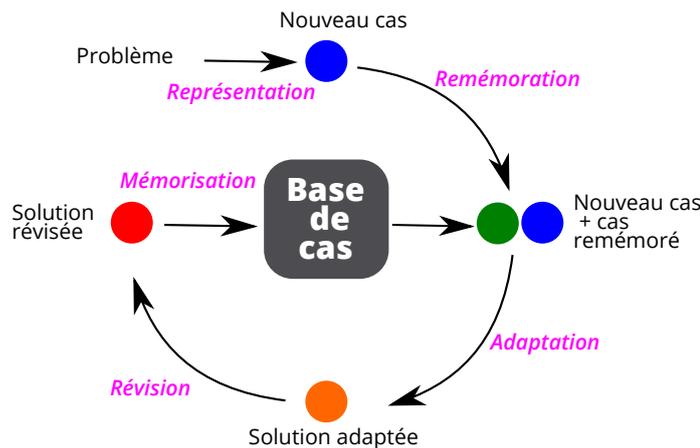


FIGURE 2.1- RÀPC TRADITIONNEL

À l'origine, le RàPC a été développé en opposition aux systèmes de résolutions de problèmes basés sur des règles [83]. D'après Rasovska, le RàPC a émergé à la fois par les découvertes en sciences cognitives sur l'utilisation de la mémoire humaine de manière dynamique, mais aussi par les limites des systèmes dits experts [196]. En effet, d'un point de vue théorique, le raisonnement à partir de cas est un cas particulier du mécanisme d'analogie qui se distingue par une structuration des données [163]. Or, selon de nombreux auteurs, les mécanismes d'analogie jouent un rôle très important dans le raisonnement humain (voir partie sur l'analogie, section 2.7.2.4). Plus simplement, dans [225], on retrouve l'idée de Kolodner : le but du RàPC est la réutilisation d'ancien modèle pour la formulation de nouvelle solution tout en passant par une analyse critique de ces dernières. D'un point de vue plus général, le RàPC s'apparente plus à une méthode de gestion des connaissances [196].

Le mécanisme de raisonnement à partir de cas passe par plusieurs étapes : recherche de cas similaire, adaptation, révision et mémorisation. La recherche de cas similaire vise à trouver un cas connu qui soit le plus proche du problème en cours afin de le sélectionner puis d'adapter sa solution. Comme le définit Lieber, la remémoration est la procédure visant à trouver le cas le plus proche du cas en cours afin qu'il puisse être adapté à ce dernier [149]. Cette phase peut passer par une étape de mapping. Le mapping, peut être défini comme la capacité de transposer un problème dans un autre plan [244].

Une question importante concernant le raisonnement à partir de cas est la réutilisation des cas précédents. Par conséquent, le système doit nécessairement classer les données afin qu'elles puissent être réutilisées. Lapalme

CHAPITRE 2. ÉTAT DE L'ART DES THÈMES ABORDÉS

explique que traditionnellement, le RàPC est basé sur une structure fermée comme des enregistrements de données ou d'objets, mais que d'autres types de RàPC ont été développés [140] ; par exemple, Lieber présente trois modes de classification des cas pour le RàPC. La classification forte qui est la classification standard, la classification floue et la classification lisse « smooth » [148]. De même, l'auteur propose une remémoration basée sur un système hiérarchique qui s'appuie sur trois procédures, forte, floue et élastique [149]. Enfin, Lapalme souligne que dans la majorité des cas, la description du problème doit être entièrement réalisée avant de pouvoir lancer la recherche de solution à partir du RàPC [140].

Une fois la remémoration effectuée, il s'agit d'adapter la solution du cas similaire trouvé au nouveau problème. Plusieurs points de vue sont considérés dans la littérature, mais généralement l'adaptation est spécifique au type de problème traité. Par exemple, Lieber définit la « reformulation » comme une fonction d'adaptation qui permet de créer un nouveau cas à partir d'un cas antérieur [150]. De plus, l'auteur s'intéresse aux coûts c'est-à-dire à l'effort de transformation nécessaire pour passer de la solution connue à la nouvelle solution et propose des formules pour son estimation. Pour Lieber, il est nécessaire, lors de la phase d'adaptation, d'effectuer une phase de spécialisation de la solution connue afin de l'adapter au problème initial [149]. Enfin, d'après certains auteurs, la solution adaptée doit être validée. Par exemple, dans certain système, l'expert a pour rôle de valider l'adaptation réalisée et d'identifier les sources d'erreurs [51].

Dans la littérature, plusieurs auteurs soulignent néanmoins les grandes difficultés que l'on rencontre avec un système de raisonnement à partir de cas. Par exemple, Cordier souligne que le RaPC présente de grandes difficultés telles que l'adaptation à un nouveau type de problème ou encore la difficulté d'effectuer des tâches de maintenance (c'est-à-dire à faire en sorte que le système continue de fonctionner) [53]. De même, l'auteur montre que les RàPC considèrent qu'une solution est toujours bonne sans prendre en compte d'évolution. Wiratunga [239] montre la difficulté d'utilisation de ce système, car chaque étape du cycle peut poser problème. Par exemple la représentation et l'adaptation dans le RàPC posent souvent un important problème d'ingénierie des connaissances [52]. D'une manière plus générale, la tâche d'acquisition des connaissances pour la résolution du problème est problématique [51].

La question de l'évolution de cet outil au cours du temps est souvent retrouvée. Ainsi, Cordier se demande comment un système qui a été construit pour un type de problème, peut s'adapter à un autre type [53]. Elle souligne que le système doit pouvoir évoluer pour pouvoir résoudre les problèmes [51].

Ainsi, dans [52] Cordier et al. visent à réduire l'effort en ingénierie nécessaire au développement du système. Pour ce faire, ils proposent une structure différente du RàPC traditionnel avec ce qu'ils appellent un « RàPC Re-visité ». Dans ce système, l'expert corrige au fur et à mesure la solution adaptée par le RàPC ce qui permet d'améliorer l'apprentissage. De plus, ils montrent que l'acquisition opportune des informations améliore le fonctionnement du RàPC [51]. Ainsi, Cordier et al. présentent un cas de RàPC associé à un système de capitalisation de connaissances au « fil de l'eau » [52], et exposent le RAPET qui est un système de raisonnement à partir de cas qui conserve la trace du processus de résolution en mémoire au lieu du cas. Le cas n'est conservé que comme contexte de la trace [53].

Dans la continuité de cette démarche, certains systèmes proposent un fonctionnement basé sur un dialogue tout au long du processus. Ainsi Lapalme décrit le modèle du RàPC conversationnel, qui vise à un dialogue entre le système et l'utilisateur tout le long du fonctionnement du processus [140]. L'auteur donne l'exemple du « FAQ Finder » qui est un modèle de RàPC conversationnel où on trouve un ensemble de réponses aux questions les plus fréquentes posées [140]. De même, Cordier expose un RàPC qui propose une acquisition des cas grâce à un échange en temps réel avec un expert dit idéal [51]. Elle donne l'exemple d'Iaka, où l'apprentissage des cas et des mécanismes de résolution se font en même temps.

Il existe ainsi plusieurs domaines d'application des systèmes de RàPC. Par exemple ABSTRACT, un outil de raisonnement à partir de cas utilisant les traces dans une application destinée aux sciences cognitives [54]. Dans [19], Badra étudie un modèle de RàPC pour la génération de recette de cuisine. Un autre cas d'application propose un modèle qui vise à utiliser le raisonnement à partir de cas en conception inventive [83].

D'autres systèmes fonctionnent en collaboration avec des méthodes ou outils différents. Ainsi, Yang montre que l'utilisation combinée du raisonnement à partir de cas et des réseaux de Pétri peut être particulièrement intéressante [242]. Dans le même esprit, Ochoa propose un modèle de RàPC associé au Data mining [180].

2.6.2.2 APPROFONDISSEMENT DE CERTAINS POINTS DU RÀPC

Dans la littérature plusieurs éléments importants à propos des RàPC sont à considérer. Dans cette partie, nous approfondissons certains points révélés dans la partie introductive de ces systèmes.

- **La notion de trace** Dans les RàPC traditionnels, de nombreux auteurs expliquent qu'un tel système retient les cas traités et par conséquent apprend de nouvelles solutions mais est incapable d'apprendre à apprendre et manque de flexibilité [53]. Or comme le souligne Prie, les systèmes sont souvent utilisés

2.6. ÉTUDE D'ÉLÉMENTS D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE PERTINENTS POUR LA RÉOLUTION DU PROBLÈME DES DÉCHETS

d'une manière différente que leur conception prévoit [194]. Ce dernier point implique donc que le système doit évoluer suivant la manière dont il est utilisé.

Ainsi certains chercheurs proposent d'enregistrer les interactions du système avec l'utilisateur [194]. Ce qui conduit à intégrer la Trace dans ce type de système. La Trace peut être définie comme un ensemble d'état transition qui modifie le système [194], comme le marquage qui suit le déroulement d'un processus [53] ou encore comme des conteneurs où l'expérience a été stockée sans traitement antérieur³ [54].

Par conséquent, l'utilisation des traces permet de conserver en mémoire à la fois le cas mais aussi le contexte de résolution du problème et ainsi d'adapter le système en fonction des besoins des utilisateurs [54].

Enfin, Cordier et al. vont plus loin dans [54], en expliquant que les traces peuvent être transformées en nouvelle trace, ce qui rend son utilisation plus flexible.

- **Adaptation** L'adaptation dans le RàPC constitue la phase où à partir d'un cas similaire au problème rencontré, on recherche à adapter la solution connue afin qu'elle puisse répondre aux besoins de ce dernier. Comme le résume Veerakamolmal, l'adaptation est la transformation d'un cas source (problème et solution connu) en un cas cible (problème en cours) en vue de son utilisation [225]. Plusieurs méthodes adaptatives peuvent être utilisées. Tout d'abord, la phase d'adaptation est souvent décomposée en plusieurs étapes élémentaires [52]. L'adaptation transformationnelle [196], qui utilise des morceaux de solution et qui, en utilisant certaines règles, les recombine afin de créer une nouvelle solution. L'adaptation hiérarchique, qui implique des solutions sous plusieurs niveaux d'abstractions. L'adaptation compositionnelle et l'adaptation générative qui recherchent une solution en utilisant l'ensemble des données dont le système dispose. Une autre approche est celle de Dufour et al. [73] qui présentent un ensemble de techniques qui permettent de réaliser l'adaptation en utilisant ce qu'ils appellent « une algèbre qualitative ». De plus, D'aquin présente l'acquisition automatique de connaissance d'adaptation. Elle se base sur l'extraction de motifs fréquents associée à une technique de fouille [81]. Néanmoins, comme il est souligné dans [81], le fait que l'adaptation fonctionne bien pour un type de problème n'implique pas que les solutions proposées soient adaptables à plusieurs types de problème. Ce qui laisserait entendre que les mécanismes d'adaptation dépendent du contexte. Enfin, pour l'adaptation, l'utilisation de règles de transformations simples permet d'élaborer des adaptations à partir de rien [141].
- **Connaissances d'adaptation** Certains auteurs soulignent qu'il est nécessaire de posséder des connaissances supplémentaires qui permettent de faciliter la phase d'adaptation. Ainsi, Badra définit les connaissances d'adaptation comme les données nécessaires à propos d'un type de problème afin de pouvoir l'adapter dans un système RàPC [19]. Selon ce dernier, il existe plusieurs mécanismes visant à trouver ce type d'information, comme les méthodes manuelles, automatiques, semi-automatiques ou interactives.
- **L'apprentissage** L'apprentissage dans le RàPC repose principalement sur le fait que les cas sont stockés de manière efficace dans la base de données du système, par exemple les cas ayant posés des difficultés [65]. Néanmoins, certaines limitations existent dans ce type de système. Ainsi, dans [65], Didierjean montre que dans le RàPC, les cas sont stockés sans niveau d'abstraction élevé. Or comme le souligne Mano dans [157], l'apprentissage est la capacité de modifier son comportement en utilisant ses expériences. Par conséquent, Cordier propose le RAPET, où l'apprentissage a lieu tout au long du fonctionnement du système et fait partie du cœur du système [53].
- **Le stockage** Le stockage constitue la phase où le nouveau cas résolu peut être stocké dans le système afin d'enrichir la base de données du RàPC. Cette phase passe par une réorganisation et un ajustement du cas [225].

2.6.2.3 CRITIQUE DU RÀPC

Il existe de nombreuses critiques à propos du raisonnement à partir de cas. Certaines d'entre elles portent sur des points précis du mécanisme, d'autre sur l'ensemble de la démarche. Lieber dans [150] expose que l'une des principales difficultés à l'utilisation des systèmes de RàPC, est la phase de conception de ces derniers. De même, la remémoration des cas et son corollaire l'indexation sont souvent soulignées. Ainsi, Estevez souligne que bien que la force du RàPC réside dans les cas résolus dans sa base de données, l'indexation pose un gros problème pour une utilisation efficace [83]. De même, lorsque la base de cas est très volumineuse, la phase de remémoration est particulièrement longue [150]. Un autre aspect est le manque de flexibilité du système d'un point de vue cognitif. Un des exemples est que le raisonnement à partir de cas ne change pas de niveau d'abstraction [83].

Néanmoins, les auteurs soulignent certains aspects intéressants. Ainsi, les systèmes de raisonnement à partir de cas sont adaptés pour des problèmes de type « routinier » c'est-à-dire que chaque problème ne se distingue pas fondamentalement des autres [83]. De même pour certains auteurs, le RàPC est souvent préféré à d'autres systèmes comme les systèmes experts, pour ce qui est des problèmes où la créativité et le sens commun jouent

3. Une vision simpliste de la trace serait de la considérer comme l'énumération des actions réalisées dans le système

CHAPITRE 2. ÉTAT DE L'ART DES THÈMES ABORDÉS

un rôle important [225], car il permet de mélanger ou d'associer des solutions de manière originale.

2.6.2.4 SYSTÈME MULTI-AGENTS

Les systèmes multi-agents sont des systèmes particuliers d'intelligence artificielle. Ce type de système est constitué d'un ensemble d'agents reliés entre eux et qui interagissent avec un environnement extérieur. Ces agents sont capables de coopérer afin de résoudre une tâche [190].

Un agent est une entité autonome. Ainsi Picard ou Franklin définissent un agent comme un être non contrôlé, qui interagit avec l'extérieur et qui est capable de prendre des décisions [37] [93] [190]. Albus décrit un agent comme un élément capable de planifier et de réaliser une tâche [7]. Les agents ont des moyens d'atteindre les objectifs qu'ils ont planifiés, sont pourvus de systèmes leur créant une motivation fondamentale, peuvent être pourvus de curiosité et peuvent abandonner un objectif [93].

L'originalité d'un tel système provient de la coopération entre les agents qui permet de réaliser la tâche confiée au système. Ainsi, pour Jennings, les agents constituent un ensemble d'éléments qui ne peuvent pas résoudre individuellement le problème mais uniquement grâce aux autres membres [127]. Comme l'explique Labidi, l'intelligence distribuée est le résultat d'un travail coopératif entre plusieurs agents [138]. Lorsqu'un agent modifie l'environnement extérieur, il est interprété par d'autres agents [126] [138].

Au bout d'un certain temps, il se dégage une solution stable au problème soumis. Ce phénomène s'appelle l'émergence. Parmentier dans [186] et Jean dans [126] énumèrent les trois conditions qui définissent l'émergence dans un système multi-agents :

- Chaque agent possède un environnement qu'il ne peut pas contrôler.
- Les agents peuvent percevoir et agir sur l'environnement mais uniquement localement.
- Il y a plusieurs agents et leur représentation du monde extérieur peut être différente. Ainsi, un agent détient des informations locales et interagit avec les autres [138].

Un moyen de représenter les interactions de l'agent avec le milieu extérieur sont les chaînes de Markov [90].

Les mécanismes de fonctionnement d'un tel système s'opère grâce à la transmission d'informations entre les agents ou par leur interprétation du monde extérieur. Pour Caillou, l'utilisation d'émotions en fonction du contexte extérieur semble intéressante pour guider l'agent et propose une transmission de l'activation suivi de certains comportements entre les agents [37]. Drogoul souligne que la redondance dans le rôle joué par les agents améliore la robustesse [70].

Enfin, pour certains chercheurs, l'émergence d'une intelligence collective n'oblige pas à ce que l'agent soit lui-même intelligent [138]. Ainsi, Mano dans [157] présente un modèle de système multi-agents basé sur les réseaux de neurones. Une forte analogie existe entre le modèle biologique et celui présenté. De même Stuber propose l'utilisation d'un système à base d'expérience et d'un système multi-agents pour combiner l'expérience individuelle [220].

2.6.2.5 APPROFONDISSEMENT DE CERTAINS POINTS DU SYSTÈME MULTI-AGENTS

Tout comme le RàPC, un ensemble de points importants ou de processus sont soulignés dans la littérature concernant les systèmes multi-agents :

- **Apprentissage** L'apprentissage dans les systèmes multi-agents est essentiel car ce type de système a pour avantage d'être dynamique. Ainsi, le système ne constitue pas un système figé qui renverrait, pour une même stimulation, la même réponse. Au contraire, le système s'adapte en fonction de ses expériences et peut ainsi évoluer.

L'apprentissage dans les systèmes multi-agents peut se réaliser de plusieurs manières [105]. Tout d'abord l'apprentissage où l'agent apprend à partir de ses interactions avec le monde extérieur, un autre type où il apprend en interagissant avec les autres agents ou par mimétisme. Mano distingue deux autres types d'apprentissage, supervisé (c'est-à-dire qui s'appuie sur des éléments connus comme corrects) et non supervisé (c'est-à-dire que la méthode d'apprentissage essaie d'extraire de l'information à partir des données qu'elle possède) [157]. Kaebbling explique qu'il y a deux manières d'implémenter l'apprentissage au sein d'un tel système [129]. L'apprentissage par renforcement où un agent doit apprendre son comportement vis-à-vis du monde extérieur en réalisant un ensemble d'essais erreurs. La deuxième méthode consiste à utiliser des méthodes dynamiques et des fonctions statistiques afin de déterminer l'issue d'une action. Enfin, l'élaboration d'une politique permet une meilleure efficacité dans les processus d'apprentissage [20]. Une politique est de donner à l'agent une récompense ou une punition en fonction du choix qu'il a fait et des conséquences que cela à entraîner. Les fonctions de récompense permettent de noter l'action de l'agent pour accomplir une tâche [108]. L'utilisation de récompenses permet donc d'orienter les décisions de l'agent ce qui le contraint à analyser comment obtenir la récompense [90] et permet une forme d'apprentissage [55]. Un modèle présenté dans la littérature pour la gestion du comportement des agents est le modèle Belief-Desire-Intention [100]. Belief désigne la connaissance que l'agent a du monde extérieur, les désirs

2.6. ÉTUDE D'ÉLÉMENTS D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE PERTINENTS POUR LA RÉOLUTION DU PROBLÈME DES DÉCHETS

sont les objectifs que doit réaliser l'agent, enfin, les intentions constituent des listes de tâches à accomplir [106].

La résolution de problème est souvent complexe et il est parfois intéressant de pouvoir diviser le problème en sous objectifs plus faciles à atteindre. Ainsi, comme le souligne Corona, l'utilisation de prise de décision par séquence est intéressante lorsque les effets sont prévisibles [55], puisque, toujours d'après l'auteur, résoudre un problème suppose de déterminer un ensemble de tâches, un chemin, permettant de le résoudre. Cependant, d'après des travaux plus anciens, Jennings estime que la division du problème en plusieurs éléments distincts et leur résolution ne résout pas le problème général [127].

- **Utilisation de systèmes neuronaux dans la résolution de problème** L'intelligence artificielle tente de reproduire le raisonnement humain, ou du moins, une partie. Or, d'après les biologistes, le cœur de la pensée se situe dans le cerveau. Ce dernier étant composé d'un réseau extrêmement complexe de neurones inter-reliés, chacun d'entre eux capable de recevoir et de transmettre de l'information [172]. On retrouve dans la littérature plusieurs analogies entre le raisonnement humain et le raisonnement artificiel. De même certains travaux se penchent sur la structure même du cerveau et sur son mode de fonctionnement afin de pouvoir essayer de le reproduire. Il est donc possible de considérer ce dernier comme un système multi-agents où les neurones constituent les agents⁴ [158].

Les neurones sont des cellules spéciales qui comportent une partie réceptive et une partie émettrice qui permettent les échanges d'informations entre chaque neurone [172]. D'après la même source, les transmissions d'information sont de différentes natures, chimique ou électrique et ont des propriétés bien distinctes. Enfin, les cellules gliales jouent un rôle important dans la conception du réseau et dans le maintien du bon fonctionnement [172].

Pour Mano, c'est le mode de communication très élaboré des neurones entre eux qui permet au réseau de fonctionner [157]. D'après lui, il est possible de réaliser un système multi-agents stable capable de s'auto-organiser et d'émerger vers un modèle efficace [158].

- **Notion d'émergence** Dans les systèmes multi-agents, la notion d'émergence est fondamentale et en est une des principales caractéristiques. L'émergence décrit le fait que quelque chose « sorte » [126]. Plus généralement, l'émergence traduit plusieurs idées. Elle constitue une forme d'auto-organisation que l'on retrouve dans la nature [126]. C'est un phénomène qui n'est pas contrôlé [126] mais qui se crée et s'auto-contrôle [190], ce qui représente une des difficultés des systèmes émergents [70] [71].

D'après Picard [190] le principe d'auto-organisation se traduit par une re-configuration spatiale conduisant à une reconnexion entre les agents et souligne l'idée que l'association de plusieurs éléments est plus efficace qu'un élément seul. Selon Drogoul, l'émergence, provient de l'auto organisation des agents afin de trouver la solution au problème, en s'adaptant au contexte [70] [71].

Ainsi, à partir d'un système de neurones un comportement peut émerger [34]. Picard explique qu'à un certain niveau il est possible de considérer l'émergence comme une boîte noire avec des entrées [190].

Lors de l'émergence, le système multi-agents suit un processus visant à construire un cheminement permettant d'atteindre la solution [126]. Ainsi, la planification d'agents vise à rechercher les meilleures actions possibles en fonction de l'environnement extérieur [108].

Un point de vue intéressant est le fait de considérer que le processus d'émergence n'existe que parce que quelqu'un le considère comme tel. Ainsi, la notion d'émergence est associée à une incompréhension, d'où son association avec la notion d'interprétation⁵ [70]. Comme le fait remarquer Jean, il doit y avoir un « observateur » pour pouvoir qualifier le phénomène d'émergeant [126]. Une caractéristique d'un système émergeant est qu'il est impossible de prédire la solution à partir de l'état initial et le hasard semble jouer un rôle important [70]. D'après ce dernier auteur, il y a émergence stable lorsque c'est l'ensemble de l'environnement qui organise le comportement de chaque agent.

Comme le souligne Chalmers, le mécanisme de perception peut être guidé par un but ou par le contexte extérieur [45] [223]. D'après Dzurilla, la résolution de problème passerait par cinq étapes associant cognition, comportement et émotion [78]. De même, McCauley propose une architecture gérant l'émotion basée sur la *Pandemonium Theory* associant l'action et l'émotion dans leur système multi-agents [165].

2.6.2.6 COMPARATIF DU RÀPC ET DU SYSTÈME MULTI-AGENTS

Le raisonnement à partir de cas permet de résoudre des problèmes routiniers et mal connus. En d'autres termes, les problèmes doivent être proches entre eux (similaires), mais une compréhension fine des mécanismes permettant de les résoudre n'est pas nécessaire. En contrepartie, plusieurs éléments peuvent être considérés comme limitant la capacité des RÀPC à résoudre certains types de problèmes. Ainsi, le fait même que les problèmes doivent être similaires implique que la portée de résolution d'un tel système sera forcément limitée

4. Les réseaux de neurones ne sont pas des systèmes multi-agents [69]

5. Pour être plus clair, l'émergence n'existe que comme phénomène observé et interprété comme tel

CHAPITRE 2. ÉTAT DE L'ART DES THÈMES ABORDÉS

à un certain type de déchet ou de mode de valorisation. De plus, la description des éléments, c'est-à-dire la représentation de l'information doit être restreinte afin d'assurer la similitude des problèmes. Or, la nature même des déchets implique au contraire la nécessité d'une grande souplesse dans la représentation au risque ici encore de limiter la portée du système. De plus, l'utilisation d'un tel système suppose la maîtrise de certains processus internes propres à ce système comme la notion de similarité. Il est donc nécessaire de définir ces processus.

En comparaison, les systèmes multi-agents ont l'avantage d'avoir une certaine flexibilité ou plasticité dans les raisonnements. Ainsi, la littérature montre qu'une notion essentielle est l'émergence de la solution, c'est-à-dire que la solution apparaît des suites d'une reconfiguration des agents. L'organisation même d'un tel système est souple puisque basée sur un ensemble d'éléments. Cette reconnexion laisse entrevoir une dynamique dans les processus de résolution qui n'est pas forcément présente dans les RàPC. Cette dynamique est introduite avec par exemple la notion de trace qui suggère que ces mécanismes évoluent. Cependant, les systèmes multi-agents restent des systèmes complexes.

Enfin, un point important, est que les deux systèmes présentent des similitudes quant à certains de leurs aspects internes. Ainsi, la phase d'apprentissage est commune aux deux. De même, bien que différente, la notion de représentation de l'information joue un rôle capital dans ces méthodes de résolution.

Au vu de ces éléments, le RàPC semble un choix intéressant pour la résolution de problèmes issus de notre thématique. Son principal avantage que nous mettons en avant et leur capacité à résoudre des problèmes mal connus. Cependant, comme nous l'avons brièvement montré en décrivant ce type de système, il présente de nombreuses difficultés. De plus, de part la complexité des problèmes et des contraintes (c'est-à-dire le type de solutions que l'on souhaite), nous constatons que certaines méthodes doivent être développées. Pour ce faire, outre les concepts qui ont pu être mis en avant lors de ces descriptions, nous nous proposons d'approfondir certains éléments et méthodes déjà évoqués et d'en introduire de nouveaux qui nous paraissent pertinents.

2.7 DESCRIPTION ET DÉVELOPPEMENT DE CONCEPTS, MÉTHODES ET MÉCANISMES PERTINENTS POUR LA CONCEPTION D'UN RÀPC

2.7.1 REPRÉSENTATION

La question de la représentation est essentielle dans tout système traitant des informations externes. Pour Peschl, la représentation serait une interprétation du monde extérieur permettant la construction de comportement [189]. En effet, il est nécessaire de coder la réalité sous formes de données que le système puisse traiter. Comme le fait remarquer Kokinov, la structure d'un mécanisme cognitif est basée sur la représentation, la mémorisation et les mécanismes qui lui sont associés [134]. Or, ceci pose un problème majeur dans les systèmes d'intelligence artificielle [45]. En effet Chalmers fait remarquer que la question cruciale est comment représenter le monde, la connaissance de manière pertinente. Ainsi, plusieurs types de représentation existent. Premièrement, d'après Kokinov, elle peut être symbolique ou basée sur les connexions [134]. Ensuite, le choix du modèle doit permettre l'utilisation et la modification des règles tout en utilisant les concepts de manière efficace [37]. À l'inverse, il semble difficilement possible qu'un système de type Pandemonium soit nécessaire pour la reconnaissance de forme [168].

Ainsi, dans [6] Aissaoui et al. présentent une représentation graphique des influences qui autorise l'utilisateur à effectuer des choix et mettent en avant l'utilisation de cartes cognitives pour structurer des données sous une forme logique. Cazenave présente le *Patern Representation* qui est une forme de représentation intéressante de l'espace mais qui manque de précision [43]. Ce dernier ajoute que l'utilisation de prédicats et de méta-prédicats peut être intéressante dans la représentation de l'environnement. Kohonen propose une représentation de l'information structurée dans l'espace, the self organized mapping [133]. Cette structure a les mêmes buts que les réseaux de neurones plus traditionnels et se base sur l'idée que les informations sont organisées dans l'espace. Mano [157] définit un système complexe comme un système avec plusieurs niveaux de description. Enfin, en théorie psychologique, Markman pense que les représentations sont organisées de manière hiérarchique lors de la recherche de similarité [159].

Cependant, si le modèle de représentation est très structuré et laisse peu de place à l'interprétation, il est souvent incomplet. Au contraire, si le modèle accepte toutes les interprétations possibles, il est souvent ambigu. Ainsi, dans [6] Aissaoui et al. expliquent qu'une des difficultés que pose les cartes cognitives est leur manque de structuration forte. Pour Chalmers séparer la représentation d'un mécanisme de haut niveau de perception est impossible [45]. Enfin, Richard soutient que la modification de l'interprétation permet la construction d'une bonne représentation et ainsi de trouver l'adequation entre cette dernière et les moyens de résoudre le problème [201]. Un point intéressant souligné est que les systèmes dits intelligents sont souvent confrontés à des informations approximatives. Or, comme le souligne Diez, l'une des difficultés majeures pour les systèmes d'intelligence artificielle est la gestion des incertitudes [80]. Cette incertitude peut provenir de plusieurs causes comme des

2.7. DESCRIPTION ET DÉVELOPPEMENT DE CONCEPTS, MÉTHODES ET MÉCANISMES PERTINENTS POUR LA CONCEPTION D'UN RÀPC

erreurs ou l'inexactitude des données.

Une multitude de représentations existent comme celle des valeurs prédéfinies caractéristiques. Cependant, compte tenu de la complexité des problèmes que nous souhaitons aborder, seules les deux méthodes les plus pertinentes sont exposées : celles permettant un stockage de l'information et celles permettant de modéliser des événements. Ainsi, certaines méthodes utilisent la propagation de l'information. La propagation est un phénomène qui se déroule dans les systèmes composés d'éléments interconnectés. Par exemple, Chauvin décrit le processus de propagation qui se déroule dans les cartes cognitives [47]. Cette activité permet de transporter de l'information entre les éléments et de réaliser des actions spécifiques au système. Ainsi, la propagation de l'influence est définie comme une propagation calculée en fonction des liens entre les concepts [47].

2.7.1.1 REPRÉSENTATION DE L'INFORMATION

On trouve dans la littérature une représentation intéressante de l'information sous forme de graphes ou de réseaux. Ces graphes peuvent être plus ou moins complexes, comme les hypergraphes, qui sont une variante plus généraliste des graphes. Duris définit un hypergraphe, généralisation de la notion de graphe, comme un ensemble fini d'éléments, de sommets, ainsi que d'arrêtes [76].

Pour notre problématique, les réseaux sémantiques sont une forme de représentation intéressante. Ce sont des réseaux de données qui peuvent servir à représenter de l'information mais aussi à la traiter. Ainsi, comme le définissent plusieurs auteurs un réseau sémantique est constitué d'un ensemble de nœuds représentant des objets ou des concepts et des arcs orientés les reliant [82] [196]. Contrairement à un modèle de données hiérarchisé, le réseau de concepts constitue un modèle multidimensionnel dans l'espace [64]. L'une des notions fondamentales des réseaux sémantiques est l'utilisation de concepts [41].

L'un des principaux avantages de cette structure de données est la possibilité de les traiter informatiquement. Desclés mentionne en effet que c'est une structure de données utilisable en informatique et souvent utilisée en intelligence artificielle [64]. Ainsi, associés à des mécanismes de traitements, les réseaux sémantiques peuvent être utilisés avec des inférences. D'après Carbonnell, les inférences dans les réseaux sémantiques humains sont de quatre types : déductive, négative⁶, fonctionnelle⁷ et inductive [41]. Enfin, les cartes cognitives, qui sont un cas particulier des réseaux sémantiques, forment des réseaux d'influence [47].

Néanmoins, certains problèmes liés à l'utilisation des graphes apparaissent également dans les réseaux sémantiques comme la recherche de similarité entre deux éléments. Dans [107], les auteurs proposent une méthode pour rechercher des cas similaires dans un réseau sémantique avec l'utilisation d'un schéma RDF⁸ (Resource Description Framework). Néanmoins, cette méthode ne compare que seulement une partie des deux graphes car le problème est au moins NP complet.

Dans la même idée, les graphes conceptuels sont une variante des réseaux sémantiques [223] utilisés en intelligence artificielle entre autre. Rasovska définit les graphes conceptuels comme une amélioration des graphes sémantiques par le fait que les nœuds représentent des concepts liés entre eux par une structure permettant une hiérarchisation [196]. Comme le souligne Jordan, l'utilisation de graphes est pertinente pour représenter une multitude de données liées entre elles [128] et ainsi avoir une représentation complète de l'information [216].

De plus, dans [132] Karouach et Dousset expliquent que les graphes peuvent être un outil intéressant pour manipuler de grands nombres de données et pour permettre d'en dégager certaines informations, comme des relations cachées. De plus, leur utilisation permet de pouvoir utiliser les concepts ainsi que les règles quelque soit leur niveau d'abstraction [37]. Mugnier dans [170] va plus loin en essayant de montrer qu'il est possible de représenter des connaissances avec des graphes et que des algorithmes qui leur sont dédiés peuvent réaliser des raisonnements. Cependant, certains auteurs pensent qu'ils peuvent représenter de l'incertitude quant à l'information qu'ils représentent [146] [213].

Une forme plus élaborée de graphes se retrouve également dans la notion d'ontologie. L'ontologie consiste en la structuration de concepts appartenant à un même domaine. Elle désigne des connaissances structurées et hiérarchisées [47]. Ce terme qui provient de la philosophie, a été repris en informatique. C'est une forme de représentation de la connaissance qui peut être utilisée en intelligence artificielle. Chauvin dans [47] montre que l'ontologie peut servir pour l'utilisateur à trouver des concepts associés qui lui permettent de réaliser la carte cognitive. Il définit la vue comme une sélection particulière des concepts associés à l'ontologie par l'utilisateur.

Il est intéressant ici d'introduire la notion de concept que l'on retrouve fréquemment. En effet, elle entre en jeu dans de nombreux sujets liés à l'intelligence artificielle. Les concepts sont des représentations générales d'un objet et par conséquent, ils sont souvent abstraits. Ainsi, Lieber montre que la notion de concept est centrale dans la classification des données [148]. Goldstone montre que la capacité de conceptualisation est essentielle dans le procédé de cognition humaine [102]. De plus, l'auteur pense que la capacité conceptuelle partage des

6. basée sur la contradiction

7. basée sur le calcul, en réponse au « Pourquoi ? »

8. <http://xmlfr.org/documentations/tutoriels/041015-0001>

CHAPITRE 2. ÉTAT DE L'ART DES THÈMES ABORDÉS

éléments communs avec le processus de représentation. En fonction de son utilisation, un concept doit regrouper certaines propriétés. Ainsi, dans le cadre du RàPC, un bon concept doit être rapide à utiliser et pertinent dans la recherche de cas similaire [43].

2.7.1.2 REPRÉSENTATION ÉVOLUÉE

Certaines représentations sont plus évoluées par le fait qu'elles fournissent d'autres éléments d'information. Ainsi, les réseaux de Petri peuvent être considérés comme une représentation d'une connaissance introduisant une certaine dynamique [242]. Une autre forme intéressante est celle des réseaux bayésiens.

Les réseaux bayésiens sont des outils graphiques [22] définissant la probabilité d'un événement en connaissant à la fois les causes et les effets liés à ce dernier, ainsi que les probabilités associées à cet événement. D'une manière générale, les réseaux bayésiens sont des graphes orientés non cycliques [188]. Il est à noter qu'il existe d'autres types de modèle graphique, comme le réseau de croyance, le réseau d'indépendance probabiliste [22]. Ainsi, par la connaissance d'une partie des causes, on peut déterminer la probabilité d'apparition d'un événement. De même, il est possible de réaliser l'opération inverse, c'est-à-dire qu'en constatant l'apparition d'événements, on peut remonter à la cause la plus probable [62]. Cet outil se matérialise par un réseau liant les causes et les événements [22] [236]. Chaque nœud comprend une table de probabilités qui permet par la suite, grâce à la formule de Bayes, de calculer les relations les plus probables. Ce calcul est réalisé par un moteur d'inférences. L'inférence consiste à mettre à jour les données de chaque nœud en fonction de valeurs fixées dans le système [22], ou plus simplement l'inférence est le calcul de n'importe quelle probabilité sachant certaines causes [146].

De par leur nature, les réseaux bayésiens peuvent permettre de trouver des architectures de causalité à partir de données brutes, ou encore pour l'étude de fonctions cognitives [188]. De plus, les réseaux bayésiens ont un intérêt pour la représentation de données dans les problèmes de décision, comme les arbres de décision [236], les systèmes experts, réseaux de neurones [175]. Les réseaux bayésiens permettent de porter son attention sur la structure du système, au lieu de se focaliser sur les valeurs numériques [22]. Enfin, ils sont très utiles pour la représentation de données incomplètes et de connaissances incertaines, et permettent de représenter graphiquement les indépendances [147]. Weber souligne que les réseaux bayésiens orientés objets permettent d'avoir une architecture arborescente hiérarchisée [236].

Néanmoins, comme le souligne Naim, les réseaux bayésiens ont plusieurs limites, comme le manque de recul sur les méthodes d'apprentissage, ou l'utilisation des probabilités qui restent une notion peu intuitive. De plus, selon l'auteur, ils restent très compliqués à gérer une fois que leur taille devient importante [175]. Sur ce point des auteurs soulignent que les méthodes de calcul sont confrontées à des explosions combinatoires ce qui implique la nécessité de méthodes approximatives [147] [22]. De plus, la base de tout modèle graphique est la décomposition en unité individuelle, en module simple, ce qui implique une forte connaissance du sujet traité [22]. Enfin, d'après Denis, dans certain cas, il est impossible de répondre à certaines interrogations s'il manque de l'information [62].

2.7.1.3 INFORMATIONS ET INFORMATIONS INCOMPLÈTES

Un des problèmes dans les systèmes utilisant de l'information survient lorsque cette dernière est incomplète, ce qui est souvent le cas [72]. Bosc définit l'information incomplète comme étant la situation où l'ensemble des données décrivant un objet n'est pas enregistré dans le système de base d'information [32]. Une autre définition proposée par l'auteur est lorsqu'il est possible de poser des questions dont la réponse ne peut être donnée par le système [32]. Ce document souligne la nature même de certaines données qui peuvent être dépendantes d'autres informations et par conséquent sujet à interprétation [32].

Une autre cause d'imprécision est que l'information transmise peut être imparfaite [72]. Dubois souligne que la nature des données ainsi que les problèmes d'interactions homme-machine s'ajoutent aux sources d'incomplétudes de l'information. L'auteur souligne que l'un des moyens de diminuer l'impact lié à ce phénomène est d'introduire l'inexactitude dans le modèle de représentation. Ainsi, les ensembles flous ou la distance d'exactitude sont des solutions possibles [72].

2.7.2 MÉCANISMES PERTINENTS MIS EN ÉVIDENCE

Dans cette partie, les mécanismes qui semblent pertinents pour la création d'un système permettant de résoudre le problème des déchets sont mis en avant. Ces mécanismes sont soit présents dans la description des systèmes étudiés et par conséquent sont approfondis, soit déduits des conclusions pouvant être tirées de l'examen de ces systèmes. Enfin, les fonctionnements mentaux dans les processus de résolution sont étudiés afin de poursuivre les idées soulevées. Ces processus, propres à l'homme, ont été intégrés dans différents systèmes d'intelligence artificielle et permettent la réalisation de mécanismes évolués.

2.7. DESCRIPTION ET DÉVELOPPEMENT DE CONCEPTS, MÉTHODES ET MÉCANISMES PERTINENTS POUR LA CONCEPTION D'UN RÀPC

2.7.2.1 SIMILARITÉ

La similarité est une notion essentielle dans une grande part des outils d'intelligence artificielle [202], et est un processus clé dans les systèmes cognitifs [159]. Elle désigne le fait que deux objets soient similaires ou pas, que deux choses partagent des éléments en communs [155], ce qui nécessite de passer par une étape de description des objets [195]. Plus précisément, c'est un critère qui permet de définir si, dans un contexte donné, deux objets peuvent être considérés comme semblables ou non. Ainsi, la notion de similarité ne signifie pas que deux objets soient strictement identiques [215].

Le but du calcul de similarité est de renvoyer une valeur décrivant le taux de ressemblance entre deux éléments comparés. Ainsi, toute la difficulté est de définir cette valeur. L'une des principales tâches est de réaliser le meilleur appariement. Par exemple, Markman propose que la similarité puisse être mesurée à partir d'un alignement de structure [159]. Néanmoins, ce type de problème est NP-difficile ou NP-Complet [215]. Sorlin mentionne que certaines méthodes d'appariement permettent d'atteindre des temps de calculs polynomiaux, mais étant incomplètes, elles ne garantissent pas que la solution trouvée soit optimale [215]. Une autre méthode consiste à évaluer le coût de transformation permettant de passer d'un graphe à un autre ce que propose Bisson [28]. De même, la similarité peut être mesurée en fonction d'aspects positifs et d'aspects négatifs [202]. Enfin, la similarité traduit la notion de distance entre deux objets. Or, comme le souligne Bisson, la notion de distance est vaste et par conséquent plusieurs modes de calcul sont possibles [28].

Ceci conduit à l'idée que le calcul de la similarité peut lui-même être différent en fonction du contexte. Autrement dit la notion de similarité est relative au contexte. D'après [202], la similarité doit dépendre de l'environnement de mesure par rapport à la réalité. De même, Leake étudie la possibilité d'adapter les critères d'évaluation de la similarité en fonction du contexte de recherche [141]. De plus, le calcul de la similarité va dépendre du choix de l'utilisateur ou du concepteur. Ainsi la capacité d'évaluer la similarité entre deux objets dépend de l'importance accordée à certains éléments [159]. À ceci s'ajoute le fait que la similarité entre deux objets, bien qu'elle existe, n'est pas forcément reconnue par le système. Ainsi, dans le cas de documents, Aggarwal montre que des idées peuvent être similaires bien que les mots pour les utiliser ne soit pas les mêmes [5], c'est-à-dire qu'un mot puisse signifier plusieurs choses différentes. Pour résoudre ce type de problème, certains auteurs proposent différentes méthodes. Par exemple, Lieber présente la classification floue, basée sur des relations de similitudes floues entre les données [148]. Aggarwal propose de relier des documents à des chaînes de concepts qui permettent d'associer des documents entre eux [5]. Avec la même idée, Baziz, soulignant que les groupes de mots sont plus pertinents au niveau du sens qu'un mot isolé, propose l'utilisation d'une ontologie sur les concepts qui permettent une recherche de documents efficaces [21]. Certains auteurs se penchent sur la tolérance dans le calcul de la similarité. En d'autres termes, la mesure de similarité est fonction de la méthode choisie [146]. Enfin, Goldstone souligne que la similarité perceptuelle n'est pas statique dans le temps mais dépend des conditions de recherche [102].

Il est intéressant de constater que plusieurs observations montrent que les mécanismes réalisant la similarité sont, chez l'humain, proches de ceux qui ont été décrits. Ainsi, Bison avance l'idée que les critères de comparaisons varient, pour les humains, en fonction de catégorisations existantes. Ces critères sont donc dynamiques en fonction du contexte [28].

L'aspect non générique de la similarité peut se complexifier avec l'introduction de l'abstraction. C'est-à-dire qu'il existe plusieurs niveaux de similarité, de la similarité apparente jusqu'à atteindre l'abstraction [28]. Pour Goldstone, la perception la similarité et l'utilisation de règles abstraites font parties d'un ensemble [102].

De même, pour certains auteurs, le mécanisme d'analogie et la notion de similarité sont proches. Ainsi, le mécanisme d'analogie s'apparente à la recherche de similarité car il implique un appariement entre les différents objets [28]. Par conséquent, selon certains, il est possible d'étendre les connaissances d'un sujet à partir de connaissances antérieures [159].

Dans le raisonnement à partir de cas, la similarité joue un rôle important car elle détermine si un cas connu peut être utilisé pour trouver une solution. Le principal but de la similarité est de déterminer les cas semblables et comment les adapter lors de l'utilisation de RàPC [141]. Dans le raisonnement à partir de cas, il est courant de s'appuyer sur les caractéristiques communes entre deux objets pour calculer leur similarité [214]. A ces fins, Rasovska cite plusieurs méthodes de recherche comme la méthode des plus proches voisins, les approches inductives, l'induction basée sur la connaissance, l'algorithme de chemin de similarité [196]. Néanmoins, ces approches restent imprécises et ne permettent pas de répondre à l'ensemble des problématiques. Ainsi, Leake souligne qu'une des difficultés est d'utiliser la similarité afin d'évaluer le coût d'adaptation [141]. Pour contrer ce problème, Cordier dans [53] propose un système où la similarité est estimée par une mesure qui prend en compte les connaissances d'adaptation qui sont disponibles.

Plusieurs modèles permettent de structurer les données afin de faciliter la recherche de cas similaires et d'en augmenter la pertinence. Dans la littérature en plus d'une organisation hiérarchique des données, avec souvent un calcul de similarité booléen, certains articles présentent deux types de structures : les modèles probabilistes

CHAPITRE 2. ÉTAT DE L'ART DES THÈMES ABORDÉS

et les graphes.

Les modèles probabilistes ont un fonctionnement qui s'apparente aux réseaux bayésiens dans le sens où le système est dynamique. Ainsi, il permet de moduler les résultats de la similarité par des probabilités de vraisemblance. Néanmoins, Baziz souligne que les modèles probabilistes sont plus efficaces que les modèles booléens, mais qu'ils sont plus difficiles à mettre en place, de par le fait qu'il est nécessaire de rechercher les probabilités [21].

Un grand nombre de documents se penchent sur la recherche de similarité entre deux objets modélisés par des graphes. L'utilisation de graphe est pertinente dans la représentation d'objet, car elle peut fournir des informations riches concernant la structure [146]. Baziz souligne que l'aspect connexionniste permet certaines fonctionnalités qui sont pertinentes dans la recherche de documents similaires [21]. Enfin, Verges propose l'utilisation des graphes et de la théorie des graphes pour les calculs de similarités [226].

La mesure de similarité entre deux graphes peut prendre différentes formes. Une des méthodes les plus simples et qui rejoint la méthode booléenne de la structure hiérarchique consiste à comparer le nombre de sommets communs qu'ils possèdent [146]. Verges [227] distingue trois types d'approches dans la recherche de similarité entre les graphes :

- l'analyse ternaire
- l'arbre maximum
- l'utilisant de filtres qui peuvent se comparer à des seuils minimaux

Une autre approche est de considérer que la distance d'édition de graphe est une notion similaire à celle de similarité [215]. Sorlin définit la distance d'édition de graphe, comme le coût minimal de transformation d'un graphe en un autre. Néanmoins, toutes les techniques supposent de savoir quels éléments comparer. Ainsi, la similarité des graphes passe par l'appariement qui est un problème connu, à savoir la recherche du couplage optimal dans deux graphes [28]. D'autre part, ce calcul semble difficile car il prend en compte des éléments différents. Selon Verges, le calcul de similarité ne peut se faire par un unique coefficient [226]. Ainsi l'auteur propose des indicateurs qui quantifient en fonction de la nature des informations à comparer et en fonction du type de calcul de similarité [226].

Un deuxième point très important est que la description d'un même objet peut être réalisée de plusieurs manières. Le niveau de décomposition peut également jouer un facteur important, en effet, si deux graphes représentant le même objet sont décrits avec des granularités différentes, la mesure de la similarité s'avère difficile [146]. Ou encore il est possible qu'un nœud puisse représenter plusieurs nœuds d'un autre graphe [215], c'est-à-dire d'avoir des appariements multivoques [146]. Verges explique que l'analyse de similarité entre graphes peut se baser sur la théorie des hypergraphes [227]. Aussi, l'utilisation de la théorie des graphes permet de mettre en évidence des groupes dans les données [226].

A l'incertitude liée à la structure même des graphes, s'ajoute la complexité de l'appariement [215]. Par exemple, la recherche d'un isomorphisme inexact de graphe vient à chercher l'appariement qui minimise la distance entre deux graphes [36].

Or comme le souligne Leray, dans une représentation sous forme de graphe, la principale difficulté est de trouver le meilleur appariement, c'est-à-dire la mise en relation des sommets des deux graphes à comparer afin d'obtenir le meilleur résultat au niveau de la similarité [146]. Comme déjà expliqué, ce type de problème est fortement combinatoire puisque il est nécessaire de réaliser le meilleur appariement entre les deux graphes [214].

Le mapping ou encore appariement, est une tâche important dans tous les systèmes où la recherche d'éléments similaires est nécessaire. Le processus de *Mapping* a pour objectifs de trouver des correspondances et de préparer les mécanismes de transfert de la connaissance [134]. Plus généralement, le processus d'appariement vise, lors de la comparaison de deux objets, à mettre en correspondance chaque paramètre décrivant les éléments d'un objet au paramètre correspondant de l'autre objet afin que la similarité entre ces deux derniers soit maximale. Holyoak introduit l'idée de mapping dans les raisonnements analogiques et définit ce dernier comme une des quatre étapes permettant la réalisation de l'analogie [115].

2.7.2.2 APPRENTISSAGE

L'apprentissage est la phase par laquelle un être vivant ou un système artificiel s'adapte face à son environnement extérieur, à des situations auxquelles il est confronté. Ainsi, l'apprentissage constitue une question fondamentale en science cognitive [65]. D'une manière générale, l'apprentissage vise à tirer des conclusions de situations vécues afin de pouvoir les utiliser lorsque de nouveaux problèmes se présentent, c'est-à-dire lorsque le moyen d'atteindre une situation est inconnu [74].

Anderson montre que l'apprentissage est influencé par les expériences, par l'utilisation de règles, ou encore par la génération de règles issues de constatations suite à la pratique [14]. Franklin décrit le processus d'apprentissage, à l'échelle cognitive en neuf étapes, de la reconnaissance à la prise de décision, jusqu'à sa réalisation [92]. Ce

2.7. DESCRIPTION ET DÉVELOPPEMENT DE CONCEPTS, MÉTHODES ET MÉCANISMES PERTINENTS POUR LA CONCEPTION D'UN RÀPC

même auteur décrit le processus de mémorisation perceptuelle comme étant la capacité de reconnaissance et d'interprétation des stimuli [92].

Une des théories de l'apprentissage propose que ce dernier contribue à la création de règles, les heuristiques qui pourront par la suite être réutilisées afin de résoudre de nouveaux problèmes. Néanmoins, comme le souligne Dupays, l'utilisation d'heuristiques nécessite la connaissance de beaucoup d'information [74]. De plus, Cazenave montre qu'il est important d'organiser les règles de manières à pouvoir les utiliser rapidement [43].

Dans les systèmes multi-agents, l'apprentissage est extrêmement important. Cet apprentissage peut se faire de différentes sortes et à différents niveaux en fonction du système. Ainsi par exemple, l'apprentissage peut se dérouler au niveau de l'agent lui-même, comme ci ce dernier était seul, ou au contraire en considérant l'ensemble des agents. Une stratégie consiste à choisir la meilleure solution dans le meilleur cas de figure [90]. Filippi propose comme calcul de la performance l'utilisation de la différence entre les récompenses obtenues par un agent réellement et ce qu'il aurait pu recevoir théoriquement [90].

2.7.2.3 FONCTIONNEMENTS MENTAUX POUR LA RÉOLUTION DE PROBLÈME

La résolution de problème, d'une manière générale, est relativement difficile. En effet, même si des travaux portent sur le sujet, il n'y a pas de méthode capable de résoudre l'ensemble des problèmes, mais plus des méthodologies générales. Par exemple, on trouve que cette action peut passer par quatre phases : identification, analyse, solution et action [59] [74].

Les processus mentaux destinés à cette fin sont mal connus. Ainsi, on retrouve dans la littérature plusieurs théories permettant d'expliquer certains types de processus. Il est possible de définir un problème comme le fait que le moyen d'atteindre une situation cible à partir d'une situation de référence n'est pas connu. Il est possible de distinguer des buts à atteindre et des buts à éviter [201]. Ainsi Richard définit l'espace associé comme un ensemble comportant l'état initial, l'état final et les moyens d'y parvenir, associés de leurs contraintes [201]. Pour l'auteur, la solution est le chemin entre les deux états.

La résolution d'un problème peut se décomposer en plusieurs phases globales selon les auteurs. Ainsi, d'après Richard, elle passe par la conception d'une représentation du problème accompagné d'un ensemble d'actions [201]. Selon Mathieu, la construction de cas générique est nécessaire pour l'obtention de connaissances générales [163]. Ensuite, Richard montre que la planification permet la construction d'objectifs intermédiaires facilitant la recherche de la solution. Cependant, la division de problème en sous problèmes n'est pas toujours possible [138].

Il est à noter la notion essentielle de points de vue. Il semblerait que la manière de représenter le problème conditionne la réussite ou non de sa résolution. Ainsi, cette dernière peut être difficile du fait d'une mauvaise représentation ou compréhension de l'objectif et, d'après les Gestalistes⁹, un changement de point de vue peut permettre de faciliter la résolution [201].

Enfin, l'expérience acquise permet de conditionner chez l'humain des mécanismes de résolutions de problème. Autrement dit, les méthodes associées se basent sur celles déjà employées lors de cas ultérieurs. Par conséquent, comme le souligne Mathieu, de nombreux résultats tendent à montrer que le fait de résoudre un problème modifie la manière dont une personne en résoudra un autre [163].

La compréhension des mécanismes de raisonnement humain a toujours été intéressante pour la réalisation de système d'intelligence artificielle. De nombreux travaux, en sciences cognitives ou en IA, ont essayé de reproduire de tels mécanismes. Newell explique en effet que la recherche en intelligence artificielle s'est basée principalement sur les théories psychologiques [176]. Ainsi, il existe de forte similarité entre les mécanismes des deux origines [70].

L'esprit humain est capable de raisonner et d'apprendre. Albus décrit l'esprit humain comme ayant la capacité de reconnaître, de se rappeler et de réutiliser les connaissances qu'il a acquises et d'évaluer ce qui arrive [7]. Selon ce dernier, la principale caractéristique d'un agent intelligent est d'être capable de jugement, de réagir et de se représenter son environnement.

Certains textes suggèrent que les processus de raisonnement humain sont des invariants par rapport aux types de problèmes rencontrés [176]. Néanmoins, plusieurs auteurs soulignent que l'une des caractéristiques essentielles d'un système intelligent réside dans la flexibilité. Par exemple, Clemen présente une approche de la flexibilité cognitive dans [49]. Dans cet article, la flexibilité cognitive est définie comme la capacité des êtres vivants à s'adapter aux changements et permet de considérer différentes approches pour résoudre un problème. Cet aspect est si important que l'auteur signale que chez les patients atteints de troubles, le manque de flexibilité se traduit par un problème au niveau de l'activation de certaines activités [49].

Certains mécanismes en IA ont essayé de reproduire cette idée. Il en découle qu'un système qui n'est pas flexible vis-à-vis de l'environnement, n'est pas un système adaptatif [176]. Jumbo est un système qui a été conçu pour résoudre des jeux de lettres sans utiliser de dictionnaire mais en utilisant l'analogie [56]. L'auteur

9. <http://www.universalis.fr/encyclopedie/gestaltisme/>

CHAPITRE 2. ÉTAT DE L'ART DES THÈMES ABORDÉS

explique que ce système associe des concepts entre eux aléatoirement, mais uniquement certaines associations sont conservées et, selon lui, ce dernier représente bien la pensée humaine.

À ceci, s'ajoute la notion de plasticité neuronale. D'après la littérature, la plasticité neuronale, c'est-à-dire la capacité du cerveau à réorganiser sa structure, serait un point essentiel dans la capacité du système à pouvoir franchir les obstacles et ainsi s'adapter aux nouvelles situations. D'après [157] cette dernière jouent un rôle important dans le mécanisme d'apprentissage. Le réseau est capable de s'auto créer lorsque la situation à laquelle il est confrontée est nouvelle.

Enfin, certains mécanismes ont été mis en évidence dans les processus de raisonnement mental chez l'humain, comme les mécanismes d'analogie, d'abstraction et de conceptualisation.

2.7.2.4 ANALOGIE

L'analogie est un processus cognitif intéressant qui permet de générer des solutions à partir de l'expérience ou de connaissances préalablement acquises. D'après [237] les raisonnements analogiques jouent un rôle important dans la résolution de problème. Par exemple, pour Douglas Hofstadter toute pensée est analogie, plus simplement, tous les raisonnements humains sont basés sur un processus analogique. [113]. Pour Stroppa, la capacité de raisonner par analogie sur des éléments bien distincts est une fonction clé du processus cognitif [219].

L'analogie est l'égalité des rapports entre objets. Ainsi A est à B ce que C est à D [155]. D'après French, la capacité d'identifier un objet dans un contexte donné représente le mécanisme d'analogie [96]. Ce qui permet d'introduire une définition générale du raisonnement par analogie. Le raisonnement par analogie permet de trouver « le quatrième élément », c'est-à-dire trouver D dans la relation A est à B ce que C est à D [155]. Un *analogon* est un élément d'une analogie [155].

Stroppa définit la transformation par analogie par, en premier une recherche d'appariement, puis par une recherche des informations à transférer [219]. De même, d'autres auteurs résument le mécanisme d'analogie par quatre phases, encodage, mapping, transfert de données et apprentissage par généralisation [96] [203] [204].

Le mécanisme de raisonnement par analogie passe donc d'abord par une phase de reconnaissance. Dans cette étape, il est essentiel de concevoir des similarités entre les différents éléments. En effet, c'est en partant de deux éléments similaires qu'un mécanisme analogique peut être réalisé [237]. Ce processus est appelé l'appariement ou encore le mapping. Dans [204], Ripoll et Eynard soulignent que dans les processus de raisonnement par analogie, *mapping* ou encore *l'alignement de structure* joue pratiquement toujours un rôle important.

Dans Ripoll et Coulon [203] et Ripoll et Eynard [204] proposent une analyse critique du *mapping* dans les processus d'analogie. Ainsi, malgré la simplicité apparente du *mapping*, ce dernier est relativement complexe au niveau du nombre d'opérations. De plus, d'après les auteurs le processus du *mapping* semble peu représentatif des fonctions cognitives humaines et sous certaines conditions, le *mapping* n'est pas absolument nécessaire au processus analogique. A contrario, d'autres pensent que la mise en correspondance est essentielle dans l'acquisition de nouvelles connaissances [237].

Néanmoins un point intéressant est que le mécanisme d'encodage et d'inférence est en série, alors que le processus de mapping peut s'arrêter lorsque une solution est trouvée [237]. Dans ce dernier article, Weil-Barais et al. soulignent que si aucune similarité n'est possible, ce type de mécanisme est inefficace. Néanmoins, Ripoll pense que des règles permettent d'encadrer l'activité de *mapping* ce qui lui permet d'obtenir de bons résultats [203].

Il est possible de s'intéresser au processus d'analogie chez l'humain. Ainsi, dans [65], Didierjean se demande comment résoudre un problème avec un autre cas similaire. Didierjean avance qu'il y ait plusieurs mécanismes d'analogie. L'auteur en mentionne deux : la sauvegarde d'exemples et la généralisation.

Didierjean [65] présente l'idée que, chez l'humain, des mécanismes primaires, permettraient la réalisation d'analogie dans un premier temps, puis, que des règles propres seraient générées. Avec l'expérience, c'est la reconnaissance de structure qui est envisagée. Ainsi, l'auteur donne l'exemple du jeu d'échecs où plusieurs mécanismes d'analogie de différents niveaux interviennent :

- les chunks : pattern de pièce
- templates : structure de connaissance qui allie variables et positions spécifiques
- retrieval structures : connaissance abstraite

L'auteur pense donc que l'expertise ne consiste pas à ne pas conserver les détails, mais à mieux les sélectionner [65]. Plus généralement, Goldstone affirme que la perception de la similarité n'est pas une chose statique mais évolue dans le temps [102].

La représentation est aussi très importante dans le bon déroulement du processus analogique. On définit la représentation comme étant la description du problème compréhensible par la machine. Pour Ripoll, l'analogie commence déjà lors de la phase de l'encodage du problème, or, cette phase est déterminée par le choix du concepteur [204]. Ou encore Chalmers pense que l'analogie dépend entièrement du mode de représentation [45]. En science cognitive, Didierjean montre que tout raisonnement par analogie passe par la construction de schémas

2.7. DESCRIPTION ET DÉVELOPPEMENT DE CONCEPTS, MÉTHODES ET MÉCANISMES PERTINENTS POUR LA CONCEPTION D'UN RÀPC

bien organisés [65]. La question de la représentation est si importante que Weil-Barais et al. montrent que la représentation d'un élément peut être différente en fonction du contexte de recherche [237]. De même, Parmentier montre que la distance entre concepts, c'est-à-dire leur proximité analogique peut varier en fonction du contexte de la situation en cours [186]. De même, French montre que tous les systèmes de résolution de problèmes par analogie sont symboliques, connexionnistes ou hybrides [96]. La transformation de la représentation en concept utilisable par l'analogie est intimement liée au processus de perception. Ainsi, comme le souligne Goldstone, le processus de conceptualisation partage des ressources avec les processus de perception [102].

Pour plusieurs auteurs, l'analogie fonctionne mieux grâce à l'intégration de l'abstraction. Chalmers pense que l'analogie dépend obligatoirement d'un système gérant un haut niveau d'abstraction [45]. Zucker explique en effet que l'abstraction permet de faciliter la recherche de solution en supprimant une partie des informations non pertinentes [247]. Plusieurs systèmes d'IA fonctionnent sur les principes du raisonnement analogique humain et de l'abstraction. On peut citer ainsi *Copycat* et *Metacat* qui sont des systèmes d'intelligence artificielle simulant les processus cognitifs humains [112] [162]. Carbonnell propose une méthode de résolution de problèmes basée sur une méthode d'abstraction dérivationnelle. La méthode repose sur une réutilisation des cas passés et la réalisation d'une analogie avec le nouveau cas [40].

La structure même de base de tel système peut être assez simple. Par exemple, dans *Copycat* et *Metacat*, le Slipnet, structure essentielle du système, n'est qu'un réseau sémantique [161]. Selon Kokinov, dans un réseau, une modification de la structure est basée soit par la création de nouveaux nœuds soit par la modification des connexions les reliant [134]. Enfin, Weil-Barais et al. pensent qu'il ne doit exister qu'un nombre restreint de mécanismes élémentaires d'analogie qui permettent la résolution de problèmes [237].

L'utilisation de mécanismes d'analogie peut être utilisée avec des outils de raisonnement à partir de cas. Ainsi, de nombreux auteurs s'intéressent à l'intégration de ce mécanisme, par exemple dans la phase d'adaptation de la solution. Bergmann et Wilke [24] présentent la part importante que peut représenter l'analogie dans un système de raisonnement à partir de cas. L'idée générale est que dans certains types de cas l'utilisation de l'analogie peut être particulièrement intéressante. De même, Marshall souligne que les méthodes d'analogie et de créativité sont particulièrement intéressantes pour les systèmes de raisonnement à partir de cas [162]. Bergmann explique que la solution abstraite générée par le raisonnement à partir de cas peut être donnée telle quelle à l'utilisateur qui devra trouver le moyen de la concrétiser. Elle peut aussi être transformée en une solution concrète aux moyens de règles créées à cet effet. L'auteur distingue par conséquent les cas concrets et les cas abstraits ainsi que plusieurs niveaux intermédiaires [24].

Néanmoins, Marshall explique que *Metacat*, un système qui permet le raisonnement analogique, n'est toutefois pas compatible avec le fonctionnement d'un RàPC [160] [162]. Cependant, l'auteur note l'importance des *concepts* dans les raisonnements analogiques et souligne l'intérêt dans le RàPC [162]

2.7.2.5 ABSTRACTION

L'abstraction représente une capacité cognitive importante dans les mécanismes de raisonnement humain ou animal ainsi que dans quelques systèmes d'intelligence artificielle. De manière plus précise, le haut niveau de perception et la capacité à raisonner avec des concepts abstraits sont extrêmement importants dans les mécanismes de cognition humaine [45]. En psychologie, la pensée abstraite désigne la capacité de gérer des concepts abstraits [238]. Cette capacité semble essentielle à la résolution de problème. Comme le souligne Ber, les humains utilisent des concepts abstraits dans leur raisonnement, en se basant sur un univers correspondant au problème en question [23]. Ainsi, lors de l'apprentissage, l'humain utilise de plus en plus des concepts abstraits pour se représenter le monde [37]. Dans la littérature, on trouve en effet deux types de mécanisme de perception, le bas et le haut. Le bas étant celui qui considère l'information brute alors que le haut niveau manipule des *concepts* [45]. Cependant, la grande majorité des systèmes d'intelligence artificielle ne permet pas des raisonnements de haut niveau [45].

L'intégration des mécanismes manipulant l'abstraction dans les systèmes d'intelligence artificielle permet de réaliser des raisonnements plus complexes. Par exemple un système à base de connaissance utilise des niveaux d'abstraction, des concepts et des règles afin de les manipuler [23]. Ainsi, l'introduction de l'abstraction est notamment l'utilisation de la profondeur permet de réaliser des systèmes dynamiques [186].

Les mécanismes permettant l'abstraction sont parfois complexes et nécessitent souvent des structures adaptées. Ainsi, Albus pense que les données sont structurées de manière hiérarchique suivant différents niveaux d'abstraction [8]. La structuration des données est souvent réalisée à partir de la notion de concept, et en fonction de leur degré d'abstraction [45]. Cette répartition peut permettre ensuite d'introduire ce que Zucker appelle la granulométrie dans le processus d'abstraction [247]. L'un des principaux moyens de relier deux concepts ensemble est de considérer que leur distance est courte. La notion de distance renvoie à la similarité. Plus la distance est courte, plus les concepts sont proches. Ainsi, selon Kanerva, la distance entre deux concepts est la distance de deux éléments dans un espace multi-dimensionnel [131]. Néanmoins, l'auteur souligne que cette représentation

CHAPITRE 2. ÉTAT DE L'ART DES THÈMES ABORDÉS

ne peut être exacte. Lors du procédé d'abstraction, les concepts - actifs - voient la distance des nœuds voisins se rétrécir, c'est à dire que les concepts voisins sont plus proches [186]. De ce fait, le processus d'abstraction entre en compte lors de la mesure de similarité.

D'une manière plus générale, le processus de résolution de problèmes grâce à l'abstraction suppose de passer par une solution abstraite qui sera ensuite transformée en solution réelle [247]. Cependant, Zucker expose le fait que si les processus d'abstraction sont difficiles, l'abstraction d'un cas concret l'est encore plus. Néanmoins, il semblerait qu'il soit réalisable pour l'auteur [247] et, si possible, sans l'intervention de l'utilisateur [37].

Chez l'humain, l'abstraction et la capacité de manipuler de tel concept semblent essentielles au bon déroulement du processus de raisonnement humain. Ainsi, la différenciation de la pensée abstraite semble jouer un rôle dans la résolution de problème [91]. De plus, il semblerait que la perception abstraite et le fait de raisonner sur le monde réel ne sont pas deux choses distinctes [35]. Un des points importants est que le concept abstrait joue le même rôle dans la pensée. Ainsi, un concept peut agir comme n'importe quel type de stimulant même après en avoir isolé les éléments clés [91]. Enfin, Fleszner souligne que l'abstraction est plus simple, chez les humains, lorsqu'il s'agit de mots [91]. Or les mots sont déjà une source d'information encodée.

Plusieurs systèmes intelligents tentent d'intégrer le mécanisme d'abstraction. Par exemple, Dupays pense que l'abstraction peut être utilisée en analogie à condition que le système puisse les reconnaître comme similaires [74]. Elle est de plus utilisée dans des méthodes dites d'innovation comme TRIZ. Estevez souligne à ce sujet qu'il y a une importante différence entre le RàPC et la méthode TRIZ de par leur navigabilité dans le domaine de l'abstraction. Ainsi alors que le RàPC reste sur un même niveau, la méthode TRIZ en change [83].

2.7.3 RÉCAPITULATIF DES MÉTHODES ET SYSTÈMES D'IA

Dans cette partie, nous avons vu les différents systèmes, méthodes et concepts intervenant dans un domaine restreint de l'intelligence artificielle. Plusieurs points sont à souligner par rapport à la problématique des déchets. En premier lieu, parmi les deux systèmes proposés (RàPC et réseau de neurones) le RàPC semble le plus propice à la résolution du problème. En effet, il permet de trouver des solutions en se basant sur la connaissance qu'il possède sur des problèmes similaires et, il ne nécessite pas une connaissance poussée des mécanismes régissant chaque problème ou permettant sa résolution. Cependant, son domaine est par définition limité puisqu'il se base que sur des problèmes routiniers. De plus, les méthodes internes qui le composent sont à définir, par exemple la notion de similarité et d'adaptation, et sont en elles-mêmes des méthodes complexes à élaborer. A contrario, les systèmes multi-agents reposent sur une auto-organisation des éléments le constituant conduisant à « l'émergence » de la solution. Cette notion d'auto-organisation semble révéler le besoin d'une dynamique dans la structure du système permettant son évolution. On retrouve cette idée dans certains travaux sur le RàPC avec la notion de « Trace ». Enfin, le système expert montre que l'utilisation de règles introduites dans le système permet la résolution de certains problèmes.

Concernant les méthodes et concepts, on retrouve plusieurs d'entre eux dans tous les systèmes. Ainsi, le RàPC et le système multi-agents utilise les notions d'apprentissage et de stockage de l'information. La représentation de la connaissance et plus largement l'organisation et le stockage de l'information constitue un facteur clé dans la structure de ces systèmes. Dans cet état de l'art, nous nous sommes focalisés sur les représentations basées sur des connexions car elles permettent une plus grande souplesse dans la représentation. Or, la problématique des déchets impose une telle souplesse.

En conclusion, il semble qu'une bonne approche pour la proposition de nouvelles solutions pour la valorisation des déchets soit proposée par le RàPC. Cependant, les méthodes ou sous étapes qui le constituent doivent intégrer des mécanismes complexes provenant d'autres systèmes. Ainsi, la notion d'émergence ou, de manière plus limitée, d'auto-organisation de l'information que l'on retrouve dans les systèmes multi-agents semble pouvoir être une solution à la contrainte des problèmes routiniers du RàPC en offrant une plus grande souplesse. Elle peut elle-même s'appuyer sur des structures complexes de l'information comme les réseaux sémantiques ou l'ontologie.

2.8 CONCLUSION DU CHAPITRE

Dans ce chapitre, nous avons défini le problème de la valorisation des déchets et son contexte. Comme nous avons pu le voir, ce problème présente plusieurs contraintes compliquant sa résolution :

- Le problème en lui-même, c'est-à-dire trouver une méthode proposant de nouvelles voies de valorisation
- La diversité des problèmes ou, plus clairement, la non-généricité du type de déchet
- Les contraintes imposées : économiques, environnementales et sociales
- Les aspects techniques liés aux méthodes de résolution

De plus, dans la seconde partie, et en relation avec ce dernier point, nous avons présenté différentes méthodes et outils pouvant permettre de trouver une solution. Notre choix s'est porté sur les outils de gestion de la connaissance et plus particulièrement sur le RàPC. Ce choix s'appuie par les points que nous venons de résumer

et en particulier sur le fait que nous ne disposons pas de connaissances nécessaires pour pouvoir répondre à la question (c'est-à-dire au problème) en passant par un système plus fin¹⁰. Suite à ce chapitre, nous nous proposons d'élaborer deux axes de recherche qui ont vocation de s'unir à la fin de cette thèse. Le premier axe est l'élaboration d'un cadre de modélisation et du développement des critères d'évaluation permettant de définir si une trajectoire répond aux attentes. Le second axe, consiste à développer notre proposition d'utiliser un système de type RàPC, ce qui nécessitera le développement de méthodes adaptées à notre contexte.

10. c'est-à-dire un système modélisant l'ensemble du processus

MODÉLISATION DES TRAJECTOIRES DE VALORISATION DES DÉCHETS

Le capitaliste qui cherche un emploi plus profitable pour ses fonds, doit naturellement peser tous les avantages qu'un genre d'industrie peut avoir sur un autre. Par cette raison, il pourrait renoncer à un emploi plus profitable de son argent, pour un autre emploi qui lui offrirait plus de sûreté, de propriété, de commodité, ou tout autre avantage réel ou imaginaire.

DES PRINCIPES DE L'ÉCONOMIE POLITIQUE ET DE L'IMPÔT – DAVID RICARDO –
CHAPITRE IV : DU PRIX NATUREL ET DU PRIX COURANT

Ce chapitre se propose de décrire une modélisation des trajectoires de valorisation des déchets. Cette modélisation permet d'établir un formalisme pour représenter les trajectoires en fonction de macro-structures standardisées. De plus, une évaluation de chaque trajectoire est réalisée par l'utilisation d'indicateurs sur les trois piliers du développement durable : l'aspect économique, l'aspect environnemental et l'aspect social.

3.1 OBJECTIFS DE LA MODÉLISATION

La modélisation de la trajectoire a plusieurs objectifs. Dans un premier temps elle va permettre de constituer un outil d'aide à la décision sur les trajectoires de valorisation. En effet, elle permet l'alimentation d'indicateurs qui serviront à les évaluer, ceci afin d'en faciliter la sélection. De plus, ce type de modélisation, traduisant l'ensemble des flux parcourant le processus, permet la mise en place d'outils d'optimisation mono ou multi critères. Enfin, la représentation multi-échelle proposée offre la possibilité de gérer l'ensemble des connaissances du projet.

Cette modélisation vise donc à :

- Établir les critères d'évaluation
- Évaluer, sélectionner la meilleure solution au regard des objectifs fixés
- Définir le périmètre de l'étude : quels sont les éléments à prendre en compte, jusqu'à quel niveau
- Mesurer le gain potentiel et le retour en conception par modification du processus ou du type de flux d'entrée
- Coordonner les acteurs : la question de la gestion des déchets est une responsabilité partagée entre les fournisseurs de matières premières, les utilisateurs industriels intermédiaires, les consommateurs, les collecteurs et les industriels du retraitement. L'enjeu majeur est d'avoir à la fois des activités de service de qualité (collecte, tri) mais aussi une maîtrise des procédés de production de matières secondaires et de leurs réutilisations.

3.2 QU'EST CE QU'UNE TRAJECTOIRE DE VALORISATION

Une trajectoire de valorisation est définie comme une option de valorisation d'un déchet. Ainsi, une trajectoire représente un ensemble d'étapes successives transformant un déchet en un produit. Théoriquement, l'ensemble des activités doit être représenté comme les transformations, les transports ou le stockage. En effet, chacune de

ces étapes peut avoir un fort impact sur l'évaluation finale de la trajectoire.

3.3 MODÉLISATION D'UNE TRAJECTOIRE PAR ÉLÉMENTS SPÉCIFIQUES

Afin d'offrir un cadre de modélisation, on propose de décomposer une trajectoire de valorisation selon trois échelles différentes. Chaque échelle constitue un niveau de description, de plus en plus détaillé. Nous avons choisi de créer les trois niveaux suivants :

- Le niveau « Configuration générique »
- Le niveau « Traitement générique »
- Le niveau « Opération unitaire »

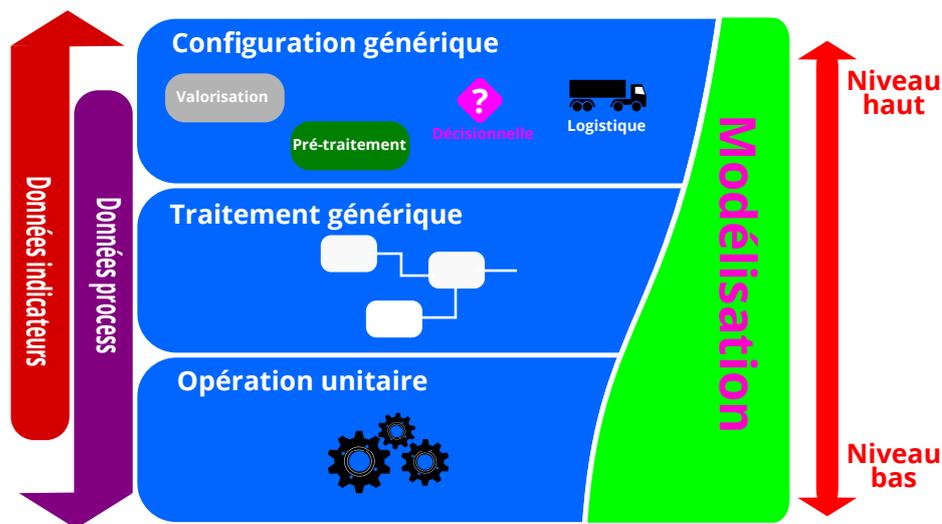


FIGURE 3.1- MODÉLISATION SELON PLUSIEURS NIVEAUX

Cette décomposition (Fig. 3.1¹) permet de faciliter la démarche de modélisation de la trajectoire. Ainsi, le passage d'un niveau supérieur à un niveau suivant se fait par un apport de données sur le processus modélisé. Par conséquent il traduit une plus grande connaissance de ce dernier. Le dernier niveau, « opération unitaire », permet une description fine du procédé. A contrario, dans le cas où le processus est mal connu du fait, par exemple, que certaines informations soient indisponibles, il est tout à fait possible de ne le décrire qu'à l'aide d'un niveau, garantissant ainsi la modélisation dans tous les cas. De ce fait, ces contraintes devront être prises en compte dans la réalisation d'un outil facilitant la génération de nouvelles trajectoires.

3.3.1 DESCRIPTION DES DIFFÉRENTS NIVEAUX DE MODÉLISATION

3.3.1.1 CONFIGURATION GÉNÉRIQUE

Nous proposons ici le niveau de description le plus haut, c'est-à-dire le plus général. Il contient quatre familles de processus, qui permettent de modéliser l'ensemble des activités de traitement :

- Logistique : regroupe les opérations propres au transport et stockage.
- Pré-traitement : ensemble de processus qui ne sont pas dans la catégorie de valorisation. Par exemple, les processus de désassemblage ou de nettoyage sont dans cette catégorie.
- Valorisation : ce sont les processus propres aux trajectoires de traitement des déchets.
- Décisionnel : ajoute des options dans les trajectoires selon des conditions à définir.

1. Images du camion et des rouages sous licence « Libre pour usage commercial » <https://pixabay.com/fr/engins-roue-dent%C3%A9e-mouvement-307380/>, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LKW_mit_Aufleger_aus_Zusatzzeichen_1048-14.svg

3.3. MODÉLISATION D'UNE TRAJECTOIRE PAR ÉLÉMENTS SPÉCIFIQUES

3.3.1.2 TRAITEMENT GÉNÉRIQUE

Ce niveau de description est le niveau intermédiaire entre la configuration générique et les opérations unitaires. Il permet une définition plus fine du processus sans entrer dans les détails des opérations. Par conséquent, on retrouvera des étapes propres à chacune des configurations génériques. Une illustration est proposée par la modélisation de la trajectoire de valorisation du pneu (Fig. 3.2).

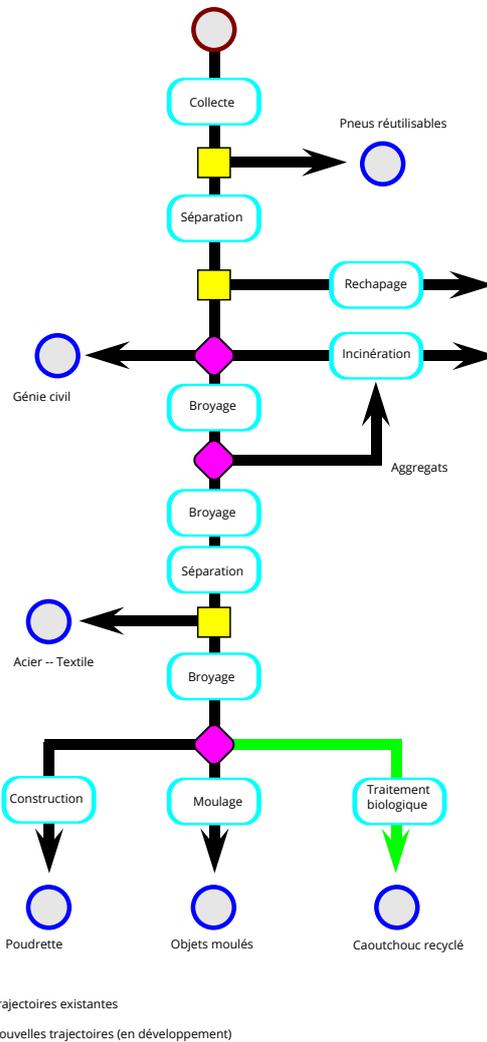


FIGURE 3.2- EXEMPLE DE MODÉLISATION AU NIVEAU TRAITEMENT GÉNÉRIQUE : VOIES DE VALORISATION DU PNEU

Logistique La partie logistique regroupe trois opérations propres au transport de matériel. Sont regroupés dans cette catégorie :

- La collecte : étape importante de la logistique inverse qui vise à regrouper dans les centres spécialisés l'ensemble des déchets.
- Le transport : étape de transport d'un point à un autre des déchets, produits intermédiaires et produits finis, comme du centre de tri à l'usine par exemple.
- Le stockage : stockage de l'ensemble des produits (en fin de vie, intermédiaires ou finaux) qui a pour objectif son entreposage dans de bonnes conditions afin de permettre une utilisation ultérieure.

Transformation de valorisation Les transformations primaires regroupent les étapes qui sont propres à la valorisation ou à défaut à l'élimination des déchets. Elles se distinguent par leur finalité :

- Valorisation matière : vise à récupérer la matière qui servira à la fabrication de nouveaux objets. L'objet usé est détruit.
- Valorisation énergétique : a pour objectif la production d'énergie à partir du déchet. Permet la récupération d'énergie mais la matière initiale est perdue.

CHAPITRE 3. MODÉLISATION DES TRAJECTOIRES DE VALORISATION DES DÉCHETS

- Valorisation de type cogénération : combine de type de valorisation comme la valorisation matière et énergétique. Durant la même opération, la matière est valorisée tout en produisant un excédant énergétique.
- Valorisation chimique : procédé qui permet la récupération d'un ou plusieurs composés chimiques. Par exemple les solvants utilisés en industrie.
- Valorisation fonctionnelle : ensemble de procédés qui restaurent l'objet usé, afin de lui permettre de retrouver sa fonction initiale.
- Stockage ultime : vise à stocker les déchets dans les meilleures conditions environnementales possibles. Il ne s'agit plus ici de valorisation mais d'élimination du déchet. Il y a perte totale de la matière ou du moins elle reste inutilisable.

Pré-Traitement Les pré-traitements regroupent les processus qui sont indispensables à la description des trajectoires mais qui ne s'inscrivent pas dans les traitements de valorisation.

- Pré-traitement : étape initiale d'un processus par exemple le nettoyage.
- Désassemblage : étape qui vise à déconstruire le déchet ou à le décomposer.
- Transformation primaire : ensemble de procédés modifiant l'élément traité mais qui ne sont pas du désassemblage.

Décisionnelle Ces processus regroupent les étapes qui n'affectent pas le déchet mais qui modifient ses trajectoires de valorisation.

- Sélection : étape où les déchets sont physiquement séparés en fonction de certains critères. Par exemple le tri constitue une étape de sélection.
- Contrôle : procédé qui permet de vérifier qu'un traitement a bien été réalisé.

3.3.1.3 OPÉRATIONS UNITAIRES

Le niveau opération unitaire est celui qui décrit le plus finement la trajectoire de valorisation. À ce niveau, cette dernière est représentée par un ensemble d'étape unitaire décrivant la succession des opérations à réaliser afin d'obtenir la valorisation souhaitée. À chaque opération correspond un équipement spécifique, comme l'utilisation d'un appareil. Chaque opération est décrite à l'aide de boîtes grises (Fig.3.3). Ainsi, l'ensemble des flux, matières ou énergétiques, est détaillé. Ceci permet la réalisation de bilans sur l'ensemble de la trajectoire qui serviront à alimenter les indicateurs.

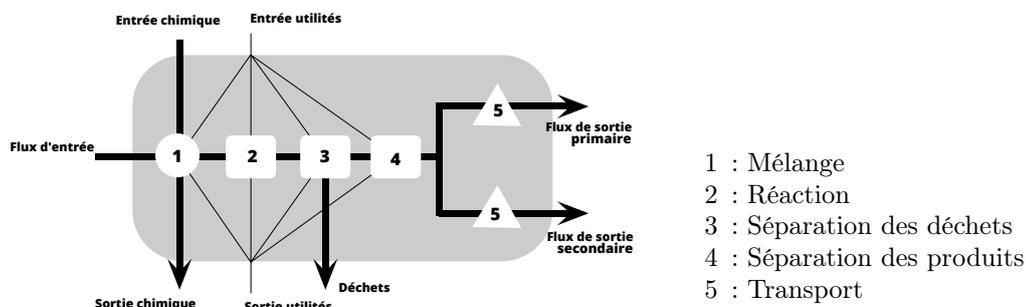


FIGURE 3.3- DESCRIPTION D'UNE BOÎTE GRISE UTILISÉE AU NIVEAU DES OPÉRATIONS UNITAIRES

3.4 MODÉLISATION D'UNE TRAJECTOIRE PAR ÉLÉMENTS CONCEPTUELS

Le cadre de modélisation qui vient d'être présenté a l'avantage de nommer les éléments et de les intégrer dans une catégorie. Cependant, il est possible de conceptualiser l'ensemble afin de créer un cadre de modélisation plus simple et plus flexible. En effet, une première conceptualisation pourrait être de créer uniquement deux catégories d'éléments dans ce nouveau cadre : les niveaux et les éléments ou blocs indivisibles (comme les boîtes grises dans le premier cadre). Néanmoins, cette première approche est limitative puisqu'elle suppose que l'ensemble des éléments constituant la trajectoire est connu au même niveau. Par conséquent, nous proposons ici, un second cadre de modélisation comportant des blocs et des systèmes (Fig. 3.4).

3.4. MODÉLISATION D'UNE TRAJECTOIRE PAR ÉLÉMENTS CONCEPTUELS

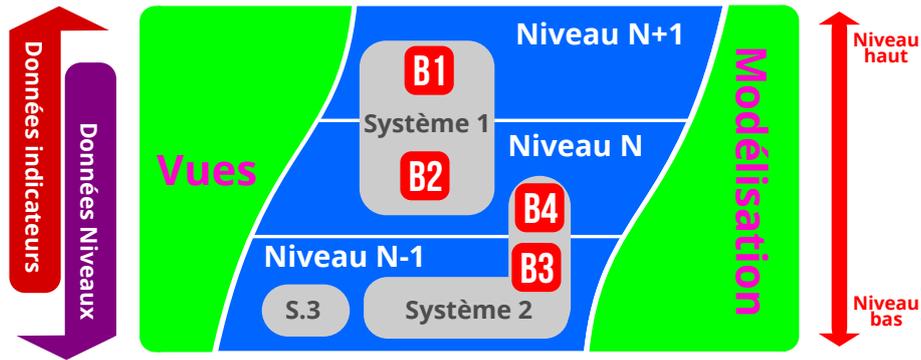


FIGURE 3.4- MODÉLISATION SOUS PLUSIEURS NIVEAUX GÉNÉRIQUES

3.4.1 LES BLOCS

Les blocs sont, comme expliqués antérieurement, des éléments de la trajectoire non décomposables (c'est-à-dire dont le mécanisme interne n'est pas détaillé dans la trajectoire). Ces blocs peuvent se positionner à n'importe quel niveau de description. Ainsi, il est possible de modéliser une trajectoire comportant ces blocs au niveau le plus haut de description. Enfin, d'après la description des boîtes grises, ces dernières sont elles-mêmes des blocs très structurés comportant des entrées et sorties spécifiques (nommées) et des procédés internes définies. Or, nous proposons ici que la description interne des blocs soit aussi simple et flexible que l'ensemble. Ainsi, un bloc est défini par des entrées et sorties détaillées lors de la description du bloc, auxquelles il faut ajouter des opérations reliant ces entrées et ces sorties (Fig.3.5). Ces opérations modélisent des contraintes entre les entrées et sorties du bloc.

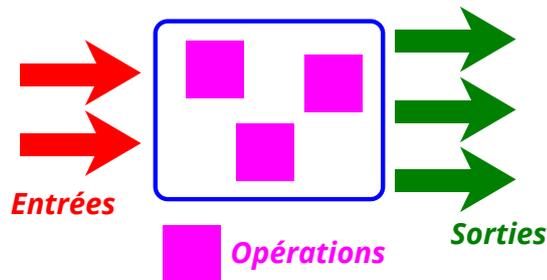


FIGURE 3.5- EXEMPLE DE LA REPRÉSENTATION D'UN BLOC

3.4.2 LES SYSTÈMES

Les systèmes, constituent des regroupements de blocs ou d'autres systèmes (Fig.3.6). Ils ne peuvent pas être au plus bas niveau, car ce dernier est réservé aux blocs. Ils permettent de modéliser deux notions. La première est que les systèmes permettent de voir un ensemble de procédés comme un unique élément à la manière d'un bloc. En d'autres termes, ils permettent d'avoir une vision de plus haut niveau de la trajectoire. La seconde est le fait qu'il est possible de créer deux systèmes de même niveau qui se partagent des éléments. Ceci à l'avantage par la suite de considérer une trajectoire non seulement sous plusieurs niveaux, mais aussi sous plusieurs vues.

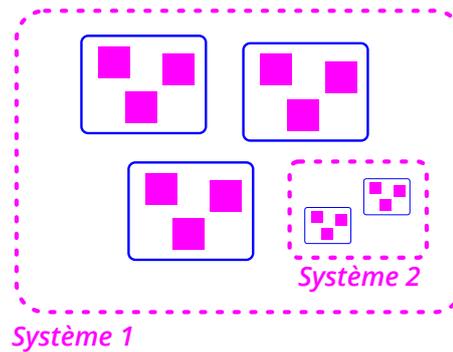


FIGURE 3.6- EXEMPLE DE LA REPRÉSENTATION DE DIFFÉRENTS NIVEAUX GRÂCE AUX SYSTÈMES

3.4.3 DIMENSION DE DESCRIPTION : NIVEAUX ET VUES

Contrairement au premier cadre de modélisation, une autre dimension s'ajoute à celle des niveaux avec la dimension « vue ». Ainsi, la dimension « niveau » permet de définir des niveaux de description (granularité) comme les trois niveaux choisis dans le premier cadre. Cependant, n'étant pas définis, ils peuvent se décomposer en un nombre important de niveaux selon le besoin de la description. La seconde dimension ajoutée, la vue, permet de regrouper un ensemble d'éléments selon une certaine logique (Fig.3.7). Par exemple, il est possible de regrouper dans une description tous les éléments de la logistique (indépendamment de l'objet traité) ou de regrouper tous les éléments appartenant à une même société. Ainsi, suivant notre exemple il y a deux vues : la vue *logistique* et la vue *société*. L'intérêt de regrouper les éléments permet d'inclure des points de vue dans la modélisation et permet de définir des ensembles (considérés comme un tout) qui sont pertinents lors de la phase d'évaluation. Ainsi, il est possible de regrouper sous une même vue, tous les éléments liés aux transports ou les sites d'un certain type.

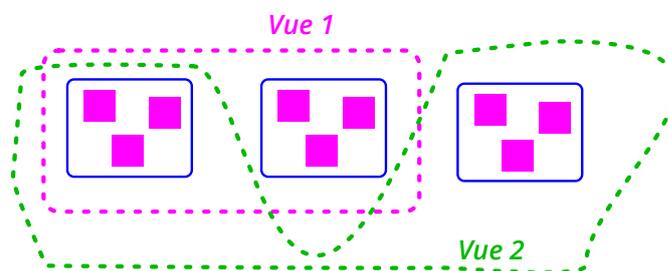


FIGURE 3.7- EXEMPLE DE LA REPRÉSENTATION DE DIFFÉRENTES VUES

3.4.4 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DU SECOND CADRE DE MODÉLISATION

Les principaux avantages du second cadre ont été décrits lors de la présentation de ce dernier. Ainsi, il ne comporte que deux éléments génériques permettant de décrire une trajectoire sous plusieurs niveaux qui sont les blocs et les systèmes. Une modélisation peut comporter autant de niveaux que nécessaires. De plus, il autorise de regrouper des éléments décrits à des niveaux différents, permettant à un élément d'être regroupé à des systèmes différents ajoutant la dimension « vue » au cadre. Cependant, et contrairement au premier cadre, la grande flexibilité proposée suppose qu'une description des éléments peut être nécessaire à la compréhension de la modélisation de la trajectoire, c'est-à-dire expliquer à quoi correspond cet élément (ce qui est implicite dans le premier cadre proposé). Ce second cadre, du fait de ses avantages, sera utilisé par la suite lors de la création d'un outil de modélisation de trajectoire.

3.5 CHOIX DES INDICATEURS ET MODES DE CALCUL

En plus de la connaissance des différentes possibilités qui s'offrent en vue d'une valorisation des déchets, il est pertinent de pouvoir évaluer les trajectoires en fonction d'indicateurs significatifs. Cette modélisation s'inscrivant dans une optique de développement durable, trois principaux critères d'évaluation ont été sélectionnés plus un

spécifique au domaine de la valorisation, qui est un indicateur qualitatif. En effet, les industries de transformation de la matière et de l'énergie ont aujourd'hui admis le principe des 3P (Peuple, Profit, Planète) qui stipule que le concept de développement durable passe obligatoirement par des progrès économiques, environnementaux et sociaux [233] [234]. Il est donc primordial de choisir des indicateurs qui soient à la fois pertinents pour une politique soutenable mais aussi qui puissent satisfaire l'ensemble des acteurs concernés et prendre en compte la mesure de la performance sur les trois dimensions précédentes [130].

Le développement durable est défini par la commission européenne de la manière suivante [84] :

« Accroissement de l'activité économique qui se réalise dans le respect de l'environnement et l'utilisation harmonieuse des ressources naturelles de façon à ne pas compromettre la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins. Par opposition, un développement non durable est caractérisé par la destruction de ressources naturelles, qui se répercute négativement sur les potentialités de développement à long terme. »

De même, un trop grand nombre d'indicateurs complique la prise de décision et leur degré d'importance varie selon l'évaluateur. Par exemple, selon Olsthoorn, le consommateur final veut uniquement savoir si le produit a un faible impact environnemental lors de sa prise de décision [182].

Ce dernier point implique une prise de décision en soi pour définir ce qui est environnementalement acceptable et comment calculer cette valeur et de ce fait, trouver un indicateur simple. Ainsi, Tyteca, qui souligne de plus la difficulté d'accès à des informations homogènes, propose d'homogénéiser l'information et de la rassembler même si cela suppose une perte d'information [224].

Plusieurs indicateurs ont été créés ou choisis pour les différentes tâches de traitements. Par exemple, Noss propose un indicateur environnemental tenant compte de la biodiversité [178]. De même l'analyse des flux énergétiques peut constituer un bon indicateur pour évaluer la performance d'un procédé [27].

Concernant la valorisation des déchets, les auteurs essaient de modéliser les procédés et leurs résultats. Ainsi, Villalba [228] propose une méthode d'estimation de désassemblage qui se base sur la viabilité économique de désassemblage d'une partie. Cet indicateur est basé sur la capacité d'un élément à être recyclé tout en gardant ses propriétés. De la même manière Kuo définit un index de valorisation traduisant la même idée [136].

Comme le souligne Villalba, ce type d'indicateur est utile dans la recherche de trajectoire de valorisation car il peut permettre de déterminer le pourcentage de recyclabilité ou encore d'optimiser les stratégies de recyclage [228].

Néanmoins, d'un point de vue général, la pertinence des voies de valorisation ne peut être définie que si ces dernières sont comparées à d'autres voies qui servent de référentiels [13]. Par conséquent, les indicateurs permettent de faire des comparaisons entre différentes alternatives, mais, pris dans l'absolu, la valeur d'un indicateur n'a rarement de sens.

Les indicateurs retenus sont par conséquent les suivants :

- Indicateurs économiques : ils visent à informer si la trajectoire est viable d'un point de vue économique. En effet, comme toute industrie, un procédé de valorisation doit permettre d'une part d'être soutenable d'un point de vue économique (sans bénéfice sur les capitaux investis) et d'autre part de permettre de réaliser des profits.
- Indicateurs environnementaux : ils permettent de mettre en évidence l'efficacité du processus sur le plan écologique. Plus précisément, l'industriel souhaitera d'une part être en conformité avec la législation en vigueur en matière de rejets ou plus globalement de l'impact que produit son activité sur l'environnement, mais aussi cela peut permettre à l'entreprise d'améliorer son image et par conséquent de créer une valeur ajoutée sur l'ensemble de ces produits.
- Indicateurs sociaux : ils ont pour objectif de quantifier l'impact sur les qualités de vie, l'emploi des travailleurs etc.
- Indicateurs de recyclage : ils évaluent la voie vis-à-vis d'une politique de déchet soutenable en fonction des éléments considérés comme la perte de matière première non renouvelable, la consommation d'énergie nécessaire à leur création. Cet indicateur qui se veut être une qualification de la trajectoire est un complément aux trois autres. Ainsi, il permet de hiérarchiser les trajectoires et peut servir à trancher sur un choix faisant intervenir des trajectoires aux évaluations (économiques, sociales et environnementales) proches.

Parmi les trois types d'indicateurs quantitatifs qui évaluent la trajectoire, plusieurs indicateurs ont été sélectionnés.

3.5.1 INDICATEURS ÉCONOMIQUES

Il est possible de distinguer deux familles parmi les indicateurs économiques. Il y a ceux qui traduisent le fonctionnement de l'entreprise, comme le coût des matières premières, le chiffre d'affaires et ceux qui traduisent

la viabilité économique du projet. Les premiers permettent d'avoir des informations sur le fonctionnement de l'entreprise en guise de volume de consommation et de production et par conséquent d'évaluer la performance de l'entreprise au regard de la tâche de traitement qu'elle doit accomplir. La seconde permet quant à elle de montrer si économiquement le projet est intéressant c'est-à-dire s'il représente un investissement rentable.

Ainsi, certains indicateurs pourront être décrits au niveau unitaire du procédé, comme l'investissement. Cependant, d'autres indicateurs n'ont de sens que sur l'ensemble du projet comme la VAN (valeur actuelle nette, définie plus tard).

Un projet d'investissement peut être considéré comme une entité indépendante [125]. Du point de vue uniquement économique, l'évaluation d'un projet doit se faire suivant les meilleures projections possibles sous différents cas de figures [125].

Un aspect important de ce type de projet est le prix du produit issu d'un processus de valorisation. Ainsi, si le produit obtenu vient en remplacement d'un autre, son prix devra être, à qualité identique, très proche. Cependant, la valeur d'un produit peut également être déterminée par sa qualité, la qualité du service proposé ainsi que son image [235]. Par conséquent, un prix plus cher que celui habituellement pratiqué sur le marché pourra être possible car l'image du produit provenant de la valorisation peut représenter un plus. Dans le cas où le produit est totalement nouveau, son prix est difficile à définir. Si le prix est trop important, le volume de vente risque d'être trop faible pour couvrir les frais généraux. A contrario, un prix trop faible n'assure pas de couvrir les frais de production [60]. La concurrence joue un rôle important dans l'estimation d'un prix. Elle fait que lorsqu'un produit entre dans le marché, tôt ou tard la concurrence va proposer un équivalent et donc concurrencer le nouveau produit. Un prix juste permet de ralentir ce phénomène [60]. Enfin, la demande, ou d'une manière plus générale le marché, reste le principal juge du bien fondé d'un projet. En effet, si le volume de vente est trop faible, même un bon produit ne sera pas intéressant à réaliser. Il existe des méthodes pour évaluer le volume de vente d'un nouveau produit, par exemple le MicroTest [166]. Pour finir, le prix d'un produit est en relation avec les coûts des transformations utilisées et des matières [151]. De ce fait et étant donné que le prix de vente d'un produit intervient dans les calculs des indicateurs économiques, il sera nécessaire de trouver un moyen de l'évaluer : par comparaison avec des produits similaires ou par étude de marché par exemple.

3.5.1.1 INDICATEURS ANNUELS

Les indicateurs annuels permettent de qualifier le fonctionnement de l'entreprise en termes de flux monétaires. Ils permettent ainsi de connaître les dépenses réalisées par l'entreprise, son chiffre d'affaires ou encore de manière indirecte le nombre de personnes travaillant dans l'entreprise.

Par conséquent, on calculera le cash-flow. En effet, l'analyse d'un projet implique la prise en considération des dépenses et des entrées ainsi que de leurs différences, le free cash flow annuel (ou Flux de trésorerie disponible²) [125].

3.5.1.2 INDICATEURS PROJETS (SUR L'ENSEMBLE DE LA VIE DE L'ACTIVITÉ)

Les indicateurs globaux du projet soulignent la durabilité économique du projet dans le temps et déterminent si investir dans ce dernier sera ou non intéressant. Ainsi, on distingue plusieurs indicateurs :

- L'investissement initial : il représente la quantité de fond qu'il faut lever pour permettre la réalisation du projet, de la conception jusqu'à la mise en fonctionnement, et comprend les sommes nécessaires au démarrage de l'activité : le fond de roulement et le capital fixe [125].
- La valeur actuelle nette : elle correspond à la valeur supplémentaire générée par l'activité. La VAN traduit l'enrichissement de l'entreprise. Par conséquent, une VAN positive est le premier critère d'acceptation d'un projet [16].
- Le taux de rentabilité interne (TRI) : il s'agit du taux d'actualisation qui permet d'obtenir la valeur actuelle nette à zéro à la date finale de fin du projet. Le TRI représente le taux de valorisation du capital engagé. Néanmoins, cette hypothèse ne prend pas en compte le réemploi des fonds, c'est-à-dire elle suppose qu'il n'y en a pas [16]. Selon le même auteur cela peut conduire à une surévaluation de la rentabilité du projet.
- Le délai de récupération du capital : c'est le délai à partir duquel la somme des flux monétaires entrant correspond à l'ensemble des capitaux investis. Le DRC ne permet de comparer que deux projets ayant la même durée de vie économique. De plus le critère ignore les flux financiers une fois que le capital investi a été récupéré. Par conséquent c'est un critère qui doit être toujours utilisé en association avec d'autres [16].

2. http://www.lesechos.fr/finance-marches/vernimmen/definition_flux-de-tresorerie-disponible.html

3.5.2 INDICATEURS ENVIRONNEMENTAUX

Les indicateurs environnementaux peuvent viser dans un premier temps à vérifier que le processus respecte les normes et lois en vigueur sur le plan environnemental et dans un second temps à souligner la capacité de ce dernier à s'inscrire dans une politique environnementale dit soutenable. Cette dernière traduit la volonté de réduire l'impact de l'activité humaine sur l'environnement ce qui à terme permet d'améliorer la qualité de vie des individus en proximités des usines et, dans un second temps, de garantir aux générations futures à satisfaire leurs besoins propres. Ainsi, l'analyse du cycle de vie fait partie de l'évaluation quantitative de l'indicateur environnemental [234].

Généralement, les impacts sur le milieu extérieur se traduisent par l'émission de flux de matière et énergétique ou par leur consommation. Ainsi, l'évaluation écologique prend en compte le type de valorisation, les caractéristiques du processus et l'innovation technologique [130]. Il existe un large éventail de méthodes réalisant ce type d'analyse. Cependant, les indicateurs retenus pour ce travail sont l'empreinte carbone et la méthode Eco-Cost, car ils permettent de faire une estimation simple de ces impacts.

3.5.2.1 EMPREINTE CARBONE

L'empreinte carbone traduit l'émission en CO_2 par l'ensemble de l'activité considérée. Ce gaz constitue en effet l'un des principaux gaz à effet de serre. Cet indicateur est pertinent mais possède des limites. Ainsi, dans le cas du recyclage, la perte de matière n'est pas inclus [232]. De plus, l'empreinte CO_2 ne prend pas en compte la présence d'éléments toxiques [234]. Il peut donc être utilisé tel quel pour évaluer les émissions uniquement sous certaines conditions. Pour donner un exemple, la combustion de bois issus de forêts bien gérées a un bilan nul sur l'équilibre carbone.

3.5.2.2 Eco-Cost

Le second indicateur retenu, Eco-cost, est une alternative à la traditionnelle analyse du cycle de vie (ACV). L'ACV est en effet souvent considérée comme une analyse complexe et relativement difficile [232]. La méthode l'Eco-Cost permet de réaliser de manière simple une analyse de cycle de vie [232]. Contrairement à l'analyse de cycle de vie traditionnelle qui tente de quantifier l'ensemble des émissions produites par l'activité et par conséquent obtient une liste d'éléments émis, l'Eco-cost se base sur la prévention des dommages environnementaux, c'est-à-dire sur les investissements en équipements écologiques qu'il faudrait réaliser pour compenser l'effet de l'activité [232] [234] [233].

Cette méthode se compose de plusieurs étapes. Comme l'ACV, on retrouvera une étape préliminaire d'inventaire des flux entrants et sortants (Life Cycle Inventory) de l'activité ainsi que les émissions dégagées [234]. Néanmoins, les étapes suivantes se révèlent beaucoup plus simples. Il est donc possible de décomposer l'ensemble de la méthode en 5 étapes :

- Définir les limites et objectifs de l'analyse.
- Établir des unités fonctionnels dans le processus étudié.
- Quantifier les flux entrants et sortants.
- Entrer les données dans la feuille de calcul.
- Interpréter les résultats [232].

Par conséquent, cette méthode est assez complète, car basée sur The virtual eco-cost 99 qui tient compte à la fois de la perte de matière première, de la consommation énergétique en rapport avec une production écologique de cette dernière et des dégâts causés par l'émission d'éléments toxiques [235]. Elle permet de montrer qu'elle est la meilleure stratégie à adopter en terme de conception afin d'atteindre un développement soutenable [235].

A partir de cet indicateur, deux autres éléments permettent d'apporter des informations pertinentes quant aux choix d'une stratégie de valorisation intéressante :

- Eco-cost Value Ratio, EVR [235]
- L'éco-efficiency

L'EVR est un indicateur représentant le rapport entre l'Eco-cost et la valeur. L'idée étant de combiner la chaîne de valeur de Porter avec la chaîne de l'analyse de cycle de vie [233] [235]. Ainsi, l'activité est soutenable uniquement si l'EVR est inférieur à 1, car les gains sont supérieurs à l'Eco-cost.

Le second indicateur est l'éco-efficiency qui est définie comme étant $Eco\text{-}efficiency = 1 - EVR$ et traduit la faisabilité écologique et économique du projet [235].

3.5.3 INDICATEURS SOCIAUX

Les indicateurs sociaux viennent compléter les indicateurs plus traditionnels comme les indicateurs économiques et les indicateurs environnementaux. Ils ont pour vocation d'informer des conditions sociales de réalisation de l'activité. Il constitue une partie importante de l'objectif de la politique économique (création d'emplois). Cependant, la création d'activités n'a pas cet objectif par nature [197]. En effet, le même auteur souligne que la création d'activité a pour objectifs la création de la valeur et la satisfaction d'un besoin et non pas la création d'emplois. De même, le page internet *Facil éco* rappelle les objectifs d'une entreprise selon trois points de vue [87] :

- L'approche des économistes : la maximisation du profit
- Le regard des gestionnaires : maximisation du profit ou de la taille de l'entreprise ?
- Le point de vue de la société : et si les objectifs des entreprises devaient répondre aux attentes de la société ?

Le troisième point de vue, qui met en avant l'aspect social, ne nie néanmoins pas l'objectif économique :

« Ainsi, certaines grandes entreprises suivent, en parallèle de leur objectif économique, des objectifs sociaux : une politique sociale généreuse pour ses salariés, la protection de l'environnement, la réduction des inégalités,...

Par conséquent, la création d'emplois n'est pas une cause de la création d'activités, mais plutôt une conséquence. Seul le cas de l'auto-entrepreneuriat semble faire exception [104] [212].

Ce type d'indicateurs est très complexe à mettre en place de par le fait du manque d'information et de la subjectivité de la question, par exemple définir si les conditions de vies des employés sont agréables ou non. La mesure sociale peut prendre en compte l'engagement de l'entreprise, la satisfaction du client et la performance des employés [130]. Par conséquent, compte tenu du fait que l'évaluation de la nouvelle trajectoire se fera en pré-projet, un nombre important d'éléments permettant ce type d'évaluation sont indisponibles. Ainsi, il est par exemple impossible d'estimer le bien être au travail des employés à ce niveau de l'étude. Il est donc nécessaire de réduire l'étendue de l'étude sociale afin qu'elle puisse être réalisée. Trois indicateurs ont été sélectionnés. Ces indicateurs représentent le nombre d'emplois générés par la création de l'activité que l'on peut diviser en trois groupes : directs, indirects et induits.

Les méthodes utilisées pour réaliser ces estimations se basent sur celles utilisées par les institutions ou les entreprises afin de quantifier une partie de l'impact social lié à l'activité d'étude. Ainsi, par exemple la commission européenne référence une liste de méthodes utilisées pour l'estimation de l'impact social [85]. De même l'Insee décrit une méthode d'évaluation de ce même impact dans [119]. Une étude des Voies navigables de France présente deux méthodes pour estimer le nombre d'emplois générés par une nouvelle activité. La première est basée sur l'utilisation des statistiques nationales afin de déterminer le ratio entre le nombre d'emplois et l'investissement du projet. La seconde se base sur la même idée mais en s'appuyant sur les données de chantiers similaires [230]. Enfin, le document [86] explique les bonnes pratiques dans l'estimation ou la mesure de la création d'emplois.

Plusieurs études de ce type ont été réalisées dans différents secteurs d'activité. Le document des Voies Navigables de France donne un bon exemple de ce type d'estimation réalisée à l'aide de la méthode décrite au paragraphe précédent [230]. Une autre étude intéressante est celle réalisée par l'Insee concernant l'impact social évalué par l'entreprise Nestlé dans la région Paca [121]. Ici aussi, la méthode de calcul est expliquée et peut servir de base à d'autres travaux. L'impact est généralisé à tout un secteur économique, en l'occurrence le secteur de l'aéronautique dans le bassin Toulousain [117]. Les auteurs du document estiment le nombre d'emplois directs, indirects et induits générés par ce secteur.

Néanmoins, les méthodes proposées pour l'estimation des indicateurs sociaux sont souvent limitées lorsque les connaissances sur une trajectoire sont faibles, comme lors du développement d'un nouveau projet. Il est donc intéressant de développer des méthodes plus simples d'estimation, et ce même si elles donnent des résultats avec une plus grande marge d'erreur.

3.5.3.1 NOMBRE D'EMPLOIS DIRECTS

Les emplois créés directement représentent l'ensemble des postes que crée l'activité. La VNF (Voies navigables de France) en donne la définition suivante :

Ce sont, par exemple pour la phase des travaux, les emplois créés ou confortés par les entreprises impliquées dans le chantier [230].

Ces emplois sont consacrés uniquement à l'activité en question et comprennent les emplois productifs ainsi que toute la partie support et administrative.

- Emplois productifs : emplois créant de la valeur par leurs activités. Par exemple : opérateurs, agents de maîtrise.
- Emplois de support : concernent les emplois ne créant pas de valeurs mais permettant la réalisation de la partie valorisante. Ainsi, la logistique, la gestion de stock font partie de ce type d'emploi.
- Emplois administratifs : l'ensemble des activités concernant le fonctionnement de l'entreprise mais ne générant pas de valeur directement.

3.5.3.2 NOMBRE D'EMPLOIS INDIRECTS

Le nombre d'emplois indirects correspond aux emplois créés ou soutenus par l'activité mais qui n'appartiennent pas à la classe des emplois directs. Plus concrètement, les emplois indirects représentent les salariés des entreprises sous-traitantes de l'activité qui sont directement concernées :

Ce sont les emplois créés ou confortés destinés à réaliser les commandes de l'activité créée (ex : fourniture de béton pour les ouvrages) [230].

3.5.3.3 NOMBRE D'EMPLOIS INDUITS

Le nombre d'emplois induits est une valeur très approximative qui permet d'estimer les emplois générés par l'activité dans les zones d'implantation de cette dernière. Ainsi, ce nombre correspond à l'impact des emplois directs et indirects sur l'économie locale et par conséquent sur les emplois locaux. Par exemple, si un employé vit avec sa famille dans une zone proche de son lieu d'emploi, l'ensemble des membres de la famille vont consommer localement ce qui impactera l'économie locale. Dans la littérature, il est possible de trouver différentes formulations de la définition traduisant ou illustrant cette notion. Par exemple, pour l'Insee :

Les retombées induites sont celles liées aux dépenses courantes de consommation des ménages des employés de l'activité, des fournisseurs et sous-traitants sur leur lieu de résidence [119] [121].

ou encore, la VNF donne cette définition :

Ce sont les emplois créés ou confortés par la demande en consommation des salariés comptés dans les emplois directs et indirects. (ex : la restauration, l'hôtellerie, commerce en général...) [230].

3.5.4 INDICATEURS DE RECYCLAGE

L'indicateur de recyclage vise principalement à qualifier le processus de valorisation des déchets. En effet, la directive officielle, [181], propose une hiérarchie dans les types de valorisation allant du plus intéressant du point de vue économie soutenable au moins intéressant. La hiérarchie est la suivante :

- Prévention
- Préparation en vue du réemploi
- Recyclage
- Autre valorisation comme la valorisation énergétique
- Élimination

L'optique principale reste en effet, en plus d'un gain économique possible, de passer d'un modèle linéaire : *extraire* → *construire* → *consommer* → *jeter*

à un modèle circulaire (Fig. 3.8) :

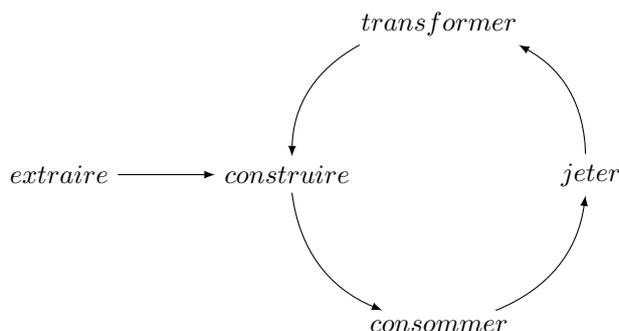


FIGURE 3.8- MODÈLE CIRCULAIRE

CHAPITRE 3. MODÉLISATION DES TRAJECTOIRES DE VALORISATION DES DÉCHETS

Il est possible de faire l'analogie entre les produits de consommation et les produits de service. Ainsi les produits de consommation sont intégrés dans un cycle de vie qui permet leur régénération. Le « berceau au berceau » (cradle to cradle) représente le même état d'esprit pour les produits de service [137]. Par conséquent, le processus d'innovation et de création prennent en compte une pensée circulaire au lieu d'une pensée linéaire [137].

Cependant, la directive [181] souligne plusieurs points importants. Bien que préconisant la hiérarchie décrite ci-dessus, elle ajoute que, dans certains cas, cette hiérarchie ne peut être respectée à cause de problème de faisabilité. De plus, un autre aspect important à prendre en considération est le principe d'auto suffisance et de proximité, qui préconise une gestion locale.

Enfin, même si le recyclage concerne 60 % des déchets et un tiers des produits manufacturiers comme l'explique l'article [57], tout procédé de valorisation doit conserver l'idée qu'il s'agit d'un moyen de réduire les déchets par un procédé les transformant en nouveaux biens et non pas une activité économique classique. Par exemple, l'article [98] met en évidence que les déchets prennent de plus en plus une valeur marchande. Il donne l'exemple de la Suède qui suite à un développement important de ces unités de valorisation et en particulier de la filière de valorisation énergétique, ne met en décharge que 1 % de ces ordures ménagères. Cependant, à cause d'un développement trop important des unités d'incinération de déchets, ces dernières sont obligées d'importer des déchets d'autres pays afin de faire fonctionner leurs usines.

La directive officielle [181] liste les étapes d'éliminations :

- D1 Dépôt sur ou dans le sol (par exemple, mise en décharge)
- D2 Traitement en milieu terrestre (par exemple, biodégradation de déchets liquides ou de boues dans les sols)
- D3 Injection en profondeur (par exemple, injection de déchets pompables dans des puits, des dômes de sel ou des failles géologiques naturelles)
- D4 Lagunage (par exemple, déversement de déchets liquides ou de boues dans des puits, des étangs ou des bassins)
- D5 Mise en décharge spécialement aménagée (par exemple, placement dans des alvéoles étanches séparées, recouvertes et isolées les unes des autres et de l'environnement)
- D6 Rejet dans le milieu aquatique, sauf l'immersion
- D7 Immersion, y compris enfouissement dans le sous-sol marin
- D8 Traitement biologique, aboutissant à des composés ou à des mélanges qui sont éliminés selon un des procédés numérotés D1 à D12
- D9 Traitement physico-chimique, aboutissant à des composés ou à des mélanges qui sont éliminés selon l'un des procédés numérotés D1 à D12 (par exemple, évaporation, séchage, calcination)
- D10 Incinération à terre
- D11 Incinération en mer
- D12 Stockage permanent (par exemple, placement de conteneurs dans une mine)
- D13 Regroupement ou mélange préalablement à l'une des opérations numérotées D1 à D12
- D14 Reconditionnement préalablement à l'une des opérations numérotées D1 à D13
- D15 Stockage préalablement à l'une des opérations numérotées D1 à D14 (à l'exclusion du stockage temporaire, avant collecte, sur le site de production des déchets)

L'ensemble des étapes de valorisations selon cette même directive sont :

- R 1 Utilisation principale comme combustible ou autre moyen de produire de l'énergie
- R 2 Récupération ou régénération des solvants
- R 3 Recyclage ou récupération des substances organiques qui ne sont pas utilisées comme solvants (y compris les opérations de compostage et autres transformations biologiques)
- R 4 Recyclage ou récupération des métaux et des composés métalliques
- R 5 Recyclage ou récupération d'autres matières inorganiques
- R 6 Régénération des acides ou des bases
- R 7 Récupération des produits servant à capter les polluants
- R 8 Récupération des produits provenant des catalyseurs
- R 9 Régénération ou autres réemplois des huiles
- R 10 Épandage sur le sol au profit de l'agriculture ou de l'écologie
- R 11 Utilisation de déchets résiduels obtenus à partir de l'une des opérations numérotées R 1 à R 10
- R 12 Échange de déchets en vue de les soumettre à l'une des opérations numérotées R 1 à R 11
- R 13 Stockage de déchets préalablement à l'une des opérations numérotées R 1 à R 12 (à l'exclusion du stockage temporaire, avant collecte, sur le site de production des déchets)

Par conséquent, cette liste permet de hiérarchiser les trajectoires de valorisation en les qualifiant. Ainsi, il ne constitue pas un indicateur similaire aux trois autres, mais permet de départager des trajectoires possédant des évaluations proches en sélectionnant celle dont l'activité s'inscrit le plus dans le développement durable. Il constitue donc un outil complémentaire de prise de décision.

3.6 MODE DE CALCUL

3.6.1 PARTIE ÉCONOMIQUE

La méthode d'estimation des coûts se décompose en deux parties. La première se concentre sur l'estimation de l'investissement initial. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées selon les données initialement disponibles. Par exemple la méthode Pré-Estime décrite dans l'ouvrage de Chauvel [46] permet de réaliser une estimation d'une activité en connaissant les différents équipements qui la compose. La seconde partie est une analyse financière du projet dans son ensemble. Plus précisément, les calculs prendront en compte l'investissement initial mais aussi l'ensemble des flux financiers durant la durée de vie théorique du projet. Cette partie vise à déterminer l'intérêt économique du projet. Le lecteur pourra trouver plus de détails dans les différents ouvrages suivants : [197], [18] et [46] et trouvera un exemple de calcul d'investissement dans [248]. Un autre exemple pourtant sur l'évaluation économique de la filière de la biomasse forestière destinée aux projets de chaufferies est présenté dans [192].

La seconde partie se préoccupe du maintien en fonctionnement et de la génération de la valeur. Le profit se calcule par la différence des recettes et des coûts. Par exemple, Ferrer cite The US EPA (1991) où la formule suivante est utilisée pour évaluer le profit lors de la génération de chaleur par combustion de pneus usés [89] :

$$\text{Profit} = \text{frais de prise en charge} + \text{Revenus} - \text{Coût de production} - \text{Transport} - \text{Traitement} \quad (3.1)$$

À cette fin, plusieurs calculs intermédiaires sont nécessaires pour évaluer les indicateurs économiques choisis (VAN, TRI et DRC), par exemple en déterminant les investissements, le chiffre d'affaires ou encore les frais opératoires. Une manière de réaliser ces derniers et se basant sur [46] est présentée en annexe (Annexe A).

3.6.2 DONNÉES ÉCONOMIQUES

Afin de réaliser une estimation des coûts d'un processus, il est nécessaire de connaître certaines données. Dans ce qui suit, et à titre d'exemple, nous montrons les éléments à prendre en compte lors de l'évaluation économique de la partie transport, ceci afin de montrer la complexité et la quantité d'informations indispensables. Naturellement, ces éléments doivent être récupérés pour l'ensemble des composants de la modélisation, comme l'équipement industriel ou les consommables.

De manière générale la logistique a un fort impact sur l'ensemble des critères d'évaluation de la trajectoire. Ainsi, la volonté politique croissante de favoriser le recyclage des déchets nécessite d'augmenter les concentrations dans les lieux de traitement et par conséquent contribue à une augmentation du nombre de transports [3]. Par exemple, en 1993, la distance moyenne de transport des déchets ménagers était de 43 km [3]. Pour donner un ordre de grandeur concernant le volume, en 2009 37,8 Mt de déchets ménagers et assimilés ont été collectées en France [4]. Ces deux éléments, statistiques, peuvent être utilisés pour estimer un coût moyen de transport dans une filière de valorisation (sous condition que cette dernière soit comparable au traitement des déchets ménagers).

Pour ce qui est du transport fluvial, le document [191] explique qu'un convoi fluvial de 3 800 tonnes (90m x 11,5m) équivaut à 66 wagons de chemin de fer de 58 t ou à 127 camions semi-remorques de 30 t. Par conséquent, le coût de revient d'après ce document est (Tab. 3.1) :

Transport	€ en t/km
Fluvial	0,01 à 0,03
Train complet	0,06
Camion	0,27

TABLEAU 3.1- COÛTS DES TRANSPORTS PAR KM

Concernant le transport de marchandise par train, le lecteur pourra se référer au document [241].

CHAPITRE 3. MODÉLISATION DES TRAJECTOIRES DE VALORISATION DES DÉCHETS

Pour le transport par camion, il est possible de retrouver les données sur :

- La capacité de transport des camions en europalettes [95].
- Les données sur les dimensions des palettes [185].
- Les tarifs de transport appliqués pour les camions en 2012 [177] .
- Le référentiel des prix de transport pour les camions et méthodes de calculs [50].
- La décomposition du coût de transport par camion, comparaison entre les différents prix en fonction du type de camion [154] .

Paramètres de modélisation de la collecte des détenteurs vers les centres de tri (données Aliapur [9]) (Tab. 3.2) :

	Benne	Vrac
Tonnage totale t	142000	127000
Distance Km	77	74
Charge réelle t	4	1.4
Charge utile t	12	3
Consommation pour 100km d'un camion chargé en L	34	15
retour à vide %	100	100
Consommation par tonne en L	9.5	12

TABLEAU 3.2- DONNÉES SUR LES TRANSPORTS

3.6.3 PARTIE ENVIRONNEMENTALE

La partie environnementale peut se décomposer en deux principales parties. La mesure de l'empreinte carbone et l'utilisation de l'indicateur Eco-cost.

Les deux méthodes impliquent de connaître un certain nombre d'informations concernant les consommations de matière, les flux, et d'une manière générale, l'ensemble des éléments pouvant impacter l'environnement.

La mesure de l'empreinte carbone se réalise principalement par la mesure des émissions de CO_2 dans l'atmosphère. La méthode utilisée consiste en une mesure de l'activité en question et de lui appliquer un taux d'émissions. Par exemple dans le cas de la logistique, l'émission de CO_2 est directement liée à la consommation en carburant. La consommation des camions peut être calculée à l'aide d'une formule utilisée par Aliapur pour ceux transportant des pneus usés [9].

$$Consommation = Distance * \frac{Consommation \text{ à pleine charge}}{100} * \left[\frac{2}{3} + \frac{1}{3} * \text{taux de retour à vide} * \frac{2}{3} \right] \quad (3.2)$$

Une autre façon est d'utiliser des ratios concernant l'énergie consommée et les émissions de gaz carbonique en fonction de l'effort réalisé. Ainsi, VNF donne pour les camions de poids supérieur à 25 tonnes une consommation unitaire d'énergie de 51.93 gep/t.km avec une émission de CO_2 162.89 g/t.km [231].

Pour l'Eco-cost, la principale tâche consiste en la recherche des informations et quantification de ces dernières, comme l'utilisation de matières premières, les activités de transport ou autres. Ensuite, il suffit de multiplier ces données par des coefficients fournis dans des tables puis de sommer l'ensemble afin d'obtenir la valeur de l'Eco-cost sur l'activité.

3.6.4 PARTIE SOCIALE³

La mesure de la partie sociale se réalise en trois étapes. La première consiste à déterminer le nombre d'emplois directs liés à l'activité. Ensuite, il s'agit d'évaluer le nombre d'emplois indirects existants grâce à l'activité étudiée chez tous les sous traitants. Enfin il s'agit d'estimer les emplois induits comme il a été défini précédemment.

La première étape consiste à fixer certaines hypothèses :

- Une limite concernant les sous traitants si ceux ci ont eux-mêmes des fournisseurs.
- Délimiter les zones géographiques où se trouvent les emplois induits.

3. Cette partie est poursuivie dans le chapitre 4

3.7. EXEMPLE : VALORISATION DES PNEUS USÉS EN GRANULATS ET POUDRETTES

Il existe deux principales méthodes pour estimer l'emploi direct qui diffèrent par l'origine des informations. La première consiste à extrapoler le nombre d'employés à partir des données provenant d'activités similaires connues. Cette extrapolation peut se faire au travers du capital investi ou de la capacité de production. La seconde méthode consiste à établir des ratios à partir de données statistiques établies par secteur d'activité. Ainsi, l'article [77] datant de 1983, donne le nombre d'employés par secteur d'activité et par capital investi.

Le calcul de l'emploi indirect par sous-traitant se calcule en connaissant :

- Le nombre d'employés du sous-traitant
- Le chiffre d'affaires total du sous-traitant
- Le chiffre d'affaires du sous-traitant réalisé grâce à l'activité étudiée

Ainsi, il est possible de déduire le ratio du chiffre d'affaires lié à l'activité et de le multiplier par le nombre total d'employés. Ce qui donne le nombre d'employés dédiés à l'activité. La somme de ces emplois sur l'ensemble des sous-traitants permet d'obtenir le nombre d'emplois indirects.

L'estimation des emplois induits ne permet, d'après la littérature, que de donner un ordre d'idée du nombre en question car la méthode est très générale d'une part et d'autre part, c'est un chiffre qui reste très difficile à déterminer même en disposant de toutes les informations nécessaires.

La principale méthode trouvée se décompose en plusieurs étapes.

- Calculer la somme des emplois directs et indirects par secteurs géographiques $\Rightarrow T_{DetI,zone} = T_{directs,zone} + T_{indirects,zone}$
- Calculer la population totale concernée en multipliant le nombre trouvé par la taille moyenne d'une famille. En France, cette valeur est de 2.3 \Rightarrow

$$T_{DetI,zone} * 2.3 = T_{pop_{zone}} \quad (3.3)$$

- Connaître la population totale de ces zones $\Rightarrow Population_{zone}$
- Connaître le nombre d'employés dans ces zones géographiques par secteur d'activité (primaire, secondaire et tertiaire) $\Rightarrow Employi_{secteur,zone}$
- Connaître pour chaque secteur, la part du chiffre d'affaires liée à la consommation des ménages $\Rightarrow RCa_{secteur,zone}$
- Calculer le nombre d'emplois induits comme étant la part d'emploi, par secteur, liée à la consommation des ménages, multipliée par le ratio entre la population issue des travailleurs directs et indirects et de leurs familles sur la population totale. \Rightarrow

$$T_{Induits,zone,secteur} = \frac{T_{pop_{zone}}}{Population_{zone}} * RCa_{secteur,zone} * Employi_{secteur,zone} \quad (3.4)$$

- Les emplois induits totaux sont : \Rightarrow

$$T_{Induits} = \sum \sum T_{Induits,zone,secteur} \quad (3.5)$$

Les données utilisées pour les calculs peuvent être trouvées notamment au travers de différentes institutions comme l'Insee. Ainsi [169] renseigne sur le pourcentage du PIB généré par la consommation des ménages. Ce PIB peut être utilisé pour estimer $RCa_{secteur,zone}$, c'est-à-dire l'impact de la consommation des ménages. L'article [88] informe sur la consommation des ménages français en donnant des informations par secteurs. L'Insee offre également des informations intéressantes comme sur la population active en France [120] ou encore des données sur certains secteurs d'activité en France permettant de pouvoir calculer des ratios entre secteur d'activité et effectif [118]. Enfin, le document [97] permet d'obtenir des chiffres clés concernant le secteur du recyclage.

3.7 EXEMPLE : VALORISATION DES PNEUS USÉS EN GRANULATS ET POUDRETTES

Dans cette partie, nous présentons une application des calculs des indicateurs sur une voie de valorisation des pneus qui est un cas d'étude connu. Certains travaux portent en effet sur ce domaine comme [144], qui propose une évaluation des plus intéressantes voies de recyclage pour la valorisation des pneus.

3.7.1 CONTEXTE

Les pneus usés sont une importante source de déchet qu'il est primordial de traiter. En effet, ils sont non dégradables et possèdent un nombre important de composants dont certains sont toxiques pour le milieu ambiant. Ainsi, en Allemagne plus de 600000 tonnes de pneus sont traitées par an [144].

Le principal composant d'un pneu est la gomme qui compose 80 % de sa masse [89]. Cependant, les propriétés des matériaux constituant les pneus ne permettent pas de générer de nouveaux pneus [144]. Il existe par conséquent d'autres voies de valorisation dont Aliapur, donne pour 2012 la répartition suivante [11] :

- 33,32 % en valorisation matière
- 48,36 % en valorisation énergétique
- 18,32 % en rechapage et réemploi

Le rechapage est le seul processus qui tente de maximiser la valorisation des pneus usés [89]. En effet, la dépense en énergie, matière et coût est relativement faible. Malheureusement, comme le suggère la répartition précédente, seuls quelques pneus ont la qualité requise pour être rechapés. Une autre voie intéressante est l'incinération, car le pneu possède un pouvoir calorifique de 31000Kj / Kg [144]. Cependant, outre les émissions qui peuvent être non écologiques, la matière, l'énergie et le travail nécessaires à la réalisation du pneu sont définitivement perdus. Par conséquent, la valorisation matière est intéressante. Comme l'explique l'article [151] l'analyse des coûts montre que le caoutchouc recyclé est moins cher à obtenir que le produit initial. La valorisation matière peut être la réutilisation des pneus entiers, principalement dans la construction, ou déstructurés pour la fabrication d'objets moulés ou composites.

Une part importante de cette activité est la récupération des pneus usés au travers d'une étape de collecte et de transport, souvent appelée logistique inverse. La répartition des coûts donne une idée de l'importance des étapes. En 2012, la répartition des coûts chez Aliapur était la suivante [11] [10] :

- 51,15 % Collecte et transport
- 1,77 % R et D
- 7,33 % Structure
- 3,91 % Valorisation
- 35,84 % Transformation

Enfin, une analyse environnementale a été réalisée qui donne des informations sur les avantages des voies de valorisation [9].

3.7.2 HYPOTHÈSES

Cette modélisation représente une unité de production de granulats et de poudrettes à partir de pneus usés entiers. Les hypothèses prises sont les suivantes :

- La limite de l'évaluation débute lors de l'acheminement des pneus depuis le centre de tri jusqu'à la fin de la production dans l'usine.
- La production est de 21 000 tonnes par an.
- Capacité de 5 tonnes par heure.
- Il n'y a pas de pertes dans la production.
- L'ensemble de l'équipement est décrit par le document [198] qui offre une liste assez détaillée.
- Certains équipements ou terrains n'ont pas été pris en compte.
- La production atteint sa capacité nominale dès la première année.
- Nombre de jours de fonctionnement par an : 200 jours.
- La durée d'amortissement est fixée à 10 ans.
- Le taux d'actualisation est de 5 %.
- Prix de récupération des pneus 74,37 € la tonne.

La production se répartit suivant le tableau Tab. 3.3 [198] :

3.7. EXEMPLE : VALORISATION DES PNEUS USÉS EN GRANULATS ET POUDRETTES

Produit	% massique	dont	Prix de vente €/tonne
Gomme	75 %		
Gomme 0,1 à 1 mm		22 %	190 €
Gomme 1 à 2 mm		21 %	185 €
Gomme 2 à 4 mm		57 %	135 €
Corde	10 %		15 €
Fer	15 %		62 €

TABLEAU 3.3- PRIX DE VENTE DES PRODUITS ISSUS DE LA VALORISATION DES PNEUS

3.7.3 PARTIE ÉCONOMIQUE

Modélisation de l'usine Le calcul des investissements en équipement a été réalisé à partir de la méthode Pré-estime ou, si l'équipement était trop spécifique, par consultation des catalogues ou devis d'appareils similaires. L'investissement en équipement a été évalué à 11 millions d'euros.

L'investissement en unité à 15 millions d'euros.

Un capital fixe et un total d'investissement pratiquement équivalent de 21 millions d'euros.

Annuellement :

- Le chiffre d'affaires est estimé à un peu plus de 4 millions d'euros.
- Les frais opératoires à 350 000 euros dont 250 000 euros de main d'œuvre.
- Les charges fixes sont de 1 million d'euros par an.
- L'excédent brut d'exploitation est de 3 millions d'euros.
- La dotation aux amortissements est de 2,7 millions.
- Le résultat net est de 150000 euros.

L'ensemble des données nous permet de calculer les indicateurs économiques suivants :

- La VAN est à un peu plus de 1 million d'euros à la fin des dix ans (Fig. 3.9).
- Le TRI est de 6.5 %.
- DRC est d'un peu plus de 9 ans.

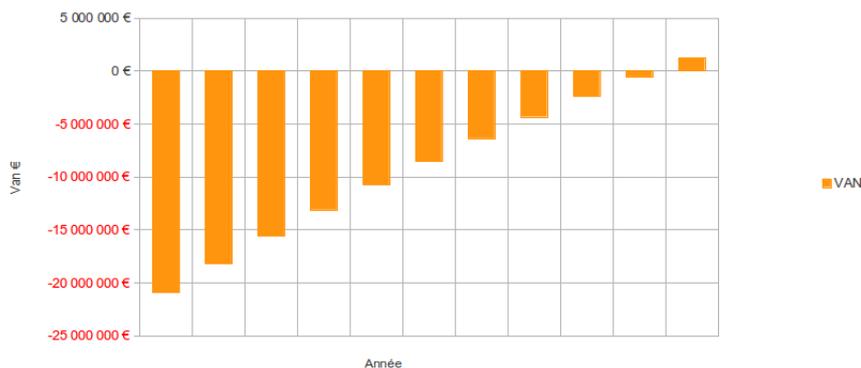


FIGURE 3.9- EXEMPLE USINE : ÉVOLUTION DE LA VAN SUR 10 ANS

Modélisation du transport La modélisation du transport se base sur les moyennes statistiques que l'on trouve sur le site du CNR (Comité National Routier) et sur l'Ademe sur le transport de déchet. Les hypothèses utilisées sont les suivantes :

- Parcours avec charge 80 km.
- Parcours à vide représentant 14 % du trajet total.
- Les camions utilisés sont des 40 tonnes.
- La densité des pneus est de 0.15.

CHAPITRE 3. MODÉLISATION DES TRAJECTOIRES DE VALORISATION DES DÉCHETS

- Taux de remplissage 80 %.
- Temps d'immobilisation 1 heure.
- Le transport est sous-traité par l'usine.

D'après les calculs effectués et les hypothèses prises, il faut un peu plus de 1700 camions pour transporter les 21 000 tonnes de pneus. Ce qui représente un coût de 260 000 euros.

3.7.4 PARTIE ENVIRONNEMENTALE

Modélisation de l'usine Par manque de données, la principale source d'émission de l'usine provient de sa consommation électrique. Les hypothèses prises en comptes sont les suivantes :

- Seule la consommation électrique est prise en compte
- L'électricité consommée n'est pas produite par l'usine mais achetée
- L'énergie consommée est égale à la somme de la puissance des équipements multiplié par la durée de fonctionnement.

Avec ces hypothèses, les calculs effectués montre une consommation annuelle de 4500000 MJ par an, ce qui représente un Eco-cost de 120000 euros. Enfin, l'EVR est de 0.75, se qui montre que la solution est soutenable.

Modélisation du transport Les trois seules hypothèses prises en comptes sont les suivantes :

- Les camions fonctionnent au gazole
- La consommation énergétique est de 51.93 gep/t.km
- L'émission de CO_2 est 0.162 kg/t.km

Ce qui donne une consommation énergétique de 4200000 MJ annuel, ce qui représente 100 tonnes de carburant. Par conséquent, les émissions de CO_2 sont d'environ 310 tonnes. Enfin la valeur de l'Eco-cost est de 50000 € et l'EVR vaut 0.13 se qui laisse entendre que cette activité peut s'inscrire dans une économie soutenable.

3.7.5 PARTIE SOCIALE

Pour la modélisation de la partie sociale, les hypothèses suivantes ont été posées :

- L'usine se trouve dans le bassin toulousain.
- Le capital de l'usine est de 1500000 €.
- Les facteurs de l'article [77] ont été actualisés d'après la valeur de l'euro actualisée par l'Insee.
- Seul le transport est considéré comme activité sous traitée.
- Le nombre de travailleurs concernés par le transport est le nombre de travailleurs dans ce secteur au pro-rata du chiffre d'affaires.

Ce qui donne les résultats suivants :

- Nombre d'emplois directs : 89.
- Nombre d'emplois indirects : 1.64.
- Nombre d'emplois induits : 39.

Ce qui représente au total de 129 emplois équivalent temps plein pour l'ensemble de l'activité.

3.7.6 PARTIE VALORISATION

La partie valorisation est qualitative. Le recyclage matière est performant et est à la troisième place des voies de valorisation de la directive officielle, [181].

3.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons proposé un cadre de modélisation pour les trajectoires de valorisation ainsi qu'un ensemble d'indicateurs permettant d'évaluer ces dernières. Pour le cadre de modélisation, deux modèles ont été proposés. Le premier s'inscrit dans le contexte du génie des procédés alors que le second est beaucoup plus ouvert et correspond plus à la modélisation de systèmes. Ces modèles présentent comme avantages de pouvoir modéliser un large spectre de processus et de ne comporter qu'un nombre limité de catégories ou d'éléments. Néanmoins, cette souplesse dans la description suppose un effort plus important lors de la modélisation et peu conduire à différentes représentations possibles. En ce qui concerne les indicateurs, trois indicateurs ont été présentés plus un élément de quantification des trajectoires. Ces indicateurs sur les trajectoires aident à la prise de décision quant à la sélection de ces dernières. Néanmoins, la maturité et la portée de ces derniers ne sont pas similaires. Ainsi, le critère social manque de maturité. De ce fait l'étendue de cet indicateur et les méthodes d'évaluation utilisées ne sont pas éprouvées. Il semble donc opportun d'analyser plus précisément ce dernier, ce que nous réalisons dans le chapitre suivant.

UTILISATION DES DONNÉES ÉCONOMIQUES POUR L'ÉVALUATION DU NOMBRE D'EMPLOIS D'UNE ACTIVITÉ

[...]la science n'est rien de plus que l'exploration d'un miracle que nous n'arrivons pas à expliquer, et l'art l'interprétation de ce miracle

FAHRENHEIT 451 – RAY BRADBURY –

4.1 OBJECTIF DE L'ÉTUDE

Dans le cadre de ce travail, nous souhaitons pouvoir évaluer les indicateurs sociaux et, plus précisément, les nombres d'emplois créés par une activité à l'aide des données disponibles. Ces données ont la particularité d'être limitées en nombre, car nous sommes dans une phase de pré-étude et, de plus, elles sont assez approximatives. Nous avons choisi d'utiliser les données économiques estimées pour le projet (voir la partie consacrée à ce sujet) car elles sont intéressantes en plusieurs points. D'une part, elles peuvent être estimées par plusieurs méthodes avec une marge d'erreurs acceptable pour l'étape du projet considérée (de l'ordre de 30%). D'autre part, parce que ces données ont des liens avec l'activité en question. L'un des avantages que nous mettons en avant est le fait que les données économiques renseignent sur le niveau de production d'une entreprise en cours de fonctionnement et permettent de donner une idée de sa santé économique. À contrario, certaines méthodes de la littérature se basant sur les procédés de l'entreprise ne tiennent pas compte de la situation courante, mais bien plus de l'état initial de cette dernière, c'est-à-dire lors de la phase de construction. Le but de cette étude est de fournir une nouvelle méthode d'estimation de la création d'emplois directs, indirects et induits se basant uniquement sur des données économiques. Le critère de satisfaction envisagé est une marge d'erreur inférieure à 30%.

4.2 MÉTHODE GÉNÉRALE

4.2.1 ÉLÉMENT ÉCONOMIQUE CHOISI

Comme détaillé dans la partie dédiée à l'objectif de ce travail, nous basons notre méthode sur des données économiques estimables durant les premières phases du projet. Nous sommes donc confrontés à des problèmes d'inexactitude et d'incomplétude sur ces données. Les données économiques sélectionnées pour l'estimation du nombre d'emplois ont été choisies par leur corrélation avec des notions comme la production ou le coût de la masse salariale. En se basant sur [75], il est possible de voir que plusieurs valeurs calculées lors de la phase d'estimation économique du projet correspondent aux critères préalablement cités :

$$\text{Vente} + \text{production en stock} = \text{Production} \quad (4.1)$$

$$\text{Production} - \text{Consommation externe} = \text{Valeur ajoutée} \quad (4.2)$$

CHAPITRE 4. UTILISATION DES DONNÉES ÉCONOMIQUES POUR L'ÉVALUATION DU NOMBRE D'EMPLOIS D'UNE ACTIVITÉ

$$\text{Valeur ajoutée} + \text{subvention} - \text{masse salariale} - \text{taxes sociales} = \text{EBE} \quad (4.3)$$

$$\text{EBE} + \text{autres profits} - \text{amortissement} = \text{Résultat d'exploitation} \quad (4.4)$$

$$\text{Résultat d'exploitation} + \text{Produits} - \text{Dépenses} = \text{Résultat courant} \quad (4.5)$$

$$\text{Résultat courant} + \text{Produits d'exceptions} - \text{Dépenses d'exceptions} = \text{Résultat avant impot} \quad (4.6)$$

$$\text{Résultat avant impot} - \text{BIC} + \text{PSFE} - \text{Charges exceptionnelles} = \text{Résultat net} \quad (4.7)$$

avec :

— BIC : impôt sur les bénéfices industriels et commerciaux

— PSFE : participation des salariés aux fruits de l'expansion

D'après ces données, les indicateurs économiques les plus intéressants et, par conséquent, ceux qui ont été retenus sont :

— Le chiffre d'affaires, **CA**

— La valeur ajoutée, **VA**

— L'excédent brut d'exploitation, **EBE**

— La masse salariale **EFF**

L'une des données les plus intéressantes pour notre objectif est le chiffre d'affaires. En effet, comme nous l'avons déjà expliqué, nous souhaitons avoir un lien direct entre la masse salariale et la production car cette dernière est obtenue lors du dimensionnement de l'installation et est une donnée non calculée. Or, le chiffre d'affaires peut être estimé comme le produit de la production par le prix de vente, soit :

$$CA = \sum_{i=1}^n (\text{prix}_i * \text{quantite}_i) \quad (4.8)$$

Afin d'étudier si une méthode basée sur ces données permet d'estimer ou non le nombre d'emplois, on se propose d'étudier les différentes corrélations possibles. Ces corrélations seront testées dans différents secteurs d'activités afin de pouvoir vérifier leur pertinence, leur aspect générique quel que soit le secteur d'activité, ou au contraire la nécessité de les adapter (par modification de certains paramètres de la formule). Ces secteurs retenus sont :

— Le secteur des plastiques et des caoutchoucs

— Le secteur médical

— Le secteur de la sidérurgie

— Le secteur chimique

4.3 HYPOTHÈSES

Dans la partie qui suit, nous présentons les différentes hypothèses formulées pour simplifier les équations utilisées. En s'appuyant sur les équations précédentes, ces hypothèses éliminent certains paramètres des formules qui sont considérés comme non significatifs sur le résultat final.

En premier lieu, à partir de la formule définissant le chiffre d'affaires, nous faisons l'hypothèse qu'il y a un prix moyen et que la production est proportionnelle à la masse salariale. Soit les hypothèses suivantes :

Hypothèse 1

$$CA \approx \alpha * \text{production} \quad (4.9)$$

et

$$\text{production} \approx \beta * \text{masse salariale} \quad (4.10)$$

Ce qui nous permet de supposer qu'il y existe une relation linéaire entre le chiffre d'affaires **CA** et la masse salariale.

La première hypothèse peut se justifier par le fait que le CA correspond aux ventes réalisées, c'est-à-dire aux produits des quantités vendues par leurs prix. Ainsi, l'hypothèse signifie qu'il y a un prix moyen de vente par quantité. L'hypothèse 4.10 suppose que la production est proportionnelle à la masse salariale. Bien que critiquable, cette hypothèse se justifie par un effet de moyenne sur des entreprises de taille conséquente.

En deuxième approximation, nous proposons de considérer que les subventions sont négligeables puis, de fusionner le coût de la masse salariale et les taxes sociales pour n'avoir qu'une seule valeur. Ainsi :

Hypothèse 2

$$Subvention \approx 0 \quad (4.11)$$

Ce qui permet de transformer l'équation :

$$VA - EBE \approx \text{Masse salariale} \quad (4.12)$$

Enfin, nous posons l'hypothèse qu'il existe un coût moyen de la masse salariale, c'est-à-dire qu'il y a une relation de proportionnalité entre le nombre d'employés et le montant de masse salariale. Soit l'hypothèse suivante :

Hypothèse 3

$$\text{Masse salariale} \approx \text{coût moyen} * \text{Nombre d'emplois} \quad (4.13)$$

Les hypothèses 2 et 3 nous permettent de supposer une relation linéaire entre $VA - EBE$ et le nombre d'emplois.

4.4 PARTIE EXPÉRIMENTALE : CONTEXTE

Dans cette partie, nous expliquons quelles sont les méthodes mises en places pour valider nos hypothèses, quelles sont les fonctions utilisées à ces fins et enfin sur quelles données se base notre étude.

4.4.1 MÉTHODOLOGIE

La méthodologie générale de cette étude est assez simple puisqu'elle consiste à trouver une corrélation entre certaines valeurs économiques et l'effectif. Il s'agit dans un premier temps d'estimer les coefficients de la formule puis de les valider.

Pour ce faire, on se propose d'utiliser des données réelles d'entreprises. Ces données sont alors divisées en deux groupes. Le premier sert à estimer les coefficients à l'aide de certaines méthodes, comme la régression linéaire. La détermination des coefficients peut, à ce niveau, révéler si les hypothèses établies sont réalistes ou non. Ainsi, si par exemple ces coefficients sont impossibles à déterminer, c'est-à-dire qu'il n'y ait pas de valeurs pour ces coefficients qui permettent à la formule d'estimation de prendre en compte l'ensemble des valeurs avec une marge d'erreur satisfaisante, alors les hypothèses appliquées peuvent être considérées comme fausses. Dans le cas où des valeurs ont été trouvées pour l'ensemble des données servant au paramétrage, il s'agit ensuite de valider ces valeurs. Pour ce faire, la méthode utilise le deuxième groupe de données, pour estimer le nombre d'emplois en utilisant la corrélation trouvée et pour les comparer avec les valeurs réelles. Une mesure de l'erreur obtenue permet de valider ou non la formule trouvée.

Nous proposons trois méthodes pour réaliser l'identification paramétrique. Les deux premières méthodes sont deux variantes des régressions linéaires alors que la troisième diffère fortement puisqu'elle se base sur l'utilisation d'un réseau de neurones. La première méthode est facile à mettre en place et donne un premier aperçu des corrélations. La seconde, plus évoluée permet de donner des indications statistiques supplémentaires quant au bien fondé de la corrélation. Enfin, l'utilisation du réseau de neurones permet de rechercher des relations entre les données d'entrées et les sorties sans que ces relations soient décrites au préalable par une formule (la nature de la relation n'est pas connue).

La première méthode utilise le tableur LibreOffice avec le solveur DEPS Evolutionary Algorithm basé sur deux algorithmes : Optimisation par essais de particules et Évolution différentielle¹. Pour cette première méthode, nous proposons la formule d'optimisation (AEP) :

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y - y_{eff}|}{y} \quad \text{avec } y \text{ le nombre d'emplois réel et } y_{eff} \text{ le nombre d'emplois estimé par la formule} \quad (4.14)$$

La méthode consiste donc à trouver grâce au solveur les coefficients qui permettent de trouver la valeur minimum pour la fonction d'optimisation. Cette fonction, en effet, somme les écarts relatifs entre les valeurs estimées et les valeurs réelles.

La seconde méthode utilise la méthode des moindres carrés (utilisation du logiciel R et plus particulièrement la fonction **lm**). Cette méthode permet de réaliser des régressions linéaires sur des ensembles de données. Le coefficient de régression R^2 est utilisé pour vérifier la validité ou non de la régression.

Enfin, nous proposons une troisième méthode basée sur l'utilisation d'un réseau de neurones **RdN**. Avec cet outil,

1. https://wiki.documentfoundation.org/FR/Calc/NLPSolver#Options_sp.C3.A9cifiques_DEPS

CHAPITRE 4. UTILISATION DES DONNÉES ÉCONOMIQUES POUR L'ÉVALUATION DU NOMBRE D'EMPLOIS D'UNE ACTIVITÉ

un réseau permettant de lier le CA avec l'effectif (EFF) est construit. Ensuite, c'est la relation entre VA-EBE et EFF qui est étudiée permettant de comparer ce nouveau modèle à celui obtenu lors de la régression. L'avantage du RdN est qu'il n'est pas nécessaire de connaître la relation entre les variables d'entrées et celles de sorties. En effet, lors de la phase d'apprentissage, le réseau va lui-même « apprendre » les relations existantes entre les différentes valeurs.

4.4.2 CORRÉLATIONS

Suite aux hypothèses formulées, nous avons proposé trois types de corrélations, avec α , β et γ des coefficients à identifier :

1. $\alpha * CA + \beta \approx$ Nombre d'emplois : cette formule suppose une relation de proportionnalité entre le nombre d'emplois et le chiffre d'affaires
2. $\alpha * (VA - EBE) + \beta \approx$ Nombre d'emplois
3. $\alpha * VA - \beta * EBE + \gamma \approx$ Nombre d'emplois

La formule 1, qui suppose une relation directe entre le chiffre d'affaires et le nombre d'emplois, a l'avantage d'être à la fois très simple et surtout pratique puisqu'elle permet d'estimer la création d'emploi uniquement en connaissant la production réalisée. À contrario, les formules 2 et 3 se basent plus sur une définition comptable de la masse salariale et, par conséquent, plus d'informations sont nécessaires à leur calcul. Enfin, la troisième formule recherche un meilleur ajustement des corrélations par rapport à la seconde. En effet, cette dernière n'est qu'un cas particulier de la troisième.

4.4.3 DONNÉES POUR L'ÉTUDE

Les données utilisées pour cette étude proviennent des publications comptables d'entreprises en France entre 2010 et 2014. Afin de s'assurer que les modèles proposés sont vérifiés pour tout type d'entreprises, nous avons sélectionné plusieurs secteurs d'activités et, pour chacun, différentes tailles d'entreprise. De ce fait, cela permet de voir si le modèle est valable pour tout type de secteur ou s'il doit être adapté par secteur, et s'il est applicable pour toute taille d'entreprise. Les secteurs sélectionnés sont les suivants :

- Le secteur de la sidérurgie
- Le secteur médical
- Le secteur des caoutchoucs et des plastiques
- Le secteur chimique

Ces secteurs permettent non seulement de vérifier l'applicabilité des formules mais aussi d'évaluer si une généralisation est possible pour des secteurs d'activités très différents. Ainsi, les secteurs chimiques et des caoutchoucs sont des secteurs d'entreprises de tailles moyennes. Le secteur de la sidérurgie est un secteur établi alors que le secteur médical représente plus les nouvelles technologies.

4.5 PARTIE EXPÉRIMENTALE : ÉTUDE PAR RÉGRESSION

Dans cette partie, nous proposons de réaliser l'étude en utilisant la première et la deuxième méthode décrites précédemment.

4.5.1 1^{RE} FORMULE : $\alpha * CA + \beta \approx$ Nombre d'emplois

On se propose ici d'étudier la relation la plus simple que nous avons supposée précédemment, à savoir : $\alpha * CA + \beta \approx$ Nombre d'emplois. Nous obtenons les résultats suivants :

Secteur	Plastique et caoutchouc	Chimique	Médical	Sidérurgie	Tous secteurs
Nombre de points	139	50	112	217	475
α	$5.9017 * 10^{-6}$	$2.5782 * 10^{-6}$	$7.2207 * 10^{-6}$	$7.5279 * 10^{-6}$	$6.1591 * 10^{-6}$
β	$1.14 * 10^{-6}$	0.00116934	0.0011697	0.000288296	0.000292573
AEP	38 %	63 %	38 %	39 %	47 %

TABLEAU 4.1- ESTIMATION DU NOMBRE D'EMPLOIS EN UTILISANT LE CA AVEC LA PREMIÈRE MÉTHODE

4.5. PARTIE EXPÉRIMENTALE : ÉTUDE PAR RÉGRESSION

Secteur	Plastique et caoutchouc	Chimique	Médical	Sidérurgie	Tous secteurs
Nombre de points	139	50	112	217	475
α	$1.987 * 10^{-6}$	$1.934 * 10^{-6}$	$7.187 * 10^{-6}$	$6.413 * 10^{-6}$	$2.694 * 10^{-6}$
β	8.827	5.862	1.059	2.849	6.137
R^2	0.49	0.59	0.75	0.77	0.5
α t value	10.16	7.965	17.813	26.895	21.83
α Pr(> t)	$< 2 * e^{-16}$	$< 5.32 * e^{-10}$	$< 2 * e^{-16}$	$< 2 * e^{-16}$	$< 2 * e^{-16}$
β t value	9.73	4.312	3.027	6.389	16.11
β Pr(> t)	$< 2.7 * e^{-16}$	$< 9.26 * e^{-05}$	0.0031	$1.03 * e^{-9}$	$< 2 * e^{-16}$

TABLEAU 4.2- ESTIMATION DU NOMBRE D'EMPLOIS EN UTILISANT LE CA AVEC LA SECONDE MÉTHODE

Dans les deux cas, nous voyons que les meilleurs coefficients trouvés, c'est-à-dire ceux qui permettent de réduire l'erreur entre les valeurs estimées et réelles, ne satisfassent pas le critère de moins de 30 % (Tab. 4.1) ou un coefficient R^2 acceptable (Tab. 4.2). Nous constatons que les points sont dispersés formant un nuage autour des valeurs trouvées, ce qui nous laisse penser que notre raisonnement est, comme nous le pensions, erroné.

Ceci s'explique car le chiffre d'affaires, d'après la définition, correspond au produit de chaque production (la quantité de différents biens vendus) par leurs prix respectifs. Ces prix tiennent compte de la matière première utilisée. À contrario, le nombre d'employés dépend du procédé et de la quantité produite. Par conséquent, si les procédés des entreprises comparés sont différents, notre hypothèse, bien que très intéressante, n'est plus valide. Pour donner un exemple, supposons trois entreprises **F1**, **Fa1** et **Fa2**. L'entreprise **F1** produit à partir de la matière première **A** le produit **C**. L'entreprise **Fa1** produit à partir de la matière première **A** le produit **B** et l'entreprise **Fa2** produit à partir de la matière première **B** le produit **C**. On peut facilement supposer que le prix de vente du produit **C** sera le même dans les deux cas. Par conséquent, avec une même production (même quantité), le chiffre d'affaires des entreprises **F1** et **Fa1** sera le même. Or, le procédé de fabrication du produit **C** n'est pas le même pour les deux entreprises puisque qu'elle n'utilise pas la même matière première et de ce fait, il est fort à parier que le nombre d'employés nécessaires ne sera pas le même non plus.

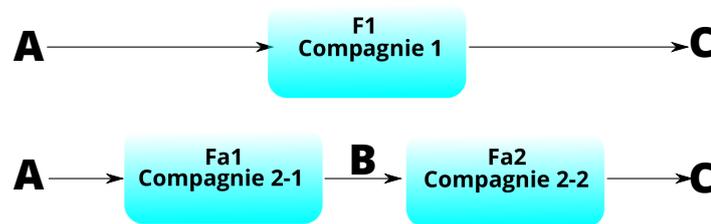


FIGURE 4.1- SCHÉMA MONTRANT QUE POUR LE MÊME CHIFFRE D'AFFAIRES, LES PROCÉDÉS PEUVENT ÊTRE DIFFÉRENTS

Par conséquent, une autre méthode basée sur d'autres paramètres s'impose.

CHAPITRE 4. UTILISATION DES DONNÉES ÉCONOMIQUES POUR L'ÉVALUATION DU NOMBRE D'EMPLOIS D'UNE ACTIVITÉ

4.5.2 2^E FORMULE : $\alpha * (VA - EBE) + \beta \approx$ Nombre d'emplois

Dans cette section, on se propose de faire l'étude de la seconde formule proposée. Cette formule issue des relations comptables simplifiée, suppose une relation linéaire entre le coût de la masse salariale et le nombre d'emplois. Comme nous l'avons fait précédemment, on cherche ici les coefficients α et β de la formule réduisant au maximum l'écart entre les points réels et ceux estimés par la formule :

$$\alpha * (VA - EBE) + \beta \approx \text{Nombre d'emplois} \quad (4.15)$$

Nous obtenons grâce aux méthodes 1 et 2 les résultats résumés dans les tableaux suivants 4.3 et 4.4.

Secteur	Plastique et caoutchouc	Chimique	Médical	Sidérurgie	Tous secteurs
Nombre de points	139	64	115	255	476
α	$2.1744 * 10^{-5}$	$1.7482 * 10^{-5}$	$1.5288 * 10^{-5}$	$2.0599 * 10^{-5}$	$1.946 * 10^{-5}$
β	0.0002862	0.000292425	0.000292572	0.000292572	$7.3145 * 10^{-5}$
AEP	19.8 %	33.2 %	35.79 %	28.13 %	31.71 %

TABLEAU 4.3- RÉSULTATS DE L'ESTIMATION DE L'EFFECTIF AVEC LA PREMIÈRE MÉTHODE

Secteur	Plastique et caoutchouc	Chimique	Médical	Sidérurgie	Tous secteurs
Nombre de points	139	64	115	255	476
α	$2.082 * 10^{-5}$	$1.431 * 10^{-5}$	$1.816 * 10^{-5}$	$1.729 * 10^{-5}$	$1.903 * 10^{-5}$
β	1,458	2.539	4.615	3.999	1.2409
R^2	0.94	0.8749	0.922	0.92	0.86
α t value	47.24	18.127	36.110	94.523	63.567
α Pr(> t)	$< 2 * e^{-16}$	$< 2 * e^{-16}$	$< 2 * e^{-16}$	$< 2 * e^{-16}$	$< 2 * e^{-16}$
β t value	1.641	2.495	1.451	7.160	6.187
β Pr(> t)	0.106	0.0162	0.15	$8.42 * e^{-12}$	$1.17 * e^{-9}$

TABLEAU 4.4- RÉSULTATS DE L'ESTIMATION DE L'EFFECTIF AVEC LA SECONDE MÉTHODE

Nous voyons ici que les résultats obtenus sont corrects avec les deux méthodes et, pour la première méthode, ils avoisinent le critère recherché d'un écart de moins de 30 %. La droite de régression linéaire pour le secteur de la sidérurgie, montre que la grande majorité des points se trouve dans la zone de confiance. De même, un nombre significatif de points se situe dans la tranche de prédiction à 95 %. Ainsi, la figure **Fig.4.2** montre une tendance à la linéarité conformément aux hypothèses. Cette tendance est confirmée sur la figure **Fig.4.3** qui correspond à la figure précédente avec un zoom sur la première partie du graphe (valeurs VA-EBE inférieures à $3 * 10^6$). On remarque par conséquent qu'il n'y a pas de « dispersion » suite à la suppression des valeurs extrêmes.

4.5. PARTIE EXPÉRIMENTALE : ÉTUDE PAR RÉGRESSION

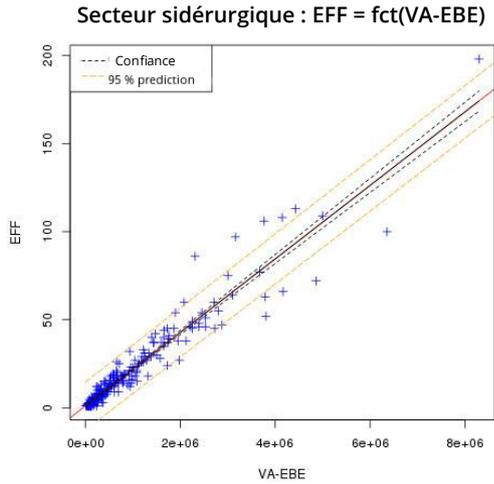


FIGURE 4.2- DANS LE SECTEUR SIDÉRURGIQUE, RÉGRESSION LINÉAIRE AVEC LES MOINDRES CARRÉES

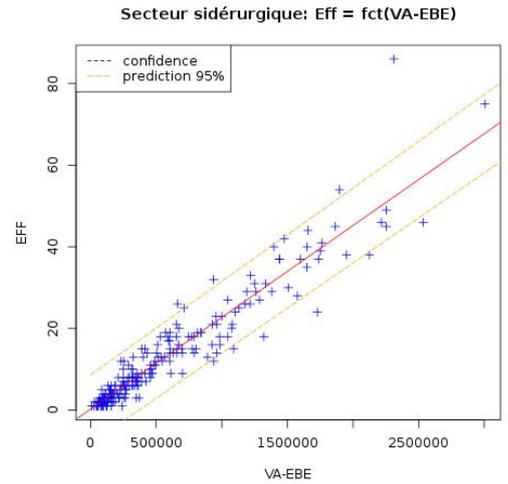


FIGURE 4.3- DANS LE SECTEUR SIDÉRURGIQUE, RÉGRESSION LINÉAIRE AVEC LES MOINDRES CARRÉS POUR DES VALEURS VA-EBE $< 3 * 10^6$

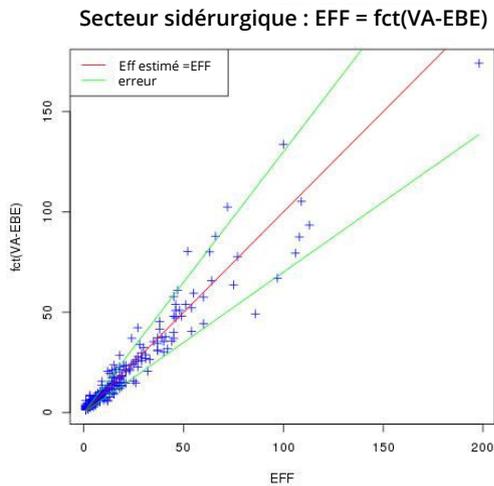


FIGURE 4.4- ESTIMATION DE L'EFFECTIF DANS LE SECTEUR SIDÉRURGIQUE

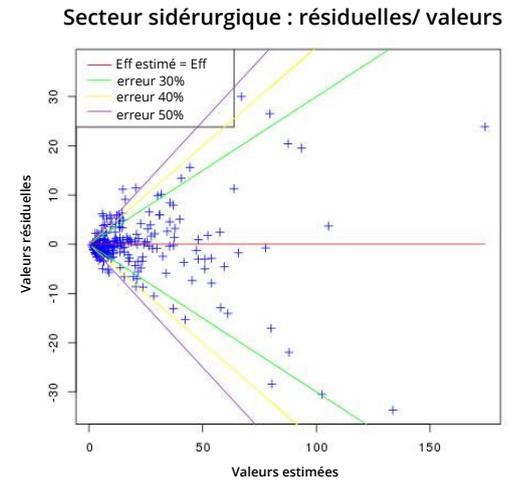


FIGURE 4.5- VALEURS RÉSIDUELLES VS VALEURS ESTIMÉES DANS LE SECTEUR SIDÉRURGIQUE

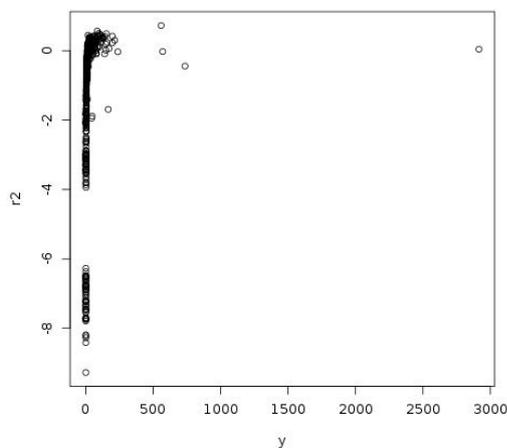


FIGURE 4.6- ÉCART RELATIF PAR RAPPORT À L'EFFECTIF TOUT SECTEUR

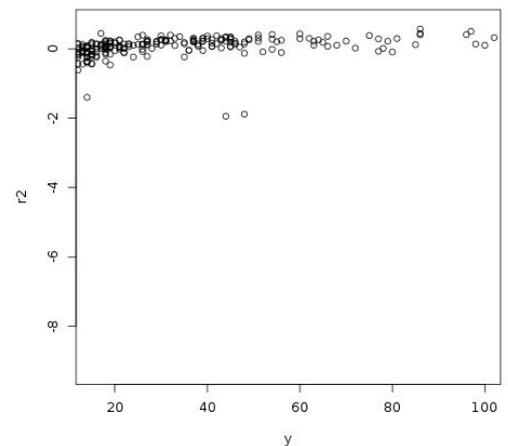


FIGURE 4.7- ÉCART RELATIF PAR RAPPORT À L'EFFECTIF TOUT SECTEUR POUR UN EFFECTIF COMPRIS ENTRE 15 ET 100 PERSONNES

CHAPITRE 4. UTILISATION DES DONNÉES ÉCONOMIQUES POUR L'ÉVALUATION DU NOMBRE D'EMPLOIS D'UNE ACTIVITÉ

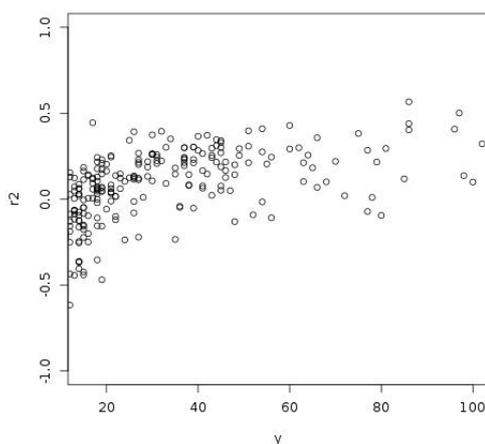


FIGURE 4.8- ÉCART RELATIF PAR RAPPORT À L'EFFECTIF TOUT SECTEUR POUR UN EFFECTIF COMPRIS ENTRE 15 ET 100 ET DONT L'ÉCART EST COMPRIS ENTRE +/- 50%

Le graphique **Fig.4.4** suggère une assez bonne corrélation pour le secteur sidérurgique avec néanmoins une dispersion pour les effectifs faibles. Ceci se confirme sur la figure **Fig.4.5** qui montre que pour de nombreuses entreprises ayant un effectif inférieur à 10 personnes, les points présentent un pourcentage d'erreur supérieur à 30 %. Néanmoins, ceci peut s'expliquer par le fait que le nombre d'employés est un entier et par conséquent, sur des petits nombres, une erreur de 1 ou 2 employés peut produire des pourcentages d'erreur importants. De plus, les valeurs-p² du tableau **Tab. 4.4** montrent que l'hypothèse nulle est rejetée pour le coefficient α mais qu'elle ne l'est pas pour le coefficient β pour les secteurs Médical et Plastique & caoutchouc (valeur-p > 0.05). Il semble donc qu'il y ait bien une relation entre VA-EBE et l'effectif.

Enfin, les graphiques **Fig.4.6**, **Fig.4.7** et **Fig.4.8** montre l'écart relatif, $r2 = \frac{Eff - Eff_{Calcule}}{Eff}$, par rapport à l'effectif réel (y). La figure **Fig.4.6** montre que le taux d'erreur augmente lorsque l'effectif tend vers zéro. Cependant, pour un effectif compris entre 15 et 100 personnes, **Fig. 4.7**, l'écart relatif semble suivre une droite montrant ainsi qu'une tendance linéaire se dégage conformément aux hypothèses posées. Enfin, la figure **Fig. 4.8** illustre le fait que l'écart relatif est de +/- 50% pour la majorité des points avec une concentration au centre (ce qui corrobore les précédents résultats). Par conséquent, au-delà d'un intervalle d'erreur, cette régression semble montrer qu'il y a une tendance linéaire de l'ensemble à condition de garder une sélection large dans le nombre d'effectifs.

4.5.3 3^E FORMULE : $\alpha * VA + \beta * EBE + \gamma \approx$ Nombre d'emplois

De même que précédemment, nous cherchons à réaliser l'étude pour la troisième formule : $\alpha * VA - \beta * EBE \approx$ Nombre d'emplois. L'étude nous donne les résultats consignés dans les tableaux **Tab. 4.5** et **Tab. 4.6**.

Secteur	Plastique et caoutchouc	Chimique	Médical	Sidérurgie	Tous secteurs
Nombre de points	139	50	112	217	475
α	$2.07 * 10^{-5}$	$1.65 * 10^{-5}$	$1.39 * 10^{-5}$	$2.10 * 10^{-5}$	$1.98 * 10^{-5}$
β	$-1.86 * 10^{-5}$	$-1.771 * 10^{-5}$	$-1.2945 * 10^{-5}$	$-2.35 * 10^{-5}$	$-1.98 * 10^{-5}$
γ	0.2384	0.238	0.19	-0.05	0.059
AEP	19 %	31 %	35 %	30 %	31.6 %

TABEAU 4.5- RÉSULTATS OBTENUS AVEC LA TROISIÈME FORMULE PREMIÈRE MÉTHODE

2. <http://www.r-tutor.com/elementary-statistics/simple-linear-regression/significance-test-linear-regression>

4.5. PARTIE EXPÉRIMENTALE : ÉTUDE PAR RÉGRESSION

Secteur	Plastique et caoutchouc	Chimique	Médical	Sidérurgie	Tous secteurs
Nombre de points	139	50	112	217	475
α	$2.117 * 10^{-5}$	$1.424 * 10^{-5}$	$9.766 * 10^{-5}$	$2.151 * 10^{-5}$	$1.422 * 10^{-5}$
β	$-2.351 * 10^{-5}$	$-1.635 * 10^{-5}$	$-2.02 * 10^{-5}$	$-2.634 * 10^{-5}$	$-1.638 * 10^{-5}$
γ	1.503	8.277	4.197	1.432	6.868
R^2	0.94	0.944	0.84	0.945 %	0.96%
α t value	45.6	37.55	6.668	44.338	91.103
α Pr(> t)	$< 2 * e^{-16}$	$< 2 * e^{-16}$	$< 1.11 * e^{-09}$	$< 2 * e^{-16}$	$< 2 * e^{-16}$
β t value	-18.075	-20.452	-4.277	-17.224	-49.185
β Pr(> t)	$2,37 * e^{-16}$	0.000168	$4.08 * e^{-05}$	$< 2 * e^{-16}$	$< 2 * e^{-16}$

TABLEAU 4.6- RÉSULTAT DE L'ESTIMATION DE L'EFFECTIF AVEC VÂ ET EBE PAR LA TROISIÈME FORMULE, DEUXIÈME MÉTHODE

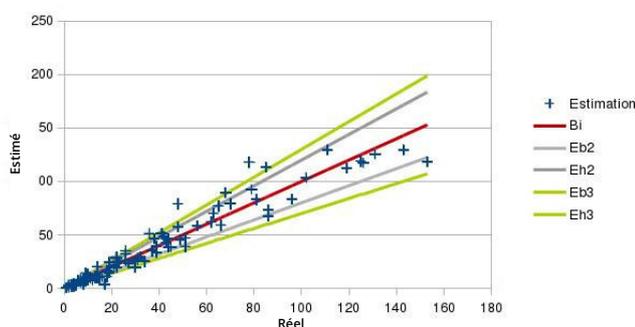


FIGURE 4.9- ESTIMATION DU NOMBRE D'EMPLOYÉS DANS LE SECTEUR DES PLASTIQUES AVEC LA PREMIÈRE MÉTHODE

Le tracé des résultats (Fig. 4.9) obtenus avec la première méthode pour le secteur des plastiques et caoutchoucs montre que l'estimation est correcte puisque, la grande majorité des points se trouvent sous les droites **Eb2** et **Eh2**, représentant respectivement les limites de -20 % d'erreur et de +20 % d'erreur. Nous pouvons dresser le même constat que pour la seconde formule, à savoir que pour des effectifs petits, le critère d'erreur à moins de 30 % n'est pas respecté pour les mêmes raisons. De plus, on remarque que les valeurs obtenues avec les deux méthodes sont très proches et que l'utilisation de la troisième formule n'apporte pas un apport significatif. En effet, les valeurs de α et β sont, dans les tableaux **Tab. 4.5** et **Tab. 4.6** très proches ou identiques et à contrario, la marge d'erreur n'est pas significativement améliorée par rapport à la seconde formule.

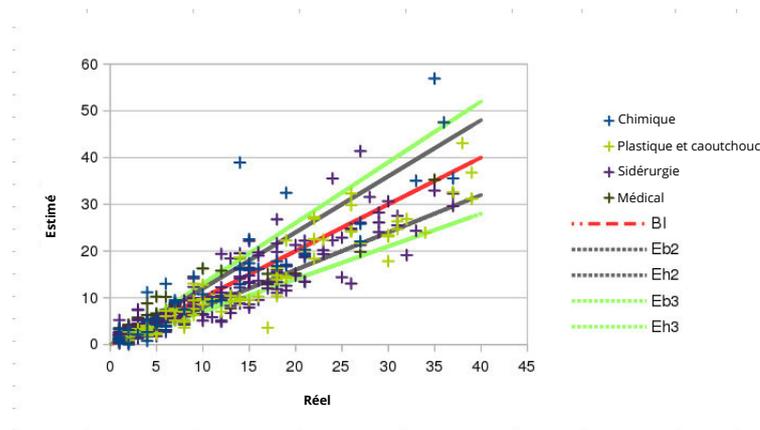


FIGURE 4.10- ESTIMATION DE L'EFFECTIF, PAR LA TROISIÈME FORMULE, PREMIÈRE MÉTHODE, POUR TOUTS LES SECTEURS

CHAPITRE 4. UTILISATION DES DONNÉES ÉCONOMIQUES POUR L'ÉVALUATION DU NOMBRE D'EMPLOIS D'UNE ACTIVITÉ

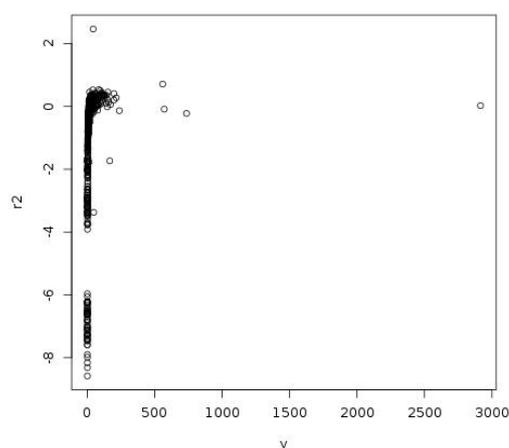


FIGURE 4.11- ÉCART RELATIF PAR RAPPORT À L'EFFECTIF TOUT SECTEUR AVEC LA TROISIÈME FORMULE

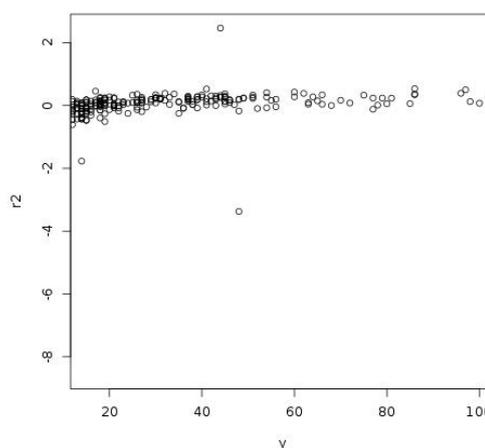


FIGURE 4.12- ÉCART RELATIF PAR RAPPORT À L'EFFECTIF TOUT SECTEUR AVEC LA TROISIÈME FORMULE POUR UN EFFECTIF COMPRIS ENTRE 15 ET 100 PERSONNES

Enfin, l'estimation sur tous les secteurs confondus avec la première méthode et son tracé (Fig. 4.10) montre qu'il y a bien une corrélation possible prenant en compte toutes les entreprises. Néanmoins, on remarque que le nuage de points est assez dispersé autour de cette tendance et laisse supposé que les coefficients obtenus en prenant en compte tous les secteurs donnent des résultats approximatifs. Par conséquent, nous pensons qu'il serait préférable de réduire à des secteurs d'activité similaires l'évaluation des coefficients pour l'obtention de résultats avec un taux d'erreur acceptable. Finalement, comme pour la seconde formule, les graphiques Fig.4.11 et Fig.4.12 représentent l'écart relatif par rapport à l'effectif réel pour tous les secteurs confondus. La conclusion est la même, avec une erreur très importante pour un effectif proche de zéro, et une dispersion de l'écart compris à +/-50% pour un effectif compris entre 15 et 100.

4.6 CONCLUSION INTERMÉDIAIRE SUR LA PREMIÈRE PARTIE EXPÉRIMENTALE

Une première analyse de l'ensemble des résultats montre que la première corrélation ne donne pas les résultats escomptés ce qui remet en cause la validité des hypothèses 1. À contrario, les résultats obtenus avec la deuxième et troisième formules permettent de penser que les hypothèses associées sont correctes. On remarque cependant qu'un taux d'erreur inférieur à 30 % est difficilement atteignable. Cette erreur résiduelle peut provenir des hypothèses et notamment l'annulation de certains termes (hypothèses : 2) ou par le fait qu'il reste difficile d'évaluer l'effectif pour les entreprises de petites tailles (< 10 personnes).

Ces deux formules sont donc exploitables si une base d'entreprises, par secteur, est trouvée. Cependant, en phase préliminaire de projet, c'est-à-dire, celle qui nous intéresse, le calcul de la *Valeur ajoutée* et de l'*EBE* reste plus difficile que celui du chiffre d'affaires, qui dépend des prévisions de vente³. En effet, la façon la plus courante de les calculer inclut la prise en compte de la masse salariale.

Nous proposons donc de refaire l'étude en utilisant cette fois-ci un réseau de neurones pour l'estimation des valeurs. Notre étude va donc essayer d'utiliser comme données d'entrées uniquement les valeurs du *Chiffre d'affaires* dans le but d'observer si un facteur inconnu pourrait permettre une estimation (c'est-à-dire, si le réseau de neurones serait capable de faire une estimation en déduisant certaines informations grâce aux données, même si nous avons montré que cela semble difficile).

4.7 PARTIE EXPÉRIMENTALE : ÉTUDE PAR RÉSEAU DE NEURONES

Dans cette partie, nous proposons de refaire la même étude que précédemment visant à déterminer le nombre d'emplois d'une activité à l'aide de valeurs économiques, mais cette fois-ci en utilisant un réseau de neurones. L'objectif est d'essayer de trouver un réseau permettant de prédire le nombre d'emplois sans supposer un schéma de corrélation. Un réseau de neurones peut être considéré comme un ensemble de cellules, où les « neurones » sont

3. Il est à noter que le calcul classique de *EBE* prend en compte le coût de la masse salariale (voir Annexe : A)

4.7. PARTIE EXPÉRIMENTALE : ÉTUDE PAR RÉSEAU DE NEURONES

organisés en couche. Chaque couche comporte un certain nombre de ces neurones. Enfin, pour terminer le réseau, chaque neurone est connecté à tous les neurones de la couche qui se trouve en amont et en aval de sa propre couche comme le représente la figure **Fig. 4.13**.

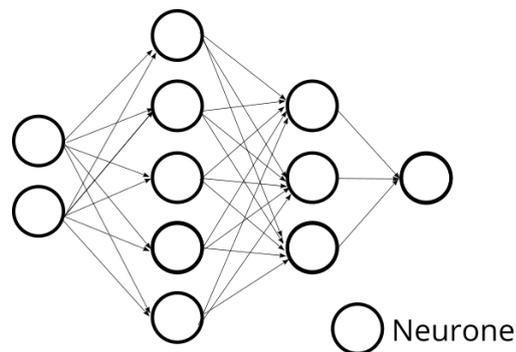


FIGURE 4.13- EXEMPLE D'UN PERCEPTRON MULTI-COUCHE

Chaque cellule reçoit autant de signaux qu'il y a de neurones dans la couche précédente. Pour chaque signal reçu, le neurone lui attribue une pondération puis exécute une fonction définie lors de la conception du réseau. À l'aide de cette formule, le neurone est en mesure de produire un signal qu'il va alors envoyer à tous les neurones de la couche suivante. La première couche comporte un nombre de neurones égal aux nombres d'entrées, c'est-à-dire au nombre de paramètres utilisés pour décrire le problème. La dernière couche comporte quant à elle un nombre de neurones égal au nombre de sorties, c'est-à-dire aux valeurs de la solution du problème. Un tel réseau est statique une fois qu'il est en fonctionnement, ce qui signifie que les valeurs des pondérations ne sont pas modifiées lors de son utilisation. Néanmoins, afin de paramétrer le réseau, une phase d'apprentissage est nécessaire. Cette phase se déroule généralement par l'utilisation de valeurs d'entrées représentant des problèmes et des solutions à ces problèmes. Divers algorithmes permettent le paramétrage de ces réseaux.

Pour notre modélisation nous avons utilisé la librairie *NeuroLab* sous Python. Parmi les éléments proposés par cette librairie, nous avons utilisé un réseau de neurones multi-couches de type *Feed Forward Multiplayer Perceptron*. De plus, nous avons utilisé comme fonction d'activation la fonction TanSig proposée par cette librairie. Pour l'apprentissage, nous utilisons de même la fonction d'apprentissage fournie. Une partie des données sur les entreprises est utilisée pour l'apprentissage alors que l'autre est utilisée pour valider le réseau. Le dernier point concernant la conception du réseau reste la détermination du nombre de couches et du nombre de neurones par couche. D'après la littérature, la façon pour déterminer le nombre optimal de couches comme de neurones reste de tester plusieurs réseaux en commençant par ceux composés avec le moins d'éléments possibles, puis, en augmentant progressivement le nombre de composants jusqu'à l'obtention d'un réseau répondant aux objectifs.

4.7.1 DÉTERMINATION DE L'EFFECTIF AVEC VA ETEBE

Dans cette première partie, nous réalisons un premier réseau ayant comme entrées les éléments économiques VA et EBE. C'est par conséquent, les mêmes données d'entrées que lors de la première étude avec la deuxième et troisième formules. La phase d'apprentissage a utilisé un ensemble de 130 tuples de données provenant de l'ensemble des secteurs précédents avec un taux d'erreur moyen de 20%. Lors d'autres phases d'apprentissage, nous avons tenté de réduire ce taux. Cependant, bien que les résultats répondaient à nos objectifs lors de la phase d'apprentissage, l'utilisation du réseau sur des données réelles n'a pas donné de résultats convainquant (il n'est pas possible de dire si le réseau fait des prédictions correctes). Par conséquent, nous sommes restés sur un taux de 20% qui nous semblait être un bon compromis.

Le meilleur réseau trouvé est composé de quatre couches, elles-mêmes contenant respectivement 2,8,14,1 neurones pour une cible moyenne de 20%. Le résultat trouvé par l'apprentissage est représenté la figure **Fig. 4.14**.

CHAPITRE 4. UTILISATION DES DONNÉES ÉCONOMIQUES POUR L'ÉVALUATION DU NOMBRE D'EMPLOIS D'UNE ACTIVITÉ

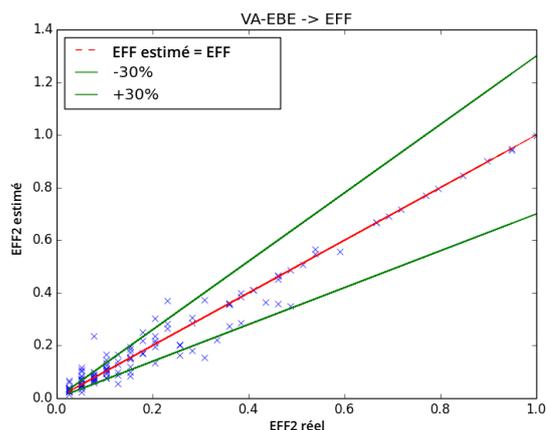


FIGURE 4.14- RÉSULTAT OBTENU LORS DE LA PHASE D'APPRENTISSAGE AVEC VA ET EBE COMME ENTRÉES : ÉCHELLE 1->40

On observe que, comme lors de la régression linéaire et pour les mêmes raisons, les entreprises ayant un effectif faible ont une valeur estimée ayant une erreur supérieure à 30%. Cependant, pour les entreprises de tailles supérieures nous obtenons une très bonne estimation des effectifs, comme représenté sur le graphique par la présence de nombreux points sur la première bissectrice, et ceci à partir d'un effectif supérieur à 16 travailleurs (représenté par le graphe au à l'abscisse 0,4).

Comme expliqué précédemment, nous utilisons par la suite un ensemble de tuples de valeur pour vérifier si les résultats obtenus par le réseau lors de la phase d'apprentissage sont transposables à d'autres cas. Cet ensemble est composé de 100 tuples, ce qui nous conduit aux résultats représentés sur la figure **Fig. 4.15**.

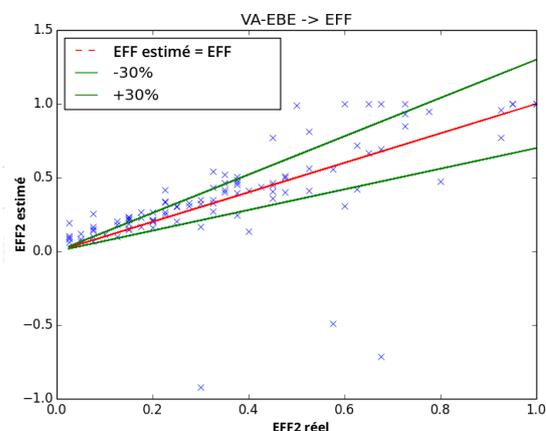


FIGURE 4.15- RÉSULTAT OBTENU LORS DE LA PHASE DE TEST AVEC VA ET EBE COMME ENTRÉES : ÉCHELLE 1->40

D'après cette figure, les résultats sont acceptables puisqu'une majorité des valeurs estimées se retrouvent avec un taux d'erreur inférieur à 30%. Néanmoins, il reste, comme pour les premières méthodes des points avec une erreur supérieure à celle recherchée. Par conséquent, nous pensons que l'utilisation d'un réseau de neurones pour ce cas fonctionne, mais qu'il n'apporte pas de précision supplémentaire comparé aux méthodes précédentes et de plus il s'avère difficile à mettre en place, notamment à cause de la difficulté à déterminer le nombre de couches et de neurones par couche.

4.7.2 DÉTERMINATION DE L'EFFECTIF AVEC CA

Nous tentons ensuite ce que les premières méthodes n'ont pas réussi, à savoir déterminer l'effectif uniquement à l'aide du chiffre d'affaires **CA**. Il est possible de se demander pourquoi tenter cette hypothèse alors que dans la première partie expérimentale nous avons démontré que le chiffre d'affaires n'était pas directement relié à l'effectif

4.7. PARTIE EXPÉRIMENTALE : ÉTUDE PAR RÉSEAU DE NEURONES

(ou en corrélation avec le travail fourni), mais dépendait du type de production. Néanmoins, nous essayons cette méthode pour voir si une relation pourrait tout de même exister (différente de celles proposées, par l'existence de groupe ou par une corrélation continue par exemple).

Nous procédons en utilisant la même méthodologie que dans la partie précédente pour l'utilisation du réseau. L'apprentissage s'est déroulé selon les mêmes conditions, avec une cible à 20% et un ensemble de tuples de 52 points. Après plusieurs essais, le réseau le plus simple trouvé comportait quatre couches avec respectivement 1,16,8,1 neurones par couche. Comme le montre la **Fig. 4.16**, les résultats obtenus lors de la phase d'apprentissage sont acceptables, puisque une très grande majorité des valeurs estimées ont un taux d'erreur inférieur à 30%, même pour les petits effectifs. Ce dernier point est donc intéressant puisque les autres méthodes testées n'ont jamais atteint ce niveau d'erreur pour les entreprises de petites tailles. Afin de valider le réseau, nous utilisons cette fois un ensemble test composé de 218 tuples de valeurs. Les résultats obtenus sont représentés par la figure **Fig. 4.17**, et se révèlent assez mitigés. En effet, sur l'ensemble des valeurs testées, seules 117 ont été estimées avec un taux d'erreur inférieur à 30 % alors que 101 points se retrouvent en dehors de ce critère. Par conséquent, seules 53% des valeurs ont eu une bonne estimation.

Nous pensons par conséquent que l'estimation de l'effectif en utilisant le **CA** est possible, mais demande une information ou un critère supplémentaire. En effet, comme nous l'avons expliqué dans la première partie, le chiffre d'affaires seul ne tient pas compte du procédé de production. Une solution possible est de restreindre dans les ensemble de valeurs utilisées, des entreprises ayant le même type de production. Pour évaluer cette proposition et, compte tenu que nous ne disposons pas des informations nécessaires, nous nous proposons dans la partie qui suit, d'utiliser comme valeurs d'entrées un tuple formé de la valeur du **CA** et de l'effectif d'une entreprise à un instant donné et de la valeur du **CA** à l'instant où l'on souhaite connaître l'effectif.

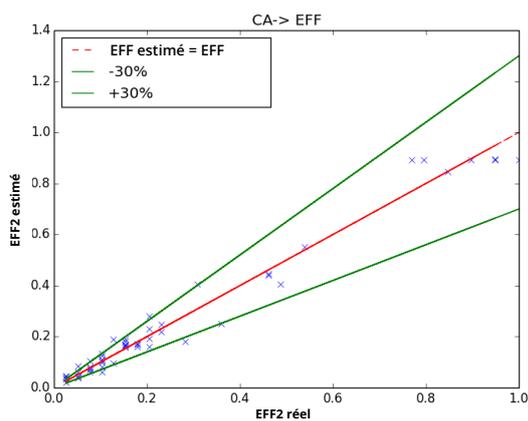


FIGURE 4.16- ESTIMATION DE L'EFFECTIF EN UTILISANT LE CA, PHASE D'APPRENTISSAGE : ÉCHELLE 1->40

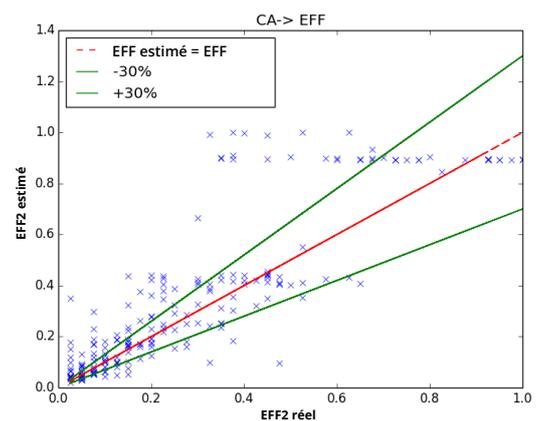


FIGURE 4.17- ESTIMATION DE L'EFFECTIF EN UTILISANT LE CA, PHASE DE TEST : ÉCHELLE 1->40

4.7.3 DÉTERMINATION DE L'EFFECTIF $EFF2$ AVEC $CA1, EFF1, CA2$

Dans cette dernière simulation, nous utilisons comme valeurs d'entrées $CA1, Eff1$ représentant le chiffre d'affaires et l'effectif d'une entreprise à une date donnée et $CA2$ le chiffre d'affaires à une autre date. La valeur recherchée étant l'effectif $Eff2$ correspondant à $CA2$. Cette démarche vise à pouvoir faciliter, dans un premier temps, l'estimation des emplois induits, mais aussi, dans un second temps, les emplois directs par une méthode analogue. Nous utilisons toujours la même méthodologie pour la conception du réseau. L'une des principales difficultés rencontrées a été le nombre de données disponibles. Nous avons eu à notre disposition 49 tuples pour l'apprentissage et 91 pour la phase de test. De plus, pour la majorité des tuples, seul un, deux ou trois ans séparent les valeurs, ce qui est relativement faible. Enfin, les données utilisées pour l'apprentissage n'étaient pas homogènes car 44 des 49 tuples comportés un effectif inférieur à 0,4 (71 employés) pour une fourchette de valeurs allant jusqu'à 1 (soit 179 employés). Lors de la phase de conception, le meilleur réseau trouvé est composé de quatre couches de 3,12,10,1 neurones par couche. Les résultats obtenus par la phase d'apprentissage sont illustrés par la figure **Fig. 4.18**, où les estimations correctes se concentrent pour les tuples ayant des effectifs inférieurs à 0,4, montrant la non-homogénéité des valeurs utilisées.

CHAPITRE 4. UTILISATION DES DONNÉES ÉCONOMIQUES POUR L'ÉVALUATION DU NOMBRE D'EMPLOIS D'UNE ACTIVITÉ

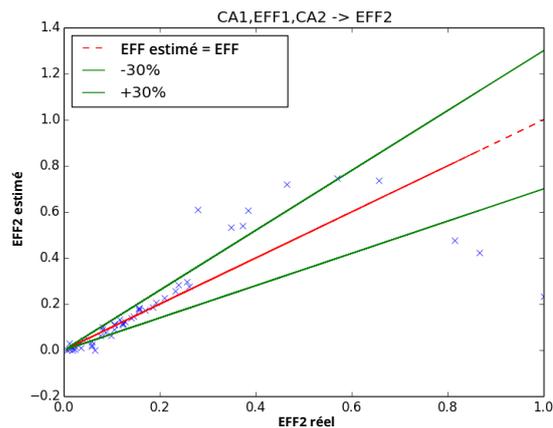


FIGURE 4.18- PHASE D'APPRENTISSAGE, ESTIMATION DE Eff2 EN UTILISANT CA1, Eff1, CA2 : ÉCHELLE 1->172

Nous utilisons ensuite un ensemble composé de 91 tuples pour valider les résultats qui, comme pour celui utilisé pour l'apprentissage, comporte 84 tuples correspondant à un effectif inférieur à 0,4. Le résultat obtenu par le réseau sur cet ensemble est illustré sur la figure **Fig. 4.19**.

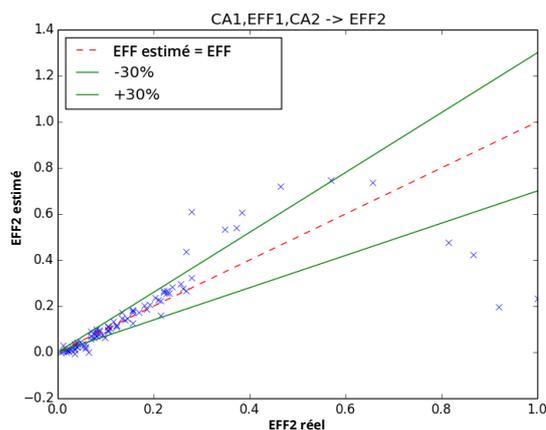


FIGURE 4.19- PHASE DE TEST, ESTIMATION DE Eff2 EN UTILISANT CA1, Eff1, CA2 : ÉCHELLE 1->172

Dans l'ensemble, les estimations sont bien meilleures que lors de l'utilisation du **CA**. Ainsi, sur les 91 points utilisés, 59 ont été estimés avec une marge d'erreur inférieure à 30% soit 64% de résultats corrects. Seuls 32 points ont un taux supérieur. Enfin, si nous limitons l'étude à l'intervalle compris entre 0,1 et 0,4 pour l'effectif, cela nous donne 36 points acceptables contre 5 en dehors de la marge d'erreur acceptable, soit 84% de bons résultats. Cette dernière limitation peut se justifier par la même explication que dans la première partie, à savoir qu'en dessous d'un effectif de 10, à un ouvrier près l'erreur devient rapidement importante.

Ce résultat, malgré les limitations, laisse supposer qu'une relation peut être faite entre le chiffre d'affaires et l'effectif d'une entreprise et par conséquent qu'il serait possible d'estimer l'effectif d'une entreprise uniquement en utilisant le **CA**, c'est-à-dire à partir des prévisions de ventes. Néanmoins, notre étude ne permet pas de trancher catégoriquement de par les différents facteurs expliqués, comme le nombre insuffisant de données et l'incertitude qu'elles peuvent présenter.

4.8 PROPOSITION

Dans cette section, nous résumons les résultats trouvés et nous proposons des moyens de calculer la création d'emplois suite à l'implantation d'une nouvelle activité. Ces indicateurs correspondent à une partie de l'impact social. Par conséquent, nous proposons plusieurs façons de calculer les emplois directs, par des méthodes issues

des travaux que nous venons de présenter. Par la suite, nous proposons également des méthodes pour le calcul des emplois indirects et induits.

4.8.1 PROPOSITION SUR LE CALCUL DES EMPLOIS DIRECTS

Comme nous venons de le voir, plusieurs méthodes existent et sont relativement efficaces pour déterminer le nombre d'emplois créé. Ces méthodes se basent, dans un premier temps sur une phase de paramétrage ou d'apprentissage. Nous avons vu qu'une des méthodes les plus simples utilise une formule basée sur la *Valeur ajoutée* et l'*excédent brut d'exploitation*. Une fois la formule paramétrée (c'est-à-dire les coefficients trouvés), elle est utilisable sur un même secteur d'activité que celui utilisé pour le paramétrage. Néanmoins, cette méthode suppose d'avoir accès à la **VA** et à l'**EBE**, ce qui n'est pas toujours le cas. Une autre façon d'estimer ce nombre d'emplois directs consiste à n'utiliser que le chiffre d'affaires comme paramètre. Le réseau de neurones s'avère ici plus efficace que la méthode basée sur des formules mais n'offre, dans l'ensemble, que des résultats mitigés. Néanmoins, combiné avec un couple de valeur chiffre d'affaires et effectif, l'utilisation de réseau de neurones peut être plus efficace voire donner de très bons résultats comme nous l'avons montré lors du dernier test. Pour conclure, les méthodes de régression linéaire basées sur l'utilisation de **VA** et à l'**EBE** comme paramètres d'entrées semblent plus fiables à condition de pouvoir estimer **EBE** sans avoir recours à la masse salariale⁴. Sinon, le chiffre d'affaires peut être utilisé avec les données d'entreprises très similaires (mêmes activités).

4.8.2 PROPOSITION SUR LE CALCUL DES EMPLOIS INDIRECTS

Comme expliqué dans la partie 3.6.4, le calcul du nombre d'emplois indirects se base sur le ratio du chiffre d'affaires de l'activité de l'entreprise sous-traitante relatif à l'activité considérée. Cependant, nous avons montré (et qui est en accord avec la littérature) que l'effectif n'évolue pas linéairement avec le chiffre d'affaires. Nous proposons donc, une nouvelle manière de réaliser ce calcul basée sur nos travaux et plus particulièrement sur les réseaux de neurones. L'idée pour le calcul est d'utiliser un tel réseau paramétré en fournissant comme valeurs d'entrées l'effectif et le chiffre d'affaires de l'entreprise sous-traitante avant déploiement de la nouvelle activité, puis le nouveau chiffre d'affaires associé. Ainsi, le résultat obtenu est le nouvel effectif (en tenant compte de la marge d'erreur) et la différence des deux effectifs nous permet de déterminer le nombre d'emplois créés.

4.8.3 PROPOSITION SUR LE CALCUL DES EMPLOIS INDUITS

Enfin, nous proposons une nouvelle formule pour le calcul des emplois induits. Comme nous l'avons montré dans la partie 3.6.4, ce calcul se fait sur une base statistique mesurant l'impact d'une activité et plus précisément des familles où l'un des membres travail directement ou indirectement dans la nouvelle activité sur l'emploi de « service ». Cependant, certaines données, comme le pourcentage d'emploi lié à la consommation dans une région, sont difficiles à trouver. Par conséquent, tout en gardant la même philosophie, nous proposons de simplifier cette formule. Nous proposons la formule suivante :

- Le nombre d'emplois directs : **DJ**
- Le nombre d'emplois indirects : **IJ**
- La taille moyenne des familles : **SF**
- La taille de la population : **P**
- La part du PIB supporté par la consommation des ménages dans le secteur : $PIB_{secteur}$
- Le nombre de travailleurs dans le secteur considéré : **JIA**

$$EmploiInduit_{secteur} = JIA * PIB_{secteur} * \frac{(DJ + IJ) * SF}{P} \quad (4.16)$$

La simplification de la formule vient de l'utilisation de données nationales et non plus régionales ou par zone d'activité. De ce fait son calcul est plus rapide car les données sont plus facilement accessibles. Bien que nous ayons testé cette formule sur plusieurs exemples, nous ne pouvons pas affirmer sa validité. Cependant, le même problème existe avec la formule originale. En effet, un décompte exacte semble impossible, puisque la limite du système n'est pas clairement définie (consommation des ménages) et que les emplois induits dépendent aussi d'autres activités.

4.9 CONCLUSION

Dans cette partie nous avons essayé d'estimer une partie des indicateurs sociaux que sont le nombre d'emplois directs, indirects et induits créés à l'aide de paramètres économiques. Le but étant de fournir des alternatives

4. En effet, le coût de la masse salariale entre en jeu pour le calcul de l'**EBE** (voir Annexe : A)

CHAPITRE 4. UTILISATION DES DONNÉES ÉCONOMIQUES POUR L'ÉVALUATION DU NOMBRE D'EMPLOIS D'UNE ACTIVITÉ

aux méthodes utilisées pour l'estimation de ces chiffres. Les résultats obtenus sont, pour une majorité, corrects mais se révèlent complexes à utiliser principalement par le fait que les données nécessaires ne sont pas forcément disponibles. À contrario, les méthodes qui sont plus faciles à mettre en place de par la facilité d'accès de ces données, comme le chiffre d'affaires, ont un résultat plus mitigé. Nous avons principalement proposé deux méthodes d'estimation de l'emploi. Une basée sur des formules qu'il suffit de paramétrer pour qu'elles soient utilisables. L'autre méthode, basée sur la conception d'un réseau de neurones, nécessite une phase d'apprentissage pour être utilisée. Cependant, la première méthode nécessite l'identification de paramètres reliant les données d'entrées à la valeur de sortie, alors que la seconde méthode n'en a pas besoin.

De plus, nous avons remarqué que pour les petites entreprises, l'estimation est souvent entachée d'une erreur importante. Une des explications possibles est le fait que le nombre d'employés est un entier et que sur des petits nombres, la moindre variation génère une erreur importante ; sur une entreprise de 3 personnes une erreur de 1 individu correspond à 33% d'erreur.

Nous identifions plusieurs points bloquants à notre étude. Tout d'abord, et comme nous l'avons souligné, les données sur les entreprises ne sont pas facilement accessibles et par conséquent il existe un certain nombre d'incertitudes dues à la fiabilité des données utilisées (erreurs possibles de par la provenance des données⁵). Nous pouvons ajouter que le nombre d'emplois dans une entreprise peut être modulé par la législation en vigueur. En effet la politique d'emplois de l'entreprise ne dépend pas forcément de la production à un instant donné, mais dépend aussi des contrats (temps pleins, temps partiels....) utilisés, de la manière dont sont comptabilisés les employés, et de la stratégies de l'entreprise à long terme.

5. différents sites d'internet proposant des bilans comptables ou des synthèses

MÉTHODOLOGIE DE GÉNÉRATION DE NOUVELLES TRAJECTOIRES BASÉE SUR LE RAISONNEMENT À PARTIR DE CAS

De même nous ne voyons pas un arbre d'une façon exacte et dans son ensemble, en détaillant ses feuilles, ses branches, sa couleur et sa forme ; il nous est beaucoup plus facile d'imaginer un à peu près d'arbre. Au milieu des événements les plus extraordinaires, nous agissons encore de même : nous inventons la plus grande partie de l'aventure, et il n'est guère possible de nous contraindre à assister à un événement quelconque, sans y être « inventeurs ». Tout cela veut dire que nous sommes foncièrement et dès l'origine — habitués au mensonge. Ou, pour m'exprimer d'une façon plus vertueuse et plus hypocrite, je veux dire d'une façon plus agréable : on est bien plus artiste qu'on ne le pense.

PAR DELÀ LE BIEN ET LE MAL – FRIEDRICH NIETZSCHE – §192, CHAPITRE V : HISTOIRE NATURELLE DE LA MORALE

5.1 OBJECTIFS DE LA MÉTHODOLOGIE ET DESCRIPTION DU PROBLÈME

5.1.1 PROBLÈME SOULEVÉ

Afin de répondre aux besoins actuels en ce qui concerne la valorisation des déchets, on cherche ici à établir une méthode et à développer un outil dont le but est de proposer de nouvelles trajectoires de valorisation. Il s'agit d'être capable de proposer des voies de valorisation sur des déchets qui n'en ont pas encore ou de proposer de nouvelles alternatives pour certaines filières. La réalisation de cet objectif nécessite la résolution de certains problèmes qui ne sont pas forcément communs en conception de procédés classiques. En effet, si l'on rencontre le plus généralement des problèmes où l'on cherche à produire un produit, ici, on retrouve trois types de problèmes (Fig. 5.1), provenant de la répondre à trois questions :

1. En quoi revaloriser un déchet ? (objet)
2. Pour quel usage ? (usage)
3. Comment arrive-t-on du produit initial au produit valorisé ¹ ? (comment)

Si l'on peut considérer la question trois comme un problème classique lors de la conception de procédés, les questions une et deux impliquent que le résultat de la transformation et son utilité ne sont pas connus. Ceci s'explique par la nature du problème.

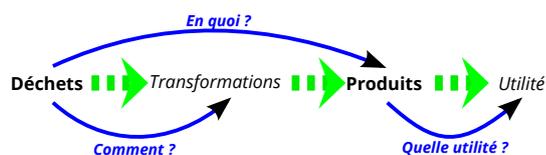


FIGURE 5.1- PROBLÉMATIQUES

1. Il y a une distinction entre un produit valorisé et un produit valorisable. Un déchet valorisé est un déchet qui a été transformé ou réemployé afin d'en tirer un bénéfice. Un déchet valorisable est un déchet qui peut être valorisé mais, dans les faits, il ne l'est pas forcément

CHAPITRE 5. MÉTHODOLOGIE DE GÉNÉRATION DE NOUVELLES TRAJECTOIRES BASÉE SUR LE RAISONNEMENT À PARTIR DE CAS

5.1.2 NATURE DU PROBLÈME



FIGURE 5.2- VALORISATION DES DÉCHETS

Le problème que nous venons de décrire a pour origine la nature de la requête demandée. En effet, la problématique soulevée est la suivante : « Comment valoriser un type de déchet ? » (Fig.5.2). Cependant, on remarque qu'il n'y a pas de but au sens procédé (c'est-à-dire atteindre un produit clairement identifié), mais uniquement un besoin de satisfaire une contrainte. Plus clairement, « valoriser » n'est pas une action directe, mais une conséquence de plusieurs actions :

- transformer un déchet (un élément qui n'a pas de valeur) en un autre produit
- évaluer la valeur de ce nouveau produit
- constater la création de valeur au travers de différentes actions
- qualifier cette action de « valorisation » par le constat d'ajout de valeur²

Or, comme nous l'avons vu le problème n'est pas classique et peut conduire à différentes approches.

5.1.3 TROIS APPROCHES DU PROBLÈME

1^{re} approche La première approche (Fig. 5.3) qui semble être la plus logique est la suivante. À partir d'un déchet, essayer de trouver en quel objet il peut être transformé, objet qui a une utilité (ou, du moins une valeur marchande) puis d'établir par quelles transformations successives il est possible de l'atteindre.

Exemple simple mais didactique :

- Je possède des planches qui ne me sont pas utiles (**Situation initiale**)
- Je souhaite en faire une table qui me sera utile (**En quoi et à quelle fin**)
- Je dois découper les planches et les assembler (**Comment**)

La difficulté dans cette approche réside dans la seconde étape. En effet, si la troisième ne pose pas plus de problème qu'une conception classique de procédés (conception courante mais non triviale), la seconde suppose la capacité de projeter mentalement un objet en un autre ayant de l'utilité ou de la valeur. Plus clairement, il s'agit d'être capable d'établir un lien entre deux objets différents, en le justifiant par la conviction qu'il est possible de transformer l'un en l'autre. Dans notre exemple, le raisonnement suppose que les planches sont transformables en table.

2^e approche La seconde approche (Fig. 5.3) est l'inverse de la première, elle est moins intuitive. L'idée est qu'ici on propose d'appliquer une transformation à un objet (déchet) puis que l'on recherche à quoi, une fois transformé, il peut servir, c'est-à-dire s'il a acquis de la valeur. Pour reprendre notre exemple :

Exemple :

- Je possède des planches qui ne me sont pas utiles (**situation initiale**)
- Je découpe les planches pour en faire différents composants (**Comment**)
- Je m'interroge à quoi elles pourraient servir (**En quoi et à quelle fin**)

Cette situation implique le problème suivant : étant donné que l'objectif de la transformation n'est pas connu, la transformation choisie (dans l'exemple, découper) est aléatoire. Dans ce cas, il n'y a aucune garantie que cette transformation amène à un objet ayant de la valeur. Par conséquent, si l'approche est prise telle quelle, il s'agit ici d'une exploration aléatoire par ajout successif d'une ou plusieurs transformations. À chaque ajout, il faut vérifier si la résultante a ou non une valeur et dans la négative, continuer l'exploration. Finalement, la difficulté provient de la combinatoire élevée d'une telle approche. Ainsi, si on reprend notre exemple, la simple action de découper peut être déclinée en une multitude d'opérations : couper droit, couper en petit bout, selon quelles dimensions....

Première constatation sur les deux approches. Bien que logiques, les deux approches précédentes possèdent de fortes contraintes :

2. Il faut bien comprendre que la valorisation n'est pas une action en-soi, mais uniquement la qualification d'une action par un observateur.

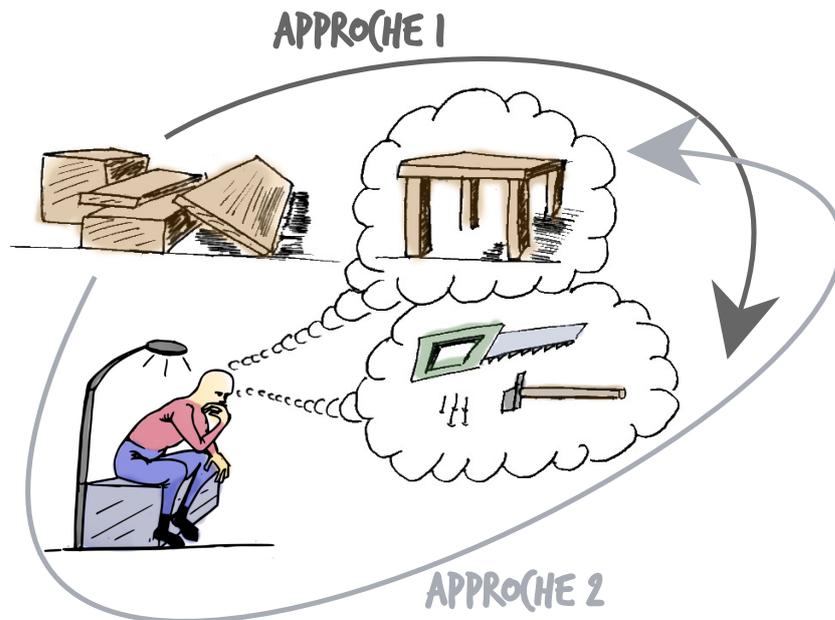


FIGURE 5.3- DEUX APPROCHES DE RAISONNEMENT

- La première suppose d'être en mesure de faire une projection du déchet en un produit valorisé. Or ceci relève d'un raisonnement complexe, même pour un humain³.
- La seconde implique de combiner toutes les opérations possibles, ce qui la rend difficilement applicable en un temps limité.

Par conséquent, il est difficile de voir comment concevoir un système pour résoudre ce type de problème. On remarque que la seconde approche proposée permettrait d'atteindre un résultat, si pour la trajectoire, le choix des opérations à effectuer serait dans un sous-ensemble restreint et non pas aléatoire. En d'autres termes, si l'espace des possibilités (contenant les opérations) est réduit.

3^e approche Comme nous l'avons constaté, le problème avec la seconde approche est la combinatoire. Or, comme nous le suggérons, si la sélection des opérations était guidée, elle rendrait la 2nd approche acceptable puisqu'elle limiterait la combinatoire au niveau des opérations possibles en ne sélectionnant que celles qui ont une grande probabilité de conduire à une solution. La question à résoudre devient alors qu'elle est la ou les opérations de transformation à appliquer qui permettraient de conduire à une solution intéressante. Pour résumer, cette approche est donc la même que la 2nd mais en limitant le choix des opérations.

Principe de résolution proposé et premières hypothèses. En mixant les approches et les constatations on propose une méthode de résolution limitant ou contournant les problèmes soulevés. L'idée est ici d'exploiter une connaissance sur ce type de problème afin d'en résoudre de nouveaux. La littérature nous propose un ensemble de techniques mettant en œuvre ce type de raisonnement (Section 2.6.2.1). Ainsi, le retour d'expérience, le raisonnement par analogie en sont deux exemples. De part les hypothèses qui suivent, le raisonnement à partir de cas a été choisi.

Hypothèse 1 Une opération qui a été réalisée sur un élément est réalisable sur un élément similaire. Par exemple si **A** et **B** sont considérés comme similaires et si l'opération **Op1** a été réalisée sur l'élément **A**, **Op1** est alors réalisable sur l'élément **B**.

Il faut néanmoins définir ce que signifie similaire. Une première définition est la suivante :

Definition 1 « Similaire : Se dit de choses qui peuvent, d'une certaine façon, être assimilées les unes aux autres » Dictionnaire Larousse

Definition 2 « Assimiler : Considérer quelque chose ou quelqu'un comme semblable à quelque chose ou quelqu'un d'autre, ou le traiter comme tel » Dictionnaire Larousse

3. Si vous en doutez, prenez n'importe quel déchet et trouvez un moyen de le rendre utile. Si vous arrivez, pourquoi ne pas exploiter l'idée ?

CHAPITRE 5. MÉTHODOLOGIE DE GÉNÉRATION DE NOUVELLES TRAJECTOIRES BASÉE SUR LE RAISONNEMENT À PARTIR DE CAS

Hypothèse 2 *La réalisation d'opérations similaires sur des objets similaires conduit à un résultat similaire.*

Autrement dit, cette hypothèse suppose que si une succession d'opérations a conduit à un certain résultat, dans notre cas la valorisation d'un déchet, alors en appliquant des opérations similaires sur un déchet similaire on obtiendra le même résultat, à savoir la valorisation du déchet ⁴.

Ces hypothèses peuvent se justifier de part le fait de la définition de la similarité. En effet, il est possible de raisonner de la façon suivante :

- Si A subit une opération Op1 pour devenir B que l'on peut écrire sous la forme : $Op1(A) = B$
- Si X est similaire à A, alors par définition X peut être assimilé à A et A peut être assimilé à X $\Rightarrow A \approx X$
- Alors $Op1(X) = Y$ avec $Y \approx B$ puisque X est assimilable à A

Exemple 1 — *Une baguette de pain est assimilée à une planche*

- *Une baguette de pain subit l'opération **couper** dont le résultat est une baguette coupée*
- *Le résultat de l'opération **couper** sur la planche est une planche coupée qui, suivant l'hypothèse sur la similarité, est similaire à une baguette coupée*

Le principe de résolution est donc le suivant : on propose de constituer une base de connaissance sur les déchets et de leurs traitements, puis, d'utiliser cette base pour résoudre de nouveaux cas. Actuellement, les versions traditionnelles du RàPC ne permettent pas une utilisation directe pour traiter le problème de la création de voies de valorisation des déchets. Il s'avère donc nécessaire de proposer de nouvelles évolutions méthodologiques pour chacune des étapes du RàPC. La finalité de ce chapitre est de détailler notre contribution sur ces évolutions. Mais avant cette partie (section 5.4, nous allons examiner la problématique.

5.2 POURQUOI UTILISER UN SYSTÈME DE RAISONNEMENT À PARTIR DE CAS (RÀPC)

Nous avons posé, dans la partie précédente, les principales caractéristiques du problème et nous proposons de les résoudre en utilisant le raisonnement à partir de cas. Cette méthode (détaillée au chapitre 2) se base sur certaines hypothèses qui permettent son utilisation. On se propose ici de vérifier l'applicabilité de cette méthode à notre problématique.

- **Des problèmes similaires ont des solutions similaires** Cet aspect constitue une contrainte forte pour l'utilisation de la méthode. Dans notre cas, nous posons cette hypothèse comme nous l'avons expliqué dans la partie précédente. Cette hypothèse s'applique donc sur les idées soulevées 5.1.3 :
 - Une opération appliquée sur un objet est applicable sur un objet similaire
 - Une suite d'opérations appliquée sur un objet conduit à un résultat similaire
- **Les caractéristiques des problèmes restent stables dans le temps** Dans notre cas, l'une des caractéristiques des problèmes serait les techniques de transformation. En effet, un même déchet n'évolue pas dans le temps. Le type de déchet lui peut évoluer mais, on peut supposer qu'il n'y a pas de modification radicale dans les éléments qui le composent. Les techniques de transformation peuvent évoluer avec l'évolution des technologies et des connaissances. On peut néanmoins considérer qu'une opération, dans sa définition générale reste la même dans sa fonction générale.
- **Les situations se répètent** La recherche de nouvelles trajectoires de valorisation peut se réaliser pour un certain nombre de types de déchet. Ces trajectoires sont des processus eux-mêmes constitués par des procédés. Ces procédés réalisent différentes opérations et peuvent se retrouver dans différents processus. Par conséquent, une mutualisation de la connaissance entre les filières est possible.

5.3 DÉFINITION GÉNÉRALE DU SYSTÈME RÀPC

Le raisonnement à partir de cas est une méthode de résolution de problèmes dits routiniers. Cette méthode se base sur la réutilisation de connaissances. Ces connaissances sont souvent des données sur les problèmes similaires ainsi que leurs solutions. Nous allons voir dans la partie qui suit les différents composants et étapes de cette méthode (Fig. 5.4). Cette description fait écho à la partie expliquant ce système (section 2.6.2.1).

4. Justification à cause de la décomposition de la trajectoire, voir section 5.9.4)

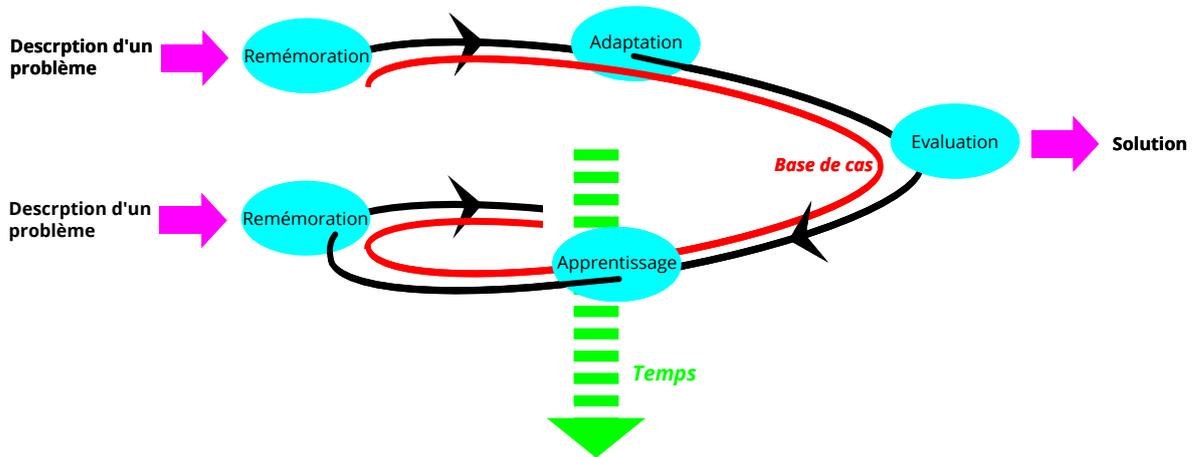


FIGURE 5.4- FONCTIONNEMENT GÉNÉRAL D'UN RÀPC

5.3.1 STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT GÉNÉRALE D'UN RÀPC

5.3.1.1 CAS

Un cas est, le plus souvent, un couple constitué d'un problème et de sa solution et est l'élément central d'un RàPC. Ce qui implique qu'ils sont considérés comme deux éléments distincts dans un système de ce type. Traditionnellement, on distingue deux cas :

- Cas source : est défini comme une expérience passée, c'est donc un cas appartenant à la base de connaissance du système composé d'un problème et de sa solution.
- Cas cible : problème en cours de résolution.

5.3.1.2 ÉTAPE 0 : REPRÉSENTATION DU PROBLÈME

La première étape à réaliser est la représentation du problème. Dans cette étape, il s'agit de décrire le problème de telle sorte que le système puisse le comprendre et l'exploiter. Ainsi, il existe différentes formes de représentation selon le type de problèmes auxquels le système sera soumis. Cela revient à trouver une manière de représenter la connaissance. Il existe plusieurs représentations de cette connaissance comme la forme classique composée d'une série d'attributs caractéristiques à valeur, ou l'utilisation des graphes. Plusieurs éléments sur la représentation de la connaissance sont détaillés dans la section 2.7.1.1.

5.3.1.3 ÉTAPE 1 : LA REMÉMORATION DU CAS

Dans cette partie, le problème **P** que l'on cherche à résoudre est introduit dans le système. La première étape de résolution consiste en la recherche de cas source similaire, c'est-à-dire d'un problème similaire et sa solution. Cette étape implique donc la définition de la similarité entre problèmes et, si nécessaire, une méthode d'exploration de la base de cas. À la fin de cette étape, un ou plusieurs cas seront remémorés et seront traités dans les étapes suivantes.

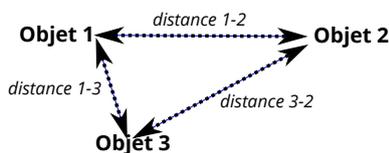


FIGURE 5.5- DISTANCES

La question centrale est qu'est ce que la similarité et comment la calcule-t-on ?

Une première réponse provient de sa définition et des éléments qui y réfèrent (voir section 2.7.2.1). Ici, nous souhaitons décrire plus en détails certains aspects de la similarité que l'on retrouve fréquemment dans les systèmes de raisonnement à partir de cas (RàPC). La similarité est une valeur en relation avec une distance (Fig. 5.5). Plus précisément, elle est souvent considérée comme l'inverse de la distance. Néanmoins il est nécessaire de définir comment calculer la distance entre deux éléments.

La distance entre deux éléments est une valeur subjective qui quantifie la possibilité de considérer ces deux éléments comme semblables. Elle fournit une comparaison des éléments entre eux en permettant par la suite une classification par ordre de similarité. Concrètement, cette valeur peut dépendre de plusieurs facteurs, comme le type de problème, le mode de représentation, le point de vue d'un expert ou le degré de connaissance du

CHAPITRE 5. MÉTHODOLOGIE DE GÉNÉRATION DE NOUVELLES TRAJECTOIRES BASÉE SUR LE RAISONNEMENT À PARTIR DE CAS

domaine. Cependant, dans la majorité des systèmes, elle nécessite des connaissances spécifiques qui doivent être introduites dans le système lors de la réalisation de ce dernier.

5.3.1.4 ÉTAPE 2 : L'ADAPTATION

Suite à l'étape précédente, un certain nombre de cas résolus plus ou moins distants (d'un point de vue de la similarité) de notre problème sont remémorés. Deux situations sont envisageables :

- Soit un cas remémoré correspond exactement à notre problème, alors notre problème est résolu et il n'y a rien à faire. La solution du cas trouvé répond à **P**.
- Soit aucun cas remémoré correspond exactement au problème. Dans cette situation plusieurs politiques peuvent être appliquées. Il est possible de considérer que la solution trouvée, bien que ne correspondant pas exactement à notre problème est applicable sans modification. Sinon, il est nécessaire de l'adapter.

Ce processus d'adaptation est complexe puisqu'il suppose que le système sache comment l'adapter. À travers de cette supposition, cela implique que des méthodes d'adaptation ont été implémentées dans le système. Nous voyons ici, qu'un autre type de connaissance est introduit dans le système. Il s'agit de connaissances qui expliquent comment réaliser cette adaptation et qui implique que ce mécanisme est plus ou moins maîtrisé.

5.3.1.5 ÉTAPE 3 : ÉVALUATION ET RÉVISION

Cette étape consiste à évaluer la solution adaptée. Cette étape peut être automatique, mais le plus généralement elle est faite par un être humain qui va vérifier la cohérence de la solution et surtout sa pertinence. Dans certains cas, la solution proposée peut être revue car malgré l'adaptation elle ne répond pas totalement aux exigences du problème initial.

5.3.1.6 ÉTAPE 4 : APPRENTISSAGE

Ici, le problème **P** résolu est stocké dans la base de cas s'il est considéré pertinent. Il pourra ainsi alimenter cette base et permettre de résoudre d'autres problèmes en élargissant l'espace de ces derniers.

5.4 DESCRIPTION DU CAS, UN ÉLÉMENT ABSENT DU SYSTÈME

Nous avons expliqué précédemment que les modèles de raisonnement à partir de cas se base sur un élément central qui est le *Cas*. Pour définir ce qui est un *Cas*, pour notre problème, il faut identifier les deux parties du couple *problème-solution*. Or comme nous l'avons vu dans la partie 5.1.3, pour notre cas d'application, il n'y a pas de distinction précise de ce que représente le problème et la solution, ou pour être plus précis, ces deux éléments peuvent être différents selon la manière dont on aborde le problème.

Nous proposons donc de ne pas créer de *Cas* à proprement parler, ou du moins, qu'il n'existe pas dans notre modèle en tant qu'élément pré-établi. Au contraire, on se propose de stocker uniquement la connaissance sous forme simple et de générer ce qui sera utilisé comme *Cas*, en fonction du besoin. Par conséquent, il s'agit plus d'une génération de cas suite à un besoin dans le système, qu'a une représentation formelle du *Cas*. Cela génère plusieurs conséquences et font émerger plusieurs difficultés. Premièrement, même si un *Cas* n'est pas formellement représenté dans le modèle, la structure proposée implique de savoir le générer à partir de l'information disponible. Deuxièmement, il est nécessaire de disposer de suffisamment d'information afin de pouvoir répondre aux sollicitations du système pour générer un *Cas* dynamiquement. Ceci implique la première difficulté de représenter la connaissance afin qu'elle puisse être traitée.

5.4.1 REPRÉSENTATION DES DONNÉES PAR UN RÉSEAU SÉMANTIQUE

Nous avons choisi de représenter l'information que nous utiliserons pour le système de RàPC que nous proposons sous forme de réseau sémantique (voir section 2.7.1.1). Ce réseau, qui s'apparente à une ontologie ne suit aucun formalisme, et donc répond aux besoins exprimés mais aussi de la façon dont nous comptons traiter l'information stockée (qui sera expliquée par la suite). Il s'agit de relier un ensemble d'éléments de manière logique par des relations. D'un certain point de vue, la manière dont ces éléments sont mis en relation n'est pas formalisée. Nous verrons néanmoins qu'une structure a été établie permettant le fonctionnement du système. De ce fait, il n'y a pas de formalisme pour la conservation des données mais uniquement pour leur traitement par le système.

5.4.2 TRAITEMENT LOGIQUE DE L'INFORMATION

Comme nous venons de l'expliquer, les informations stockées dans le système vont être traitées dynamiquement afin de satisfaire les besoins de flexibilité liés à la représentation et à la résolution du problème. En complément du réseau sémantique, nous proposons d'utiliser des mécanismes d'inférences qui vont permettre de traiter les données et de retourner l'information nécessaire structurée si besoin. Ces mécanismes sont souvent présents dans des systèmes dits intelligents, comme les moteurs de parcours d'ontologie. L'inférence est un moyen de vérifier ou d'arriver à une vérité en passant par d'autres vérités (ou assertions).

Exemple 2 — *Je sais que C est vrai si A et B le sont*

- *Je sais que A est vrai*
- *Je sais que B est vrai*
- *=> inférence => j'en déduis que C est vrai*

De ce fait, même si l'information n'est pas structurée, elle peut être analysée de manière logique pour en tirer des informations ou des constatations. L'inférence peut aussi permettre l'extraction de nouvelles données par l'utilisation de règles définissant de nouvelles assertions.

Exemple 3 — *Si X est père de Y et si Y est père de Z alors X est grand père de Z => règle d'inférence*

- *Je sais que A est père de B*
- *Je sais que B est père de C*
- *inférence => j'en déduis que A est grand-père de C*

Au travers de cet exemple, on voit que des informations non existantes de manière explicite dans la base de données peuvent être extraites grâce aux mécanismes d'inférence. Dans l'exemple précédent, nous ne savons pas que A est grand-père de C mais nous le déduisons de manière logique. La construction de règles d'inférences repose néanmoins sur de la connaissance qui doit être introduite. Elle a l'avantage de permettre l'extraction de connaissances implicites mais oblige à que cette connaissance soit valide pour tous les *Cas* (au sens *RàPC*). Pour exemple, si nous avons la règle d'inférence suivante :

- *Si X est un homme, alors X est mortel,*

il faut que cette règle soit vraie pour tout *X* tel que la condition *est un homme* soit vérifiée.

Ce mécanisme d'inférence a l'avantage de structurer notre information, et de générer nos cas en fonction des besoins.

5.4.3 DES CAS DYNAMIQUES

Nous proposons donc pour notre modèle la création de cas dynamiques. Cette idée renvoie à la partie précédente, c'est-à-dire à la possibilité de créer un cas selon notre besoin indépendamment de la structuration de nos données dans la base de cas. Par conséquent, un cas n'est structuré dans le système que comme une inférence. C'est une règle qui va définir ce qui est à considérer comme cas et plus précisément ce qui constituera la partie solution et la partie problème. Ainsi, sur la figure 5.6, on peut voir qu'à partir d'une structure de données, le mécanisme d'inférence identifie ce qui pourrait être un cas avec sa composante problème et sa composante solution. Une telle définition du cas permet une grande souplesse quant à l'utilisation de la connaissance puisque la structuration de l'information ne limite pas la manière dont elle peut être utilisée. Ainsi, ce même système peut résoudre un ensemble différents de problèmes selon l'approche souhaitée. Par exemple, un problème peut être décomposé en sous-problèmes distincts, ayant une définition du cas différente.

Pour le sujet traité ici, nous proposons plusieurs structurations du cas, permettant ainsi d'adapter l'ensemble du système aux différents sous-problèmes rencontrés.

5.4.4 STRUCTURATION D'UN CAS

Dans cette partie, on souhaite définir nos différentes structures de cas. Pour ce faire, on s'appuie sur la partie exposant le problème et les différentes approches retenues. Il en découle trois principales structures de cas pour notre problème :

- Je suis dans une situation, j'applique une opération (ou une action), mon inconnue est le résultat (l'objet valorisé)
- Je suis dans une situation, je veux atteindre un résultat, mon inconnue est comment je fais
- Je veux un résultat, je sais que c'est le résultat d'une opération, mon inconnue est la situation initiale

En représentant par + l'élément connu et par ? l'inconnue, on en déduit la matrice suivante :

CHAPITRE 5. MÉTHODOLOGIE DE GÉNÉRATION DE NOUVELLES TRAJECTOIRES BASÉE SUR LE RAISONNEMENT À PARTIR DE CAS

Données :

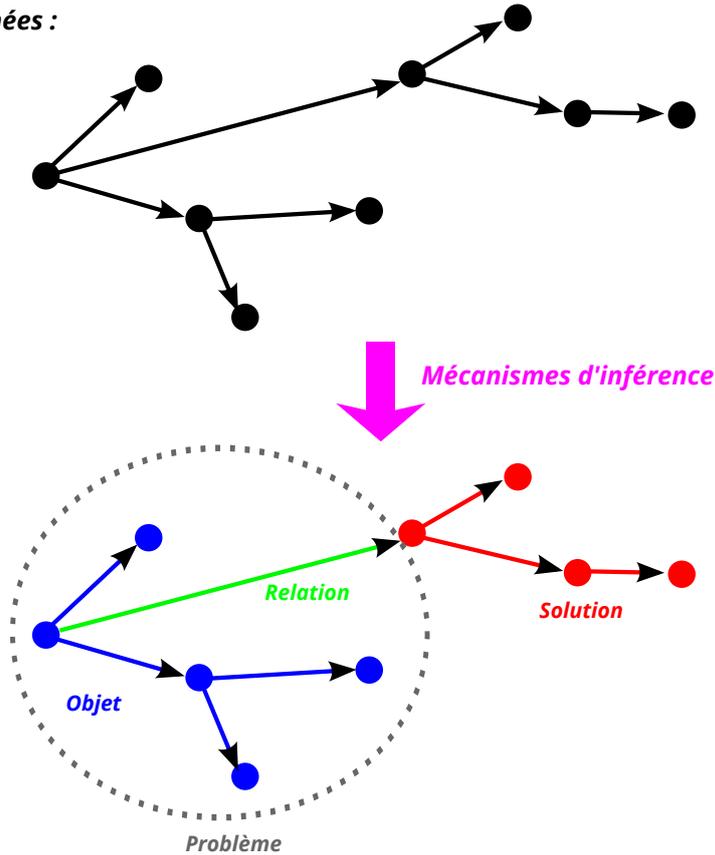


FIGURE 5.6- GÉNÉRATION DYNAMIQUE DE CAS

Structuration d'un cas	Situation initiale	Transformation	Situation finale
1	+	+	?
2	+	?	+
3	?	+	+

Lors de la résolution d'un problème, c'est trois types de structuration peuvent intervenir. Cette matrice souligne l'intérêt du cas dynamique. En effet, l'introduction d'un cas typique dans le système peut produire trois cas utilisables par ce dernier. Ceci permet par conséquent de résoudre un nombre plus important de problème et ceux avec un nombre de cas introduits dans le système nettement inférieur à un système utilisant des cas classiques.

Nous entrevoyons ici la structure des données de notre base de connaissances, maintenant, nous allons voir comment elle est construite et quels sont les différents éléments qui la composent.

5.5 DESCRIPTION D'UN ÉTAT

Jusqu'à présent, nous avons parlé de situations (initiale, finale, ...). À partir de maintenant, nous parlerons d'état.

5.5.1 DÉFINITION D'UN ÉTAT

Comme nous le laissons supposer, un état est une situation, une image figée de l'état de la connaissance durant un processus de pensée à un instant donné. De ce fait, une succession de ces états peuvent, s'ils possèdent un lien, former un raisonnement. Deux notions sont importantes dans cette définition. La notion d'instant qui ne fait pas référence à un moment (temporel) qui serait en rapport avec l'objet de la pensée, mais uniquement avec le procédé de pensée lui-même. La notion de situation qui décrit la pensée à un instant donné et qui par conséquent ne décrit pas forcément une situation réelle en rapport avec l'objet de la pensée. Ainsi, un état peut représenter une situation réelle comme une situation issue de la réflexion.

Exemple fil rouge 1 *Différents exemples d'état :*

- Une porte ouverte
- Une porte fermée
- Dans ce cas, ce n'est pas bon

5.5.2 UNE DESCRIPTION NON STRUCTURÉE

Le système de base de cas que nous proposons, et plus précisément la base de connaissances, décrit les états comme un ensemble non structuré. C'est-à-dire que contrairement à de nombreux systèmes de RàPC, il n'y a pas une structure regroupant un ensemble de paramètres ou, dans le cas de modèle objet, de sous-structures elles-mêmes définies par des paramètres et attributs. Seules quelques règles d'utilisation doivent être respectées assurant le bon fonctionnement du système. Ainsi, il est possible de représenter une multitude d'éléments, avec un nombre différents de paramètres, de composants.

Il est possible de se demander pourquoi avoir fait un tel choix et ne pas utiliser une représentation structurée. Il est possible d'avancer les justifications suivantes :

- Un état peut comporter un nombre indéterminé de composants, c'est-à-dire d'éléments (concepts) le décrivant, c'est-à-dire de concepts qui le caractérisent
- Les déchets sont très différents, ce qui implique que leur représentation le soit également. Par exemple quels paramètres communs peut-on utiliser pour représenter à la fois un mélange de composés chimiques et un système mécanique ?
- Les relations entre les éléments composant un état sont parfois très différentes. Par exemple, si les composés chimiques d'un mélange ont comme relation le fait qu'ils soient mélangés, des pièces de métal peuvent être rivetées ou soudées. Or, on peut remarquer que cette information est importante par exemple si l'on souhaite séparer les différents éléments (phase de déconstruction), que ce soit pour le mélange chimique ou les pièces.

Dans le système, chaque description contient donc un ensemble d'éléments permettant sa description. Ces éléments sont inter-reliés permettant ainsi une description fluide (c'est-à-dire aisée). Dans la partie suivante, la constitution de la structure de données sera expliquée en détail.

5.5.3 RÉSEAU CONCEPTUEL : REPRÉSENTATION SOUS FORME DE RÉSEAU

Le système de données est comme nous l'avons expliqué de manière non structurée⁵ permettant ainsi une très grande souplesse dans la représentation de l'information. Dans le système, les données sont représentées sous forme d'un réseau conceptuel : un ensemble de données inter-connectées via des liens formant ainsi un réseau. Ce réseau permet de relier des *concepts* de manière logique structurant ainsi l'information à la manière d'une ontologie.

Dans les réseaux conceptuels, les concepts sont reliés par des prédicats représentant des relations entre les concepts, comme un sujet et un objet. Ainsi, par exemple, il est possible de représenter l'assertion *Un chat est un mammifère*, par *un_chat*⁶ et *un_mammifère* comme deux concepts, reliés par un prédicat *est_un*. Dans notre réseau, plusieurs liens (prédicats) permettent de décrire différents types de relations.

- **def** : cette relation est la principale puisqu'elle permet de décrire les états. Une des particularités de cette relation est qu'elle englobe un ensemble de relations. En effet, si on reprend l'exemple de *Un_chat est un_mammifère*, une des façons de représenter cette relation serait : $est(Un_chat, un_mammifère)$. Cependant, nous avons choisi de représenter la relation de la façon suivante : **def**(est, Un_chat, un_mammifère). de façon plus générique, cette relation se présente sous la forme **def**($E, L, A, Q1, Q2, U, B$) où :
 - E : représente un identifiant de l'état, cet élément sera expliqué plus tard
 - L : représente la relation entre les concepts, c'est aussi un concept, par exemple *est*
 - A : représente un concept, par exemple *Un_chat*
 - $Q1$: représente une valeur numérique
 - $Q2$: représente une seconde valeur numérique
 - U : représente une unité
 - B : représente un second concept, par exemple *Un_mammifère*

Ainsi, l'assertion *Un_chat est un_mammifère* est représentée par : **def**($E, est, un_chat, _ , _ , un_mammifère$). Cette façon de définir les relations permet de représenter différents types de liens, donne par exemple :

5. dans la représentation et non pas dans la structure de données

6. l'utilisation de « $_$ » montre que l'on a à faire à une constante ([153])

CHAPITRE 5. MÉTHODOLOGIE DE GÉNÉRATION DE NOUVELLES TRAJECTOIRES BASÉE SUR LE RAISONNEMENT À PARTIR DE CAS

A est B	def(E,est,A,_,_,_,B)
A mesure 7 cm	def(E,mesure,A,7,_,cm,_)
A est compose de 50 % de B	def(E,est_compose_de,50,_,%,B)
A pese entre 3 et 7 kg	def(E,pese_entre,3,7,kg,_)

Cependant, une petite distinction doit être prise en compte. En effet, dans la représentation de prédicat, l’assertion *Un_chat est un_mammifère* devrait être codée sous la forme **est**(Un_chat, un_mammifère). Or nous avons choisi d’introduire dans le prédicat **def**, par conséquent le prédicat logique **est** devient un élément interne du prédicat **def**, au même titre que le sujet ou l’objet (par conséquent **est** devient une constante⁷). Cette structure possède deux avantages par rapport à la représentation simple. Elle donne la possibilité de créer un ensemble de prédicats dans une dimension de représentation supérieure qui est, en l’occurrence, le domaine de description de propriétés intrinsèques d’un objet (il est donc ainsi possible de décrire différents types de relations avec la même structure de représentation). En deuxième lieu, elle permet de réaliser des inférences sur les prédicats, pour notamment supporter une fluidité conceptuelle, offrant ainsi la possibilité de raisonner avec les relations. On remarque cependant que pour ce deuxième point ce n’est pas la seule solution mais que ce mécanisme aurait pu être fait par la représentation courante *symbole(sujet,objet)* au moyen de règles d’inférences. Cependant, le modèle proposé permet de réaliser ce point tout en conservant le prédicat principal **def**, ce qui par la suite facilite le développement de la solution.

- **relation** : cet élément sert à relier différents états au travers de relations logiques. La forme de représentation est assez simple puisqu’elle correspond à la représentation usuelle à savoir : **relation**(*relation,Ea,Eb*) où *relation* décrit le type de lien logique entre les deux états Ea et Eb et se lit : *Ea relation Eb*. Ainsi par exemple, si Ea représente « un pneu » et Eb représente « du broyat de pneu », la relation sera une transformation et plus précisément le *broyage* : **relation**(*transformation(broyage),Ea,Eb*).
- **onto** : ce prédicat s’utilise pour mettre en relation des concepts liés par une relation de conceptualisation. Il permet par conséquent la réalisation de taxonomie (qui est une forme simple d’ontologie) sur des concepts types (Fig. 5.7, Fig. 5.8). Ces concepts peuvent être des objets, par exemple *balle de tennis* et *balle* ou des éléments comme ce qui sera utilisé comme relation, par exemple *broyage* et *processus_mécanique*. La syntaxe utilisée est la suivante **onto**(*objet1,objet2*) et signifie *objet1 est objet2*. Ainsi par exemple, **onto**(*broyage,processus_mécanique*) signifie *broyage est un processus_mécanique*. Il est possible de s’interroger sur le fait que l’on peut décrire une même relation sous deux formes. Par exemple, *Un_chat est un_mammifère* peut être représenté par **onto**(*un_chat,un_mammifère*) ou par **def**(*E,est,un_chat,_,_,_,un_mammifère*). Cependant, le rôle de ces définitions n’est pas le même et par conséquent, même si la relation a le même sens, elles ne seront pas utilisées de la même façon.

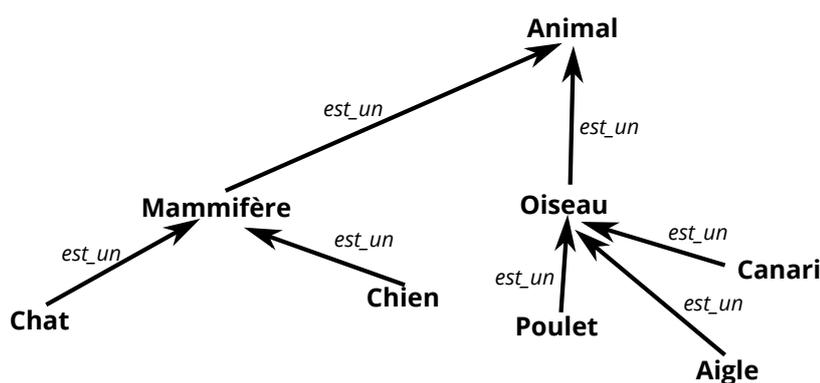


FIGURE 5.7- EXEMPLE DE TAXONOMIE

7. Constante au sens de [153]

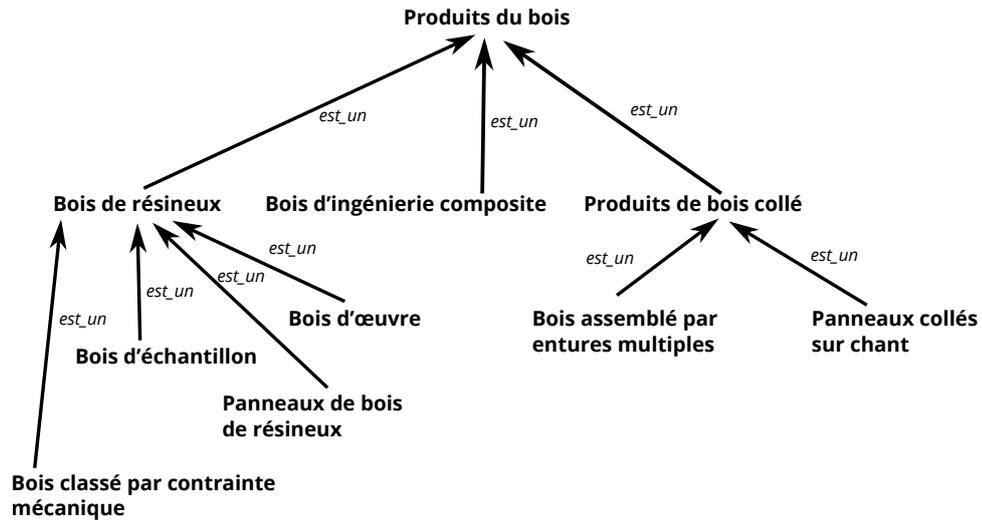


FIGURE 5.8- EXEMPLE DE TAXONOMIE EN RELATION AVEC LA PROBLÉMATIQUE DES DÉCHETS. SOURCES : RESSOURCES NATURELLES CANADA <https://www.rncan.gc.ca/forets/industrie/demandes/14511>

5.5.4 UN NŒUD RACINE UNIQUE

Une des particularités dans la représentation des états est la présence de nœuds racines. En effet, un état est décrit avec des relations du prédicat **def** qui permettent de définir les propriétés d'un objet. Or, il est évident que ce type de description construit, dans le domaine de **def**⁸, un réseau sous forme arborescente (mais pas au sens stricte car il peut y avoir des relations inter-nœuds), avec comme nœud racine le concept défini. On peut aussi imaginer que dans un état il y ait plusieurs objets et par conséquent qu'il y ait plusieurs nœuds racines. Cependant, il a été choisi que chaque état ne comporte qu'un seul nœud racine, ce qui n'empêche pas d'avoir une description de plusieurs objets et évite une étape de matching. En effet, il suffit de définir un état avec des prédicats **def**, comme un concept étant composé de plusieurs objets distincts.

Exemple fil rouge 2 Description d'une porte fermée :

<i>La _porte est_en bois</i>	<i>def(E,est_en,la _porte,_,_,_,bois)</i>
<i>La _porte contient_ une poignée</i>	<i>def(E,contient_une,la _porte,_,_,_,poignée)</i>
<i>La _porte contient_ une serrure</i>	<i>def(E,contient_une,la _porte,_,_,_,serrure)</i>
<i>poignée est_reliée serrure</i>	<i>def(E,est_reliée,poignée,_,_,_,serrure)</i>
<i>serrure est_dans_état fermée</i>	<i>def(E,est_dans_état,serrure,_,_,_,fermée)</i>

5.5.5 DESCRIPTION DE RELATION

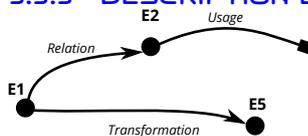


FIGURE 5.9- EXEMPLE ILLUSTRANT LES RELATIONS, OÙ E1, E2 ET E5 SONT DES ÉTATS

Dans la partie précédente, les principaux éléments composants le réseau sémantique ont été présentés. Parmi ceux-ci, l'élément **relation** est important puisqu'il permet de mettre en relation différents états. Ces relations sont dans notre système décomposées en différents types facilitant leur interprétation et par conséquent leurs utilisations. On distingue trois catégories de relation. Bien

évidemment, dans l'absolu, elles ont le même sens, mais leurs portées diffèrent.

- **Relation simple** : Le cas le plus simple est celui où il n'y a pas de spécificité dans la relation. Elle matérialise uniquement un lien entre les deux états. Cette structure ne permet pas d'interprétation.
- **Relation liée à une transformation** : Un des premiers cas particuliers de relation est celui lié à une transformation. Ce cas est plus riche en information car il sert à définir deux choses. La première, comme dans le cas de la relation simple, permet de relier deux états par une relation. La seconde, spécifie qu'il s'agit d'une transformation et par conséquent qu'il est possible de passer d'un état à l'autre, par cette transformation. Pour bien comprendre la distinction, on peut prendre l'exemple suivant : le concept *Alain*

8. on précise ce point car l'ensemble de la connaissance ne forme qu'un réseau (sauf cas particulier). Le domaine **def** n'est donc qu'un ensemble limité de ce réseau

CHAPITRE 5. MÉTHODOLOGIE DE GÉNÉRATION DE NOUVELLES TRAJECTOIRES BASÉE SUR LE RAISONNEMENT À PARTIR DE CAS

peut être relié au concept *Pierre* par la relation *est_père*, signifiant bien que *Alain est père de Pierre*. Cependant, cette relation ne signifie pas que *Alain* peut devenir *Pierre*. À contrario, le concept *Bois* peut être relié au concept *Énergie* par la relation *transformation(incinération)*, signifiant bien que l'on peut passer de l'un à l'autre en respectant le sens de la transformation. Plus subtilement, supposons les concepts mathématiques 5 et $\frac{1}{5}$. Il est possible de les relier par la relation *inverse* ou *transformation(inverse)*. La distinction va être que *inverse* signifie « je sais que ces deux concepts ont cette relation » alors que *transformation(inverse)* signifie « je sais qu'il est possible de passer de l'un à l'autre par la transformation *inverse* ».

- **Relation d'usage** : La relation d'usage est un cas particulier puisque cette dernière ne vise qu'à lier un état avec une relation n'aboutissant pas à un état. À la place de dire par exemple, *Ea a pour usage Eb* de la manière suivante **relation**(*usage, Ea, Eb*), il existe une relation qui est **usage**(*usage, Ea*) et qui par inférence peut devenir **relation**(*usage(usage), Ea, _*). Le principal avantage est de simplifier la description dans la base de connaissances et, de définir un élément spécifique qui est l'utilisation.

Exemple fil rouge 3 Une porte et quelques relations :

Plusieurs états (*E*) définissant Porte

- *E1* ⇒ une porte fermée
- *E2* ⇒ une porte ouverte
- *E3* ⇒ une porte non posée
- *E4* ⇒ des cendres

Plusieurs relations peuvent exister entre ces états :

- **relation**(*transformation(ouvrir_porte), E1, E2*) ⇒ on ouvre la porte pour passer de *E1* vers *E2*
- **relation**(*transformation(ferme_porte), E2, E1*) ⇒ on ferme la porte pour passer de *E2* vers *E1*
- **relation**(*transformation(pose_la_porte), E3, E1*) ⇒ on pose la porte pour passer de *E3* vers *E1*
- **relation**(*transformation(brûler), E1, E4*) ⇒ on brûle la porte pour passer de *E2* vers *E4*

5.6 SIMILARITÉ

Comme nous l'avons vu dans la phase de présentation du raisonnement à partir de cas, la similarité est une notion importante. En effet, elle va permettre de définir la ressemblance ou dissemblance entre deux cas et par conséquent de connaître quelle solution devra être adaptée pour résoudre notre problème. La similarité se base sur un mécanisme permettant l'évaluation. Dans la première section, nous présenterons un bref aperçu des méthodes généralement proposées pour cette mesure. Dans la seconde section, nous expliquerons notre méthode puis nous commenterons ses avantages et ses inconvénients.

5.6.1 UN CALCUL DE DISTANCE : DÉFINITION COURANTE

Généralement, les méthodes permettant de mesurer la similarité se résument à un calcul de distance. Cette notion de distance est une valeur estimée selon des règles afin de décrire si deux éléments sont proches ou non. Deux objets sont similaires si l'un peut être assimilable à l'autre. Cependant, cette notion est assez floue puisque le fait d'être assimilable dépend généralement de ce qui est comparé et à quelle fin. Par conséquent, la notion de similarité est une connaissance issue d'un expert permettant d'établir que, pour le type de problème traité, deux cas sont similaires. Ce qui suppose trois points importants : la méthode de calcul de similarité dépend du type de problème traité, elle est issue et constitue une connaissance et enfin elle dépend également du mode de représentation.

Dans la littérature, la majorité des méthodes utilisées pour le calcul de similarité se basent toutes sur un même principe. Lors de la description du *cas*, un ensemble de caractéristiques est identifié afin de permettre la description de celui-ci. Lors du calcul de similarité entre deux caractéristiques, la distance entre les valeurs des deux caractéristiques est calculée. Puis grâce à une fonction de regroupement, l'ensemble des distances est agrégé pour ne donner qu'une seule distance dont, souvent, son inverse sera la similarité.

En fonction de leur nature, il existe plusieurs moyens pour calculer la distance entre deux valeurs d'une caractéristique :

- Les **valeurs numériques** sont le plus souvent converties en écart relatif
- Les **valeurs discrètes**, peuvent par exemple faire appel à une matrice de distances où un expert à préalablement renseigné une distance pour chaque couple de valeurs. Nous remarquons encore ici que cela suppose l'utilisation d'une source dite experte afin de spécifier ces valeurs. Par conséquent, ces valeurs peuvent être très subjectives.

- Pour les **ontologies, taxonomies**, plusieurs méthodes ont été proposées afin de déterminer la distance entre deux concepts, comme la distance de Wu et Palmer Fig. 5.10 [240].

De même qu'il en est avec la distance entre deux valeurs, il existe plusieurs fonctions d'agrégation de ces distances locales permettant de donner une valeur unique représentant la similarité entre deux cas :

- La somme des valeurs $s = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} * d_i$ où d_i est la distance pour la caractéristique
- La somme des valeurs pondérées $s = \frac{1}{\sum_{i=1}^n w_i} \sum_{i=1}^n w_i * d_i$ où w_i est la pondération de la valeur de la distance de la caractéristique i
- ...

$$ComSim(C1, C2) = \frac{2 * N3}{N1 + N2 + 2 * N3}$$

Si C3 désigne le plus proche concept commun avec C1 et C2 et Root, le nœud racine, alors N1 est la distance C1-C3, N2 la distance C2-C3 et N3 la distance C3-root

FIGURE 5.10- DISTANCE DE WU & PALMER

5.6.2 SIMILARITÉ PAR DÉFINITION COMMUNE

Dans cette section, nous allons expliquer comment nous procédons pour évaluer la similarité entre deux cas et plus précisément entre deux états. Dans notre méthode, il y a principalement deux points importants à souligner. Le premier est que, compte tenu de la nature de notre problème, la notion de similarité n'est pas générale c'est-à-dire qu'il n'y a pas qu'une seule définition. En effet, nous avons montré que dans la base de cas, le *Cas* n'est pas défini, mais est dynamique. De plus, même si d'un point de vue globale il s'agit du même type de problème (ce qui permet l'utilisation de méthode RàPC), le type de problème peut être vu comme plusieurs types de problèmes distincts. Par exemple un problème serait *Quel est le résultat de couper du bois ?* et un autre serait *Quel est le résultat de brûler du bois ?*. On voit au travers ces deux exemples que la structure générale est *État1, action, Résultat* qui, appliquée à nos problèmes, devient : *État1, couper, Résultat1* et *État1, brûler, Résultat2*. Ces deux dernières descriptions constituent des problèmes en soi (c'est-à-dire des types de problèmes différents : brûler et couper ne représentent pas les mêmes choses). Or, comme nous l'avons montré dans la partie sur la définition courante d'une distance, la similarité dépend du problème. Par conséquent, nous supposons qu'il est nécessaire qu'il y ai autant de mesures de similarité que de problèmes définissables. Le deuxième point important est que dans notre méthode il n'y a pas de calcul de distance. En effet la méthode ne passe pas par le calcul d'une valeur décrivant la distance entre deux valeurs d'un paramètres. À l'inverse, nous proposons de relier différents états par des « groupes de définition commune ».

5.6.2.1 LES GROUPES DE DÉFINITION COMMUNE

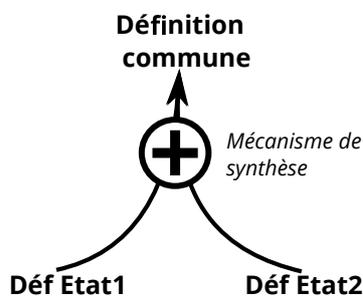


FIGURE 5.11- DÉFINITION COMMUNE

Pour comprendre ce qu'est une *définition commune*, il est nécessaire de se remémorer la description d'un *cas*. La description d'un cas se fait par la création d'un réseau de forme arborescente dans le domaine **def**. Par conséquent, et suivant la définition de la similarité ainsi que la structure de notre modèle, si un état possède tous les éléments définissants un autre état, alors on établit que cet état est similaire à l'autre. En notant, $defE1$ l'ensemble des prédicats de l'état 1 et $defE2$ l'ensemble des prédicats de l'état 2 si l'état 1 est similaire à l'état 2, alors : $defE2 \subset defE1 \Leftrightarrow \text{État1 similaire à État2}$. Cependant, cela n'implique pas que l'État2, soit similaire à État1, d'après cette définition⁹. Une des idées sous-jacentes est que si une définition d'un état n'a pas un certain prédicat, cela ne signifie pas que ce prédicat est faux mais, au contraire, qu'il est indéterminé.

Plus généralement, la *définition commune* de deux états est la description d'un état ayant la particularité qu'il est la sous-définition commune des deux états, c'est-à-dire une définition partielle qui correspond aux deux éléments (Fig. 5.11). Cette sous-définition prend en compte les éléments communs directs de la définition des deux états,

9. $A \subset (A,B,C)$ mais $(A,B,C) \not\subset A$

CHAPITRE 5. MÉTHODOLOGIE DE GÉNÉRATION DE NOUVELLES TRAJECTOIRES BASÉE SUR LE RAISONNEMENT À PARTIR DE CAS

mais aussi ceux issus de la fluidité (voir partie concernant la fluidité¹⁰ Section 5.8) Cet état factice permet de regrouper les deux états qui ont permis sa création, mais aussi permet de regrouper un état qui serait similaire à ce groupe. En effet, si un état a une définition qui englobe (c'est-à-dire dont la description valide) celle d'une définition commune, alors cet état est considéré comme similaire à ce groupe. Par extension, il est possible de former des définitions communes de définitions communes et ainsi de monter en abstraction/conceptualisation, créant ainsi une arborescence. Dans cette dernière, plus on se rapproche de la définition correspondante au nœud racine, plus on monte en niveau de conceptualisation et, à l'inverse, plus on descend et plus on se spécialise et on se rapproche des états réels.

Nous verrons par la suite que cette fonction permet la sélection intelligente des cas par le phénomène de filtrage généré.

Exemple fil rouge 4 Exemples de création d'une définition commune.

Deux états existent E1 et E2 définis comme suit :

- `def(E1,est_composé_de,porte_bureau,_,_,_,planche_bois)`
- `def(E1,contient,porte_bureau,_,_,_,écriteau_bureau)`

- `def(E2,est_composé_de,porte_chambre,_,_,_,planche_bois)`
- `def(E2,contient,porte_chambre,_,_,_,écriteau_chambre)`

Supposons deux cas possibles. Le premier où aucune information n'est ajoutée. Le second où une taxonomie existe où `écriteau_bureau` et `écriteau_chambre` sont définis de type (`est_un`) `écriteau`. la définition commune est pour le cas possible 1 :

- `def(EX,est_composé_de,X,_,_,_,planche_bois)`, où X désigne l'objet fictif et EX l'état engendré

pour le cas possible 2 :

- `def(EX,est_composé_de,X,_,_,_,planche_bois)`
- `def(EX,contient,X,_,_,_,écriteau)`

5.6.2.2 DES GROUPES DE DÉFINITION PAR TYPE DE CAS POSSIBLE

Dans la partie **Structuration d'un cas**, nous avons montré que ce dernier est décrit de manière dynamique, prenant ainsi plusieurs configurations. Dans cette même partie, nous avons montré les trois différentes configurations possibles. Ces configurations sont une combinaison entre un état et une relation (2 possibilités) ou encore entre deux états. Comme expliqué précédemment, la méthode de calcul de la similarité proposée se base sur les états ce qui permet d'être utilisable pour les trois configurations que nous proposons.

Pour résoudre le problème lié au calcul de la similarité évoqué, nous proposons le mécanisme suivant.

Un état est, généralement, relié à une relation (généralement une transformation) permettant de faire le lien avec un autre état. Nous proposons donc de générer des groupes de définition pour chaque relation de départ ou d'arrivée d'un état. Ainsi, pour une relation, l'état sera regroupé avec d'autres états ayant cette même relation et pourra être regroupé dans d'autres groupes de définitions pour d'autres relations.

Ce mécanisme permet de limiter la recherche aux cas qui sont progressivement définis comme possibles. Mais aussi, ce mécanisme tient uniquement compte, au début de la recherche, que les attributs décrivant les états qui sont importants pour le type de problème. Ce n'est que progressivement que l'ensemble de la définition de chaque état est comparée. Ceci revient à une forme de pondération des attributs puisqu'une plus grande importance leur est accordée en début de recherche.

5.6.3 TROIS ÉTAPES CLÉS DANS LA RECHERCHE D'UN CAS

La partie concernant la remémoration des cas se déroule en trois étapes ayant chacune une fonction particulière. Le but de cette partie et non seulement d'obtenir des cas susceptibles de pouvoir être adaptés correctement pour résoudre le problème en cours, mais aussi de permettre l'adaptation de l'ensemble de la solution. En effet, le système proposé offre une très grande souplesse dans le raisonnement, mais à besoin d'un minimum de structuration afin d'assurer la cohérence des résultats.

5.6.3.1 SIMILARITÉ PARTIELLE

La première étape est la recherche des cas similaires en appliquant ce que nous appelons la **similarité partielle**. Il s'agit ici de l'exploration de la structure arborescente décrite dans la partie **Similarité par définition commune** (Fig. 5.12).

Dans un premier temps, on recherche l'ensemble des *groupes de définition* qui correspondent à la structure du cas recherché. Ensuite, il s'agit de débiter la phase d'exploration en commençant par les nœuds racines. Comme

10. Certains concepts sont transformés en des concepts de plus haut niveau ou négligés

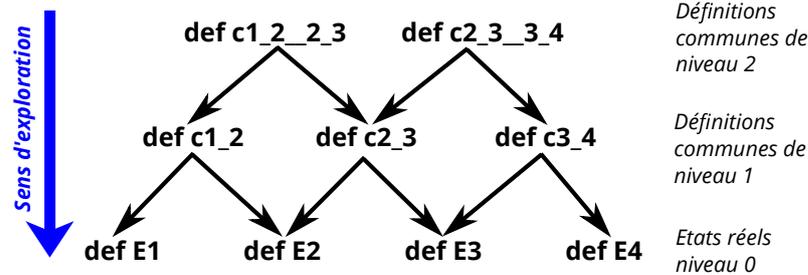


FIGURE 5.12- EXPLORATION DES DÉFINITIONS

expliqué précédemment, un état est dit similaire à un groupe de définition si $defE2 \subset defE1$. Pour ce faire, on introduit ici un nouveau mécanisme, la conversion d'un état en règle.

Conversion d'un état en règle L'idée principale de la méthode est de convertir l'ensemble de définition de l'état sous forme de règles ou, plus précisément, sous forme de clauses de Horn :

Definition 3 Une clause de Horn est une clause avec au plus un littéral positif¹¹, [153] :

$$R \vee \bar{r}_1 \vee \bar{r}_2 \vee \bar{r}_3 \vee \dots \quad (5.1)$$

Definition 4 Un littéral est un atome positif ou négatif, [153].

Une clause de Horn peut s'écrire sous la forme de règles :

$$(r_1 \wedge r_2 \wedge r_3 \wedge \dots) \rightarrow R \quad (5.2)$$

où r_i sont des littéraux positifs et R un littéral positif. Cette conversion se fait en plusieurs temps. Tout d'abord, l'ensemble du graphe représentant les prédicats définissant l'état sont regroupés, il s'agira de la structure de la clause. Ensuite, les objets décrits dans ces états sont remplacés par des variables. En effet, le nom d'un objet (c'est-à-dire un élément que l'on définit) n'a pas d'importance. Seules importent les définitions de ses propriétés intrinsèques (c'est-à-dire des attributs qui le définissent). Par cette conversion, on permet à n'importe quel autre objet de s'identifier à l'ensemble de définition.

Par conséquent, lors de la recherche d'un cas défini par son ensemble de définition **defC**, si la clause que l'on vient de créer est vraie pour cette ensemble, alors cela signifie que l'ensemble de définition représenté par la clause est inclus dans **defC** et par extension, cela permet de considérer que notre cas est similaire à cette ensemble de définition.

Ainsi, pour poursuivre la description du mécanisme permettant la recherche de cas similaires, à chaque fois qu'une *définition commune* est testée, cette dernière est convertie en clause pour faciliter la comparaison. Ensuite, deux cas se présentent : soit il y a échec sur la clause, soit elle est vraie.

S'il y a échec sur la clause, le cas présenté ne satisfait pas les contraintes imposées par la définition commune. Par conséquent, toutes les définitions communes de rangs inférieurs (en considérant le nœud racine comme le nœud de rang supérieur) seront fausses. Il ne sert donc à rien de les explorer (Fig. 5.13). À contrario, si la clause est vérifiée, alors le cas présenté satisfait les contraintes de cet ensemble et l'exploration peut se poursuivre.

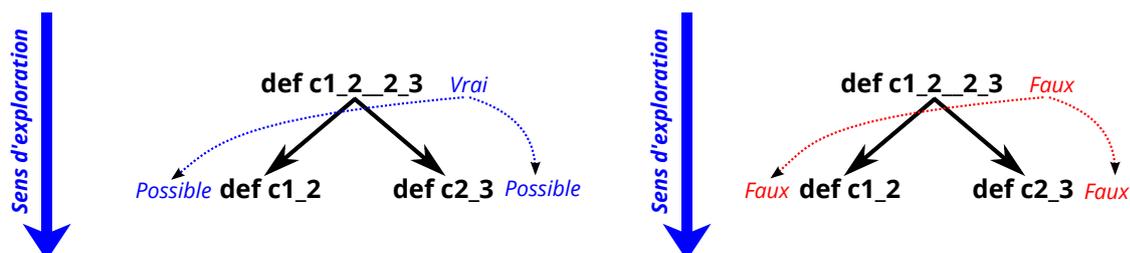


FIGURE 5.13- EXPLORATION DES CAS POSSIBLES

11. <http://www.irit.fr/~Andreas.Herzig/C/pred.html#prolog>

CHAPITRE 5. MÉTHODOLOGIE DE GÉNÉRATION DE NOUVELLES TRAJECTOIRES BASÉE SUR LE RAISONNEMENT À PARTIR DE CAS

Cette dernière peut se terminer soit par l'atteinte d'un élément de plus bas niveau, et par conséquent, il s'agit d'un cas existant (du moins, la définition de l'une est incluse dans l'autre), soit l'exploration n'atteint pas le dernier niveau et par conséquent, un ensemble de cas sont susceptibles de satisfaire au problème. L'exploration peut elle aussi être soit totale, soit au contraire limitée à la sélection d'un certain nombre de cas possibles. Il s'agira par la suite d'en sélectionner un ou plusieurs.

5.6.3.2 SÉLECTION

La sélection se fait une fois que l'exploration a atteint un ou plusieurs niveaux les plus bas (c'est-à-dire proche des descriptions de cas réel) et s'est arrêtée. Les derniers groupes de définitions validés correspondent donc à des ensembles où l'ensemble de définition actuel est en accord avec la définition du groupe. Par conséquent, les cas dont sont issus ces groupes sont dit similaires. Néanmoins, comme dans la méthode traditionnelle de mesure de distance, le taux de similarité peut varier.

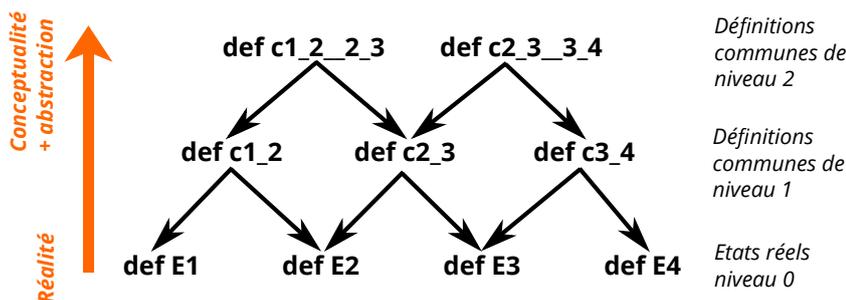


FIGURE 5.14- STRUCTURE DES DÉFINITIONS COMMUNES

Dans notre système, comme aucune mesure n'est effectuée, nous proposons de définir le taux de similarité comme étant le niveau de plus bas niveau où le groupe de définition a été validé. Ainsi, une fois l'exploration terminée, il existe une liste de groupe de définition avec leur niveau, par exemple 0 si le groupe définit un état réel, 1 si c'est un couple de d'états réels et ainsi de suite (Fig. 5.14). Finalement, une des manières de sélectionner les cas sources est de lister ces groupes de définition par ordre croissant de niveau ce qui place le groupe le plus similaire en tête.

5.6.3.3 REGROUPEMENT

La deuxième phase lors de la recherche d'un cas est ce que nous nommons le regroupement. Une fois qu'un cas a été sélectionné par la similarité partielle, on applique la même méthode que pour réaliser des définitions communes avec le cas recherché.

Ceci conduit à plusieurs appariements possibles entre les objets composant les deux états du fait du partage de certaines définitions communes et de la fluidité du système¹². À ceci s'ajoute la nécessité de la cohérence dans l'appariement, ce qui implique une forme d'exclusion entraînant des appariements incomplets. Le regroupement consiste ici à mélanger les solutions obtenues en s'assurant de la cohérence de l'ensemble et en permettant qu'un objet d'une définition puisse regrouper plusieurs objets de l'autre définition¹³.

Notion de cohérence : Cette notion signifie que lors de l'appariement des différents objets composants les deux états, certaines propriétés doivent être respectées pour assurer un sens dans cet appariement. Dans le cas contraire, l'appariement ne servirait à rien car la résultante de l'opération serait inexploitable. Les règles sont les suivantes :

Si A est un ensemble de définition et B un second alors :

- Un élément de A ne peut être apparié à un élément de B que s'ils partagent des définitions communes *defCommunes*, dans ce cas là ils sont *similaires par defCommunes*
- Un élément de A peut être apparié à plusieurs éléments de B , dans ce cas là ces éléments de B ne peuvent être appariés **qu'avec et uniquement avec cet élément de A** => notion de regroupement

12. Voir Section 5.8

13. Ce point est important car il différencie l'appariement du regroupement. Le regroupement est, lors de l'appariement, le fait de considérer que plusieurs objets d'un état puisse être similaires à un seul objet d'un autre état.

- Un ensemble A est complètement apparié à un ensemble B si tous les objets composant A sont appariés à tous les objets composant B

La vérification de la cohérence permet par conséquent d'obtenir un appariement logique et exploitable pour la phase d'adaptation de la solution.

Le résultat du regroupement est un appariement total (dans le meilleur des cas) ou un appariement partiel mais, dans tout les cas il est logique.

Remarque : si la cohérence ne peut pas être assurée, alors la recherche de cas similaires se poursuit en recommençant l'étape de regroupement avec un autre cas (issu du processus décrit 5.6.3.2). Cette fonction de regroupement est puissante puisqu'elle permet une autre forme de fluidité (fluidité dans les raisonnements, voir Section 5.8) et l'utilisation avancée de l'abstraction. Par exemple (Fig. 5.15), A et B deux états définis par deux ensemble *defA* et *defB* (en description simplifiée) :

Règle	Représentation
defA	defB
— def(A,compose_de,A1)	— def(B,compose_de,B1)
— def(A1,est,acier)	— def(B,compose_de,B2)
	— def(B,compose_de,B3)
	— def(B1,est,acier)
	— def(B2,est,acier)
	— def(B3,est,acier)

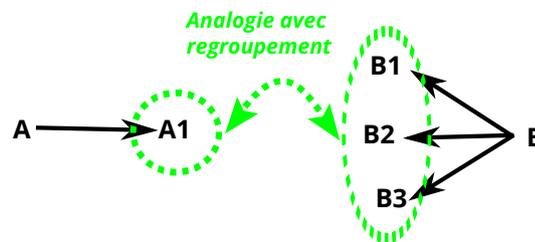


FIGURE 5.15- EXPLICATION DU REGROUPEMENT

Dans cet exemple, bien que le nombre de composants diffère entre A et B (1 contre 3), le regroupement permet de considérer *B1*, *B2*, *B3* comme similaires à *A1* et, par la suite, d'appliquer l'adaptation par analogie entre les deux groupes.

5.6.4 AVANTAGES DE CETTE MÉTHODE DE RECHERCHE DE CAS SIMILAIRE

Nous exposons dans cette partie les avantages¹⁴ que présente notre méthode vis-à-vis d'une similarité classique. En premier lieu, c'est une méthode très générique et ne demande pas une connaissance importante du problème. Elle s'adapte automatiquement à chaque type de problème. Par conséquent, nous pensons que c'est une bonne alternative quand il peut y avoir une grande disparité de raisonnement dans le calcul des distances suivant les cas. Le second point important est la méthode qui génère les groupes de définitions. Elle permet d'une part de créer une forme d'indexation de la base de cas et ceci de manière automatique et selon le type de problème. Ce point permet une plus grande facilité dans la recherche de cas et permet d'être toujours adaptée au type de cas traité. D'autre part, la construction d'une structure arborescente où la conceptualisation et la généralisation des descriptions se réalisent en montant dans l'arborescence, constitue en quelque sorte un filtre. En effet, plus l'évaluation, lors de l'exploration, descend vers les cas réels, plus elle oblige la définition du cas en cours à posséder un certain nombre de définitions. Par conséquent, ce mécanisme augmente les chances d'obtenir un bon appariement lors de la phase de regroupement, assurant ainsi la cohérence de l'ensemble. Enfin, l'utilisation de la fluidité entre les concepts et le mécanisme de regroupement permet à la fois une très grande souplesse de l'ensemble ainsi que l'émergence (voir section 2.6.2.5) de la créativité¹⁵ dans les solutions par la réalisation d'appariements à haut degré de conceptualisation.

5.6.5 DÉSAVANTAGES DE LA MÉTHODE

Notre méthode possède toute fois plusieurs inconvénients en comparaison aux méthodes de mesure des distances plus classiques. Tout d'abord, pour permettre la réalisation de la structure arborescente composée des

14. Une analyse plus critique se trouve dans le chapitre 7.1

15. La créativité fait référence à la capacité de créer des associations inédites entre des concepts ou idées.

CHAPITRE 5. MÉTHODOLOGIE DE GÉNÉRATION DE NOUVELLES TRAJECTOIRES BASÉE SUR LE RAISONNEMENT À PARTIR DE CAS

groupes de définitions et ce sur toutes les configurations possibles (autrement dit par relation associée), il est nécessaire d'avoir plusieurs cas en mémoire. Néanmoins, ce problème du remplissage de la base de cas se retrouve dans tout système de RàPC. Le second désavantage concerne l'incertitude dans le raisonnement. Cette incertitude peut se retrouver à la fois dans l'appariement où les concepts mis en communs ne sont pas contrôlés et par conséquent, dont la pertinence ne l'est pas non plus, mais aussi dans la sélection des cas, tant au niveau du processus de filtrage qu'au niveau de la sélection finale. Enfin, la créativité proposée est à double tranchant. En effet elle permet d'associer des éléments qui ne sont pas à premières vues similaires et par la suite de proposer de nouvelles solutions originales. Cependant, comme cette association n'est pas contrôlée par le processus, rien ne garantit que cette dernière propose des solutions ayant une réalité.

Une critique de la méthode proposée est faite lors de son évaluation dans la section 7.1

5.7 MÉMORISATION DES ÉTATS

Dans cette partie, nous nous proposons d'expliquer le mécanisme de mémorisation du RàPC et par extension celui de l'apprentissage (voir section 5.3.1.6). Ce mécanisme se décompose en plusieurs parties dont certaines visent uniquement à conserver la connaissance et d'autres « apprennent » certains mécanismes permettant l'estimation des états, principalement par analogie.

5.7.1 MÉMORISATION D'UN ÉTAT

La mémorisation¹⁶ d'un état est l'une des principales étapes lors de l'apprentissage. La mémorisation d'un état passe par deux étapes clés. La première, une fois que l'ensemble des définitions sont insérées dans le système, est de vérifier que cet état n'existe pas. On précise que cela suppose que dans la base de connaissance il existe un état avec exactement le même ensemble de définition. La seconde étape consiste à créer un état, ce qui en soi se résume à fournir un nouvel identifiant. Une fois cette identifiant connu, il ne reste plus qu'à enregistrer chaque définition. Comme expliqué déjà, une définition est représentée sous la forme suivante : **def** ($E, L, A, Q1, Q2, U, B$). E représente l'identifiant de l'état et le système permet d'avoir plusieurs valeurs de E dans la même définition. Par conséquent, deux cas se présentent lors de la sauvegarde d'une définition :

- Soit la même définition existe pour d'autre cas, alors le système se contente de rajouter à la liste E la valeur de l'identifiant du cas actuel
- Soit la définition n'existe pas et elle est créée

Ce mécanisme d'enregistrement possède l'avantage de réduire le nombre de définitions différentes dans cette dernière et aussi de mettre en correspondance directe plusieurs états qui possèdent la même définition (c'est-à-dire une relation de type **def** commune).

5.7.2 APPRENTISSAGE : CRÉATION PROGRESSIVE D'UNE TAXONOMIE

Une deuxième partie importante de l'alimentation de la base de connaissances est la création progressive de taxonomie permettant par la suite des mécanismes d'inférences et plus particulièrement de conceptualisation. En effet, comme nous l'avons déjà montré, une partie des définitions sont de la forme *Sujet, relation, objet*, par exemple *Un chat est un mammifère*. Néanmoins, pour que cet exemple soit exploitable, il est nécessaire que le concept *un mammifère* signifie quelque chose ou du moins qu'il soit relié à d'autres concepts. Comme nous l'avons présenté, un objet n'a de sens que par ses définitions et de même pour les concepts. Suite à ce constat, le mécanisme d'apprentissage proposé est le suivant : lors de la description d'un état, tout concept introduit doit être relié dans une taxonomie. Par exemple, on peut imaginer que mammifère soit relié au concept *animaux* dans une taxonomie. On pourrait ici se demander pourquoi cette taxonomie n'est pas, par défaut, implantée dans le système. En fait, nous avons choisi de procéder ainsi parce que nous pensons qu'il est inutile de conserver dans la base de connaissances des concepts qui n'ont pas d'utilité puisque aucune définition ne les appelle (seuls les concepts servant de nœud dans la taxonomie sont rajoutés). Par conséquent, cela permet la génération dynamique de taxonomie optimisée aux connaissances actuelles du système et rajoute une part d'indéterminisme dans le raisonnement. En effet, comme la création de la taxonomie est laissée libre à l'utilisateur, celui-ci peut avoir une vision différente des relations entre concepts et par là même modifier le raisonnement de conceptualisation qui peut en découler.

16. Cette partie est importante car elle montre un autre avantage de la structuration de la connaissance proposée. Il s'agit bien d'un réseau où tous les éléments sont inter-connectés

5.7.3 INDEXATION ET SIMILARITÉ

Nous traitons ici du mécanisme d'indexation qui permet de générer la structure arborescente composée des définitions communes. Le mécanisme d'indexation est ici assez simple. La première étape consiste en la mémorisation d'un nouveau cas ainsi que de ses relations. Une fois cette étape franchie, l'indexation peut débuter. Dans un premier temps, il s'agit de sélectionner tous les cas ayant la même relation, puis de former des couples avec le cas encours d'indexation. Puis, pour chaque couple, un ensemble de **def** communs est généré. Cet ensemble se présente comme la description d'un état classique, sauf que son origine est précisée. Cette première étape permet la création d'une nouvelle couche de définitions communes (Fig. 5.16). Ensuite, il suffit de répéter la même opération avec les éléments de la couche supérieure et ainsi de suite pour un nombre limité de fois (Fig. 5.17). Il est possible de simplifier la structure en ne créant qu'un nombre limité de couple (et non pas tous les couples possibles) et ce par une sélection aléatoire. Le résultat final obtenu est un ensemble de définitions communes hiérarchisées par degré de conceptualisation.

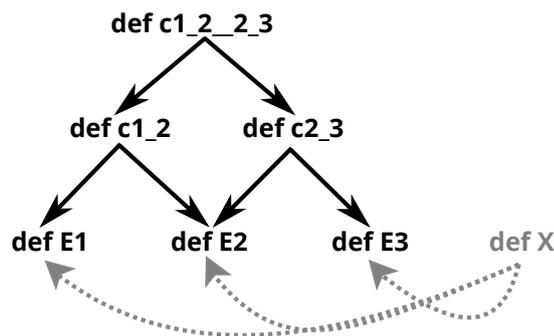


FIGURE 5.16- PREMIÈRE PHASE D'INDEXATION

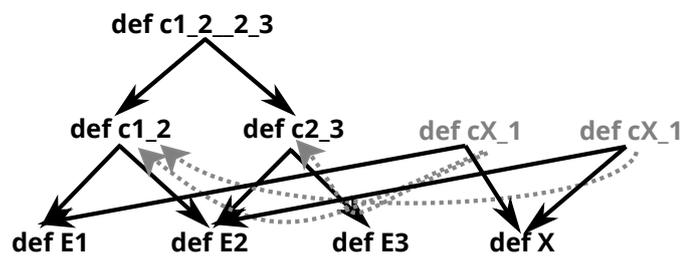


FIGURE 5.17- SECONDE PHASE D'INDEXATION

5.7.3.1 CRÉATION DE NIVEAUX D'ABSTRACTION ET DE CONCEPTUALISATION

Une des conséquences de l'indexation (plus concrètement de la création de l'arborescence) est la génération de niveaux d'abstraction et de conceptualisation. Ce mécanisme se retrouve également lors de la phase de sélection et de regroupement des cas. L'abstraction est générée par le fait que certaines définitions sont ignorées au cours du processus. Par conséquent, il y a abstraction de certaines données qui sont jugées « inutiles ». Le maintien ou non de l'abstraction des **def** provient de la présence de certaines définitions dans tous les états et inversement si c'est uniquement dans certaines ou même dans seulement une. De ce fait, plus une définition est « rare », plus elle va disparaître rapidement dans les couches d'indexation supérieures et inversement. Ceci permet de ne conserver que les définitions qui semblent importantes dans les couches supérieures et d'éliminer celles qui ne semblent pas être représentatives. De même, la conceptualisation se produit lors de la génération de définition commune par le remplacement de certains concepts par des concepts d'ordres supérieurs dans leurs taxonomies (voir partie sur la fluidité Section 5.8).

5.7.3.2 CRÉATION DE FILTRE

Comme expliqué auparavant, l'indexation permet un filtrage dans la sélection des cas. D'une part par le fait que la présence de certaines définitions soit rendue obligatoire par la validation successive des ensembles de définitions communes. Ce qui entraîne que si le cas actuel ne les possède pas, alors l'exploration de cette

CHAPITRE 5. MÉTHODOLOGIE DE GÉNÉRATION DE NOUVELLES TRAJECTOIRES BASÉE SUR LE RAISONNEMENT À PARTIR DE CAS

partie est stoppée. D'une certaine manière, ce mécanisme renforce le poids de certaines définitions. D'autre part, ce filtre, en rendant obligatoire la présence de certains éléments, assure un bon appariement lors de la phase de regroupement. En effet, il est possible d'imaginer que si cette phase n'est pas réalisée, alors le mécanisme d'appariement, ne vérifiant pas par lui-même la cohérence des résultats, fournirait un couplage n'ayant aucun sens et non représentatif du problème.

5.7.3 UNE MÉMORISATION NON DÉTERMINÉE : INTRODUCTION DE L'ALÉATOIRE

Un autre point important est l'introduction de l'aléatoire lors de la phase d'indexation et plus particulièrement lors du couplage des cas en vue de la formulation d'une définition commune. En effet, si une politique de couplage total est réalisée, alors le nombre de couplages devient de plus en plus important à chaque introduction d'un nouveau cas. Or, comme il a été mentionné, il est possible de ne choisir qu'un certain pourcentage ou nombre d'appariements par couche. Par cette méthode, une fonction aléatoire va sélectionner les cas ou ensemble de définition à appairer. Cette fonction aléatoire va entraîner un non-déterminisme dans la phase d'indexation qui va lui-même affecter l'efficacité du filtre et donc l'importance des définitions. De même, cela peut entraîner que certains cas soient ignorés alors que d'autres se voient renforcés. Cependant, on peut supposer que ce phénomène se voit lisser de par la nature même des phénomènes aléatoires (c'est-à-dire qu'il y a une répartition homogène de la sélection lors du croisement).

5.7.4 MÉMORISATION DES MÉCANISMES DE TRANSFORMATION : 2 POSSIBILITÉS

Dans le système, il est aussi possible de modéliser des transformations, non pas sur le plan d'une relation, mais comme une suite d'opérations permettant de passer d'une étape à une autre. Par opération, on entend une modification de la structure de définition des états. Nous avons défini trois types d'opérations permettant la transformation d'un état :

- La suppression : il s'agit de supprimer une définition
- L'ajout : contrairement à la suppression, cette opération ajoute une définition à l'état
- La modification : sur une définition existante, un des éléments est modifié

De plus, lors de la formulation de la liste d'opérations, il est possible de conditionner une opération par une contrainte sur la structure de l'état ou sur les éléments en stipulant la relation que doit posséder l'ancienne définition avec la nouvelle. Par exemple, si l'état initial comporte la définition suivant, $\text{def}(E,a,\text{pese},10, \text{kg})$, une opération de modification pourra être la suivante :

- $\text{def}(_,X,\text{pese},V,U)$
- $\text{relation}(\text{multiple}(2),V,W)$, signifiant que W est le double de V
- $\text{modifier}(\text{def}(_,X,\text{pese},V,U),\text{def}(_,X,\text{pese},W,U))$, signifiant de remplacer la première définition par la suivante

La génération de ces listes d'opérations se fait généralement sur les transformations de plus bas niveau, celles qui dans le système ne sont pas décomposables. L'avantage de ce mécanisme est qu'il permet d'anticiper l'évolution d'un état lors d'une transformation, c'est-à-dire que le système essaie d'estimer le résultat de l'opération. Lors, de la résolution de notre problème (voir partie sur la décomposition), cela aura l'avantage de modifier chaque état représentant une situation intermédiaire et par la suite de propager cette modification au reste du raisonnement. Ainsi, la trajectoire de valorisation sera adaptée plus finement. Cependant, le bon fonctionnement de ce procédé dépend de l'exactitude de la liste d'opérations définies pour chaque transformation de bas niveau. Nous proposons deux moyens d'alimenter le système avec ces données :

- Par l'utilisateur : l'utilisateur va renseigner les listes d'opérations comme une partie intégrante d'un cas
- La méthode automatique : cette méthode analyse la différence entre l'état final et l'état initial et va déterminer les définitions à supprimer, celles qui sont ajoutées et celles qui sont modifiées en tentant de trouver les relations entre les éléments composant les définitions. Ces définitions peuvent être :
 - Des relations de proportionnalité entre les valeurs numériques
 - Des relations entre concepts

5.8 FLUIDITÉ DU SYSTÈME ET CONCEPTUALISATION, UTILISATION D'UNE TAXONOMIE DE CONCEPTS

Dans cette section nous allons traiter des mécanismes permettant au système d'avoir une certaine fluidité et d'avoir la capacité de conceptualiser. Pour notre travail, nous proposons de définir la fluidité du système. Cette fluidité, qui s'inscrit dans une volonté de créer des mécanismes permettant de résoudre des problèmes de manière créative. Elle s'appuie sur les définitions rencontrées en sciences cognitives et en informatique.

5.8. FLUIDITÉ DU SYSTÈME ET CONCEPTUALISATION, UTILISATION D'UNE TAXONOMIE DE CONCEPTS

Ainsi, en sciences cognitives, la *fluidité* est définie dans les processus créatifs comme « le nombre d'idées produites » [31]. Plus généralement, Torrance définit un test de créativité, qui prend en compte 4 points [31, 222] :

- la fluidité (nombre d'idées produites)
- l'originalité (rareté statistique des réponses)
- la flexibilité (nombre de catégories de réponses différentes)
- l'élaboration (ajout de détails pour expliciter l'idée principale).

Par conséquent, la fluidité est la capacité à générer des idées durant le processus créatif. D'un autre côté, Hofstadter définit la « fluidité » comme la capacité de *glisser* d'un concept à un autre [114]. Selon lui, cette fluidité est la base des raisonnements par analogie. De même, Saillot et al. utilisent la notion de fluidité basée sur la définition de Hofstadter pour définir les fonctions cognitives de l'homme du paléolithique et l'explique de la manière suivante [209] :

« La fluidité cognitive de la tâche de traitement, c'est-à-dire la souplesse, la mobilité cognitive d'un concept à l'autre, [...] »

Enfin, Mithen explique comment le cerveau primate a utilisé ensemble différents mécanismes de traitement de la connaissance afin d'évoluer vers un cerveau humain [167]. Par conséquent, nous appelons *fluidité du système*, la combinaison de ces trois définitions en vue de la réalisation d'un processus créatif. Ainsi :

Definition 5 « *La fluidité du système qualifie un mécanisme créatif visant à générer des idées originales. Ce mécanisme s'appuie sur la capacité de passer d'un concept à un autre, la combinaison d'un ensemble de sous mécanismes (abstraction, conceptualisation, regroupement et appariement) et de flexibilité. Cela entraîne le fait que les raisonnements évoluent et s'adaptent en fonction des besoins, permettant ainsi un processus qui n'est pas limité à un raisonnement purement déductif.* »

Nous ajoutons ici la définition de la flexibilité cognitive :

Definition 6 « *Cognitive flexibility is defined as the readiness with which the person's concept system changes selectively in response to appropriate environmental stimuli [...]* » [210]

« *Cognitive flexibility is the human ability to adapt the cognitive processing strategies to face new and unexpected conditions in the environment* » [38] [39]

La fluidité va se traduire par des mécanismes d'abstraction qui permettent au raisonnement de ne pas rester bloqué si certains éléments ne sont pas présents lors de la comparaison de deux états. La conceptualisation va quant à elle permettre de considérer deux concepts différents comme étant le même concept en généralisant sur un concept d'ordre supérieur (c'est-à-dire plus conceptuel) grâce à l'utilisation d'une taxonomie. Enfin, la création d'ensemble permet, pour les valeurs numériques, de déterminer la similarité de deux valeurs en prenant en compte les tolérances possibles et les facteurs d'échelles (c'est-à-dire que selon le cas, une variation plus ou moins faible entraîne la validité ou non de la similarité. Par exemple, si une pièce de 10 cm doit rentrer dans une boîte de 2*2m, une augmentation de 100% de la taille n'a pas d'impact. Si cette même pièce doit rentrer dans une boîte de 10,1 cm, une augmentation de 2% entraîne le rejet de la similarité).

5.8.1 FLUIDITÉ GRÂCE À L'UTILISATION DU MÉCANISME D'ABSTRACTION

La comparaison entre deux états pose le problème de l'appariement entre les différents éléments les décrivant. Plus exactement, afin de reconnaître ces différents éléments, une comparaison des structures et des concepts définissants chaque état est réalisée pour déterminer, au sein des sous éléments, quels sont les appariements possibles. Le mécanisme d'abstraction est ici réalisé de deux manières. La première par le fait que même si les deux éléments comparés ne possèdent pas la totalité de leurs concepts en communs, l'appariement reste quand même possible et au niveau du raisonnement, ces deux éléments peuvent être considérés comme semblables. Deuxièmement, si un des états possède des définitions que l'autre ne possède pas, alors par défaut elles sont ignorées. Ce qui peut aussi s'interpréter comme suit : si dans un état une définition n'est pas spécifiée, alors elle n'est pas considérée comme fausse mais comme indéterminée.

5.8.2 FLUIDITÉ GRÂCE À L'UTILISATION DU MÉCANISME DE CONCEPTUALISATION ET L'UTILISATION DE TAXONOMIE

Lorsque deux définitions sont comparées, certains concepts sont différents par comparaison directe car leurs termes ne sont pas les mêmes¹⁷. Ces termes peuvent être parfois similaires si la conceptualisation est autorisée permettant ainsi un appariement à un « certain degré de conceptualisation ». La méthode utilisée pour la

17. Si on compare le concept A et B, alors $A \neq B$ par comparaison directe

CHAPITRE 5. MÉTHODOLOGIE DE GÉNÉRATION DE NOUVELLES TRAJECTOIRES BASÉE SUR LE RAISONNEMENT À PARTIR DE CAS

conceptualisation est simple. Elle consiste à utiliser une taxonomie sur les concepts. Cette taxonomie, sous forme arborescente, se compose en son nœud racine du concept universel pour la taxonomie. Par exemple, dans une taxonomie décrivant les différents animaux, familles, sous-familles ..., le concept racine peut être *animaux* et un concept extrémité peut être *chat*. Plus un concept est éloigné du nœud racine, plus ce dernier représente une spécification de tel sorte que le nœud racine soit le plus conceptuel et les nœuds extrémités les plus réels. L'idée de la conceptualisation est par conséquent de remplacer les deux concepts en cours de comparaison par un concept de niveau supérieur dans la taxonomie. Pour donner un exemple, si les deux concepts suivants sont présents : *chat* et *tigre*, ces deux termes sont différents, mais ils peuvent être remplacés par le concept commun *félin* (Fig. 5.18).

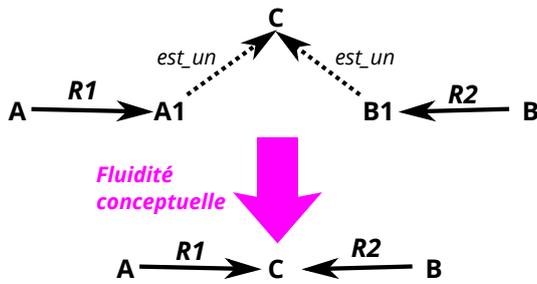


FIGURE 5.18- EXEMPLE DE FLUIDITÉ PAR CONCEPTUALISATION

Durant la phase de comparaison de deux définitions, ce mécanisme peut être utilisé pour comparer les objets, mais aussi les prédicats (rappel de la structure : *sujet, prédicat, objet*). Ainsi, par exemple si on a les définitions simplifiées suivantes : $\text{def}(E, \text{est_visse}, A, B)$ et $\text{def}(E, \text{est_colle}, C, D)$ signifiant respectivement A est vissée à B et C est collé à D, alors la conceptualisation du prédicat donne, si le concept commun le plus proche est *est_fixe* : $\text{def}(E, \text{est_fixe}, A, B)$ et $\text{def}(E, \text{est_fixe}, C, D)$ ce qui permettrait de dire que A et C ont le même rôle et de même pour B et D.

Cependant, ce mécanisme ne peut pas être toujours autorisé, car de nombreuses définitions pourraient être jugées similaires alors que cela ne se justifierait pas. Par conséquent, ce mécanisme est utilisé lors de la génération de définition commune où les deux cas introduits dans la base (voir partie sur l'indexation) sont considérés comme vrais.

Exemple fil rouge 5 On compare deux éléments (concepts) A et B :

- A : la porte du bureau
- B : la porte de la chambre
- C : Concept de porte. A et B sont des portes

La comparaison directe de A et B renvoie que les concepts ne sont pas égaux \Rightarrow la porte du bureau n'est pas la porte de la chambre, $A \neq B$.

La conceptualisation par l'utilisation de la taxonomie va provoquer le « glissement¹⁸ » de A et B vers C. Ainsi $A = C$ ¹⁹, $B = C$ ce qui permet, lors de la comparaison des deux termes de dire $A \sim B$, ou pour reprendre l'exemple, la porte de bureau peut être considérée comme le même concept que la porte de la chambre.

5.8.3 FLUIDITÉ SUR LES VALEURS NUMÉRIQUES

De même que sur les concepts, il est possible d'essayer de réaliser un système qui permette d'avoir une fluidité sur les valeurs numériques. Étant donné qu'il n'est pas possible de réaliser une taxonomie sur les nombres, nous proposons ici de réaliser le mécanisme à l'aide d'ensemble. L'idée est que lors de la création d'une définition commune, au lieu de rejeter deux définitions ayant des valeurs numériques différentes pour un même prédicat, on définit pour ce prédicat un ensemble de validité. Cet ensemble comprend les valeurs où la définition est vérifiée à savoir, le domaine de validité pour chacun des cas. Par conséquent, lors de la phase de création de la structure d'indexation, la plage de valeurs pour cette définition ne peut que s'agrandir²⁰. Plusieurs points intéressants en découlent :

- Les effets sur les domaines de validité sont moins complexes à gérer. En effet, si pour un type de relation une solution a, pour un paramètre donné, la valeur V1 et une autre la valeur V2, alors la définition commune aura pour paramètre l'ensemble (V1,V2), quelles que soient ces valeurs.
- Si, pour un paramètre (prédicat) les valeurs des différents cas sont très proches, pour une structure d'indexation, la plage de valeurs possibles sera très petite, assurant le rôle de filtrage de la structure d'indexation.
- À contrario, si la plage devient très grande, elle autorisera une grande liberté sur ce prédicat.

18. L'emploi du terme glissement fait référence au même terme trouver dans les travaux de Copycat et Metacat [112] [161] [162]

19. À comprendre comme *est considéré comme étant*

20. Ce mécanisme intègre les *ensembles flous*. Cependant, la principale activité de ce dernier est de générer ces ensembles, afin d'assurer le mécanisme de fluidité. Il est à noter qu'il est possible d'intégrer dès le départ des ensembles flous comme définitions d'éléments (c'est-à-dire d'objets)

La principale limite de ce fonctionnement reste le cas où seules des valeurs discrètes sont autorisées pour un prédicat ou seules certaines plages sont possibles (et non pas la totalité de la plage). Dans ces cas, le système ne fera pas la différence. On peut néanmoins souligner que les méthodes classiques de comparaison, c'est-à-dire par calcul des distances, ne représentent pas forcément non plus ce type de contraintes.

5.9 MÉTHODE DE FONCTIONNEMENT ET DE RÉOLUTION

Dans cette partie, nous traitons du mécanisme mis en place afin de résoudre l'ensemble du problème, à savoir, trouver de nouvelles voies de valorisation des déchets. D'une manière générale, il s'agit de résoudre les problèmes soumis au système, suivant les structures de cas présentées. Rappelons, comme nous l'avons décrit dans la partie **Structuration d'un cas**, qu'il y a trois structures possibles :

1. On connaît la situation initiale, la relation, mais pas le résultat
2. On connaît la relation et la situation finale, mais pas la situation initiale
3. On connaît la situation initiale, la situation finale mais pas la relation

Les deux premiers cas sont assez similaires puisque seul le sens de la résolution va différer. Le troisième cas est plus particulier et sera traité séparément des deux autres. Dans un premier temps nous verrons les techniques employées pour résoudre ces problèmes. Ensuite, nous verrons quelle est la méthodologie générale de résolution.

5.9.1 TECHNIQUE DE RÉOLUTION POUR LE STRUCTURES 1 ET 2

Pour les deux premières structures, il s'agit du couple état-relation qui définit le cas. La technique pour les résoudre consiste dans un premier temps, à rechercher des cas similaires. Par exemple, dans la structure 1, le système va tout d'abord sélectionner les cas en mémoire appartenant à la structure de définitions communes définie pour la même relation. Sur cette sélection, une recherche de cas similaire va être effectuée ce qui amènera à une solution, comme une opération unitaire. Si cette opération unitaire est définie par une liste d'opérations sur la structure des états (voir partie **Mémorisation des mécanismes de transformation : 2 cas**), alors les opérations sont effectuées sur le cas encours (cas cible) afin d'adapter la solution qui sera l'état final ou l'état initial suivant la structure. À noter que le mécanisme de transformation est réalisable « à l'envers » en appliquant les opérations inverses (ajouter → supprimer, supprimer → ajouter et de même pour la modification).

5.9.2 TECHNIQUE DE RÉOLUTION POUR LA STRUCTURE 3

Le cas trois est différent car il ne laisse pas de place à une modification possible des états. L'inconnue est la relation seule. La manière la plus simple de résoudre le problème est qu'il y ait dans le système ce même cas résolu. Néanmoins, si ce dernier n'est pas présent, plusieurs stratégies peuvent être mises en place. L'une d'elles consiste à réaliser une exploration des opérations possibles en étant guidé par la différence entre les deux états. Il s'agit de déterminer la liste des instructions nécessaires qui modifient les définitions de l'état, pour passer d'un état à un autre. Une fois cette liste obtenue, une combinaison d'opérations doit être trouvée dont l'ensemble satisfasse cette liste. Ainsi le système fournit une liste d'opérations conduisant d'un état à un autre. Cependant, l'ordre et la justesse des opérations choisies ne sont pas connus. Une possibilité reste de relancer la recherche de solution en posant le problème sous la forme de la structure 1 ou 2.

5.9.3 LE CAS SIMPLE

Dans cette section, nous présentons la démarche pour une structure simple, c'est-à-dire sans décomposition des problèmes. Il s'agit en fait ici de la structure où la relation entre les deux états est directe et répond au problème (il n'y a donc pas de décomposition). Pour bien comprendre, on peut avoir les cas suivants :

- Soit la relation renseignée comporte dans la base une liste d'opérations sur les états → création d'un nouvel état ⇒ Fin du problème
- Dans le cas contraire, on recherche une relation « parallèle » ayant une liste d'opérations, puis → création d'un nouvel état ⇒ Fin du problème

Pour trouver la relation adéquate dans la base de connaissances, le protocole suivant a été réalisé :

- a) Définir la structure du cas
- b) Si le cas est déjà présent, fournir le résultat ⇒ Fin du problème
- c) Rechercher la structure de définitions communes correspondant au problème (normalement liée à la relation recherchée et à la position de l'inconnue)
- d) Parcourir la structure de haut en bas (haut étant la description la plus conceptuelle)

CHAPITRE 5. MÉTHODOLOGIE DE GÉNÉRATION DE NOUVELLES TRAJECTOIRES BASÉE SUR LE RAISONNEMENT À PARTIR DE CAS

- e) Sélectionner les définitions communes les plus basses validées
- f) Ranger par ordre croissant de niveau ces définitions (le niveau zéro correspondant au niveau le plus bas, c'est-à-dire le niveau réel)
- g) Sélectionner une définition commune puis le ou les états (réels) associés
- h) Si l'opération reliée à l'état sélectionné comporte une liste d'instructions, les appliquer \rightarrow création d'un nouvel état \Rightarrow Fin du problème

Ensuite, et pour compléter le fonctionnement de la méthode du raisonnement à partir de cas, le nouvel état peut être mis en mémoire, ainsi que ses relations associées.

5.9.4 PROPAGATION DU PROBLÈME, MÉTHODE RÉCURSIVE ET DÉCOMPOSITION DU PROBLÈME

La propagation du problème intervient lorsque, la relation renseignée est une relation de description générale, c'est-à-dire qu'elle n'est pas une transformation ou bien que c'est une transformation qui regroupe un ensemble de transformations, elles-mêmes pouvant être décomposables. Par conséquent, lors de la résolution du problème, une décomposition de ce dernier est possible, permettant une adaptation de la trajectoire. La méthode envisagée se base sur la méthode décrite précédemment dans **La structure simple**. Cependant, à chaque relation correspondante trouvée, le système recherche si cette dernière est décomposable. Pour ce faire, lors de l'insertion des cas dans la base de connaissances, les relations entre les états, est renseignée, formant ainsi une sorte de « taxonomie » pour ces relations. Si la relation n'est pas décomposable, le problème est traité comme dans le cas simple. Sinon, le problème est décomposé en sous-problème propageant ainsi la recherche de solution. Cette méthode se base sur un système récursif. L'exemple suivant tente d'illustrer le mécanisme (Fig. 5.19²¹) :

- a) On recherche $E2$ défini comme $E1 \rightarrow R1 \rightarrow E2$, où $E1$ est un état initial et $R1$ une relation
- b) Le système procède à la résolution et conduit à la décomposition de $R1$ en $R1a$ et $R1b$ (Cas A sur la figure)
- c) Le problème propagé devient $E1 \rightarrow R1a \rightarrow Ea$, où Ea est l'inconnue
- d) Ce nouveau problème est résolu, $R1a$ n'étant pas décomposable (cas B sur la figure), on applique la liste d'opérations correspondante créant le nouvel état Ea .
- e) Ea n'est pas un état final, la résolution se poursuit (Cas 2 sur la figure)
- f) Ea connu le nouveau problème est $Ea \rightarrow R1b \rightarrow E2$
- g) Ce nouveau problème est résolu, $R1b$ n'étant pas décomposable (cas B sur la figure), on applique la liste d'opérations correspondante créant le nouvel état $E2$ (état final, Cas1 sur la figure).
- h) \Rightarrow Fin du problème

Deux avantages existent pour cette méthode. Le premier étant que comme le système essaie systématiquement de décomposer la relation, la trajectoire conduisant d'un état à un autre est adaptée à l'état en cours. En effet, le mécanisme de recherche de cas similaires étant effectué à chaque décomposition, la meilleure solution est à chaque fois sélectionnée. De ce fait, si un cas source (noté CS1) a été sélectionné lors de la résolution d'un problème (plus conceptuel), la résolution des problèmes issus de la décomposition de ce dernier n'aboutira pas forcément à la sélection du cas source (CS1). Le deuxième avantage provient des listes d'opérations associées à certaines transformations qui permettent d'estimer le résultat de cette dernière. Ceci entraîne que lors de la propagation, le mécanisme recherche un cas similaire à l'état estimé et non pas à l'état initial, améliorant ainsi la solution.

5.10 MISE EN PLACE ET DÉVELOPPEMENT

Dans cette partie, nous traitons de la mise en place du système au niveau programmation, des choix qui ont été faits et de l'efficacité du système. Dans un premier temps, nous justifierons l'usage du paradigme choisi ainsi que du langage utilisé pour représenter le mécanisme décrit auparavant. Ensuite, nous expliquerons notre démarche d'implémentation.

5.10.1 CHOIX D'UN PARADIGME ET D'UN LANGAGE : PROLOG

Comme nous l'avons montré dans les parties antérieures, le mécanisme de raisonnement à partir de cas proposé s'appuie sur une base de connaissance formée comme un réseau sémantique. De plus, le raisonnement se base sur plusieurs inférences comme les inférences sur les taxonomies permettant la conceptualisation. L'ensemble des

21. Algorithme issu de l'article « Adaptive method for CBR based on recursion and problem decomposition : application to recovery processes » de P. Chazara, S. Négnny et L. Montastruc, article en cours de publication

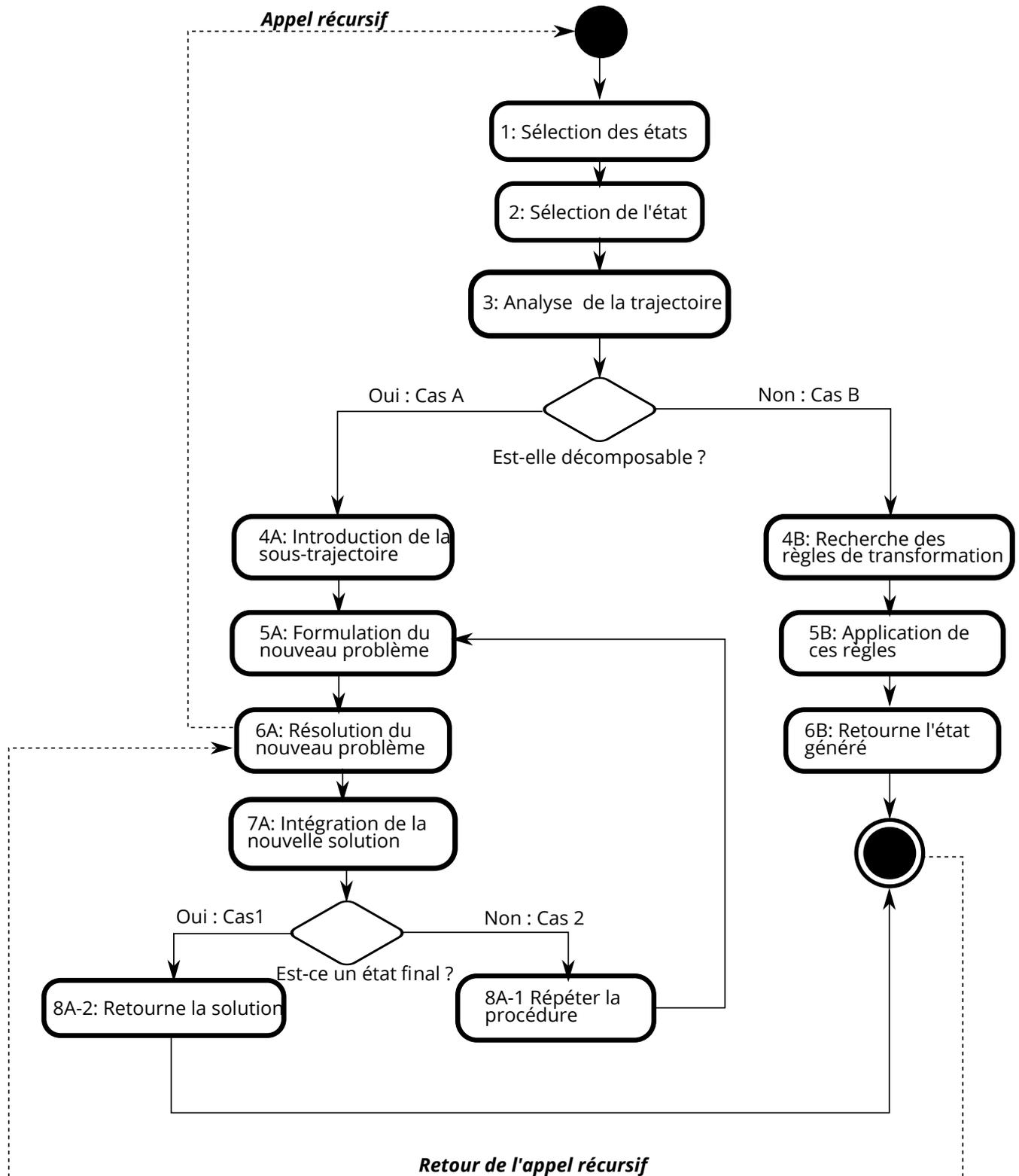


FIGURE 5.19- ALGORIGRAMME DE LA MÉTHODE DE DÉCOMPOSITION ET DE RÉOLUTION DU PROBLÈME

raisonnements utilise principalement des aspects purement logiques et non pas calculatoires car les seuls calculs se font lors des recherches de relations entre valeurs numériques. Nous avons donc choisi le paradigme de la programmation logique en choisissant le langage de programmation Prolog. En effet, la structure du système peut se décrire ainsi :

- Les connaissances sont des faits, ce qui se traduit en Prolog par des prédicats
- L'ensemble des raisonnements d'inférences, ainsi que la structure sont réalisés avec des règles. Ces règles

CHAPITRE 5. MÉTHODOLOGIE DE GÉNÉRATION DE NOUVELLES TRAJECTOIRES BASÉE SUR LE RAISONNEMENT À PARTIR DE CAS

dans Prolog sont structurées sous la forme de clauses de Horn.

5.10.2 FONCTIONNEMENT GÉNÉRALE DE PROLOG

Prolog est un langage de programmation logique développé par Alain Colmerauer et Philippe Roussel en 1972 en vue de traitements linguistiques. Prolog se base sur le calcul de prédicats de premier ordre. En effet, dans ce langage, il existe deux types d'éléments :

- Les faits en prédicats, qui sont des atomes (clauses positives) et qui représentent des éléments incondi- tionnels
- Les règles, qui sont des éléments composés d'un atome (clause négative) en en-tête, et d'atomes (clauses positives) constituant le corps de la clause

Les règles comme les faits constituent des clauses de Horn, cependant, les règles sont des vérités déduites comme vraies si l'ensemble des clauses du corps sont vraies. Par exemple :

```
estPere(Pere , Fils):-  
    estFils(Fils , Pere).
```

est une règle où $estPere(Pere,Fils)$ est la clause négative (le but à atteindre), l'en-tête de la règle, $estFils(Fils,Pere)$ est une clause positive constituant le corps de la règle et $Pere$ et $Fils$ sont des variables. Cette règle permet de faire des déductions par exemple, il est possible de demander si *pierre* est le père de *jean* en interrogeant le système avec :

```
estPere(pierre , jean).
```

renverra **Vrai** s'il existe le prédicat $estFils(jean,pierre)$.

De plus, Prolog permet de faire des déductions. Ainsi, en supposant que le prédicat $estFils(jean,pierre)$ existe, la question :

```
estPere(pierre , Fils).
```

où $Fils$ est une variable non unifiée (non unifiée signifie ici qu'elle n'a pas de valeur. De même, une variable ne peut être unifiée qu'une seule fois et de ce fait elle n'est plus modifiable par la suite), renverra les valeurs de $Fils$ tels que la règle **estPere** soit vraies. Dans notre exemple, Prolog retournera la réponse :

```
Fils=jean .
```

Si par exemple, au lieu d'avoir le prédicat $estFils(jean,pierre)$ on a :

```
estFils(jean , pierre).  
estFils(robert , pierre).  
estFils(roger , pierre).
```

à la même question, Prolog répondra :

```
Fils=jean ,  
Fils=robert ,  
Fils=roger .
```

Enfin, et sans rentrer dans les détails, Prolog permet de réaliser des raisonnements plus poussés. Un exemple classique est celui déduisant qu'une personne est grand-père d'une autre avec la règle :

```
estGrandPere(X,Z):-  
    estFils(Y,X) ,  
    estFils(Z,Y).
```

où X,Y,Z sont des variables. Cette règle renverra **Vrai** pour X et Z tel que Z soit fils de Y et Y soit fils de X . Par cet exemple, on remarque que quels que soient les éléments d'entrées (à savoir si X et/ou Z sont unifiées ou non), Y ne sera pas unifiée. Ce qui implique que Prolog utilise un moteur d'inférence basé sur la méthode du *Backtracking*, permettant de rechercher (dans le cas où X soit unifié et Z non) un Y tel que la première clause $estFils(Y,X)$ soit vraie, puis de rechercher un Z pour que la seconde clause $estFils(Z,Y)$ soit vraie. Si aucun Z n'est trouvé, Prolog va rechercher un autre Y vérifiant la première clause, puis refaire l'opération. Il retournera toutes les solutions et si aucune n'est trouvée, il retournera **Faux**.

5.10.3 PRINCIPE DE DÉVELOPPEMENT : LE PRINCIPE KISS

Lors du développement, nous avons essayé de suivre le principe **KISS**. Ce principe, ayant plusieurs significations, exprime l'idée *Keep It Simple & Stupid*. Cela signifie de concevoir toujours un système simple, au plus proche des besoins sans rajouter des choses inutiles. Par ce principe la solution élaborée est simple (mais pas simpliste) et très épurée. Elle ne conserve que les fonctions de bases expliquées antérieurement.

5.10.4 MISE EN PLACE DU SYSTÈME

Le système a été mis en place en utilisant SWI-Prolog. L'ensemble des mécanismes est réalisé sous forme de règles permettant la création, la modification et la destruction des prédicats, constituant la base des faits. Chaque mécanisme suit la logique décrite et cherche à être le plus rapide possible en terme d'exécution. Cependant, les prédicats sont ici dynamiques puisqu'ils doivent pouvoir être manipulables. Or, comme l'explique la documentation de SWI-Prolog, l'utilisation de prédicats dynamiques peut poser problèmes et est définie comme « database evil ». Ces problèmes proviennent principalement du fait que lors de la résolution des questions posées à Prolog, le mécanisme utilisé est celui du *Backtracking* pour l'exploration des solutions possibles. Or l'ajout dynamique de prédicats peut perturber ce type de raisonnement. Pour notre solution, nous avons choisi de ne rentrer, comme prédicats, que des éléments qui ont été déclarés comme vrais. De ce fait, le principal problème soulevé est contourné. Pour les données temporaires mais nécessitant une sauvegarde sous forme de prédicats, la politique choisie vise à limiter au maximum leur nombre et, après chaque utilisation, de nettoyer intégralement la base de faits.

5.11 CONCLUSION

Dans cette partie, nous avons décrit le fonctionnement d'un système basé sur la gestion de la connaissance, permettant de générer de nouvelles trajectoires de valorisation pour les déchets. Plus généralement, elle permet de créer de nouveaux procédés de toutes natures du moment que les conditions nécessaires soient présentes (voir les hypothèses posées pour le raisonnement à partir de cas). Dans ce système, nous partons d'une méthodologie existante qui est celle du raisonnement à partir de cas et nous l'appliquons à notre problématique. Ensuite, l'ensemble des étapes de cette méthode sont analysées et adaptées à nos besoins. Par conséquent, nous proposons une façon de décrire la connaissance sous formes d'entités non structurées et composées d'éléments ou de concepts inter-reliés par des relations. La formation des cas est dynamique permettant de résoudre différents types de questions à partir d'une base commune d'informations. Ceci a amené à définir une nouvelle méthode d'évaluation de la similarité basée sur la notion de **définition commune** où aucune mesure n'est effectuée. Ce système permet ainsi de s'adapter aux questions de manière naturelle et permet de réduire la connaissance apportée par l'expert lors de la conception du système. De plus, un ensemble de mécanismes assurent la fluidité lors des raisonnements. Ainsi, certaines égalités peuvent être déduites entre des éléments distincts provocants, à un premier niveau des appariements d'éléments, des regroupements, et à un second niveau, permet le déploiement d'une certaine créativité émergeant du rapprochement d'éléments qui de prime abord sont dissemblables. La recherche de cas, lors de la phase de résolution, est de ce fait impactée par le système des **définitions communes** et permet une recherche ciblée de cas. La décomposition des problèmes, provenant de fait de la description des éléments dans la base de cas, assure une adaptation des solutions. Cette dernière est réalisée par un système récursif décomposant un problème en un ensemble de sous-problèmes eux-mêmes pouvant être résolus par le même mécanisme décrit. Enfin, le modèle proposé n'est pas spécifique à la valorisation des déchets, mais peut être utilisé dans tous les problèmes qui peuvent être décrits sous forme *État → relation → État*.

Néanmoins, certains points restent à améliorer. Ainsi, le mécanisme de fluidité est soumis principalement à la description d'une taxonomie permettant le mécanisme de conceptualisation. Or, la création de cette taxonomie étant dynamique, elle implique l'apport d'une connaissance de la part de l'utilisateur. Ce point est toutefois atténué par le fait que cette information est très limitée et est relativement simple à mettre en place pour un nombre important de types de problème. Un autre point problématique est l'utilisation des mécanismes de fluidité qui ne sont pas contrôlés. Ainsi, s'ils permettent une forme de créativité, ils peuvent représenter un risque d'association d'éléments qui peuvent être incorrects, amenant ainsi à des solutions générales non cohérentes.

CRÉATION D'UN OUTIL DE REPRÉSENTATION ET D'ÉVALUATION DE TRAJECTOIRES DE VALORISATION

Cesse de dire des balivernes ! Tu n'es absolument pas fou,
monsieur le Professeur ; tu manques même beaucoup trop de folie à
mon goût !

LE LOUP DES STEPPES – HERMANN HESSE –

Cette partie détaille la démarche de modélisation et de réalisation d'un outil destiné à la simulation des trajectoires de valorisation des déchets et leurs évaluations. Plus largement, elle s'applique à tout type d'activité. Cette partie se décompose en trois grandes idées avec d'une part la logique de modélisation de la trajectoire appliquée à un outil informatique, son implémentation et enfin la réalisation des différents calculs.

6.1 BESOINS ET RÔLES DE L'OUTIL

6.1.1 INTÉRÊT

La génération de trajectoires de valorisation passe par une étape de sélection des trajectoires possibles. Cette sélection suppose une évaluation de cette dernière comme il a été expliqué dans le [chapitre 3](#). L'intérêt d'une telle démarche se base sur la nécessité de pouvoir modéliser une trajectoire, de pouvoir prédire ses performances de manière simple malgré le manque de données disponibles. Cette modélisation suppose de disposer de connaissances sur le fonctionnement des différentes étapes unitaires afin d'estimer les différents flux, par exemple matières, énergétiques ou financiers. L'outil, dans un premier temps, devra rendre le système cohérent à partir d'un ensemble d'opérations indépendantes, afin de permettre de calculer la valeur de ces flux. Qui plus est, l'interconnexions des différentes opérations unitaires permet d'établir certaines relations de dépendance entre les éléments amenant certaines contraintes pour la configuration.

Génération



Evaluation



Sélection

6.1.2 BESOIN ET JUSTIFICATION

Les besoins justifiant la création de l'outil sont d'une part d'assurer une modélisation cohérente avec celle proposée dans la partie purement théorique de ce travail. D'autre part, l'outil vise à fournir un mécanisme de modélisation qui se veut simple tout en permettant une grande flexibilité sur cette dernière. Rappelons ici un de ces objectifs : permettre de proposer de nouvelles voies de valorisation pour un type de déchet. Il s'agit ici d'une première étape, c'est-à-dire d'une première évaluation permettant non pas de connaître avec précision la fiabilité ou la faisabilité du procédé, ni d'estimer avec une faible marge d'erreur la production espérée, mais de prédire si cette voie pourrait être potentiellement intéressante et s'il convient de l'étudier plus en détail dans les prochaines phases du processus de conception. Par conséquent, un premier point est que le modèle se doit d'être simple. Le deuxième point est qu'il doit posséder une capacité de réutilisation. Ainsi, une fois qu'une opération unitaire créée, elle doit pouvoir être utilisée pour d'autres trajectoires, ou encore elle doit pouvoir être légèrement

CHAPITRE 6. CRÉATION D'UN OUTIL DE REPRÉSENTATION ET D'ÉVALUATION DE TRAJECTOIRES DE VALORISATION

modifiée sans pour autant remettre en cause la totalité de sa structure. Par conséquent, chaque opération doit être modélisée de telle sorte qu'elle soit indépendante de son intégration première. Le nombre de flux, qu'ils soient financiers, matériels ou énergétiques, imposent un nombre important de calcul et surtout une forte relation entre eux (Fig. 6.1). Enfin, on peut remarquer que certains aspects, comme la résolution du problème de contraintes ou encore certains outils mathématiques devront être facilement intégrés à l'outil.

Description

Etapes unitaires

Contraintes

Liens

Calcul flux



FIGURE 6.1- ÉLÉMENTS PERMETTANT LE CALCUL DES FLUX

Une interrogation peut provenir sur le choix de réaliser un outil de modélisation alors que certains outils sont déjà présent sur le marché. Par exemple, il existe plusieurs simulateurs de procédés, comme Aspen Plus[®], Prosim[®] ou JModelica[®]. Ces logiciels permettent de modéliser des procédés assez finement et même pour certains permettent de réaliser des évaluations économiques. Cependant, il nécessite souvent d'avoir des données précises sur le procédé étudié. Ils sont donc plus adaptés pour les phases plus aval du processus de conception (Fig.6.2).

Par conséquent, le type de logiciel proposés ont souvent un niveau de description des modèles plus élevé que ce que l'on pourrait souhaiter, ce qui pourrait alourdir la tâche lors de la modélisation.

Besoin

- SIMPLE
- FLEXIBLE
- COHERENT
- EFFICACE

FIGURE 6.2- BESOINS

Une fois les flux calculés, l'intérêt de cet outil est de réaliser une évaluation sur les différents critères choisis :

- Économique : ce qui nécessite une connaissance des flux de capitaux entre les différentes entités financières, mais aussi de pouvoir dimensionner les installations afin d'évaluer leur coût de fonctionnement ainsi que l'investissement nécessaire.

- Environnemental : pour ce faire, le système doit disposer, comme on le montrera par la suite, des flux matières et énergétiques entrant et sortant du système considéré.

- Sociale : qui s'appuie sur une évaluation de la création du nombre d'emplois et qui nécessite, entre autre un dimensionnement des infrastructures, qui passent par la détermination d'une capacité de production.

Enfin, la réalisation de l'outil implique une compréhension de son fonctionnement théorique permettant ainsi d'évaluer la validité du modèle ainsi que ses limites.

6.2 MODÉLISATION DE L'OUTIL : APPROCHE THÉORIQUE

Dans ce chapitre, la démarche de modélisation de la trajectoire sera expliquée. Au-delà de l'aspect « programmation », c'est l'aspect conception qui nous intéresse. La modélisation de la trajectoire s'appuie sur la nécessité de simplicité et d'efficacité du modèle en vue d'atteindre son principal objectif qui est le calcul des données alimentant les indicateurs. Dans un premier temps, nous verrons comment le système permet de modéliser les trajectoires, c'est-à-dire comment sont conçus les modèles représentant les opérations unitaires, puis le fonctionnement et l'utilisation des flux sont expliqués. Dans un second temps, nous verrons la notion de « système », notion essentielle pour la représentation de la granularité dans les vues (la possibilité de considérer la trajectoire sous le point de vue de l'opération unitaire, de l'usine ou par exemple sous la vue logistique).

6.2.1 PROPOSITION DE REPRÉSENTATION DES OPÉRATIONS

D'un point de vue purement conceptuel, une opération est un « passage » où une ou plusieurs entrées subissent des transformations, générant ainsi une ou plusieurs sorties. Ainsi, par exemple, une opération de transformation chimique conduit à la transformation d'un composant en un ou plusieurs autres, alors qu'une opération logistique conduit à la transformation d'un état (d'une



FIGURE 6.3- UNE OPÉRATION ⇒ UNE BOITE

position géographique) en un autre état (une nouvelle position géographique). Par conséquent, une opération est une étape de modification se caractérisant par une entrée et une sortie ou l'une des deux. On peut donc résumer chaque opération comme un élément qui modifie les paramètres d'un état. La succession d'états constitue les flux. Ceci est vrai pour n'importe quel type de flux et n'est pas limité aux flux matières. En effet, on peut considérer que la transformation d'un composé par une opération peut se faire par l'ajout de matière, d'énergie et de travail, dont une des façons de le quantifier est le coût. Par conséquent, chaque entité n'est qu'un élément qui modifie des flux ou crée des flux. Or, d'un point de vue global, un flux peut être vu comme un élément auquel on associe une ou plusieurs variables comme le débit. De ce fait, il est possible de considérer une opération comme un calculateur¹ qui reçoit des données d'entrées et émet une ou plusieurs sorties en fonction de la valeur des entrées mais aussi des règles qui le régissent.

Dans notre modèle, une opération est donc régie par des règles qui imposent des contraintes entre les entrées et les sorties (Fig. 6.4). Par exemple, une opération comportant une réaction chimique est contrainte par la stoechiométrie de la réaction. Ces contraintes sont parfois complexes à modéliser et requièrent une très bonne connaissance de l'opération en question. Cependant, comme nous l'avons souligné, les données en notre possession pour l'évaluation de la trajectoire sont en faible quantité. De plus, nous ne cherchons pas à comprendre les mécanismes sous-jacents aux opérations, mais uniquement à prédire leur comportement. Par conséquent, il a été choisi de décrire chaque opération comme une boîte « grise » où les mécanismes régissant le fonctionnement de l'opération sont réduits aux relations entre les divers flux entrants et sortants. Ces relations peuvent donc être proches de la réalité, si elles sont assez faciles à modéliser ou aux contraires entachées d'erreurs ne donnant qu'un ordre de grandeur des relations entre les flux. Le but, rappelons le, est d'avoir un modèle simple permettant, finalement, une prise de position quant à la poursuite d'étude d'une trajectoire de valorisation.



FIGURE 6.4- CONTRAINTES ENTRE LES ÉTATS

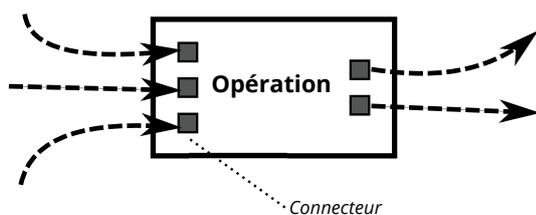


FIGURE 6.5- REPRÉSENTATION D'UNE OPÉRATION

De plus, chaque opération est décrite dans le modèle comme une boîte disposant d'un nombre limité d'entrées et de sorties appelées connecteurs (Fig. 6.5). Ces connecteurs sont assimilables à des ports d'entrées et de sorties du système et permettent à ce dernier de connaître la provenance ou l'allocation d'un flux. Ainsi, l'ensemble de règles définissant les contraintes est paramétré en fonction des flux selon leur provenance, leur composition et leur destination. Dans la modélisation, chaque connecteur ne peut être considéré que comme entrée ou sortie. De plus, si le connecteur est un connecteur d'entrée, il a aussi pour fonction le mélange de tous les flux qui lui sont reliés². À contrario, un connecteur de sortie ne peut être relié qu'à un seul flux. En effet, dans le cas contraire, il serait nécessaire de décrire le comportement de ce connecteur, c'est-à-dire comment la séparation des flux se fera.

6.2.2 PROPOSITION DE REPRÉSENTATION DES FLUX MATIÈRES ET AUTRES

Dans la partie précédente, nous avons vu comment les opérations définies dans le système et comment elles fonctionnent. Dans cette partie, nous nous intéressons aux flux. Toujours d'un point de vue conceptuel, un flux représente un déplacement de matière, d'énergie, de capitaux ou encore simplement d'information. Cependant, ce déplacement ne peut être considéré que sous l'hypothèse qu'il n'y ait pas de modification du flux entre son entrée et sa sortie. Ce point implique donc qu'une opération de transport doit être modélisée comme une opération à part entière, ce qui permettra de plus de lui associer un coût ou encore un délai.

1. <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/calculateur/12280>

2. Le système considère des mélanges simples, uniquement par sommation

CHAPITRE 6. CRÉATION D'UN OUTIL DE REPRÉSENTATION ET D'ÉVALUATION DE TRAJECTOIRES DE VALORISATION

De plus, un flux est caractérisé par sa composition qui peut être invariable. Par conséquent, du point de vue modélisation, un flux est une description d'un ou plusieurs éléments qui peuvent être paramétrés, comme le débit. Or, un flux est lié à des opérations par des connecteurs, c'est-à-dire qu'il possède un connecteur d'entrée et un connecteur de sortie. Un flux est donc un élément qui permet d'associer ou de contraindre les valeurs associées à deux connecteurs. On précise ici, qu'il n'y a pas forcément égalité entre les connecteurs puisqu'un connecteur d'entrée peut avoir plusieurs connecteurs reliés et, de ce fait, les valeurs véhiculées par le flux ne seront qu'une partie des valeurs du connecteur.

6.2.3 PROPOSITION DE REPRÉSENTATION DES CONNECTEURS

Les connecteurs sont des éléments qui font la jonction entre les flux et les opérations. Ces éléments, n'ont pas vraiment de réalité physique puisqu'ils peuvent représenter une entrée matière ou simplement une destination de l'information. Leur rôle est de permettre de spécifier la provenance ou la sortie d'un flux, permettant ainsi de les traiter selon leurs origines. D'un point de vue structurelle, on peut représenter les connecteurs exactement de la même manière que les opérations (Fig. 6.6). Cependant, leur comportement vis-à-vis des flux est fixé à l'avance et ne peut être changé. Ce comportement, est simple :

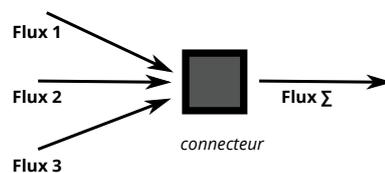


FIGURE 6.6- CONNECTEURS

- Si le connecteur est une entrée du procédé, alors il a vocation de sommer les débits des flux par composant (une information n'a pas de débit).
- S'il est placé en sortie, il ne fait que lier ces propres valeurs au flux sortant de l'opération qui lui est connecté.

Nous voyons ici que les connecteurs ont des valeurs propres. En effet, dans notre modélisation, les règles régissant l'opération modifient les valeurs de ces connecteurs. Ainsi, d'un point de vue pratique, une contrainte exprimera des faits comme : *pour une valeur X du composé A dans le connecteur 1, la valeur du connecteur 2 pour le composé B sera Y*. Par conséquent, une opération n'aura, comme variables modélisant la trajectoire, que les valeurs de ces connecteurs.

6.2.4 PROPOSITION DE REPRÉSENTATION D'OPÉRATIONS DE NIVEAUX SUPÉRIEURS

La représentation de la trajectoire comporte plusieurs niveaux de granularité (Fig. 6.7), lui permettant une représentation différente selon ce que l'on désire modéliser. Ainsi, si la modélisation nécessite une description au niveau des opérations unitaires, la modélisation se fera à bas niveau, alors qu'une modélisation de haut niveau se concentrera sur une modélisation au niveau usine par exemple. Afin d'assurer la possibilité d'avoir recours à différentes vues, le modèle doit comporter un mécanisme permettant de faire le lien entre chaque niveau.

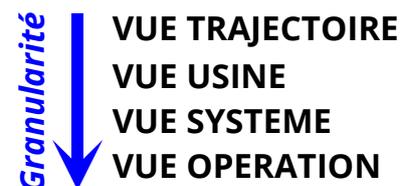


FIGURE 6.7- VUE GRANULARITÉ

Le modèle permet la modélisation de structure sous différents niveaux de plusieurs façon :

- La première façon est tout simplement de définir une opération simple, comportant, si besoin, plusieurs entrées et sorties. En effet, comme nous l'avons expliqué, une opération n'est qu'une boîte noire (un calculateur) qui pose des contraintes entre les flux entrants et les flux sortants. Cependant, rien n'oblige à ce que l'opération soit une opération unitaire, un procédé ou une usine. De ce fait, la seule limite que pose cette modélisation est la capacité de l'utilisateur à représenter le modèle à l'aide de différentes contraintes posées sur ces entrées sorties. Cependant, cette façon de procéder oblige par la suite à limiter le niveau de vue possible sur la trajectoire. En effet, si par exemple on modélise sous forme d'opération une usine, il sera par la suite impossible de pouvoir descendre de niveau de granularité par le simple fait que l'usine décrite est sous forme de boîte noire et que par conséquent, le système ne sait pas ce qui se passe à l'intérieur (il ne peut pas, de lui-même décomposer l'usine en opérations unitaires).
- La deuxième façon est la définition de système. En effet, comme nous avons vu avec la solution consistant à modéliser une structure sous forme d'opération, une décomposition ultérieure est impossible. Le système

6.2. MODÉLISATION DE L'OUTIL : APPROCHE THÉORIQUE

permet de résoudre ce problème car il est décrit comme un ensemble d'opérations de bas niveau (niveau qui sera par conséquent le niveau de granularité le plus bas exploitable). Par conséquent, il s'agit en fait de créer des ensembles d'opérations qui seront définis comme un tout commun sous une certaine vue. Cette structuration possède plusieurs avantages. Tout d'abord, si par exemple l'ensemble de la trajectoire est représenté à l'aide d'opérations unitaires, il est possible de représenter plusieurs niveaux de systèmes comme :

- Un système pour une ou plusieurs opérations unitaires
- Un système regroupant des opérations unitaires et des systèmes
- Un système comportant une partie de plusieurs systèmes

Le second avantage est qu'il est possible de représenter, à partir d'une même trajectoire, plusieurs configurations de haut niveau. Ainsi, il est possible d'évaluer la meilleure configuration à partir d'une trajectoire et d'opérations unitaires fixées permettant par exemple de représenter différents sites de traitement.

Enfin, l'utilisation de système permet de représenter un ensemble d'opérations comme une structure virtuelle, ce qui permet de définir des systèmes qui seront utilisés lors de la phase d'évaluation (Fig. 6.8).

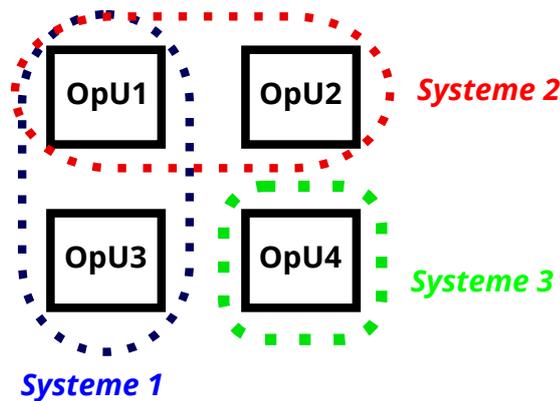


FIGURE 6.8- ILLUSTRATION DE REGROUPEMENTS POSSIBLES

6.2.5 UTILISATION DE SIMULATIONS ET DU PROJET

La modélisation précédente n'est pas dynamique, il n'est pas possible de simuler une modification des flux comme le ferait un système simulant les états transitoires. Cependant, au cours d'une vie d'un projet, les structures des usines, les capacités ou simplement les débits peuvent être modifiés. Ces modifications influencent les indicateurs, comme l'évaluation économique qui va évaluer l'ensemble du projet, de sa création jusqu'à la fin de l'exploitation de la filière. De ce fait, et même si comme nous l'avons dit le système n'est pas dynamique, nous proposons la création d'une structure nommée *simulation*, qui permet de contenir l'ensemble de la trajectoire décrite, ainsi que la définition des flux. Grâce à cela, il est possible de réaliser plusieurs simulations d'un même projet (Fig. 6.9). Chaque simulation peut être, par exemple, exactement la même trajectoire composée des opérations unitaires initiales mais avec des débits différents, elle peut contenir une différence structurelle mais avec les mêmes débits ou encore être complètement différente. Cet ensemble permet :

- de créer plusieurs modèles,
- de modéliser plusieurs scénari,
- de représenter une évolution dans une trajectoire au cours du temps.

Ce dernier point est intéressant car il permet d'introduire un nouvel élément, le projet. Le projet est une succession de simulations ordonnées chronologiquement. Ceci permet de simuler, pour un même projet, des évolutions dans les trajectoires.

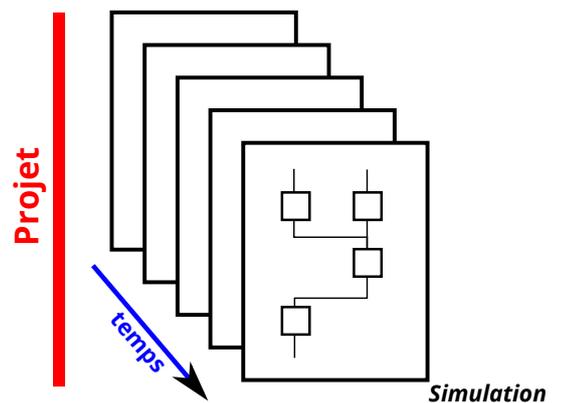


FIGURE 6.9- LES SIMULATIONS FORMENT UN PROJET

CHAPITRE 6. CRÉATION D'UN OUTIL DE REPRÉSENTATION ET D'ÉVALUATION DE TRAJECTOIRES DE VALORISATION

6.3 MODÉLISATION DE L'OUTIL : RÉALISATION

La réalisation de l'outil est passée par plusieurs étapes visant d'une part à satisfaire les fonctionnalités souhaitées, de rendre le code le plus simple possible tout en lui permettant une grande flexibilité et une certaine robustesse. Cette réalisation s'est donc décomposée en plusieurs étapes : allant du choix d'un paradigme de programmation, le choix d'un langage répondant à ce paradigme et par une structuration de l'application. Dans cette partie, nous proposons d'expliquer, la mise en place du système exposé dans la partie théorique précédente en se concentrant sur certains choix techniques. Dans un second temps, nous expliquerons comment nous avons procédé pour résoudre le problème associé à notre système de contraintes. Enfin, les méthodes mises en place pour l'utilisation de différents critères d'évaluation et leur fonctionnement sont expliquées.

6.3.1 RÉALISATION DE L'OUTIL : PROGRAMMATION

6.3.1.1 CONTRAINTES LIÉES AU MODÈLE PROPOSÉ

Dans la partie théorique, nous avons vu le fonctionnement des différentes structures que nous proposons dans notre modèle afin de réaliser les fonctionnalités souhaitées. Nous allons exposer, les différentes contraintes liées à l'implémentation de ses structures dans un système informatique.

D'un point de vue général, nous pouvons observer que le modèle présente de nombreux composants, comme :

- Les opérations
- Les systèmes
- Les flux

Ensuite, il est possible de remarquer que, par définition, le nombre d'opérations dans le modèle de trajectoires est indéterminé. De même, d'une façon plus générale, le nombre d'opérations unitaires que le système peut décrire est lui aussi indéfini. Par conséquent, ce type de modélisation doit pouvoir être dynamique, c'est-à-dire de pouvoir adapter le nombre d'éléments gérés par le système quelle que soit la taille de l'ensemble. Enfin, une contrainte supplémentaire est la facilité de mise en place du système. En effet comme nous l'avons expliqué, nous souhaitons réaliser un outil simple, facilement manipulable et adaptable. Par conséquent, il ne s'agit pas ici de réaliser un outil complexe, mais bien plutôt un ensemble simple (mais pas simpliste) et optimisé pour les tâches qui lui seront allouées.

6.3.1.2 PARADIGME DE PROGRAMMATION

Le paradigme de programmation choisi est celui de la programmation orientée objet. En effet, il est possible de considérer chaque élément par type d'objet. Pour modéliser une trajectoire, 3 principaux objets sont nécessaires :

- Les opérations, que nous appellerons conteneurs
- Les connecteurs
- Les flux

À ceci s'ajoute les autres éléments qui peuvent se comporter comme des objets :

- Les systèmes
- Les simulations
- Les projets

Les avantages de la programmation orientée objet (**POO**) pour la modélisation du système sont nombreuses. Il est, par exemple, possible de décrire un modèle d'opération qui pourra être utilisé plusieurs fois dans la trajectoire sans avoir à être redéfini. En effet, en définissant un type d'opération comme une classe, il est possible de générer autant d'instances que l'on souhaite, ce qui résout de manière simple et élégante la contrainte dynamique de la modélisation. De même, la **POO** possède la qualité de structurer le code, facilitant par la suite son usage et son adaptabilité.

6.3.1.3 LE CHOIX DU LANGAGE

Le langage de programmation sélectionné est le langage Python 2. En effet, ce dernier supporte plusieurs paradigmes dont l'orienté objet. Le choix du langage dans ce type de projet n'est pas crucial, mais peut faciliter ou non sa réalisation, son efficacité, par exemple la vitesse d'exécution ou la quantité de mémoire nécessaire, et enfin permet ou non d'utiliser des bibliothèques. Ainsi, certains langages comme le langage C++ sont réputés pour être assez efficaces au niveau d'exécution. En contrepartie, étant des langages de bas niveaux, leurs implémentations reste longue et assez complexe. En contrepartie, les langages de haut niveaux sont plus proches du raisonnement humain, mais présente souvent une efficacité moindre.

Ainsi, le langage de programmation Python répond aux besoins posés pour la modélisation du système. C'est un

langage libre (*Python Software Foundation License*³), de haut niveau, multi-plateformes et offre une multitude de bibliothèques permettant ainsi d'avoir très rapidement un ensemble de fonctionnalités poussées. Par exemple, l'utilisation de certaines bibliothèque comme *NumPy* (*licence BSD*⁴) permettant d'étendre le langage aux calculs sur les matrices ou encore *pyswip* (*MIT License*⁵) permettant d'interfacer Python avec SWI-Prolog (*licence LGPL*⁶) sont des avantages indéniables.

6.3.2 STRUCTURE GÉNÉRALE DU PROGRAMME

Le programme développé a été conçu en deux phases. La principale phase fut la modélisation de la trajectoire, en créant un modèle orienté objet à la fois simple et flexible. Les premières classes créées furent donc celles dédiées aux opérations unitaires, c'est-à-dire les opérations appelées conteneurs, avec ses connecteurs, les flux et les systèmes. La deuxième partie du développement concerne les fonctionnalités propres au fonctionnement de l'ensemble, tant à la modélisation et gestion des trajectoires, qu'à leurs utilisations. Par conséquent, la structure générale du programme (Fig. 6.10) reflète d'une part la forme de modélisation choisie pour la représentation de la trajectoire à laquelle vient s'ajouter une partie dédiée à son utilisation, et d'autre part la volonté de légèreté et de flexibilité.

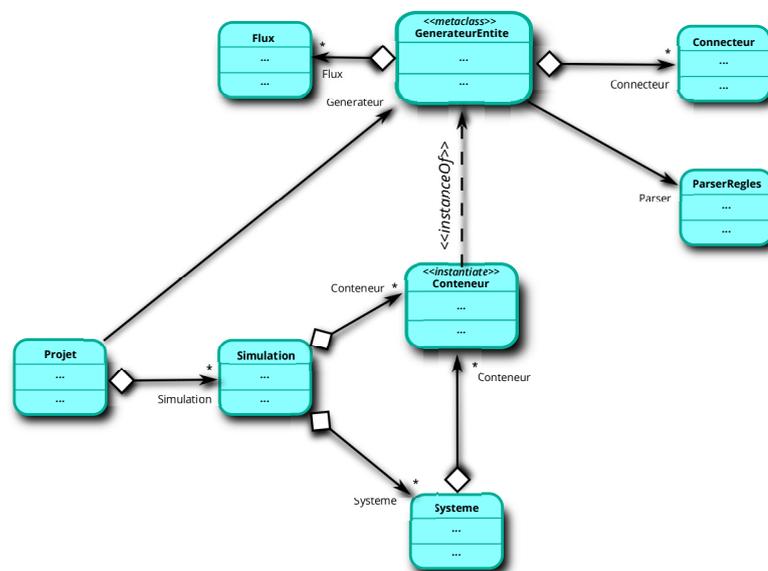


FIGURE 6.10- DIAGRAMME DE CLASSES PARTIEL DU SYSTÈME

6.3.3 MODÉLISATION DES OPÉRATIONS/CONTENEURS

6.3.3.1 POINT DE VUE GÉNÉRAL

Les conteneurs sont des structures permettant de modéliser les opérations. Ces structures doivent contenir différents éléments :

- Les connecteurs qui permettent d'effectuer des connexions entre les flux. Comme le nombre d'entrées et de sorties est inconnu, le conteneur doit être capable d'en créer et d'en stocker un nombre indéterminé. Ils seront stockés dans un dictionnaire qui permettra l'accès grâce à une clé (à comprendre comme un identifiant).
- Les règles -contraintes- entre les flux. Ici, l'ensemble des contraintes sera stocké sous forme de règles comportant plusieurs types de variables comme le nom des connecteurs et le composant associé, des variables dépendantes de la classe et plus précisément du type d'opération, des appels à des fonctions.

3. <https://www.python.org/download/releases/2.7/license/>, licence compatible avec la GPL selon la FSF <https://www.gnu.org/licenses/license-list.html#Python>

4. <http://www.numpy.org/> compatible GPL <https://www.gnu.org/licenses/license-list.html#ModifiedBSD>

5. <https://code.google.com/p/pyswip/> compatible GPL <https://www.gnu.org/licenses/license-list.html#X11License>

6. <http://www.swi-prolog.org/pldoc/man?predicate=license/2> voir <https://www.gnu.org/licenses/license-list.html#LGPL>

CHAPITRE 6. CRÉATION D'UN OUTIL DE REPRÉSENTATION ET D'ÉVALUATION DE TRAJECTOIRES DE VALORISATION

- Tout un ensemble de mécanisme permettant l'utilisation de l'opération au sein de la trajectoire comme les méthodes pour la connexion/déconnexion des flux ou la méthode pour générer les règles de manières globales.
- Des fonctions particulières permettant d'obtenir certains résultats propres au type d'opération, comme des valeurs nécessaires à la modélisation (fonctions propres à la modélisation de l'entité).

Les conteneurs sont donc des structures assez similaires qui vont différer par :

- Le nombre de connecteurs
- Les règles associées
- Les fonctions propres associées

Ainsi, plusieurs choix peuvent être réalisés quant au modèle de classe représentant les conteneurs. Soit une classe est créée en modélisant le comportement global des conteneurs, puis à chaque création d'une instance, un paramétrage est réalisé afin de définir les caractères propres de chaque opération. Cette solution a l'avantage d'être assez simple mais, si cette opération est utilisée à plusieurs reprises dans la trajectoire, elle nécessite d'être répétée autant de fois. Une deuxième solution consiste à passer par l'utilisation d'une méta-classe permettant la construction de classes paramétrées représentant le comportement spécifique d'une opération. Plus compliquée à mettre en place, cette méthode possède l'avantage de la facilité d'utilisation qui en découlera. C'est cette méthode qui a été retenue.

6.3.3.2 UTILISATION DE MÉTA-CLASSE

Une opération est décrite par son nombre de connecteurs et par les règles qui lui sont associées. Or, dans un processus, une même opération peut apparaître plusieurs fois. Il est par conséquent intéressant de pouvoir sauvegarder un modèle d'opération qui pourra être utilisé plusieurs fois. L'utilisation de méta classe est donc pertinente. L'idée est de permettre au modèle la création de classes d'opération qui pourront être déclinées en un nombre illimité d'opérations (objets du point de vue programmation). La méta-classe constitue ici un patron qui au travers des paramètres propres à la classe souhaitée, va permettre la génération des classes décrivant un type d'opération unitaire (Fig. 6.11).

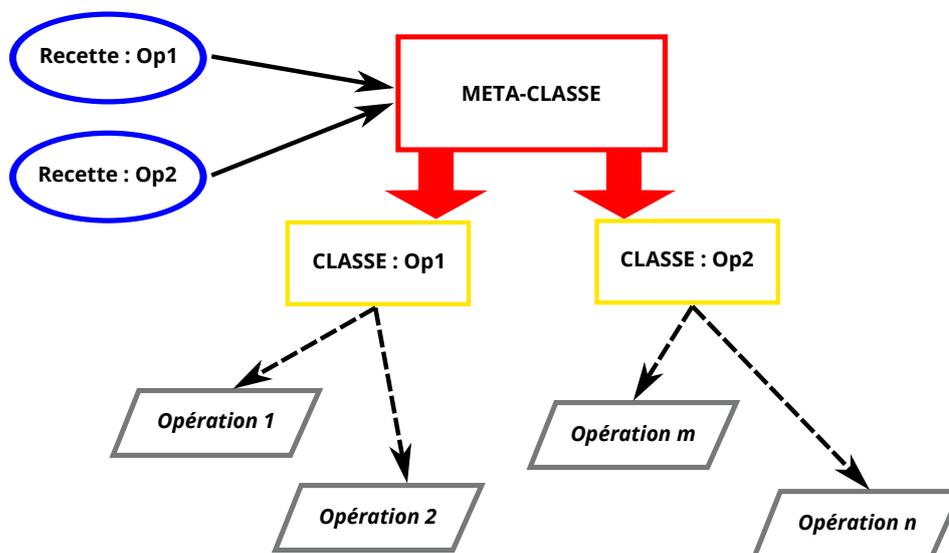


FIGURE 6.11- GÉNÉRATION DYNAMIQUE DE CLASSES OPÉRATIONS

Son utilisation contribue à avoir un système simple et léger mais permettant néanmoins la création dynamique de procédé.

6.3.4 MODÉLISATION DES CONNECTEURS

Les connecteurs sont des objets très simples puisqu'ils n'appartiennent qu'à un seul conteneur. Ils ont donc des fonctions très limitées qui permettent :

- de connecter des flux,
- de générer des contraintes lors de la résolution du système global.

6.3.5 MODÉLISATION DES FLUX

Les flux sont encore plus simples que les connecteurs car ils ne possèdent pas de fonctions spécifiques. De fait, mis à part celles utilisées pour le fonctionnement de la classe (constructeur,...), elles ne font que stocker les composants que le flux véhicule ainsi que les paramètres associés.

6.3.6 MODÉLISATION DES SYSTÈMES

Les systèmes ont deux fonctions principales. La première est de permettre de définir un ensemble d'opérations. La seconde est de définir un modèle et par conséquent, d'identifier les flux entrants et sortants de ce modèle. Ce point est important, car lors de la phase d'évaluation avec les différents modules associés, c'est la classe système qui est évaluée et non les opérations. Par conséquent, cette classe possède diverses fonctions permettant d'identifier ces flux.

6.3.7 BASE DE DONNÉES ASSOCIÉE

Afin de stocker les différents éléments générés dynamiquement par le modèle, une base de données a été créée et associée au système. Afin de faciliter son intégration et son utilisation, une solution prête à être utilisée a été choisie, Zodb. Zodb est une base de données orientée objets utilisable avec Python sous licence GNU. Sa parfaite intégration en Python permet une utilisation facile. En effet, étant orientée objet, elle est capable de conserver automatiquement les instances de classes ainsi que leurs liens, sans autre appel au système que celle de transaction. Les données sont conservées sous forme d'un dictionnaire. Cependant, l'une des conditions pour que ce système fonctionne est que l'objet soit « pickable » (ce qui est une propriété des objets dans Python). Or, les classes créées par la méta-classe ne sont pas « pickable » et ne peuvent pas être stockées et donc, il s'avère nécessaire de passer par une classe simple contenant les paramètres propres des opérations, puis, lors de chaque démarrage de l'application, ce dernier recrée les classes opératoires en fonction de leur appel (c'est-à-dire que si une opération doit être utilisée soit elle est créée comme classe, soit il n'y a eu aucun appel à cette dernière et elle doit être créée en passant par la méta-classe). Malgré cet inconvénient, une fois qu'une opération a été définie (nombre de connecteurs, règles, ...), elle est gardée en mémoire et peu être réutilisée pour n'importe quel autre projet.

6.3.8 UTILISATION DE GREFFONS

Le système développé a été conçu pour pouvoir être adaptable et améliorable afin d'assurer sa pérennité. Les parties qui peuvent le plus évoluer sont l'utilisation des solveurs et les critères d'évaluation. Ainsi, un système de greffons a été mis en place. Ce système accepte l'intégration de fichier code en Python permettant l'ajout de fonctionnalités. Au démarrage, le système détecte la présence de ces fichiers et les intègre au modèle sans intervention de l'utilisateur. Deux types de greffons ont été mis en place :

- les greffons solveurs,
- les greffons évaluations.

Chaque greffon est constitué d'un fichier code dont une partie de l'organisation est structurée de la même manière pour tous les fichiers. Cette codification permet au système sa prise en compte sans intervention. De plus, hors cette structuration obligatoire, le reste du module peut être librement implémenté et des packages peuvent lui être ajoutés lui offrant ainsi un large éventail de possibilités.

6.3.8.1 MULTI-SOLVEURS

Le modèle proposé est multi-solveurs c'est-à-dire qu'il peut être utilisé avec un grand nombre de solveurs différents, intégré à Python ou non. Techniquement, chaque solveur est implémenté dans le programme par un greffon structuré comme expliqué précédemment. Le module comporte une méthode commune à tous les solveurs qui va permettre la communication entre le programme et ce dernier. Le rôle de ce fichier est de constituer une interface. Par conséquent, il va, dans un premier temps, recevoir les données du programme, les traiter puis les retourner sous un format spécifique au reste de l'application.

On peut distinguer plusieurs étapes dans l'exécution de ce type de greffon (Fig. 6.12) :

- La réception des données : les données sont ici les contraintes que doivent respecter le modèle et qu'il va falloir résoudre pour calculer les flux circulant dans la trajectoire modélisée.
- La conversion des données : il s'agit ici de traduire les contraintes du système sous un format utilisable par le solveur. Par exemple, pour le solveur Minion, ceci sera réalisé par la création d'un fichier texte comportant les variables et les contraintes avec les mots clés propres à ce dernier.

CHAPITRE 6. CRÉATION D'UN OUTIL DE REPRÉSENTATION ET D'ÉVALUATION DE TRAJECTOIRES DE VALORISATION

- L'exécution du solveur : le greffon va ici transmettre puis lancer la résolution du problème au solveur destiné.
- Réception et structuration du résultat : le greffon solveur a la charge de récupérer la solution au problème et de la transformer dans un format spécifique pour la transmettre au reste de l'application.

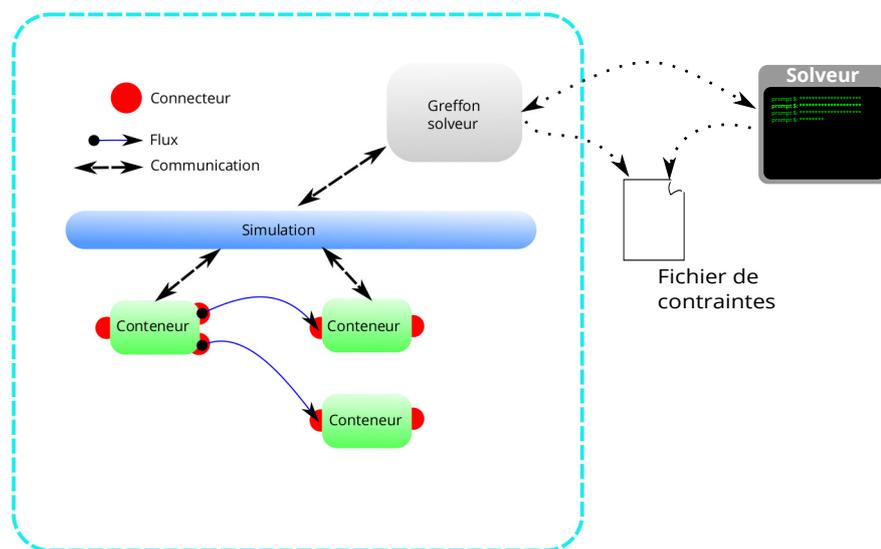


FIGURE 6.12- INTERACTIONS ENTRE LE SYSTÈME ET LE SOLVEUR POUR LA MODÉLISATION D'UN PROCESSUS

Pour la vérification du bon fonctionnement du système, plusieurs solveurs ont été mis en place : Minion, Glpk et Prolog avec la librairie « clp/bounds ». Le but étant principalement de montrer l'adaptabilité offert par l'architecture du système.

6.3.8.2 INTÉGRATION DE MODULE D'ÉVALUATION DYNAMIQUE

De la même manière que pour les greffons solveurs, des greffons d'évaluation peuvent être ajoutés. Ces greffons sont destinés à l'évaluation ou l'analyse des systèmes, et plus particulièrement des flux. Ces greffons récupèrent certaines données provenant du calcul des flux ainsi que des paramètres propres à chaque opération. Ils se distinguent néanmoins des greffons solveurs car ils peuvent rajouter des attributs ou des méthodes aux opérations. Ce mécanisme est réalisable grâce à l'utilisation de la méta-classe qui permet leurs intégrations lors de la génération de classes. Le but de ces greffons, est l'évaluation ou l'analyse. Par conséquent ils ne modifient pas la trajectoire, mais se contentent d'évaluer certains indicateurs grâce aux informations recueillies et calculées par la résolution des contraintes du système.

Nous avons ici mis en place trois types de greffons d'évaluation, conformément à l'analyse de la trajectoire que nous souhaitons faire :

- Un greffon analyse économique, dont la principale tâche est le calcul des indicateurs financiers,
- Un greffon Eco-cost, qui permet le calcul de l'indicateur Eco-cost, c'est-à-dire une mesure de l'impact environnemental,
- Un greffon analyse sociale, permettant le calcul du nombre d'emplois directs, indirects et induits.

Une des particularités de ce type de greffons est qu'il ne s'applique pas à l'ensemble de la trajectoire mais uniquement à des systèmes. Ainsi, une analyse économique peut être faite par exemple sur l'ensemble de la trajectoire, considérant ainsi que cette dernière constitue un ensemble économique unique, ou bien sur différents systèmes pouvant modéliser, par exemple, plusieurs entreprises indépendantes. Ce fonctionnement permet une analyse fine de la trajectoire offrant ainsi différents scénari quant à sa mise en place.

6.4 MÉTHODE DE CALCUL ET D'ÉVALUATION

Cette partie a pour vocation d'expliquer le mécanisme de modélisation de la trajectoire conduisant aux calculs des flux qui permettront par la suite l'alimentation des indicateurs. Ce mécanisme se base sur une description par contraintes des flux traversants chaque opération. La résolution du calcul des flux est réalisée une fois que le modèle de la trajectoire est entièrement codé sous forme de contraintes puis transmis au solveur.

6.4.1 UNE APPROCHE PAR CONTRAINTES

Afin de calculer les flux dans la trajectoire modélisée, l'approche considérée a été de définir chaque opération comme un ensemble de règles ou plus exactement de contraintes entre les différents flux la traversants. Par conséquent, la création du modèle se fait par l'ajout de blocs indépendants du reste du système. Chaque bloc contraint les valeurs des flux entrants et sortants à respecter certaines règles. Il s'ensuit que le mécanisme de résolution cherchera une solution vérifiant l'ensemble des contraintes imposées par chaque opération. Dans ce qui suit, nous présentons les différentes syntaxes que nous avons implémentées pour décrire les règles dans chaque opération.

La description dans une opération se fait en identifiant son entrée ou sa sortie par son nom, suivi du composant pris en compte (composant qui peut être un élément physique ou une information). Ainsi : $A > CO_2$ signifie que le composant CO_2 dans le connecteur A . De même, le symbole $@$ représente tous les composants présents (mais pris individuellement). Par exemple, supposons que le flux possède trois éléments $c1, c2, c3$ et que l'on souhaite dire que tous ce qui rentre dans le connecteur A doit sortir dans le connecteur B . Il est possible de formuler ces contraintes par trois règles :

1. $A > c1 = B > c1$
2. $A > c2 = B > c2$
3. $A > c3 = B > c3$

De cette façon, il est nécessaire, lors du paramétrage de l'opération, de connaître tous les composants et, pour chaque composant, définir une règle. Avec le symbole $@$, ce type de contrainte devient :

1. $A > @ = B > @$

Cependant, il est parfois utile de définir des exceptions pour certains composants. Par conséquent, il est possible, lors de la définition du conteneur, d'exclure certains composants du symbole $@$.

Les règles qui sont insérables comme contraintes sont décrites dans le tableau suivant :

Contraintes	Explications
$A > c1 + 2 * B > c2 = 3 * C > c3$	la quantité de composé $c1$ dans le conteneur A + 2*la quantité de composé $c2$ dans le conteneur B est égale a 3*la quantité de composé $c3$ dans le conteneur C
$A > c1 + 5 * B > c2 >= C > c3$	La valeur à gauche est supérieure ou égale à la valeur de droite
$A > c1 + 5 * B > c2 <= C > c3$	La valeur à gauche est inférieure ou égale à la valeur de droite
$A > c1 != B > c2 != C > c3$	Les trois valeurs sont différentes entre elles
$\min(A > c1, B > c2, C > c3, 55)$	Minimum des quatres valeurs
$\max(A > c1, B > c2, C > c3)$	Maximum des trois valeurs

6.4.2 CALCUL DES DIFFÉRENTS TYPES DE FLUX

Le but de la résolution du modèle est le calcul des différents flux. Comme expliqué précédemment, il est possible de distinguer deux types d'informations. Le premier est le flux physique, c'est-à-dire qu'un flux lie les valeurs associés à deux conteneurs. Autrement dit, il impose une contrainte sur les valeurs manipulées par les opérations unitaires. Le deuxième type d'information est le contenu de chaque flux. En effet, ces derniers peuvent contenir différentes valeurs associées à des quantités. Par exemple, il peut s'agir d'un flux matière où, dans ce cas, les valeurs seront les différents composés contenus dans ce flux ainsi que leurs débits partiels. Dans notre cas, les principales valeurs circulant dans le modèle seront les suivantes :

- Les matières : tout type de composés ou d'éléments qui seront principalement les entrants sortants des opérations ainsi que les utilités.
- Les énergies : par exemple la consommation électrique.
- Les capitaux : les flux financiers, par exemple d'une usine à l'autre ce qui pourra correspondre au chiffre d'affaires.

Chaque flux étant relié à un connecteur de sortie (provenance) et d'entrée (arrivée), il assure une contrainte entre deux connecteurs et par la même occasion entre deux opérations. En effet, la valeur du flux est égale à la valeur du connecteur de sortie, et la valeur du connecteur d'entrée est égale à la somme, par composant, des valeurs des flux connectés. Par ce mécanisme, chaque flux est relié à des contraintes issues de différents blocs formant ainsi un système de contraintes. Pour terminer le modèle, il reste encore à intégrer les contraintes entre les valeurs des connecteurs dans une même opération. Nous avons déjà vu que ces dernières étaient définies

CHAPITRE 6. CRÉATION D'UN OUTIL DE REPRÉSENTATION ET D'ÉVALUATION DE TRAJECTOIRES DE VALORISATION

par des règles implémentées lors de la construction de la classe correspondant au type d'opération souhaitée et pouvant être modifiée par la suite. Ces règles constituent de fait des contraintes entre les valeurs des connecteurs. Plusieurs remarques : il est possible d'observer que ce système, bien que simple, permet la gestion d'un nombre important de connecteurs. De plus, l'insertion des règles au niveau de la classe grâce à l'emploi de la méta-classe assure un comportement par défaut et, comme ces règles sont propres à l'objet en question et ne dépendent en rien des éléments extérieurs, assure une simplicité et une rapidité de modélisation.

6.4.3 TRANSFORMATION DES CONTRAINTES LOCALES EN UN MODÈLE UNIFIÉ

Dans la partie précédente, nous avons vu les mécanismes régissant la mise sous contraintes des différents opérations et flux. De part la programmation, ces contraintes sont encapsulées, c'est-à-dire qu'elles sont indépendantes du milieu extérieur autre que l'objet où elles se trouvent. Il est donc nécessaire de les transformer pour en faire un modèle unifié permettant sa résolution par un solveur. Le mécanisme mis en œuvre ici se résume en une conversion des contraintes par des variables uniques pour l'ensemble du système modélisé. Trois paramètres entre en jeu pour la création de ces dernières :

- Le connecteur
- Le flux
- La valeur (le composant par exemple)

Par conséquent, pour une opération, il y a autant de variables que le produit du nombre de flux connecteurs et composés circulant. L'opération consiste donc à attribuer à chaque flux et chaque connecteur un identifiant unique auquel sera ajouté le nom d'une valeur. Ce mécanisme conduit à l'obtention d'une liste de règles modélisant un système de contraintes.

6.4.4 TRANSFORMATION DES CONTRAINTES POUR FACILITER LEUR UTILISATION PAR LES MODULES DE SOLVEUR

Chaque solveur ayant sa propre syntaxe pour représenter un modèle de contrainte, il est plus facile de transformer les contraintes du langage naturel en vecteur en identifiant les variables, les réels et le symbole mathématique décrivant la contrainte. Par exemple une égalité du type :

$$- A > c1 + 2 * A > c2 + B > c1 = 7 * D > c3 + 44$$

est convertie sous la forme suivante :

$$- [A > c1, A > c2, B > c1, D > c3], [1, 2, 1, -7], 44, \text{égalité} \text{ (où chaque } A > c1, A > c2 \text{ etc sont transformées en variables globales uniques).}$$

Cette forme est plus compliquée pour l'utilisateur à écrire (moins naturelle), mais elle est plus facilement transformable selon la syntaxe du solveur.

6.4.5 INTRODUCTION DES SYSTÈMES ET ÉVALUATION DES STRUCTURES

Cette section va présenter l'utilité et le fonctionnement des systèmes. Comme expliqué précédemment, le modèle se veut pouvoir modéliser une trajectoire sous plusieurs niveaux de granularité : comme les opérations unitaires ou encore au niveau usine. Or par un souci d'efficacité et de simplicité, il a été choisi de ne représenter, au niveau calcul, que les contraintes au niveau le plus bas. Pour satisfaire cette contrainte, on introduit ici le concept de système.

On définit un système comme un regroupement d'une ou plusieurs opérations de bas niveau. Par conséquent, d'un point de vue calcul, les systèmes sont transparents, n'ayant pas d'impact sur ce dernier. Les systèmes permettent de regrouper plusieurs éléments afin de permettre une modélisation et surtout une analyse plus cohérente. En effet, l'analyse de la trajectoire par les indicateurs sélectionnés ne se fait qu'au niveau système. Par conséquent, cette idée suppose qu'un élément de niveau supérieur n'existe que comme « concept » et non pas comme réalité à proprement parlé. Par ce mécanisme, la modélisation acquiert une grande fluidité car elle permet de définir, pour une opération, plusieurs systèmes associés. Par conséquent, pour une même modélisation de trajectoire, plusieurs systèmes peuvent être représentés offrant ainsi la possibilité, par exemple, d'une étude de configuration optimale dans la répartition des opérations par centres ou lieux.

6.4.6 FONCTIONNEMENT DES MODULES D'ÉVALUATION

Les modules d'évaluations sont utilisés une fois que l'ensemble des flux sont calculés. Ces valeurs peuvent être soit des valeurs de flux, soit des valeurs propres aux opérations qui peuvent avoir été intégrées. Il n'y a donc pas, lors de la phase d'évaluation ou d'analyse, de modification de la trajectoire ou d'un de ces éléments. De plus, une des limitations des analyses, par exemple l'analyse environnementale, est qu'elles nécessitent d'être limitées

6.5. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'OUTIL DÉVELOPPÉ

dans l'espace pour être appliquées, c'est-à-dire avoir une limite d'étude bien définie. Toujours avec l'exemple de l'analyse environnementale, le système ou la limite d'étude doivent être définis. Ainsi, il existe clairement une distinction, une frontière entre le milieu étudié, par exemple une usine, et le milieu extérieur, par exemple l'environnement. Ce problème est encore plus marqué avec l'analyse économique. En effet, d'un point de vue global, l'investissement, par exemple, n'est pas la somme des investissements des opérations unitaires. Il est donc nécessaire de définir, avant toute analyse, la limite de ce système économique. Le rôle de limitation de système est attribué aux éléments systèmes du cadre de modélisation. Un système représente donc un ensemble d'opérations unitaires ou encore d'autres systèmes décrivant un niveau de représentation plus haut, auxquels pourront s'appliquer un ou plusieurs modules d'évaluation. Du point de vue du module, un système est donc un bloc de la trajectoire indivisible. Le milieu intérieur est tout ce qui se trouve à l'intérieur du système. Le milieu extérieur (autres parties de la trajectoire, environnement ...) tout ce qui ne lui appartient pas.

Les flux sont référencés selon les besoins. Ainsi, les flux entrant au système et les flux sortant sont identifiés. Puis, si besoin des valeurs propres aux opérations ou aux systèmes sont récupérés. Par la suite, le module opère ses propres calculs qui viendront alimenter les indicateurs principaux du module.

6.5 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'OUTIL DÉVELOPPÉ

6.5.1 AVANTAGES

Les avantages de cet outil sont nombreux, mais les principaux restent sa grande flexibilité et son adaptabilité. Ainsi, tout type de trajectoire peut être modélisé, à condition que l'utilisateur puisse représenter des opérations unitaires de manière simple en termes de contraintes sur les entrées sorties. De même, il ne prend que deux éléments en compte, les flux et les opérations, pour modéliser une trajectoire. Enfin, l'outil n'apporte pas de grosses contraintes sur la modélisation. Un autre avantage réside dans la modélisation des contraintes. Ces dernières n'ont pas comme but de suivre de manière rigoureuse des contraintes physique ou mécanique, mais bien de représenter, de manière simple, leurs comportements. Par conséquent, une vision boîte grise ou boîte noire de la structure peut être suffisante. Ce point est particulièrement important car il autorise la modélisation avec un minimum de données. À ceci s'ajoute le fait que les flux eux-mêmes ne sont pas, limités à un certain type, laissant ainsi la possibilité de prendre en considération n'importe quel type d'information entre les différents blocs. D'un point de vue plus abstrait, il s'agit donc d'un outil de modélisation par blocs de systèmes gérés par contraintes.

6.5.2 INCONVÉNIENTS

Parmi les inconvénients, on retrouve certains avantages. Ainsi, la grande souplesse d'utilisation peut conduire à un modèle non structuré, puisque seul l'utilisateur et en mesure d'assurer la cohérence de l'ensemble. Un autre point important est que le système ne fournit pas d'opérations unitaires de base, mais c'est à l'utilisateur de les intégrer au fur et à mesure de son utilisation. Ceci implique qu'un investissement important de la part de l'utilisateur est à faire au début de son utilisation, mais qui se verra rapidement réduit dans le temps pour disparaître pratiquement. Une partie assez bloquante est la modélisation des contraintes. Comme expliqué, le modèle a été conçu de tel sorte qu'un nombre important de solveur puisse lui être alloué, offrant ainsi la possibilité de choisir le meilleur selon le type de problème (ici trajectoire) modélisé. Or ceci a impliqué le besoin de créer un langage de modélisation de contraintes qui sera facilement transposable par les greffons solveurs dans leur langage propre. Cela a entraîné le choix de limiter certaines fonctions afin d'obtenir une certaine homogénéité entre les contraintes de tous les solveurs. Par conséquent, certaines contraintes peuvent être quelques fois bloquantes ou difficiles à modéliser.

6.5.3 CONCLUSION

Cet outil permet de faciliter la modélisation de l'ensemble des trajectoires de valorisation puis de calculer les flux. Ces derniers peuvent être en partie fixés pour modéliser une trajectoire avec une certaine capacité. Ensuite, cet outil permet une réutilisation des opérations déjà définies dans d'autres trajectoires. La modélisation des systèmes permet de définir des structures de moyen et haut niveau. Elles permettent par la suite d'être évaluées par des modules eux-mêmes pouvant être sélectionnés et ajoutés.

Afin de valider notre modèle et de montrer que notre outil permet effectivement de modéliser différentes trajectoires et de les évaluer, nous réalisons un cas d'étude dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 6. CRÉATION D'UN OUTIL DE REPRÉSENTATION ET D'ÉVALUATION DE TRAJECTOIRES DE VALORISATION

ANALYSE, ÉVALUATION ET COMMENTAIRES SUR LA RÉALISATION

Ça ne fait jamais plaisir d'apprendre que les gens qui sont
d'accord avec vous sont complètement siphonnés
LA TRILOGIE DIVINE, TOME 1 : SIVA – PHILIP K. DICK –

 L'objectif de cette partie est d'expérimenter et d'évaluer la capacité des outils et des méthodes proposés dans les parties précédentes. Dans ces parties, nous avons développé une méthodologie et un système basé sur la gestion des connaissances afin de proposer de nouvelles voies de valorisation pour les déchets. Dans un deuxième temps, nous avons décrit la conception d'un outil permettant l'évaluation rapide d'une trajectoire grâce à une estimation de ses flux puis, d'évaluer la pertinence de la trajectoire ou de sélectionner la meilleure à l'aide de trois types d'indicateurs mesurant les impacts : économiques, sociaux et environnementaux. Le but de ce chapitre est donc d'observer la pertinence de ces méthodes et outils. Plus explicitement, il s'agit de réaliser des essais réels visant à confirmer, ou infirmer nos choix et hypothèses.

7.1 ÉVALUATION DE LA MÉTHODE DE RECHERCHE DE NOUVELLES TRAJECTOIRES BASÉE SUR LA GESTION DES CONNAISSANCES

7.1.1 OBJECTIFS DE L'ANALYSE

L'outil de génération de nouvelles trajectoires s'appuie sur plusieurs étapes composant le mécanisme de raisonnement à partir de cas. Ces étapes ont été expliquées précédemment et nous les rappelons ici :

- La recherche de cas similaires,
- L'adaptation des solutions correspondantes,
- La mémorisation des cas, et plus généralement, de la connaissance.

Dans la méthodologie proposée, nous avons introduit plusieurs mécanismes permettant de réaliser ces étapes :

- Un mécanisme de stockage de l'information basé sur l'utilisation de graphe conceptuel,
- Un mécanisme de génération dynamique de cas permettant, de déduire des cas à partir de la connaissance stockée et de mécanismes d'inférences,
- Un mécanisme d'indexation qui permet à la fois de rechercher des cas similaires et de filtrer par ordre décroissant d'importance les éléments décrivant les états,
- Une méthode basée sur la récursivité décomposant les problèmes en sous-problèmes eux-mêmes pouvant être résolus par la méthode proposée,
- Un mécanisme d'adaptation s'appuyant d'une part sur la décomposition des problèmes et entraînant de par ce fait une adaptation des relations composant la trajectoire et, d'autre part, par un mécanisme, d'anticipation des résultats des transformations utilisant l'analogie,
- Un mécanisme permettant la conceptualisation et l'abstraction dans l'analyse et la comparaison des différents états.

Les mécanismes listés sont donc les composants essentiels au fonctionnement du système proposé. Par conséquent, les objectifs de cette partie seront d'évaluer ces différents mécanismes, de définir leurs efficacités ainsi que leurs limites permettant ainsi une évaluation et une analyse de la méthode et de son implémentation.

7.1.2 COMMENTAIRES SUR LES LIMITES DE L'ANALYSE

Afin de satisfaire ces objectifs, l'étude portera sur l'ensemble des points suivants avec quelques limitations :

- L'étude se basera sur le sens direct, c'est-à-dire, dans une structure de la forme suivante $\mathbf{E1} \rightarrow \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{E2}$ où $\mathbf{E1}$, $\mathbf{E2}$ sont des états et \mathbf{R} la relation et $\mathbf{E2}$ l'inconnu,
- Le principal indicateur de réussite ou d'échec du système sera les réponses données par ce dernier après interrogations, par conséquent et pour tenter d'expliquer le résultat obtenu, certaines parties de la programmation ou de la méthode pourront être détaillées ou analysées,
- L'étude est menée avec à une base de données limitée mais suffisante. Elle a pour vertu de pouvoir être rapidement analysée pour tenter de comprendre les causes conduisant aux solutions trouvées.

7.1.3 1^{RE} ÉTUDE

7.1.3.1 DESCRIPTION DES DONNÉES

Dans cette partie, nous nous proposons de décrire l'ensemble des données stockées dans la base de connaissances et qui seront utilisées par le système afin de résoudre les différents problèmes auxquels il sera soumis. De plus, nous profitons ici de la présentation des données afin d'illustrer par des exemples concrets les mécanismes expliqués dans la partie théorique (Chapitre 5). Une description détaillée et graphique des trajectoires de valorisation utilisées comme base de cas est réalisée dans l'annexe A de ce document.

Description des voies Les voies proposées se concentrent sur certains types de déchets et de leurs composants, afin d'assurer une indexation satisfaisante et par là même une recherche et une résolution de problème efficace (voir fonctionnement théorique, section 5.7). De plus, et pour les mêmes raisons qui viennent juste d'être citées, le nombre de transformations et de relations assurant les liaisons entre les différents états est lui aussi limité (nous verrons dans la seconde étude l'impact sur le système que produit une grande diversité de relations et principalement le fait qu'une relation soit utilisée de manière unique ou dans un nombre de cas très limité).

Les voies utilisées sont les suivantes :

1. Voie de valorisation du polypropylène : à partir de déchets composés de polypropylène comme les bouchons ou les pare-chocs, la matière est revalorisée pour un autre usage. La fin de la voie est une poudre de polypropylène utilisable dans l'industrie.
2. Voie de valorisation des téléviseurs cathodiques : les téléviseurs cathodiques sont démontés, les divers éléments et composants sont séparés et les matériaux sont traités pour être réutilisables.
3. Voie de valorisation des tubes néons : les tubes de néons sont détruits, les matériaux sont séparés et traités pour intégration comme matière première.
4. Voie de valorisation des bouteilles de verres : les bouteilles de verres sont traitées pour être réintégrées dans la production de verre.
5. Voie de valorisation de l'aluminium : des déchets composés d'aluminium, comme les canettes, conserves, emballages et autres sont traités pour que l'aluminium soit réintégré dans la filière de production d'aluminium.
6. Voie de valorisation des batteries : une fois traitées, les différentes parties de la batteries sont séparées puis, après traitements, les matériaux sont revalorisés.

Par conséquent, il est possible de remarquer que la principale relation de valorisation décrit dans ces voies est le recyclage matière. Nous justifions ce point par le fait que :

- Il est nécessaire d'avoir plusieurs cas par relation (voir sections 5.6.2.1 et 5.6.3)
- Le fait que ce soit du recyclage matière, fonctionnel, énergétique ou autre n'a que peu d'importance sur le mécanisme de recherche de nouvelles voies de valorisation de par le fait que, pour le système, le « mot » qui qualifie une relation n'est en soit qu'un « mot » et ne conditionne pas la relation, mais c'est l'utilisation de cette relation qui va orienter le processus de recherche.

On remarque, par la suite, que les opérations de bas niveaux décrites (les procédés) sont très semblables, mais elles possèdent des différences ce qui justifie une description spécifique pour chacune d'entre elles. De plus, les relations de plus haut niveau, décrivant un ensemble de processus sont quant à elles très limitées en termes de diversité puisqu'il n'y en a que quatre (voir Fig. B.7) :

- *valorisation(matière)* (description globale de la trajectoire)
- *prétraitement*
- *traitement*
- *op_valorisation* (qui désigne les opérations spécifiques de la valorisation)

7.1. ÉVALUATION DE LA MÉTHODE DE RECHERCHE DE NOUVELLES TRAJECTOIRES BASÉE SUR LA GESTION DES CONNAISSANCES

Le fait d'avoir deux ensembles de relations avec, à la fois un grand nombre de relations mais peu utilisées (une occurrence) et, à l'inverse, un nombre très restreint de relations (quatre relations) mais très utilisées va nous permettre d'analyser les conséquences de la description de l'ensemble des cas sur la nature des solutions trouvées.

Description des états principaux Les états, nous le rappelons, sont la description sous forme d'un graphe conceptuel d'un ensemble d'éléments au travers de leurs relations entre eux-mêmes ou avec des concepts. Nous allons décrire dans ce chapitre certains états (entrées et sorties) composant les trajectoires de valorisation utilisées pour initialiser le système. La description complète des états figure dans l'annexe B. Cette description succincte permet de donner un exemple des états utilisés pour les tests et d'indiquer le niveau de représentation utilisé. Elle permet aussi de montrer la capacité de représentation que possède le modèle proposé dans l'outil de génération de trajectoires. Pour montrer la représentation utilisée dans le système développé sous Prolog, nous insérons la description de l'état telle qu'elle est intégrée dans le système¹.

Voie 1 : valorisation de polypropylène

- **ID1 : bouchon de bouteille** : cet état décrit de manière générale un bouchon de bouteille plastique composé de polypropylène.

```
(def(compose , bouchon , _ , _ , _ , polypropylene) ,  
def(contient_trace , bouchon , _ , _ , _ , metal) ,  
def(taille , bouchon , 3 , _ , cm , _ ) ,  
def(forme , bouchon , _ , _ , _ , tube)  
) ,
```

- **ID7 : poudre de polypropylène** : poudre utilisable comme matière première, constitue le résultat de la trajectoire de valorisation de la voie 1.

```
(def(compose , poudre_polypropylene , _ , _ , _ , polypropylene) ,  
def(taille , poudre_polypropylene , 1 , 3 , mm , _ ) ,  
def(forme , poudre_polypropylene , _ , _ , _ , poudre)  
) ,
```

Voie 2 : recyclage téléviseurs cathodiques

- **ID8 : téléviseur cathodique** : cet état décrit un téléviseur cathodique, état initial de la trajectoire

```
(def(contient , tv , _ , _ , _ , tube_cathodique) ,  
def(contient , tv , _ , _ , _ , armature_tv) ,  
def(forme , armature_tv , _ , _ , _ , monobloc) ,  
def(compose , armature_tv , _ , _ , _ , plastique) ,  
def(contient , tube_cathodique , _ , _ , _ , piece_electrique) ,  
def(contient , tube_cathodique , _ , _ , _ , tube_verre) ,  
def(compose , tube_verre , _ , _ , _ , verre) ,  
def(compose , tube_verre , _ , _ , _ , verre_plomb) ,  
def(compose , piece_electrique , _ , _ , _ , metal)  
) ,
```

Voie 3 : recyclage de tube néon

- **ID20 : tube néon** : cet état décrit un tube néon composé d'un tube de verre, de matériel électrique et de poudre composée de mercure et de phosphore.

```
(def(contient , tube_neon , _ , _ , _ , tube_verre) ,  
def(compose , tube_verre , _ , _ , _ , verre) ,  
def(contient , tube_neon , _ , _ , _ , poudre_PhM) ,  
def(compose , poudre_PhM , _ , _ , _ , phosphore) ,  
def(compose , poudre_PhM , _ , _ , _ , mercure) ,  
def(contient , tube_neon , _ , _ , _ , piece_metal) ,  
def(compose , piece_metal , _ , _ , _ , metal) ,  
def(forme , tube_verre , _ , _ , _ , tube)  
) ,
```

1. pour plus de détails, se référer au chapitre 5 et plus particulièrement la section 5.5. Ces éléments sont intéressants pour comprendre les tests et leurs résultats

Voie 4 : recyclage bouteille de verre Cette voie de recyclage est extrêmement simple puisqu'elle n'est composée que d'une seule « ligne » dans la trajectoire. Néanmoins, elle reste intéressante car elle montre l'interrelation entre les trajectoires générant de ce fait un enrichissement de la base de données. En effet, son état final est l'état défini comme **ID16** qui, bien que final pour la trajectoire, n'est qu'une étape intermédiaire d'une des branches de la **voie 2**, conduisant elle-même à une solution finale. Ceci montre, que dans la description des trajectoires, il est possible de réutiliser certaines voies déjà existantes dans le système.

— **ID16 : verre broyé sale** : description du verre broyé, intermédiaire dans la trajectoire de valorisation 2.

```
( def ( compose , verre_broye_sale , _ , _ , _ , verre ) ,
  def ( forme , verre_broye_sale , _ , _ , _ , broyat ) ,
  def ( contient_trace , verre_broye_sale , _ , _ , _ , salete )
) ,
ajouter_etat ( Liste16 , ID16 ) ,
ajouter_type ( verre_broye_sale , objet )
```

Voie 5 : valorisation de l'aluminium Cette voie est particulièrement intéressante car elle permet d'illustrer le besoin d'abstraction et de conceptualisation que ce type de problème à besoin. En effet, nous pouvons remarquer que bien que la description des états soit différente entre une canette, une boîte de conserve, un emballage et une pièce quelconque en aluminium, l'information principale, à savoir la composition en aluminium (élément qui les associe dans la trajectoire), ne constitue qu'une fraction de la description possible de chacun d'eux. D'où l'importance des mécanismes de *fluidité conceptuelle* que nous avons expliqués dans la partie théorique.

— **ID31 : canette** : canette en aluminium.

```
( def ( compose , canette , _ , _ , _ , aluminium ) ,
  def ( forme , canette , _ , _ , _ , tube )
) ,
```

— **ID32 : conserve** : conserve en aluminium.

```
( def ( compose , conserve , _ , _ , _ , aluminium ) ,
  def ( forme , conserve , _ , _ , _ , boite )
) ,
```

— **ID33 : emballage** : emballage en aluminium.

```
def ( compose , emballage_alu , _ , _ , _ , aluminium ) ,
def ( forme , emballage_alu , _ , _ , _ , emballage )
) ,
```

— **ID34 : pièce** : pièce en aluminium.

```
def ( compose , piece_alu , _ , _ , _ , aluminium ) ,
def ( forme , piece_alu , _ , _ , _ , piece )
) ,
```

Voie 6 : recyclage de batterie

— **ID38 : batterie** : batterie composée de plomb, d'acide et de polypropylène

```
(
  def ( contient , batterie , _ , _ , _ , carcasse_batterie ) ,
  def ( contient , batterie , _ , _ , _ , partie_plomb ) ,
  def ( contient , batterie , _ , _ , _ , partie_oxyde_plomb ) ,
  def ( contient , batterie , _ , _ , _ , liquide_acide ) ,
  def ( compose , carcasse_batterie , _ , _ , _ , polypropylene ) ,
  def ( compose , partie_plomb , _ , _ , _ , plomb ) ,
  def ( compose , partie_oxyde_plomb , _ , _ , _ , oxyde_plomb ) ,
  def ( compose , liquide_acide , _ , _ , _ , acide ) ,
  def ( forme , carcasse_batterie , _ , _ , _ , monobloc ) ,
  def ( forme , partie_plomb , _ , _ , _ , element ) ,
  def ( forme , partie_oxyde_plomb , _ , _ , _ , element ) ,
  def ( forme , liquide_acide , _ , _ , _ , liquide )
) ,
```

7.1. ÉVALUATION DE LA MÉTHODE DE RECHERCHE DE NOUVELLES TRAJECTOIRES BASÉE SUR LA GESTION DES CONNAISSANCES

Description des taxonomies utilisées Comme expliqué dans la partie théorique (Section 5.8.2), le mécanisme s'appuie sur l'utilisation de taxonomies. Ces taxonomies fournissent une hiérarchisation des concepts utilisés dans le système sous la forme de *Concept_1 est un Concept_2* signifiant que si une chose est définie par le *Concept_1* alors elle peut l'être par le *Concept_2*. À l'inverse, une chose définie par le *Concept_2*, n'est pas obligatoirement définissable par le *Concept_1*. Dans notre modèle, ces relations rendent possible la réalisation d'une partie des mécanismes de fluidité lors de la comparaison de deux états ainsi que la génération de définition plus conceptuelle lors de la création des *définitions communes*. De plus, elles hiérarchisent les relations et ainsi la décomposition de cette dernière lors du processus de résolution de problèmes. Dans ce qui suit, nous allons présenter les taxonomies issues des données du système.

Taxonomie sur les concepts La taxonomie des concepts est un élément important des mécanismes de fluidité. De manière générale, elle permet de relier et de décrire les uns par rapport aux autres l'ensemble des concepts créant ainsi une structure. Pour l'ensemble des états décrits dans le système, deux taxonomies ont été intégrées en fonction des définitions réalisées. En effet, nous le rappelons ici, une partie du modèle proposé fonctionne par le fait qu'un concept n'a aucune valeur en tant que mot, mais que c'est ses relations qui le définissent. Les deux taxonomies sont :

- Les constituants
- La géométrie

Les constituants regroupent les concepts de constituants des états définis par les relations telles que *compose*. Ces concepts sont donc des composés chimiques, comme l'aluminium, ou encore des matériaux comme le *verre*. Ainsi, tous les constituants des états définis sont intégrés dans cette taxonomie. Cependant, il est possible de remarquer que si une taxonomie est réalisée en seulement deux niveaux, à savoir, un nœud racine et l'ensemble des constituants, cette dernière n'a que peu d'utilité. En effet, si par exemple on associe les nœuds **acide** et **aluminium** au nœud racine **Constituant**, la fluidité ne fonctionnerait pas, car elle assurerait une égalité entre ces deux concepts et ne permettrait pas de les distinguer. Il est donc important d'intégrer des éléments dans cette taxonomie distinguant certaines catégories. Ainsi, dans nos données d'exemple, nous avons inséré les concepts tel que *métal, verre divers, plastique ...* (voir Fig. B.8, de l'annexe B).

La seconde taxonomie est la *géométrie*. De même que pour les constituants, cette dernière regroupe les éléments décrivant la forme de l'objet, et plus généralement, la description physique d'un élément. Comme pour la première taxonomie, des concepts intermédiaires définissant des sous-catégories ont été intégrés afin de donner du sens au mécanisme de conceptualisation.

Une description détaillée de ces deux taxonomies se trouvent en Annexe B.

Taxonomie sur les relations De même que pour la taxonomie sur les concepts, une taxonomie sur les relations a été réalisée. Elle fournit une arborescence des relations permettant une décomposition lors de la résolution de problème. En effet, un des mécanismes du système transforme un problème, c'est-à-dire une structure de la forme $E1 \rightarrow R \rightarrow E2$ en un ensemble de sous-problèmes, par exemple, $E1 \rightarrow R1 \rightarrow Ea \rightarrow R2 \rightarrow Eb \rightarrow R3 \rightarrow E2$. Pour pouvoir réaliser ceci, le système a besoin de deux données :

- Des relations reliant l'état initial à l'état final
- La connaissance que ces relations sont la décomposition d'une relation de plus haut niveau

La première donnée nous assure qu'il est possible de relier deux états par des relations (de transformations) mais ne permet pas de dire si elles sont au même niveau de décomposition, ni quel est ce niveau. Ainsi, lors de la décomposition d'un problème en sous-problèmes, le système ne peut pas choisir quelle relation sélectionner. On pourrait s'interroger sur le fait que si on a :

- $E1 \rightarrow R \rightarrow E2$

Et qu'il existe un chemin tel que :

- $E1 \rightarrow R1 \rightarrow Ea \rightarrow R2 \rightarrow Eb \rightarrow R3 \rightarrow E2$

Alors ce second chemin est une décomposition du premier. Ici encore, le raisonnement est incertain puisque rien ne nous dit qu'il n'y a pas un autre chemin de niveau intermédiaire. De plus, et pour mieux comprendre, un autre exemple directement inspiré de la base implémentée pour les tests, supposons que l'on ait les relations suivantes :

- $E1 \rightarrow \text{valorisation(matière)} \rightarrow E2$
- $E1 \rightarrow \text{traitement} \rightarrow E2$

Dans ce cas, il est clairement impossible de choisir la trajectoire de plus haut niveau (on ne sait pas si **traitement** est décomposition de **valorisation(matière)** ou l'inverse).

La seconde donnée, c'est-à-dire l'intégration d'une taxonomie des relations permet de définir les niveaux. Ainsi,

CHAPITRE 7. ANALYSE, ÉVALUATION ET COMMENTAIRES SUR LA RÉALISATION

en suivant l'exemple décrit plus haut, la taxonomie affirme que **traitement** est sous opération de **valorisation(matière)**. De ce fait, le niveau est bien défini et le système est par conséquent capable de décomposer une relation en ses sous relations directes. Cependant, il est possible de remarquer que la taxonomie, à elle seule, est incapable de fournir assez d'éléments pour la décomposition d'une trajectoire, car aucune information n'est donnée concernant l'ordre des relations ni les liens avec les états. Ce commentaire sur le rôle de la taxonomie de relations met en avant le fait que c'est un élément clé du mécanisme de résolution. Par la suite, nous verrons l'impact de ces données sur l'ensemble du système.

La taxonomie fournie pour ce premier jeu de données est constituée de trois niveaux. Le nœud racine est *valorisation(matière)* puisque nos six voies principales sont définies comme des trajectoires de valorisation matière. Le niveau inférieur est constitué uniquement de trois relations qui forment ainsi trois classes de relations de bas niveau ou, plus exactement, de transformations. Ces trois relations sont les suivantes :

- prétraitement
- traitement
- op_valorisation

Enfin, le dernier niveau est constitué des opérations de transformations. Une description complète de cette taxonomie se trouve en Annexe B (Fig. B.7).

Évaluation du nombre de cas possibles dans le sens direct Dans ce paragraphe, nous cherchons à démontrer l'utilité des inférences pour la génération de cas. L'étude étant limitée au sens direct de recherche, c'est-à-dire l'utilisateur décrit un état, une relation désirée et le système doit trouver comment réaliser cette relation et, si c'est possible, déterminer l'état final, un lecteur non avisé pourrait penser qu'il y a le même nombre de cas que de nombre d'états. Cependant, le système proposant la génération de cas dynamique par interprétation des informations contenues dans la base de données, ce nombre est plus important.

Nombre d'états Le nombre d'états décrit est l'une des composantes du nombre total de cas réellement disponibles dans le système. En effet, lors de la recherche de cas similaires, le système, ce dernier va rechercher les états correspondants. Ainsi, dans ce jeu de données il y a 45 états décrits. Cependant, pour notre modèle, un cas est une *association* entre deux états et une relation. De ce fait, il est nécessaire d'estimer le nombre de relations possibles contenues.

Nombre de liens bruts On entend par là insérées manuellement par l'utilisateur, on dénombre 95 relations (Tab. 7.1, tableau qui a été rempli en comptant les relations entre les états (voir Annexe A))

Niveau/Voie	1	2	3	4	5	6	total
2	7	15	11	3	7	10	53
1	3	6	5	1	6	6	27
0	1	4	4	1	4	1	15
total	11	25	20	5	17	17	95

TABLEAU 7.1- NOMBRE DE RELATIONS PAR VOIE ET PAR NIVEAU

Par conséquent, le nombre de cas possibles uniquement avec les relations brutes et, dans le sens de solution défini, serait de 95 cas possibles pour l'ensemble des 6 voies de valorisation. Cependant, les mécanismes d'inférences mis en places pour la génération de cas permettent de faire apparaître certaines relations induites, c'est-à-dire des relations qui ne sont pas explicitement introduites dans le système mais qui existent par logique. Pour illustrer, supposons qu'un chemin permette de passer de $E1$ à $E2$ par les transformations $R1$, $R2$, $R3$ de telle sorte que l'on ait :

$$\text{— } \mathbf{E1} \rightarrow \mathbf{R1} \rightarrow \mathbf{Ea} \rightarrow \mathbf{R2} \rightarrow \mathbf{Eb} \rightarrow \mathbf{R3} \rightarrow \mathbf{E2}$$

Puis, que l'on ait une relation supplémentaire, Rx , reliant $\mathbf{E1}$ à $\mathbf{E2}$. Bien que \mathbf{Ea} et \mathbf{Eb} ne possèdent pas la relation Rx , le fait de dire que \mathbf{Ea} est relié à $\mathbf{E2}$ par Rx est correcte puisque c'est l'ensemble du chemin allant de $E1$ à $E2$ qui est défini par la relation Rx . Par conséquent, le système d'inférence doit prendre en compte ces relations.

Nombre de liens inférés Pour calculer le nombre de relations total et par conséquent le nombre de cas, il est nécessaire de calculer le nombre de relations brutes et induites. Dans notre base (voir Annexe A), si on prend les relations de plus bas niveau (niveau 2), c'est-à-dire 53 d'après Tab. 7.1, il y a 11 relations d'usage qui

7.1. ÉVALUATION DE LA MÉTHODE DE RECHERCHE DE NOUVELLES TRAJECTOIRES BASÉE SUR LA GESTION DES CONNAISSANCES

n'ont pas de relation induite. Cependant, les autres relations sont systématiquement décrites sous trois niveaux (que l'on peut constater par la taxonomie sur les relations). Par conséquent, le nombre de relations total est :

$$(53 - 11) * 3 + 11 = 137$$

Nombre de cas possibles Par conséquent la base de données fournie pour les tests offre 137 cas dans le sens direct de résolution.

7.1.3.2 PHASE DE TESTS ET COMMENTAIRES AVEC LES DONNÉES 1

Dans cette partie, nous présentons les différents tests que nous avons réalisés sur le modèle développé. Dans un premier temps, l'analyse portera sur les résultats fournis par l'outil puis, dans un second temps, ces derniers seront commentés et expliqués afin d'approfondir le fonctionnement du système et ainsi d'en connaître les limites. Chaque phase de tests se décompose en trois parties. La première consiste à décrire le comportement, c'est-à-dire le mécanisme testé (section 7.1.1). Ensuite, il s'agit de décrire le problème posé faisant appel à ce mécanisme. En troisième partie, la réponse brute du système sera exposée suite à quoi l'analyse des résultats et ses commentaires clôtureront le test.

Test 1 : test état initial \Rightarrow Mémorisation de cas simple

Mécanisme évalué Dans ce test, nous cherchons à vérifier la capacité de mémorisation et de restitution de l'information contenue par le système de gestion des connaissances. Durant cette étape, il s'agit plus de tester des fonctions simples d'une base de données que d'un raisonnement à partir de cas. Toutefois, cette fonctionnalité est préliminaire au bon fonctionnement de l'ensemble du système.

Problème posé Les deux problèmes posés visent à vérifier la capacité de remémoration du système. Par conséquent, nous avons choisi comme test la soumission de deux cas initiaux entrés comme données, à savoir :

- Insertion du cas *id1*, avec la relation *valorisation(matière)*, c'est-à-dire **id1** \rightarrow **valorisation(matière)** \rightarrow **E**, où **E** est l'inconnu
- Insertion du cas *id8*, avec la relation *valorisation(matière)*, c'est-à-dire **id8** \rightarrow **valorisation(matière)** \rightarrow **E**, où **E** est l'inconnu

Les réponses attendues sont donc, pour le premier problème la branche décrite en Annexe comme la voie 1 allant de *id1* à *id7*, et pour le deuxième problème la branche allant de *id8* à une des solutions proposées par la voie 2 soit : *id12*, *id13*, *id17*, *id19*

Réponse du système et analyse La réponse du système lorsqu'on lui soumet un cas identique au cas *id1* (ici, le cas identifié comme *515*) est la suivante.

Remarque 1 (*Lecture des résultats obtenus*) Dans ce qui suit, nous donnons différents processus générés par le système. Nous expliquons ici comment interpréter ces derniers :

- Les nombres correspondent à des identifiants d'état. Ce nombre est généré par l'application et de ce fait ne correspond pas à l'identifiant (*id1*).
- Une étape est décrite de la forme 1,étape,2 où 1 correspond à l'identifiant (*machine*) de l'état initial, étape le nom de l'étape, 2 l'identifiant *machine* de l'état final
- Les trajectoires obtenues sont représentées sous différents niveaux. Chaque niveau correspond à une indentation (—).

Pour un exemple expliqué, voir Tableau 7.2.

CHAPITRE 7. ANALYSE, ÉVALUATION ET COMMENTAIRES SUR LA RÉALISATION

Resolution -->2	Signifie la résolution avec l'état (machine) 2, dans nos études, on recherche une trajectoire de valorisation matière pour cet état
2,valorisation(matiere),3	Trajectoire décrit au niveau le plus haut, ici, la valorisation(matiere) de l'état 2 en l'état 3
--2,sous-etape1,4	Décomposition de l'étape valorisation(matiere) par la sous-étape 1 conduisant à l'état intermédiaire 4
--4,sous-etape2,3	Sous étape2 de l'étape valorisation(matiere) allant de l'état intermédiaire 4 à l'état 3
true.	true => succès de la résolution

TABLEAU 7.2- EXPLICATION DE LA SORTIE OBTENUE PAR LE PROTOTYPE

Procédé initial remémoré par le système à partir du cas source (2) :

```
Resolution -->2
2,valorisation(matiere),8
---2,traitement,6
-----2,transformation(broyage_bouchon),4
-----4,transformation(flotation),5
-----5,transformation(broyage_fin),6
---6,pretraitement,8
-----6,transformation(lavage_1),7
-----7,transformation(sechage),8
true.
```

Procédés trouvés par le système lors de la soumission du nouveau problème (515) :

```
Resolution -->515
515,valorisation(matiere),520
---515,traitement,518
-----515,transformation(broyage_bouchon),516
-----516,transformation(flotation),517
-----517,transformation(broyage_fin),518
---518,pretraitement,520
-----518,transformation(lavage_1),519
-----519,transformation(sechage),520
true.
```

On remarque que le procédé se décompose de la même manière que la voie 1. De plus, ce dernier a bien créé un état pour chaque transformation. Ce qui indique que le système a répondu correctement à la sollicitation. Les différents cas sources ont bien été remémorés et l'ensemble des problèmes (ici, les relations entre les états) ont bien été décomposés permettant ainsi de trouver une réponse. Il reste néanmoins à comparer le résultat trouvé, c'est-à-dire l'état final du processus. On compare donc l'état final de la voie 1 (*id7*, ici 8) avec l'état final de la nouvelle voie générée (ici 520).

État final de la trajectoire du cas source (ici état 8) :

```
affichage_etat(8).
poudrette_polypropylene compose polypropylene
poudrette_polypropylene taille 1 a 3 mm
poudrette_polypropylene forme poudrette
true.
```

État final de la trajectoire proposé par le système (ici état 520) :

```
?- affichage_etat(520).
poudrette_polypropylene compose polypropylene
poudrette_polypropylene taille 1 a 3 mm
poudrette_polypropylene forme poudrette
true.
```

7.1. ÉVALUATION DE LA MÉTHODE DE RECHERCHE DE NOUVELLES TRAJECTOIRES BASÉE SUR LA GESTION DES CONNAISSANCES

L'état final trouvé est bel et bien le même que celui du cas source. Comme dans notre cas un autre état a été élaboré (le cas 515), on peut donc conclure que pour ce test ² :

- Le processus de remémoration a bien fonctionné, puisque lorsque que l'on soumet au système la *Resolution* ->2 celui ci retourne la trajectoire et les différents états corrects
- Le mécanisme d'indexation a permis de trouver le cas source correspondant (cas 2 et suivants) à partir des données du cas cible(515). Donc pour des cas identiques, ce mécanisme semble fonctionner
- Le procédé de décomposition des problèmes (ici des trajectoires) se déroule convenablement et permet d'obtenir une solution adéquate
- Le système permettant d'estimer les états suites aux transformations (cf. section 5.7.4) fonctionne car la description de l'état 520 correspond bien à celui de l'état 8.

On se propose par la suite de tester un autre exemple, la voie de valorisation 6, qui a la particularité de décrire une trajectoire comportant une division en *id40* pour rejoindre l'état solution *id 45*. Cette trajectoire a la particularité de posséder une trajectoire allant de *id38* à *id4* qui rejoint la voie de valorisation 1. De plus, dans ce jeu de données, cette voie n'a pas été définie comme une voie de valorisation matière. On se propose ainsi de voir le comportement du système.

Le programme génère la réponse suivante à la sollicitation faite avec l'*id38* à la question *valorisation(matiere)* :

```
Resolution -->39
39, valorisation (matiere),46
---39,pretraitement ,40
-----39,transformation (neutralisation_acide),40
---40,traitement ,42
-----40,transformation (broyage_batterie),41
-----41,transformation (separation_plomb),42
---42,op_valorisation ,46
-----42,transformation (coulee_plomb),46
39, valorisation (matiere),46
---39,pretraitement ,40
-----39,transformation (neutralisation_acide),40
---40,traitement ,43
-----40,transformation (broyage_batterie),41
-----41,transformation (separation_oxyde_plomb),43
---43,op_valorisation ,46
-----43,transformation (cuisson_oxyde_plomb),44
-----44,transformation (affinage_plomb),45
-----45,transformation (coulee_plomb),46
true.
```

Lors de la même demande avec cette fois ci le cas 505 qui est copie (comme description) de l'état 39, la réponse obtenue est la suivante ...

```
Resolution -->505
505, valorisation (matiere),510
---505,pretraitement ,506
-----505,transformation (neutralisation_acide),506
---506,traitement ,509
-----506,transformation (broyage_batterie),507
-----507,transformation (separation_plomb),509
---509,op_valorisation ,510
-----509,transformation (coulee_plomb),510
505, valorisation (matiere),514
---505,pretraitement ,506
-----505,transformation (neutralisation_acide),506
---506,traitement ,511
-----506,transformation (broyage_batterie),507
-----507,transformation (separation_oxyde_plomb),511
---511,op_valorisation ,514
```

2. La portée de cette conclusion se limite aux problèmes soumis. Néanmoins, comme dans le système les « mots » n'ont pas d'importance (c'est les relations entre les concepts qui définissent la valeur de ce dernier), cette portée peut être étendue à tous problèmes ayant cette structure d'informations

CHAPITRE 7. ANALYSE, ÉVALUATION ET COMMENTAIRES SUR LA RÉALISATION

```
-----511,transformation(cuisson_oxyde_plomb),512
-----512,transformation(affinage_plomb),513
-----513,transformation(coulee_plomb),514
true.
```

...qui correspond donc à la même chose (même processus). L'étude des états obtenus par le cas cible et le cas source donne des descriptions identiques :

```
?- affichage_etat(46).
lingot_plomb compose plomb
bloc_plomb forme lingot
true.
```

```
?- affichage_etat(510).                ?- affichage_etat(514).
lingot_plomb compose plomb            lingot_plomb compose plomb
bloc_plomb forme lingot                bloc_plomb forme lingot
true.                                    true.
```

Par conséquent, il est possible de tirer les mêmes conclusions que lors du premier test avec la voie 1. Les principaux mécanismes proposés pour la résolution de problèmes fonctionnent pour des cas identiques. On remarque cependant que lors du test de la voie 6 la branche conduisant à l'*id4* n'a pas été proposée par le système. Ceci s'explique par le fait que l'*id38* n'est pas relié à l'état final de la voie 1, soit l'*id7* par la relation *valorisation(matiere)*, et que par conséquent le système ne l'a pas traité.

Test 2 : test état intermédiaire ⇒ Mémorisation de cas avec inférences

Mécanisme évalué Dans ce test, on cherche à établir que le mécanisme d'inférences est correctement appliqué pour les trajectoires. Plus précisément, on cherche à déterminer si un état se trouvant dans une trajectoire de valorisation mais qui n'est pas initialement relié, lors de sa définition et sa mise en mémoire, à un autre état peut quand même être considéré comme relié grâce aux inférences. L'enjeu est important car il permet, au système, d'inférer un nombre important de relations qui pourront produire le même nombre de cas lors de la phase de remémoration (et de ce fait, leurs prises en compte lors de la phase d'indexation).

Problème posé Les problèmes posés correspondent au même type que ceux du **Test 1** à la différence que ce sont des états intermédiaires qui sont utilisés. Ainsi, nous avons proposé de tester les requêtes suivantes :

- Insertion du cas *id4*, avec la relation *valorisation(matiere)*, c'est-à-dire **id4** → **valorisation(matiere)** → **E**, où **E** est l'inconnu
- Insertion du cas *id39*, avec la relation *valorisation(matiere)*, c'est-à-dire **id39** → **valorisation(matiere)** → **E**, où **E** est l'inconnu

On peut constater que les états choisis sont proches du **Test 1** permettant ainsi de vérifier que les différentes branches de chaque trajectoire sont bien explorées.

Réponse du système et analyse Pour réaliser le test, on a effectué la remémoration de **id4** (ici 5) ...

```
Resolution -->5
5,valorisation(matiere),8
---5,traitement,6
-----5,transformation(broyage_fin),6
---6,pretraitement,8
-----6,transformation(lavage_1),7
-----7,transformation(sechage),8
true.
```

... puis nous avons soumis au système un problème similaire avec un état qui est une copie de l'état **id4** (ici, c'est l'état 726).

```
Resolution -->726
726,valorisation(matiere),729
---726,traitement,727
-----726,transformation(broyage_fin),727
```

7.1. ÉVALUATION DE LA MÉTHODE DE RECHERCHE DE NOUVELLES TRAJECTOIRES BASÉE SUR LA GESTION DES CONNAISSANCES

```
---727,pretraitement ,729
-----727,transformation (lavage_1) ,728
-----728,transformation (sechage) ,729
true .
```

Par conséquent, le procédé renvoyé est bien, dans le cas de la remémoration, celui qui a été introduit (résolution 726) et, la solution a bien été construite. On affiche ensuite la description de chaque état final pour voir s'ils correspondent et si les mécanismes de prévisions des états ont bien fonctionné, comme lors du test 1. L'affichage de l'état **id7** (ici 8) a donné :

```
?- affichage_etat(8).
poudrette_polypropylene compose polypropylene
poudrette_polypropylene taille 1 a 3 mm
poudrette_polypropylene forme poudrette
true .
```

De même, on affiche la sortie du procédé trouvé qui correspond ici à l'état 729 :

```
?- affichage_etat(729).
poudrette_polypropylene compose polypropylene
poudrette_polypropylene taille 1 a 3 mm
poudrette_polypropylene forme poudrette
true .
```

Ces états sont donc identiques confirmant ainsi que, pour ce test du moins, les procédés d'estimation (cf. transformations, section 5.7.4) ont bien fonctionné. Par conséquent, et toujours en vue d'analyser et de valider l'ensemble des mécanismes proposés, nous réalisons ici un bilan de ceux qui semblent être validés par le test :

- Les processus qui fonctionnaient lors du test 1 fonctionnent toujours pour le test 2
- Les mécanismes d'inférences fonctionnent sur plusieurs niveaux :
 - Un état qui se trouve dans une trajectoire de valorisation mais qui n'est pas directement relié par une relation de valorisation est quand même considéré comme si il est relié par le système
 - Lors de la décomposition des trajectoires, ce processus est lui aussi efficace puisqu'il intègre les relations intermédiaires. Par exemple, dans notre test, **id4** n'est pas relié à la relation traitement allant de **id1** à **id5**. Cependant, lors de la décomposition, le système a bien décomposé la relation *valorisation(matière)* sur le cas **id4** (qui est l'état le plus similaire à l'état posé, ici 726) par les relations *traitement* et *pretraitement* (condition nécessaire à la réussite du test).
 - Lors de la recherche du cas source correspondant à la relation *traitement*, l'état **id4** a bien été sélectionné car la sous opération associée est bien **broyage_fin** et non pas **broyage_bouchon**, **flotation**, **broyage_fin**. Par conséquent, l'inférence a été prise en compte lors de l'indexation des cas. Ce dernier point affirme donc le fait que l'inférence permet d'augmenter le nombre de cas possibles.

On a réalisé par la suite le même test avec une trajectoire plus complexe, la trajectoire 6 pour vérifier que l'ensemble des trajectoires a bien été pris en compte. On a réalisé le test avec l'**id39** (ici 40), nous donnant le procédé remémoré suivant :

```
Resolution -->40
40,valorisation(matiere),46
---40,traitement ,42
-----40,transformation (broyage_batterie) ,41
-----41,transformation (separation_plomb) ,42
---42,op_valorisation ,46
-----42,transformation (coulee_plomb) ,46
40,valorisation(matiere),46
---40,traitement ,43
-----40,transformation (broyage_batterie) ,41
-----41,transformation (separation_oxyde_plomb) ,43
---43,op_valorisation ,46
-----43,transformation (cuisson_oxyde_plomb) ,44
-----44,transformation (affinage_plomb) ,45
-----45,transformation (coulee_plomb) ,46
true .
```

et avec un état qui est une copie de l'état **id39** (ici 730) ...

```

Resolution -->730
730, valorisation (matiere), 734
---730, traitement, 733
-----730, transformation (broyage_batterie), 731
-----731, transformation (separation_plomb), 733
---733, op_valorisation, 734
-----733, transformation (coulee_plomb), 734
730, valorisation (matiere), 738
---730, traitement, 735
-----730, transformation (broyage_batterie), 731
-----731, transformation (separation_oxyde_plomb), 735
---735, op_valorisation, 738
-----735, transformation (cuisson_oxyde_plomb), 736
-----736, transformation (affinage_plomb), 737
-----737, transformation (coulee_plomb), 738
true.

```

... ce qui est le même procédé. On vérifie par la suite les états finaux correspondants :

```

?- affichage_etat (46).
lingot_plomb compose plomb
bloc_plomb forme lingot
true.

```

et

```

?- affichage_etat (734).
lingot_plomb compose plomb
bloc_plomb forme lingot
true.

```

```

?- affichage_etat (738).
lingot_plomb compose plomb
bloc_plomb forme lingot
true.

```

Encore une fois les états sont identiques, confirmant donc les résultats de ce test.

Test 3 : test état comportant plus d'éléments qu'un état dans la base de cas \Rightarrow Capacité d'abstraction

Mécanisme évalué Ce test vise à mettre en avant la capacité d'abstraction du système. On cherche à établir que lors de la comparaison de deux états, si certains éléments ne sont pas décrits dans les deux c'est-à-dire que si un état possède des définitions que le second état ne possède pas, ces dernières peuvent être ignorées et seules celles qui sont communes sont abstraites et comparées. Ce mécanisme est important à cause de l'absence de formalisme dans la description des états. Or, comme une description d'un même état peut être vue de plusieurs façons, avec plus ou moins de détails, sans ce mécanisme, leur mises en relation peut être difficile ou même impossible lors de la recherche de cas par exemple.

Problème posé Pour ce test, nous nous proposons de solliciter le système avec deux états qui, cette fois ci, ne sont pas des états déjà présents dans la base de cas. Comme nous souhaitons évaluer le mécanisme d'abstraction, nous avons pris deux états, 4 et 39, auxquels nous avons ajouté certains éléments de description. Cependant, il a fallu vérifier à ne pas transformer ces nouveaux états en d'autres états déjà existants, ce qui nous aurait conduit à refaire le test 2. Les descriptions de ces deux états fictifs, que nous nommeront *id4b* et *id39b* sont les suivantes :

— **ID4b** : id 4 modifié.

```

( def (compose ,bp ,_ ,_ ,_ , polypropylene) ,
  def (taille ,bp ,1 ,3 ,cm ,_ ) ,
  def (forme ,bp ,_ ,_ ,_ , broyat) ,
  def (couleur ,bp ,_ ,_ ,_ , noire)
) ,

```

7.1. ÉVALUATION DE LA MÉTHODE DE RECHERCHE DE NOUVELLES TRAJECTOIRES BASÉE SUR LA GESTION DES CONNAISSANCES

(Le nom a été délibérément modifié en *bp* à la place de *broyat_polypropylene* pour illustrer un des mécanismes proposés)

— **ID39b** : id 39 modifié.

```
(def(contient , batterie ,_,_,_, carcasse_batterie) ,
def(contient , batterie ,_,_,_, partie_plomb) ,
def(contient , batterie ,_,_,_, partie_oxyde_plomb) ,
def(compose , carcasse_batterie ,_,_,_, polypropylene) ,
def(compose , partie_plomb ,_,_,_, plomb) ,
def(compose , partie_oxyde_plomb ,_,_,_, oxyde_plomb) ,
def(forme , carcasse_batterie ,_,_,_, monobloc) ,
def(forme , partie_plomb ,_,_,_, element) ,
def(forme , partie_oxyde_plomb ,_,_,_, element) ,
def(couleur , partie_oxyde_plomb ,_,_,_, noire)
) ,
```

Réponse du système et analyse Une fois les différents cas soumis, on a comparé avec les résultats obtenus avec les cas *id4* et *id39* (procédés et états finaux résultants décrits dans le test 2 (partie 7.1.3.2). Concernant les procédés, nous avons obtenu les réponses suivantes :

Pour le cas **ID4b** ici(726) ...

```
Resolution -->726
726, valorisation (matiere) ,739
---726,traitement ,737
-----726,transformation (broyage_fin) ,737
---737,pretraitement ,739
-----737,transformation (lavage_1) ,738
-----738,transformation (sechage) ,739
```

...et pour le cas **ID39b** ici 725 ...

```
Resolution -->725
725, valorisation (matiere) ,731
---725,traitement ,730
-----725,transformation (broyage_batterie) ,729
-----729,transformation (separation_plomb) ,730
---730,op_valorisation ,731
-----730,transformation (coulee_plomb) ,731
725, valorisation (matiere) ,736
---725,traitement ,733
-----725,transformation (broyage_batterie) ,732
-----732,transformation (separation_oxyde_plomb) ,733
---733,op_valorisation ,736
-----733,transformation (cuisson_oxyde_plomb) ,734
-----734,transformation (affinage_plomb) ,735
-----735,transformation (coulee_plomb) ,736
```

... ce qui correspond donc aux mêmes procédés trouvés en utilisant des copies des états des cas sources comme cas cible. Ce qui montre que, de manière générale, le fait qu'il y ait une différence dans la description de l'état (plus d'informations que dans le cas source), n'a pas posé de problème. Par conséquent :

- Le mécanisme de recherche de cas similaire a bien fonctionné
- Les mécanismes d'estimation des états finaux ou des états intermédiaires ont été correctement exécutés puisque chaque transformation a donné un nouvel état et que ces derniers ont permis de sélectionner les meilleures³ étapes (transformations) possibles amenant à une solution acceptable.

Ensuite, nous avons affiché les états de sortie de chaque trajectoire pour analyser comment ont été gérés les nouveaux éléments introduits dans la définition des états, à savoir :

- *def(couleur, bp, _, _, _, noire)* pour l'état 4 modifié
- *def(couleur, partie_oxyde_plomb, _, _, _, noire)* pour l'état 39 modifié

Nous avons obtenu les sorties suivantes :

3. Meilleures dans le sens du RàPC, celle qui correspond au cas le plus similaire (selon la politique, cf. section 5.6.3.2)

```
?- affichage_etat(739).
poudrette_polypropylene compose polypropylene
poudrette_polypropylene couleur noire
poudrette_polypropylene forme poudrette
poudrette_polypropylene taille 1 a 3 mm
true.
```

et pour le deuxième cas,

```
?- affichage_etat(731).
lingot_plomb compose plomb
lingot_plomb couleur noire
lingot_plomb forme lingot
true.
```

```
?- affichage_etat(736).
lingot_plomb compose plomb
lingot_plomb couleur noire
lingot_plomb forme lingot
true.
```

Plusieurs éléments sont intéressants. Tout d’abord, le premier constat est que les états finaux de chaque trajectoire sont proches mais pas exactement les mêmes. Ce point peut sembler cohérent puisque la définition de chaque état cible n’a pas été la même. Dans la première trajectoire, on peut constater que bien que l’état cible avait pour élément principal l’élément *bp* au lieu de *broyat_polypropylene*, l’ensemble des mécanismes a bien considéré que les deux états étaient similaires et lors de la transformation, le nom a été remplacé. Ce remplacement ne provient pas d’une comparaison avec l’état source, mais il provient de la définition de la transformation estimée par le système lors de la phase d’apprentissage des cas sources insérés, c’est-à-dire que l’objet est transformé en un autre objet (plus clairement, le premier objet est supprimé, le second est ajouté). Comme avant l’exécution de l’opération de transformation un appariement est réalisé entre le cas source et le cas cible, c’est *bp* qui a été remplacé. Par conséquent on peut constater que, pour l’estimation des états :

- Le nom d’un objet importe peu, seules ses connexions avec des concepts ou d’autres objets permettent de le définir
- La présence de définitions supplémentaires n’enraye pas le bon déroulement de l’ensemble des mécanismes d’estimation

Cependant, on constate que les définitions ajoutées se retrouvent présentes dans les définitions des états finaux. Qui plus est, la propriété ajoutée à l’état initial a été rajoutée à l’état final estimé dans chaque trajectoire. Dans la première trajectoire, on retrouve la définition *poudrette_polypropylene couleur noire* et dans la seconde trajectoire la définition *lingot_plomb couleur noire*. Néanmoins, on ne sait pas si effectivement un lingot de plomb est de couleur noire (en réalité, il est plutôt gris), mais la description de l’état estimé le considère comme tel. On atteint ici une des limitations du système présenté.

Limitation 1 *La première limitation de notre système est la détermination des opérations sous forme de règles. Pour rappeler, lors de la phase d’intégration d’une trajectoire, si cette dernière possède des transformations, le système va « tenter » de déterminer une suite d’opérations permettant de transformer un état initial en un état final. Ces opérations sont limitées à la modification des relations entre les différents objets et concepts et peuvent être : la création, la suppression ou la modification (pour plus de détails, voir 5.7.4). La suite d’opérations obtenue fonctionne avec l’état original. Cependant, deux cas de figure se présentent. Tout d’abord, comme dans ce test, si d’autres éléments sont présents dans la définition de l’état, ce mécanisme ne les prend pas en compte. En effet, leur comportement lors de la transformation est inconnu puisque non défini. De ce fait, la politique mise en place est que, la définition « supplémentaire » n’est pas touchée et si elle n’est pas connectée à la structure principale de définition de l’état, alors une procédure rattache la définition à l’origine de l’état. Deuxièmement, ce même problème peut provenir de l’appariement. En effet, avant l’exécution de l’opération, l’état source et l’état cible sont appariés permettant ainsi l’identification des éléments. Cependant, cet appariement peut produire certains effets inattendus. Cet appariement découle de l’identification d’éléments ou de concepts communs entre les objets. Il arrive parfois que plusieurs combinaisons soient possibles, or, comme il n’y a pas de mesure de distance, le système ne permet pas de dire pas quelle est la meilleure. Dans ce cas, la règle que nous avons mis en place est de sélectionner une combinaison **aléatoirement**, rendant ainsi l’ensemble du processus de résolution **non déterministe**. Pour justifier ce choix, nous avançons deux arguments. Le premier est que nous avons souhaité proposer un modèle qui n’utilise pas le calcul de distances classiques que l’on retrouve dans les RàPC. Seule une détermination qui semble logique ou partiellement logique est implémentée (créant ainsi le fait que plusieurs*

7.1. ÉVALUATION DE LA MÉTHODE DE RECHERCHE DE NOUVELLES TRAJECTOIRES BASÉE SUR LA GESTION DES CONNAISSANCES

combinaisons sont proposées). Le deuxième argument est que ce mécanisme permet une plus grande créativité du système grâce à sa capacité de considérer deux éléments comme similaires. Par conséquent, il peut arriver que deux éléments (l'un du cas source, l'autre du cas cible) soient considérés comme similaires. Lors de la phase de transformation, plusieurs opérations peuvent être associées à ce dernier. Ainsi sur l'élément du cas source, toutes ces opérations fonctionnent correctement, mais pour celui du cas cible, certaines opérations ne vont pas être réalisées (par exemple, suppression d'un élément non existant ...), entraînant de ce fait une estimation hasardeuse de l'état final.

Pour conclure sur ce test, nous insistons sur le principal résultat que nous avons trouvé. L'ajout d'éléments de définitions dans un état ne produit pas le blocage du système et par conséquent n'affecte pas la résolution du problème. Cependant, cet ajout peut avoir comme conséquences :

- La description d'états estimés peut contenir des anomalies ou des éléments faux
- Une augmentation du nombre de combinaisons possibles lors de la phase d'appariement et ainsi rendre moins déterministe l'ensemble du processus
- Un impact sur la sélection de cas sources

Test 4 : test état comportant moins de données ⇒ Robustesse

Mécanisme évalué Dans ce test, nous avons cherché à observer la réponse du système lorsqu'on lui soumet un problème auquel il manque des informations. Nous avons choisi les mêmes états que pour les tests 1 et 2 où certaines définitions ont été supprimées. Le but de ce test est principalement d'évaluer le mécanisme d'indexation. De plus, et si ce dernier mécanisme a bien fonctionné, il s'agit de voir si ceux dédiés à la transformation des états (voir test 3) fonctionnent eux aussi correctement. De manière synthétique, l'ensemble de cette phase d'évaluation consiste à observer la flexibilité du système.

Problème posé Nous avons posé au système des cas « incomplets » par rapport aux cas sources. Comme pour le test 3, il a fallu prendre la précaution de ne pas transformer un cas source en un autre cas source existant. Nous nous sommes donc proposés de modifier les cas :

- *id4* en créant le cas *id4m*
- *id39* en créant le cas *id39m*

La description de ces nouveaux cas est la suivante, pour le cas *id4m*...

```
(def(def(taille ,broyat_polypropylene ,1 ,3 ,cm,_) ,
      def(forme ,broyat_polypropylene ,_,_,_, broyat)
    ),
```

...où la définition *def(compose,broyat_polypropylene,_,_,_,polypropylene)* a été supprimée par rapport au cas source⁴, et pour le cas *id39m* ...

```
(def(contient ,batterie ,_,_,_, carcasse_batterie) ,
      def(contient ,batterie ,_,_,_, partie_plomb) ,
      def(contient ,batterie ,_,_,_, partie_oxyde_plomb) ,
      def(compose ,partie_plomb ,_,_,_, plomb) ,
      def(compose ,partie_oxyde_plomb ,_,_,_, oxyde_plomb) ,
      def(forme ,carcasse_batterie ,_,_,_, monobloc) ,
      def(forme ,partie_plomb ,_,_,_, element) ,
      def(etat ,partie_oxyde_plomb ,_,_,_, oxyde) ,
      def(etat ,partie_plomb ,_,_,_, non_oxyde) ,
      def(forme ,partie_oxyde_plomb ,_,_,_, element)
    ),
```

...où la définition *def(compose,carcasse_batterie,_,_,_,polypropylene)*, a été supprimée par rapport au cas source.

Réponse du système et analyse Comme pour les tests précédents, on soumet les différents problèmes au système, puis, on observe la réponse retournée. Pour le premier problème, le cas *id4m* (ici 17609), la réponse est la suivante :

4. Le choix de l'élément supprimé n'est pas important car ce ne sont que des « mots ». Par contre, la fréquence de l'élément dans la base de connaissance joue un rôle. Cependant, pour ce test, il n'y a pas assez de différence pour que ce soit pertinent

CHAPITRE 7. ANALYSE, ÉVALUATION ET COMMENTAIRES SUR LA RÉALISATION

```
Resolution -->17609
Pas de solution trouvee
Propositions : renvoyer cas similaires connus
Combien d elements maximum voulez-vous ?
```

Explications : ici, le système n'a pas réussi à trouver l'ensemble du procédé c'est-à-dire lors de la construction de la nouvelle trajectoire, au moins une partie a échoué : aucun cas n'a pu être trouvé, ou plus précisément, sur une relation, tous les index ont échoué (même ceux de haut niveaux). Dans ce cas, nous avons implémenté une option permettant, en cas d'échec, de retourner uniquement les états les plus similaires pour la question posée. Ainsi, dans notre test, il nous a demandé combien de cas nous souhaitons voir apparaître (rangé par ordre décroissant de niveau). Dans ce qui suit, nous avons demandé de renvoyer les cinq premiers ...

```
Cas similaire de niveau :1 cas numero :535 provenant de :[4 ,16]
Cas similaire de niveau :1 cas numero :536 provenant de :[4 ,19]
Cas similaire de niveau :1 cas numero :444 provenant de :[4 ,31]
Cas similaire de niveau :1 cas numero :538 provenant de :[4 ,36]
Cas similaire de niveau :1 cas numero :539 provenant de :[4 ,37]
```

... le système a renvoyé 5 états ainsi que leurs origines (c'est-à-dire les états réels d'où ils dérivent. Voir partie indexation, section 5.7.3). On constate que l'origine 4 (qui correspond à l'id3, proche de notre état test dérivé de l'id4 (ici 5)) est bien référencée. Pour comprendre pourquoi le système n'a pas renvoyé de solution alors qu'il a bien détecté l'état 4, nous nous proposons d'observer la décomposition de la trajectoire que le système ferait. Ainsi, supposons que l'état 4 serait sélectionné comme cas source (cette sélection est aléatoire), la décomposition obtenue de la trajectoire poserait alors la nouvelle question :

— *id4m,traitement, E* avec E l'inconnu (voir la décomposition de la trajectoire 1)

Nous avons lancé cette nouvelle question dans le système, la réponse obtenue est la suivante...

```
Resolution -->17609
Pas de solution trouvee
Propositions : renvoyer cas similaires connus
Combien d elements maximum voulez-vous ?
```

... où nous avons demandé de renvoyer les 5 premiers cas trouvés :

```
Cas similaire de niveau :1 cas numero :444 provenant de :[4 ,31]
Cas similaire de niveau :1 cas numero :763 provenant de :[5 ,31]
Cas similaire de niveau :1 cas numero :3484 provenant de :[12 ,31]
Cas similaire de niveau :2 cas numero :772 provenant de :[4 ,5 ,31]
Cas similaire de niveau :2 cas numero :3491 provenant de :[4 ,12 ,31]
```

Ici encore, il n'y a pas de solution, mais l'état 4 (id 3) est bien trouvé ainsi que l'état 5 (id 4). La décomposition se traduirait par la question :

— *id4m,flotation, E* si l'état 4 est sélectionné

— *id4m,broyage_fn, E* si l'état 5 est sélectionné

Comme précédemment, nous avons posé ces questions au système qui nous a renvoyé pour la première question

...

```
Resolution -->17609
Pas de solution trouvee
Propositions : renvoyer cas similaires connus
Combien d elements maximum voulez-vous ?5.
```

true .

... et pour la seconde...

```
Resolution -->17609
Pas de solution trouvee
Propositions : renvoyer cas similaires connus
Combien d elements maximum voulez-vous ?5.
```

true .

... soit dans les deux cas, le système ne fournit ni une solution adaptée, ni même un état similaire pouvant servir de cas source. Par conséquent, c'est à ce niveau que le système a échoué et n'a pas pu générer une solution adaptée

7.1. ÉVALUATION DE LA MÉTHODE DE RECHERCHE DE NOUVELLES TRAJECTOIRES BASÉE SUR LA GESTION DES CONNAISSANCES

à notre problème. Pour tenter d'interpréter l'échec à ce niveau, il est nécessaire de bien comprendre comment le mécanisme de recherche de cas est plus généralement celui de la mémorisation fonctionne (voir partie théorique, section 5.7). Dans ce test, le souci provient du nombre d'états sources qui sont reliés à la relation *flotation* ou à la relation *broyage_fin*. En fait, on s'aperçoit que seul l'état **id 3** et l'état **id 4** sont reliés c'est-à-dire, ces relations n'existent que pour un seul état dans la base de connaissances. Or, le mécanisme de mémorisation, combine les différents états (possédant une relation) pour générer des éléments synthétiques qui correspondent à des définitions générales des deux états. Cette définition générale est plus « souple » que les définitions d'origines. Or, dans ce test, il n'y a pour chaque relation qu'un seul état correspondant. Par conséquent, seule la définition d'origine existe. Autrement dit, lors de la recherche de cas, soit la définition de l'état cible permet la validation de la définition source, soit la question n'amène pas de réponse, comme dans notre cas de figure. Ce raisonnement nous conduit donc à définir une nouvelle limitation pour notre système.

Limitation 2 *Pour le système de recherche de cas, moins il y a d'états ayant la même relation, plus la faculté (c'est-à-dire la flexibilité du système au moment de la recherche de cas similaire) du système à trouver un cas source est limitée. Ainsi, si une relation n'admet qu'un état, seul un état cible validant (voir section 5.6) cette définition sera considérée comme correcte. Plus généralement, le système de recherche de cas ne fonctionne correctement que lorsqu'il existe plusieurs problèmes (relations) identiques avec des états différents.*

Nous avons soumis au système avec le second cas proposé, à savoir **id39m** (ici 17610), la réponse suivante a été retenue ...

```
Resolution -->17610
Pas de solution trouvee
Propositions : renvoyer cas similaires connus
Combien d elements maximum voulez-vous ?5.
Cas similaire de niveau :1 cas numero :95 provenant de :[2,15]
Cas similaire de niveau :1 cas numero :96 provenant de :[2,18]
Cas similaire de niveau :1 cas numero :173 provenant de :[3,15]
Cas similaire de niveau :1 cas numero :174 provenant de :[3,18]
Cas similaire de niveau :1 cas numero :179 provenant de :[3,29]

true.
```

... et comme pour le cas précédent, il n'y a pas eu de réponse. L'origine de l'explication est la même que pour id4m.

Ce test nous permet de souligner les points suivants :

- Lorsque la description d'un état manque d'éléments pour être validée par celle d'un état source, ceci n'est pas une limitation pour la recherche de cas et pour la résolution de problème (puisque nous avons vu qu'à la question *valorisation(matiere)* et *traitement*, des cas sources ont été trouvés).
- Moins une relation possède d'états différents reliés, plus la faculté de recherche de cas est limitée.

Test 5 : test état comportant des données moins conceptuelles ⇒ Capacité de conceptualisation

Mécanisme évalué Dans ce dernier test, on cherche à évaluer la capacité de conceptualisation du système lors de la recherche de cas. Pour rappel, on entend par capacité de conceptualisation le fait qu'une définition soit considérée comme vraie lorsque l'élément comparé correspond à une sous-catégorie (dans la taxonomie) de celui vérifié. Par exemple, si l'on a *X est un chat* et que l'on teste si *X est un mammifère*, alors la réponse sera *Vrai* si, dans la taxonomie *chat* est considéré comme un *mammifère*.

Problème posé On s'est proposé de prendre comme référence l'id4 auquel on effectue une modification. On introduit un nouveau concept *polypropylene55* qui est défini comme une sous-catégorie de *polypropylene*. Ce nouveau concept, remplace l'original dans la définition de l'état créant ainsi l'état **id4c** avec la définition suivante :

```
( def ( compose , broyat_polypropylene , _ , _ , _ , polypropylene55 ) ,
  def ( taille , broyat_polypropylene , 1 , 3 , cm , _ ) ,
  def ( forme , broyat_polypropylene , _ , _ , _ , broyat )
) ,
```

De même, on a créé un nouvel état **id39c** correspondant à l'état de base **id39** auquel on a modifié *polypropylene* par *polypropylene55* et *oxyde* par **oxyde4** en rajoutant l'élément **oxyde4** comme sous-catégorie d'**oxyde** dans la taxonomie. Ainsi, l'état **id39c** possède la définition suivante :

```
(def(contient , batterie , _ , _ , _ , carcasse_batterie) ,
def(contient , batterie , _ , _ , _ , partie_plomb) ,
def(contient , batterie , _ , _ , _ , partie_oxyde_plomb) ,
def(compose , carcasse_batterie , _ , _ , _ , polypropylene55) ,
def(compose , partie_plomb , _ , _ , _ , plomb) ,
def(compose , partie_oxyde_plomb , _ , _ , _ , oxyde_plomb) ,
def(forme , carcasse_batterie , _ , _ , _ , monobloc) ,
def(forme , partie_plomb , _ , _ , _ , element) ,
def(etat , partie_oxyde_plomb , _ , _ , _ , oxyde4) ,
def(etat , partie_plomb , _ , _ , _ , non_oxyde) ,
def(forme , partie_oxyde_plomb , _ , _ , _ , element)
) ,
```

Réponse du système et analyse La réponse du système pour le premier problème posé (état **id4c**, ici 17609) est la suivante...

```
Resolution -->17609
17609, valorisation (matiere) ,17612
---17609, traitement ,17610
-----17609, transformation (broyage_fin) ,17610
---17610, pretraitement ,17612
-----17610, transformation (lavage_1) ,17611
-----17611, transformation (sechage) ,17612
```

... avec comme description de l'état final :

```
?- affichage_etat (17612).
poudrette_polypropylene compose polypropylene
poudrette_polypropylene forme poudrette
poudrette_polypropylene taille 1 a 3 mm
true .
```

On remarque donc que d'une part la trajectoire a été créée et qu'elle correspond à la solution à laquelle on pouvait s'attendre, à savoir un procédé similaire à la voie une car **id4c** est une copie dont la définition est incluse dans la définition de **id4**. Par conséquent, le mécanisme reconnaît bien une définition moins conceptuelle lors de la comparaison avec un autre état. De plus, on constate que la définition de l'état final généré est identique à la solution originelle. Autrement dit, le *polypropylene55* a été remplacé par polypropylene.

Ce phénomène provient du mécanisme de transformation d'un état en un autre qui tente d'estimer le résultat d'un procédé. Comme expliqué dans la partie théorique, une transformation d'un état en un autre est simulée par une liste d'opérations sur les définitions d'un état. Les deux opérateurs sont *ajouter une liaison* et *supprimer une liaison*. Chacune de ces opérations permet d'ajouter ou de supprimer une définition dans un état. Cependant, du fait de l'existence de taxonomie sur les concepts, ces opérateurs ne réalisent pas les opérations telles quelles. Ainsi, l'ajout d'une relation n'a de sens que s'il n'y a pas de relation moins conceptuelle déjà définie. En effet, si une telle définition existe, alors celle qui est proposée pour être ajoutée existe de fait puisqu'elle peut être inférée. De même, si l'on supprime une relation, celles qui sont moins conceptuelles le sont aussi. Par exemple, si une définition d'un état est *pièce est en chêne*, que *chêne* est défini comme une sous-catégorie de *bois* et, enfin, que l'on applique sur cet état l'opération *supprimer(pièce est en bois)*, alors supprimer la relation *pièce est en chêne* est correcte. Cependant, cela n'explique pas pourquoi *polypropylene55* est remplacé par polypropylene.

Limitation 3 *Les opérations d'ajout et de suppression de définition ne tiennent compte des relations taxonomiques que si l'élément principal (l'objet) n'est pas modifié. Pour illustrer si on a **a est défini comme concept1** et que la résultante d'une opération conduit à **b est défini comme concept2**, l'affirmation **concept1 est concept2** n'est pas toujours vraie.*

Conclusion de la première phase de test Au travers de ces tests, nous voulions vérifier le fonctionnement des mécanismes listés dans la section 7.1.1. Nous avons montré que ces derniers fonctionnent correctement et que les principales limitations que l'on a signalées proviennent d'incertitudes sur les données. Par conséquent, les principales fonctionnalités recherchées pour le système ont été atteintes (du moins dans ces tests). Ce qui montre en outre que :

- Les mécanismes de stockage des données et de recherche de cas sources fonctionnent et présentent plusieurs avantages.

7.1. ÉVALUATION DE LA MÉTHODE DE RECHERCHE DE NOUVELLES TRAJECTOIRES BASÉE SUR LA GESTION DES CONNAISSANCES

- La méthode basée sur la récursivité décomposant les problèmes en sous-problèmes permet bien d'adapter des solutions.
- Les mécanismes d'abstraction et de conceptualisation apportent de la fluidité dans les raisonnements.

7.1.4 2^e ÉTUDE

Dans cette partie, nous proposons d'étudier l'impact de la représentation de la connaissance sur l'ensemble de la résolution. Pour ce faire, nous avons repris certains des tests de la première phase mais avec une base de cas sources modifiée. On s'est proposé de simplifier la description de ces cas en apportant certaines généralisations au niveau de la taxonomie.

7.1.4.1 DESCRIPTION DES DONNÉES

Les données utilisées sont les mêmes que celles de la première étude avec cependant des modifications dans la description des trajectoires avec une simplification de la taxonomie. Ainsi, on se propose de réduire les relations de bas niveaux aux groupes suivants :

- Broyage
- Séparation
- Lavage, séchage
- Démontage
- Les opérations de valorisation restent inchangées

Une description graphique se trouve en Annexe B.8.

7.1.4.2 PHASE DE TESTS ET COMMENTAIRES AVEC LES DONNÉES 2

Test 1 : fonctionnement initial

Aspect évalué Dans ce test, on se propose de vérifier que le système de résolution n'est pas affecté par le changement de base de cas. Ainsi, on vérifiera que la sélection du cas source fonctionne et que l'ensemble du processus d'adaptation tienne compte des modifications de la structure.

Problème posé On se propose de tester le mécanisme de résolution avec une copie de l'état 4 **id4**, comme dans la phase de tests de l'étude 1.

Réponse du système et analyse Lors du test, on obtient le résultat suivant. (L'**id4** est ici 17609) ...

```
Resolution -->17609
17609,valorisation(matiere),17612
---17609,traitement,17610
-----17609,transformation(broyage),17610
---17610,pretraitement,17612
-----17610,transformation(lavage),17611
-----17611,transformation(sechage),17612
true.
```

...ce qui correspond au procédé du cas source (avec les modifications apportées). Ensuite, nous avons affiché l'état final obtenu avec le procédé de transformation :

```
?- affichage_etat(17612).
poudrette_polypropylene compose polypropylene
poudrette_polypropylene forme poudrette
poudrette_polypropylene taille 1 a 3 mm
true.
```

Ce qui est ici encore conforme au cas source.

Par conséquent, nous avons bien vérifié que le système n'est pas affecté par le changement de base de cas.

Test 2 (reprise du test 4 de l'étude précédente) état comportant moins de données

CHAPITRE 7. ANALYSE, ÉVALUATION ET COMMENTAIRES SUR LA RÉALISATION

Aspect évalué Dans ce test, nous avons refait le test 4 qui avait échoué avec la base de cas de l'étude 1. Nous rappelons que la cause de cet échec était le fait que certaines relations entre les états étaient uniques dans la base et que par conséquent le mécanisme de mémorisation et celui de recherche de cas n'avaient pas pu sélectionner de solution. Nous nous sommes proposés de le refaire avec cette nouvelle base de cas qui a l'avantage de supprimer une partie de ces relations problématiques.

Problème posé Nous avons donc testé de nouveau *id4m* qui a été défini au test 4 de l'étude 1.

Réponse du système et analyse Le système a retourné la réponse suivante (ici *id4m* est 17609) :

```
Resolution -->17609
17609,valorisation(matiere),17611
---17609,traitement,17611
-----17609,transformation(separation),17610
-----17610,transformation(broyage),17611
true.
```

avec pour état final :

```
?- affichage_etat(17611).
poudrette_polypropylene_sale compose polypropylene
poudrette_polypropylene_sale contient_trace salete
poudrette_polypropylene_sale forme poudrette
poudrette_polypropylene_sale taille 1 a 3 mm
true.
```

Cette fois ci, le système a généré une solution, qui n'est pas celle de *id4*. Par conséquent, la solution a été adaptée en fonction des données disponibles et s'apparente à la solution originelle (voie 1). Comme nous supposons que cette adaptation est le fruit d'une sélection aléatoire dans les différents cas sources possibles, nous avons réalisé une seconde fois le test...

```
Resolution -->17609
Pas de solution trouvee
Propositions : renvoyer cas similaires connus
Combien d elements maximum voulez-vous ?5.
Cas similaire de niveau :1 cas numero :535 provenant de :[4,16]
Cas similaire de niveau :1 cas numero :536 provenant de :[4,19]
Cas similaire de niveau :1 cas numero :438 provenant de :[4,31]
Cas similaire de niveau :1 cas numero :538 provenant de :[4,36]
Cas similaire de niveau :1 cas numero :539 provenant de :[4,37]
```

...qui cette fois n'a pas abouti, le système nous proposant les cas les plus proches au problème posé. Cependant, un troisième test nous a donné :

```
?- testEval(1,17609).
Resolution -->17609
17609,valorisation(matiere),17611
---17609,traitement,17610
-----17609,transformation(separation),17610
---17610,pretraitement,17611
-----17610,transformation(lavage),17611
true.
```

avec comme état final...

```
?- affichage_etat(17611).
verre_broye compose verre
verre_broye forme broyat
verre_broye taille 1 a 3 cm
true.
```

... ce qui est un peu surprenant. En fait, il est nécessaire de se rappeler la définition de l'état **id4m 7.1.3.2**. Cette définition ne précise pas la composition de l'état et, par conséquent, peut s'adapter à plusieurs cas sources, sans pouvoir les distinguer!

7.1. ÉVALUATION DE LA MÉTHODE DE RECHERCHE DE NOUVELLES TRAJECTOIRES BASÉE SUR LA GESTION DES CONNAISSANCES

Pour conclure sur ce test, nous avons montré, comme nous le suggérons dans l'étude 1, qu'une fréquence élevée d'une même relation dans la base de cas est nécessaire au bon fonctionnement du mécanisme de recherche de cas. De plus, nous avons pu apprécier le non-déterminisme de la méthode de résolution qui peut, dans le cas ou aucun cas ne se dégage, proposer plusieurs adaptations et par conséquent différentes solutions à un même problème.

7.1.5 3^e ÉTUDE

Dans cette partie, nous nous proposons d'analyser l'impact du taux d'indexation sur le fonctionnement du système (cf. 5.7.3.3). On rappelle ici, que le système, lors de la mémorisation des états et de leurs relations, crée des **définitions générales** provenant de deux états de la couche d'indexation inférieure (cf. 5.7.3). Lors des études 1 et 2, les paramètres étaient les suivants :

couche	0	1	2
taux	–	100%	100%

Nous nous proposons dans cette étude de faire quelques tests en ayant modifié le taux par couche.

7.1.5.1 DESCRIPTION DES DONNÉES

Les données utilisées sont les mêmes que celles pour l'étude 1. Pour le paramétrage des couches, nous avons proposé de tester la configuration suivante :

couche	0	1	2
taux	–	75%	25%

(⇒ Le temps d'exécution lors de la phase d'indexation des états de la base de cas est nettement inférieur au temps initial, ceci vient du fait qu'un nombre significativement moins important (<400 contre plus de 17000) de définitions générales a été généré.)

Test 1 : fonctionnement initial

Aspect évalué Dans ce test, on se propose de vérifier que le système de résolution soit correctement appliqué avec la nouvelle indexation. Ainsi, on vérifiera que la sélection du cas source fonctionne correctement et que l'ensemble du processus d'adaptation tient compte des modifications de la structure.

Problème posé On se propose de tester le mécanisme de résolution avec une copie de l'état 4 **id4**, comme dans la phase de test de l'étude 1.

Réponse du système et analyse Le système a retourné la réponse suivante (ici *id4* est 355) :

```
Resolution -->355
355, valorisation (matiere) ,358
---355,traitement ,356
-----355,transformation (broyage_fin) ,356
---356,pretraitement ,358
-----356,transformation (lavage_1) ,357
-----357,transformation (sechage) ,358
```

Avec comme description de l'état final :

```
?- affichage_etat(358).
poudrette_polypropylene compose polypropylene
poudrette_polypropylene forme poudrette
poudrette_polypropylene taille 1 a 3 mm
true.
```

Ce qui correspond bien à la solution du cas source. Par conséquent, une diminution du taux d'indexation ne modifie pas la recherche de cas, en tout cas pour un cas cible identique à un cas source (ce qui se comprend aisément par la seule présence de la couche 0 dans l'indexation⁵).

5. Par la description même de la couche 0 (elle contient les états réels)

CHAPITRE 7. ANALYSE, ÉVALUATION ET COMMENTAIRES SUR LA RÉALISATION

Test 2 : (reprise su test 4) test état comportant moins de données

Aspect évalué Dans cette partie, nous nous sommes proposés de tester un cas où le rôle de l'indexation est déterminant par le fait que certaines informations soient manquantes (voir étude 1, test 4 et étude 2 test 2).

Problème posé Nous avons donc testé de nouveau *id4m* défini au test 4 de l'étude 1.

Réponse du système et analyse Le système a retourné la réponse suivante (ici *id4m* est 355) :

```
Resolution -->355
Pas de solution trouvee
Propositions : renvoyer cas similaires connus
Combien d elements maximum voulez-vous ?5.
Cas similaire de niveau :1 cas numero :165 provenant de :[4 ,16]
Cas similaire de niveau :1 cas numero :166 provenant de :[5 ,16]
Cas similaire de niveau :1 cas numero :181 provenant de :[4 ,19]
Cas similaire de niveau :1 cas numero :213 provenant de :[12 ,24]
Cas similaire de niveau :1 cas numero :240 provenant de :[4 ,31]
```

Comme pour le test 4 de l'étude 1, le système ne retourne pas de réponse. Par conséquent, il ne permet pas de déterminer l'impact de l'indexation sur la recherche de cas. On se propose donc d'utiliser les données de la seconde étude et de refaire le test. Ce qui nous donne (ici *id4m* est 368) :

```
?- testEval(1,368).
Resolution -->368
Pas de solution trouvee
Propositions : renvoyer cas similaires connus
Combien d elements maximum voulez-vous ?5.
Cas similaire de niveau :1 cas numero :164 provenant de :[4 ,16]
Cas similaire de niveau :1 cas numero :203 provenant de :[4 ,24]
Cas similaire de niveau :1 cas numero :206 provenant de :[5 ,24]
Cas similaire de niveau :1 cas numero :304 provenant de :[4 ,36]
Cas similaire de niveau :1 cas numero :307 provenant de :[4 ,37]
```

```
true .
```

```
?- testEval(1,368).
Resolution -->368
368,valorisation(matiere),374
---368,traitement,373
-----368,transformation(separation),373
---373,pretraitement,374
-----373,transformation(lavage),374
true .
```

avec comme description de l'état final :

```
?- affichage_etat(374).
verre_broye compose verre
verre_broye forme broyat
verre_broye taille 1 a 3 cm
true .
```

Ici encore, les solutions obtenues ressemblent à celles de l'étude 2. Par conséquent, il n'est pas possible de dire quel est l'impact du nombre de couches et du taux d'indexation par couche.

7.1.6 CONCLUSION SUR L'ÉVALUATION DE LA MÉTHODE DE RECHERCHE DE NOUVELLES TRAJECTOIRES

Dans cette phase d'analyse, nous avons montré au travers de tests que l'ensemble des fonctionnalités et des mécanismes que nous recherchions 7.1.1 fonctionnent correctement. La méthode de mémorisation, d'indexation et de recherche de cas se révèle efficace et permet de proposer des solutions originales en fonction de la description

7.2. ÉVALUATION DE L'OUTIL DE MODÉLISATION ET D'ÉVALUATION DES TRAJECTOIRES

du problème posé. De plus, le mécanisme de décomposition de problème en sous-problèmes ainsi que celui d'estimation des résultats des états résultants d'une opération permettent une adaptation des solutions tant sous une description générale (c'est-à-dire de haut niveau de conceptualisation) qu'à bas niveau avec une estimation de la sortie. Enfin, les mécanismes de fluidité fonctionnent grâce au processus d'abstraction et de conceptualisation offrant une souplesse dans la description des états, dans la procédure de résolution et dans les résultats. Nous avons ensuite vu que la configuration choisie pour l'indexation (c'est-à-dire le nombre de couches et le taux affecté) a un impact sur le système, par exemple sur le temps nécessaire à l'apprentissage. Cependant, les tests proposés ne permettent pas de dire quel est cet impact sur le processus de résolution, ni quelle est la configuration optimale. Enfin, l'ensemble de ces tests a permis de dévoiler l'ensemble des limites de la méthode proposée.

7.2 ÉVALUATION DE L'OUTIL DE MODÉLISATION ET D'ÉVALUATION DES TRAJECTOIRES

7.2.1 OBJECTIFS DE L'ÉVALUATION

Dans cette partie, nous nous proposons d'évaluer l'outil de modélisation et d'évaluation des trajectoires que nous avons décrit dans la partie théorique (Chapitre 6). Le but de cette étude est donc de pouvoir valider la méthodologie avec l'outil. Le but de l'outil est de permettre une modélisation d'un système comportant différentes entités inter-reliées et gérées indépendamment, d'estimer les flux circulants dans ces connexions et enfin d'utiliser des méthodes pour analyser ou évaluer cette application. L'objectif de l'étude se résume en plusieurs points :

— 1^{re} Partie

- Capacité de l'outil à créer des classes de processus (pouvant être de différents niveaux), ce qui implique :
 - De pouvoir décrire des structures
 - De définir le nombre d'entrées et de sorties
 - De définir des paramètres propres à chaque classe
 - De pouvoir ajouter des fonctions dédiées
 - De définir des règles régissant le comportement des flux de la structure
- Pouvoir générer des entités modélisant des processus ou groupes de processus à partir des classes définies
- De pouvoir personnaliser chaque entité en ayant la possibilité de :
 - Modifier les règles de gestion
 - Modifier les paramètres
- De relier ces entités formant ainsi un réseau où circulent les flux

— 2^e Partie

- D'estimer la valeur de ces flux, c'est-à-dire leurs compositions tant au niveau des éléments que de leur quantité

— 3^e Partie

- D'analyser ou d'évaluer certains outils du système, les greffons, et plus particulièrement :
 - Le module d'évaluation économique d'une simulation et d'un projet
 - Le greffon qui permet l'analyse environnementale d'un groupe de processus en se basant sur l'EcoCost
 - Le calcul des emplois directs, indirects et induits générés par l'activité

D'un point de vue plus technique, il s'agira de s'assurer du bon fonctionnement des points suivants :

- De la génération de classe grâce à la méta-classe
- De la génération du modèle représentant le système sous forme de contraintes sur les flux et plus précisément :
 - Le remplacement des contraintes de chaque entité par une forme unique au niveau du système
 - De la prise en compte des variables et des fonctions définies sur chaque entité
 - Du bon fonctionnement du parser permettant l'utilisation de solveurs indépendants

7.2.2 MÉTHODOLOGIE

Pour ce faire, nous nous proposons de réaliser un cas d'étude académique⁶. Le but de l'étude étant de montrer la capacité de modélisation puis d'évaluation de l'ensemble du système proposé, les valeurs qui sont utilisées ne reflètent pas forcément la réalité, cependant, elles permettent néanmoins de modéliser un système et de réaliser les différents tests afin de vérifier les différents objectifs de l'étude. Nous proposons de réaliser cette étude en modélisant une trajectoire de valorisation de pneus usés.

6. C'est un cas fictif et incomplet par rapport à un cas réel

7.2.2.1 CONTEXTE DU MODÈLE

Cette trajectoire est décrite sur les figures Fig. 7.1 et Fig. 7.2. Dans ces schémas, on peut distinguer la chaîne de production et les autres éléments de la trajectoire.

La Chaîne de production : Le modèle proposé contient une chaîne de production transformant des pneus usés en cinq objets valorisables qui peuvent être réutilisés comme matériaux :

- De la gomme de pneu de 25 mm : **Gomme 1**
- De la gomme de pneu de 1 à 2 mm : **Gomme 2**
- De la poudrette : **Gomme 3**
- De l'acier : **Fer**
- De la fibre : **Fibre**

Cette chaîne de production est décomposée en plusieurs éléments où l'on distingue trois types d'entités :

- Les entités de transformation **GP1, GP2, GP3, GP41, GP42, Classification** qui ont pour vocation de modifier les flux de matière entrants et, par conséquent, ces structures représentent des ensembles d'opérations unitaires (NB : il aurait été possible de descendre au niveau de l'opération unitaire, cependant, cela n'aurait pas apporté plus de valeur à l'étude mais aurait considérablement alourdi la modélisation.
- Un élément d'entrée qui symbolise l'entrée de l'usine et qui a pour vocation de recevoir les pneus usés **Entrée 1**
- des éléments de sortie, limites de l'usine d'où partent les éléments valorisés et qui « payent » les transporteurs pour les acheminer jusqu'aux acheteurs

Les autres éléments : Cette chaîne de production est alimentée en matière première par une source nommée **SourcePneus** représentant un dépôt de pneus usés (après collecte). Cette source alimente l'usine avec un débit moyen. Dans ce modèle, un transporteur **Transporteur1** transporte les pneus usés de la source jusqu'à l'entrée de l'usine. Une entité nommée **Fabricants de pneus** modélisant les fabricants de pneus neufs se chargent de payer le transporteur ainsi que l'usine de traitement et c'est l'entité **Entrée 1** qui assure la réception. De plus, pour chaque produit en sortie il y a un acheteur spécifique : **Acheteursfer, AcheteursFibre, AcheteursGomme1, AcheteursGomme2, AcheteursGomme3**. Chaque acheteur réceptionne le produit acheminé par un transporteur depuis une des sorties. Pour les flux financiers, la sortie de l'usine paye le transporteur et l'acheteur paye la sortie.

En plus de ces entités, trois autres éléments ont été créés : **Energie_electrique, Ressources_naturelles, Environnement**. Ce sont trois cas particuliers qui permettent de compléter la modélisation en symbolisant des unités fictives. Le but est de permettre de créer des liens particuliers. Ainsi **Energie_electrique** représente le fournisseur d'énergie électrique. Chaque entité consommant de l'électricité sera reliée à cette structure qui lui fournira l'énergie dont elle a besoin et qui en retour devra payer sa consommation. **Ressources_naturelles** permet de modéliser les besoins en ressources naturelles des différents procédés, et ainsi, de pouvoir prendre en compte certain phénomène comme l'épuisement des ressources ou simplement de prendre en compte leur consommation. Enfin, l'entité **Environnement** symbolise le milieu extérieur. Les émissions dans l'environnement issues des procédés pourront par la suite être prises en compte pour la mesure de l'impact environnemental.

Paramètres et règles de modélisation pris en compte : Afin de modéliser l'ensemble du procédé, certains paramètres ont été fixés. Ces paramètres sont pour la plupart issus de documents trouvés sur le procédé en question, d'autres ont été calculés lors de la partie modélisation. Cependant, certains d'entre eux ont été estimés.

7.2.2.2 RÉALISATION DU MODÈLE EN VUE DE LA SIMULATION

Composants et unités des flux La première étape de la modélisation vise à définir les composés qui vont circuler dans les différents flux ainsi que de fixer les unités utilisées. Le principal intérêt de ceci est de s'assurer de la cohérence du modèle. Ainsi, les différents éléments ont été définis dans le tableau Tab. 7.3.

Nombre et modèle de classe d'opérations utilisés : Comme expliqué dans la partie théorique, il est nécessaire de créer des classes d'opérations d'où pourront être générées différentes opérations elles-mêmes modifiables. Par conséquent, il est intéressant lors de la modélisation d'un processus de créer des classes à partir desquelles l'ensemble des opérations pourra être rapidement modélisé. Ces classes, comme nous allons le voir, regroupent les entités selon leurs fonctions. Ainsi on retrouve dans notre modélisation les 9 classes suivantes :

- La classe **transport**, modélisant les éléments de mêmes noms et qui a pour fonction, en plus d'être un connecteur matière (nous avons pris l'hypothèse que toutes marchandises entant chez un transporteur en ressort), permet le calcul des coûts ainsi que la quantité de diesel nécessaire et les émissions liées

7.2. ÉVALUATION DE L'OUTIL DE MODÉLISATION ET D'ÉVALUATION DES TRAJECTOIRES

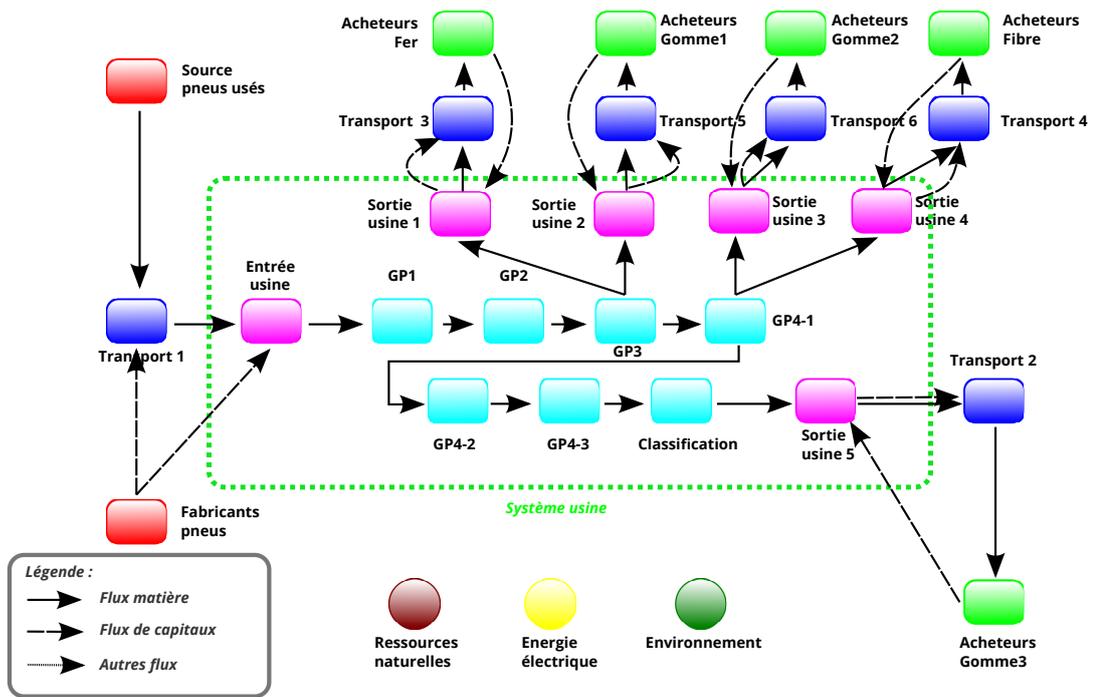


FIGURE 7.1- CHAÎNE DE PRODUCTION - FLUX MATIÈRES ET FINANCIERS

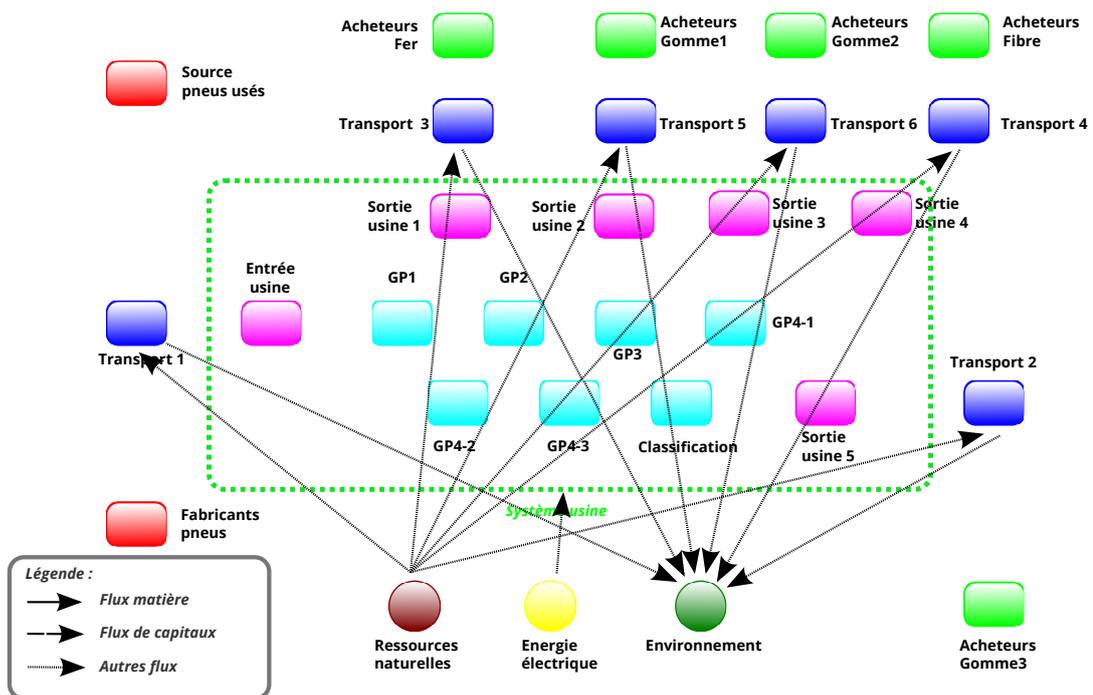


FIGURE 7.2- CHAÎNE DE PRODUCTION - FLUX RESSOURCES NATURELLES, ÉNERGÉTIQUES ET ÉMISSIONS

- La classe **process1-1**, modélise les entités où s'effectuent des transformations matières avec une seule entrée et une seule sortie.
- La classe **process1-3**, modélise les entités où s'effectuent des transformations matières avec une seule entrée et trois sorties.
- La classe **entreeSortie**, permet la génération des entités symbolisant les entrées/sorties de l'usine.
- La classe **acheteur**, modélise les acheteurs, avec comme principale fonction le fait de payer une sortie en fonction de la quantité de produit qu'ils reçoivent.
- La classe **source**, symbolise une origine et est, par conséquent, un début possible de procédé. Ici, leur

Composant	Unité	Commentaire
Électricité	kWh	Flux énergétique
Diesel	L	Litre de diesel
Euro	E	Flux monétaires en Euros
Fer	kg	Quantité de fer/acier
Fibre	kg	Quantité de fibre
Gomme150	kg	Gomme de pneu taille 150mm
Gomme25	kg	Gomme de pneu taille 25mm
Gomme1	kg	Gomme de pneu taille 2 à 4 mm
Gomme2	kg	Gomme de pneu taille 1 à 2 mm
Gomme3	kg	Gomme de pneu taille 0 à 1mm
Pneu	kg	Pneus usés
N21	kWh	Émissions liées à la production d'électricité
T18	km	Émissions liées à l'utilisation moyenne d'un camion

TABLEAU 7.3- COMPOSANTS DES FLUX

seule fonction est la génération de flux.

- La classe **source_multiportEM**, classe particulière ayant entre autre 10 entrées économiques et dix sorties matières. Permet la représentation de ressources_naturelles.
- La classe **source_multiportEE**, classe particulière ayant entre autre 10 entrées économiques et dix sorties énergétiques. Permet la représentation de Energie_electrique.
- La classe **source_multiportM**, classe particulière ayant 10 entrées émissions. Permet la représentation de Environnement. Cette classe sert juste de point d'ancrage aux flux liés aux émissions de polluants.

Systemes créés : Les systèmes sont des ensembles d'entités et permettent l'utilisation de *Greffons* dédiés à l'évaluation ou l'analyse des systèmes. Dans cette modélisation, deux systèmes ont été créés. Le premier est celui regroupant les différentes entités de l'usine, c'est-à-dire de l'entrée jusqu'aux sorties. Il constitue de ce fait le système principale de la modélisation. Le second regroupe toutes les entités à l'exception de la ressource_matiere et de l'environnement. Le premier système permet l'analyse de la nouvelle structure proposée, à savoir l'implémentation d'une nouvelle industrie. Il sera par conséquent intéressant de l'utiliser lorsque l'on se focalise sur des données propres à l'activité. Le second système s'intéresse à l'ensemble de la trajectoire mise en place et permettra donc d'analyser l'impact de cette nouvelle activité.

Simulations créées : Comme nous l'avons vu, une simulation permet de définir le comportement du modèle de manière constante pendant une période donnée (l'unité de temps étant l'année). Néanmoins, pour la partie économique, il est nécessaire de modéliser une phase de création de l'activité où il n'y a aucune activité de production mais où il y a des coûts d'investissement. Ainsi, nous avons choisi de modéliser l'ensemble avec deux simulations. La première, d'une durée d'un an, simule l'investissement et plus particulièrement la création de l'activité. La seconde, d'une durée de trente ans, simule l'exploitation de cette dernière. Une production constante a été choisie et par conséquent une seule modification est nécessaire (investissement et production). De plus, on précise ici que la durée d'amortissement est fixée à quinze ans.

Choix du solveur de contraintes : Pour l'évaluation de ces simulations, nous avons choisi d'utiliser le solveur *glpk : GNU Linear Programming Kit*⁷. Ce solveur⁸, permet la résolution de problème linéaire (LP) et de programmation linéaire mixte par entier (MIP). Ce choix a été fait pour la raison suivante :

- Les flux matières générés peuvent être sous forme non entière

L'utilisation de solveur par contraintes, comme Minion⁹, qui est un solveur par contraintes sous licence GNU GPLv4 rapide [99] et dédié à des problèmes contenant un grand nombre de contraintes, aurait pu être réalisée, cependant, il aurait fallu prendre en compte les fractions décimales dans les règles de modélisation ce qui alourdit la création du modèle. Il aurait néanmoins permis d'intégrer des équations non linéaires.

7. <https://www.gnu.org/software/glpk/>

8. Qui a l'avantage d'être un logiciel libre au sens de Free Software Fondation <https://www.gnu.org/philosophy/free-sw.fr.html>

9. <http://constraintmodelling.org/minion/>

7.2. ÉVALUATION DE L'OUTIL DE MODÉLISATION ET D'ÉVALUATION DES TRAJECTOIRES

Nous observons ici que le choix du solveur impacte la modélisation. En effet, si le solveur utilisé ne permet de gérer que des entiers ou des valeurs discrètes, alors la modélisation du processus devra en prendre compte et permettre l'existence d'une solution répondant à ces contraintes. Ainsi, ici, le solveur *Glpk* ne nous permet d'inclure que des règles linéaires dans le modèle. Par conséquent, certaines contraintes ne peuvent pas être modélisées.

7.2.2.3 COMMENTAIRES SUR LES CHOIX DE MODÉLISATION ET SUR LES ALTERNATIVES POSSIBLES PAR LE SYSTÈME

Nous remarquons ici qu'une importante part de la simulation se base sur la modélisation du procédé et surtout sur certains choix effectués. Ainsi, lors de cette phase, il est possible de représenter un procédé sous plusieurs configurations. Cependant, ces choix impactent par la suite les valeurs obtenues et, même si au niveau global les résultats sont identiques, les résultats aux niveaux des entités de transformation vont différer. Par exemple, dans cette simulation nous avons choisi d'affecter les émissions de production électrique à la source. Ceci est logique puisque l'on peut considérer que c'est bien elle qui génère les émissions associées à la production d'électricité. Néanmoins, nous allons montrer dans la partie résultat que ce choix ne permet pas de déterminer les entités les plus polluantes.

7.2.3 RÉSULTATS

7.2.3.1 PARTIE MODÉLISATION

1^{er} résultat : réalisation de la modélisation La première étape du test a été de montrer que l'ensemble du modèle est réalisable avec l'outil proposé. Ceci a été fait grâce à un fichier Python *ModelPneu.py* qui décrit les principaux éléments suivants (voir Annexe C) :

- Les composants
- Les classes utilisées avec leurs règles et paramètres
- La génération des entités avec leurs règles spécifiques et leurs paramètres
- La réalisation des connexions entre les différentes entités et plus précisément entre les connecteurs des entités
- La définition de systèmes
- La définition de simulations ainsi que le paramétrage des entités

La modélisation (sans calcul des flux) a fonctionné comme escompté, validant certains points de la partie 1 7.2.1

2^e résultat : évaluation des flux L'utilisation du solveur *Glpk* et de l'ensemble du système de modélisation, permet par la suite d'évaluer les flux. La solution a été rapidement trouvée ce qui montre les deux points suivants :

- L'ensemble des règles de fonctionnement imposées à chaque entité permet de trouver au moins une solution. Par conséquent, les contraintes sont cohérentes les unes par rapport aux autres.
- La partie 2 des objectifs 7.2.1 est réalisée.

Une fois l'évaluation des flux réalisée, nous affichons une représentation du modèle¹⁰. Le résultat obtenu est représenté sur la figure 7.3. Il est néanmoins possible de ne pas afficher certains types de flux permettant ainsi une lecture plus aisée du diagramme. On souligne ici que chaque type de flux est représenté par une couleur différente. Il en est de même pour chaque type d'entité (classe) sauf pour un système donné (ici le système usine) qui se retrouve avec des entités de même couleur et représentées à l'aide octogone.

3^e résultat : utilisation des greffons pour l'analyse et l'évaluation de la trajectoire Dans cette partie, nous avons utilisé trois greffons permettant l'analyse économique, environnementale et sociale du projet. On souligne ici l'un des avantages de l'utilisation de modules complémentaires dans le système. En effet, nous avons développé un greffon pour chaque évaluation. Cependant, il est tout à fait possible de développer à cette même fin d'autres modules avec des règles de calculs différentes et de les faire cohabiter dans le système. La seule limitation consiste à garder une cohérence entre le système modélisé et le fonctionnement du greffon. Par conséquent, nous évaluons ici une proposition de méthode pour chaque type d'évaluation, en prenant certaines hypothèses.

10. Réalisée à l'aide de la fonction *diagramme_simulation* qui utilise les bibliothèques *Graphviz* (<http://graphviz.org/Home.php>), sous licence Eclipse Public License <http://graphviz.org/License.php>, qui est reconnue comme libre mais non compatible avec la GPL2 <https://www.gnu.org/philosophy/license-list.html#EPL> ainsi que *pyGraphviz* (<https://pygraphviz.github.io/index.html>) distribuée sous licence BSD license (<http://networkx.lanl.gov/pygraphviz/reference/legal.html>) reconnue comme libre mais non compatible avec la GPL <https://www.gnu.org/philosophy/license-list.html#OriginalBSD>)

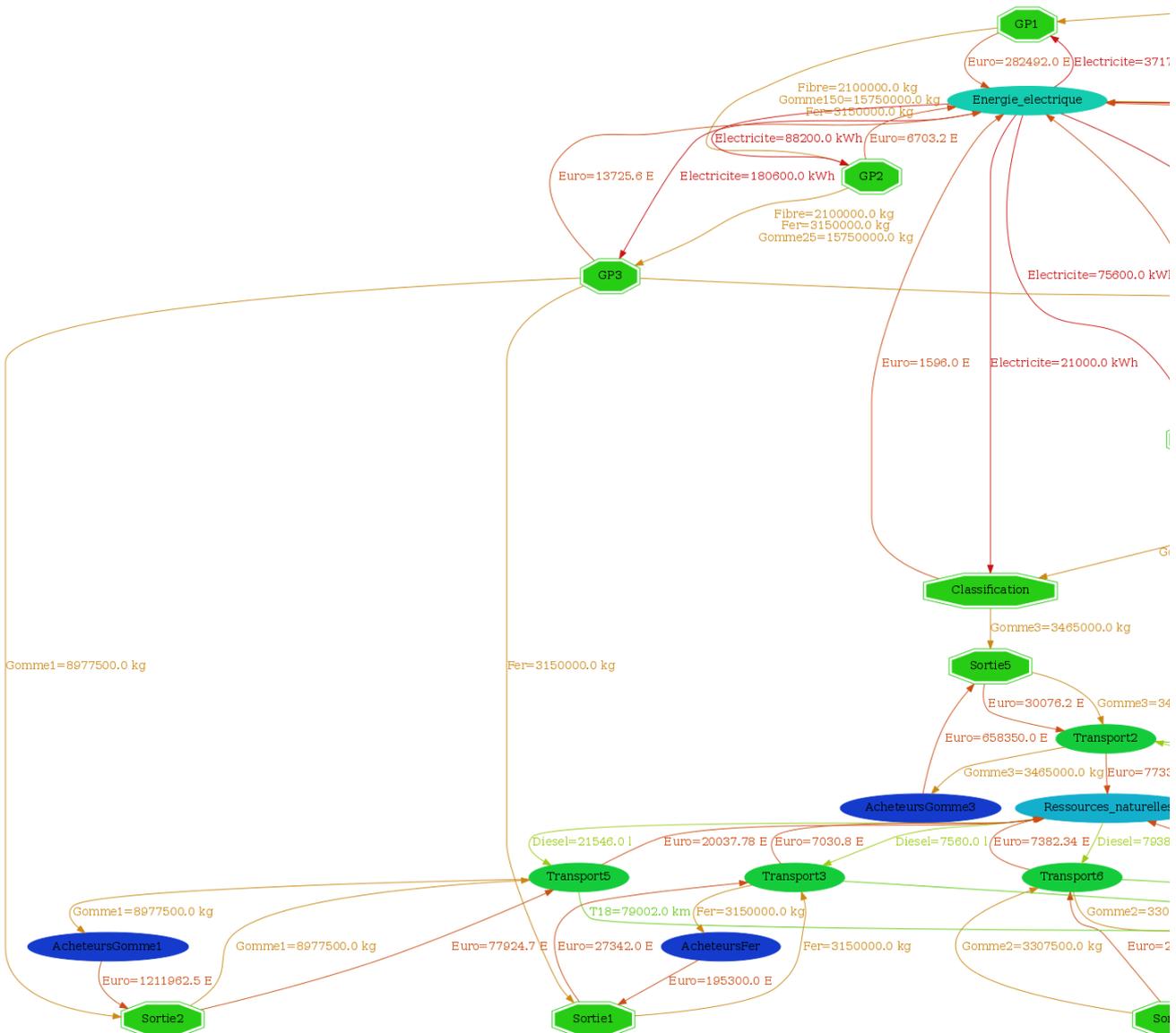


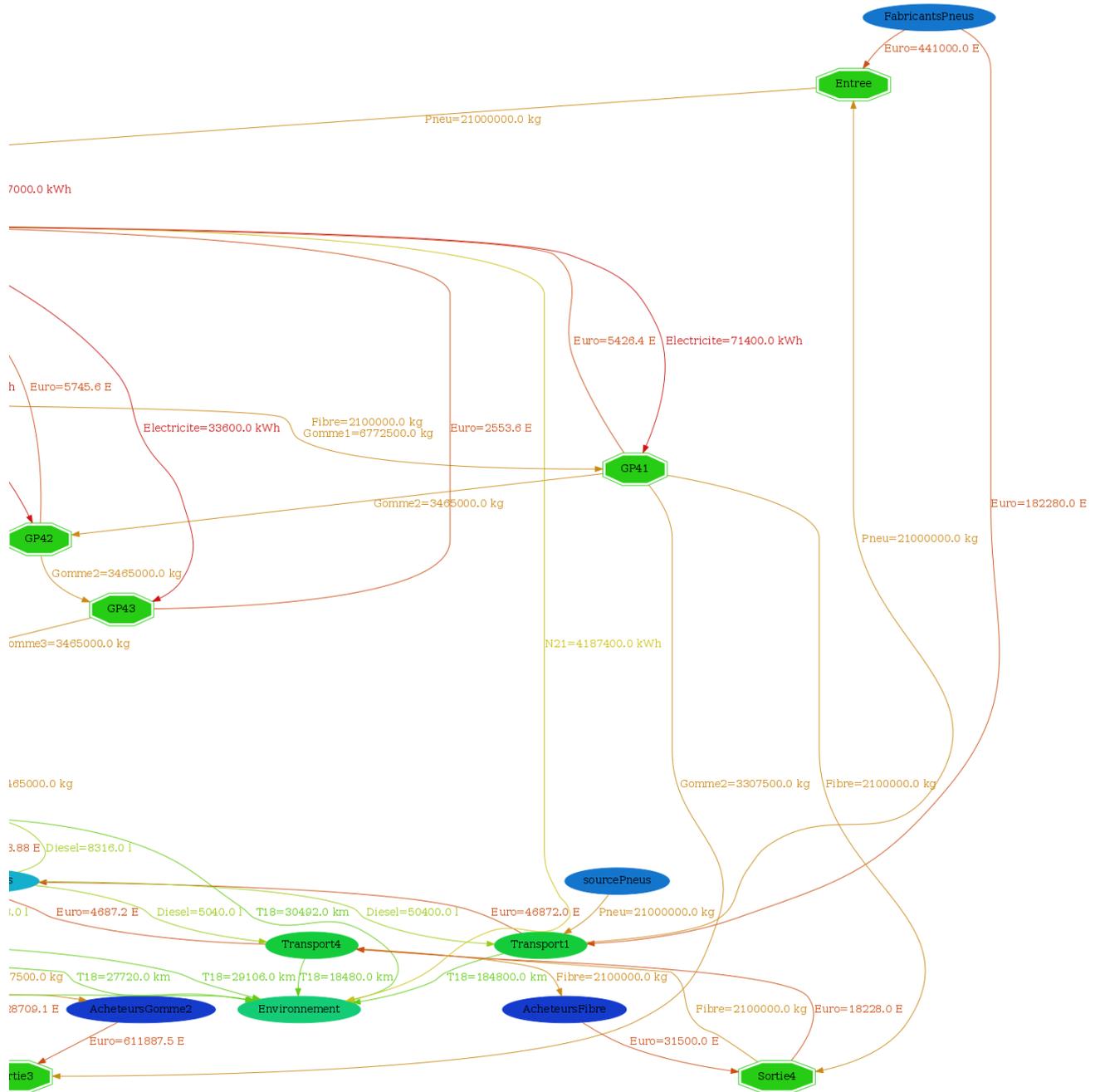
FIGURE 7.3- REPRÉSENTATION DE L'ENSEMBLE DE LA SIMULATION AVEC LE CALCUL DES FLUX

Remarque 2 Dans cette partie, il ne s'agit pas d'évaluer les greffons développés, les méthodes utilisées ou les résultats obtenus. En effet, ces greffons sont une proposition correspondant aux indicateurs quantitatifs du Chapitre 3 et les méthodes utilisées ont été justifiées dans ce dernier. La forme des résultats obtenus (présentation) n'est ici encore qu'une proposition qui s'inspire de travaux, livres ou discussions¹¹. Enfin, l'étude des résultats obtenus n'a peu d'intérêt que c'est un cas d'étude servant à la validation de l'outil. Par conséquent le but de cette partie est de montrer que la méthodologie fonctionne et qu'il est possible de réaliser des greffons pour évaluer des trajectoires.

Évaluation économique du projet Dans cette première évaluation nous réalisons l'étude de la nouvelle trajectoire développée d'un point de vue financier. Cette étude porte sur le système principal *Usine* et comprend donc les deux simulations (celle modélisant la phase d'investissement et celle modélisant la phase de production supposée constante dans le temps).

11. Nous remercions M. Guillaume Buset pour la suggestion de présentation de la partie environnementale

7.2. ÉVALUATION DE L'OUTIL DE MODÉLISATION ET D'ÉVALUATION DES TRAJECTOIRES



Quelques choix ont été réalisés. Ainsi, la durée d'amortissement est fixée à 15 ans et la méthode de calcul se base sur un amortissement économique constant dit aux fonds d'amortissement (sinking fund method, Chauvel p174). Le tableau 7.4 montre le résultat obtenu restreint aux valeurs principales de l'analyse (le greffon calcul l'ensemble des valeurs du plan d'affaire).

CHAPITRE 7. ANALYSE, ÉVALUATION ET COMMENTAIRES SUR LA RÉALISATION

unité : euro	2014	2015	2016	...	2044
Total investissement	17277144	0	0	...	0
Chiffre d affaire	0	3150000	3150000	...	3150000
Total frais opératoire	-0	-500522	-500522	...	-500522
EBE	0	2649477	2649477	...	2649477
Amortissement	0	583286	583286	...	0
Cash flow	0	1571997	1571997	...	1766406
VAN	-17277144	-15780003	-14354155	...	7858953

TABLEAU 7.4- RÉSULTAT DE L'ANALYSE ÉCONOMIQUE DU SYSTÈME *USINE*. LES ANNÉES 2017 À 2033 SONT SIMILAIRES SAUF POUR L'AMORTISSEMENT QUI SE TERMINE 15 ANS PLUS TARD EN 2029 ET LA VAN QUI PASSE EN POSITIF 16 ANS PLUS TARD

On peut voir l'évolution de la VAN sur la figure 7.4 générée par le module d'évaluation. La forme croissante est assez linéaire du fait de la constance dans la production et d'un amortissement constant sur les quinze premières années de la production.

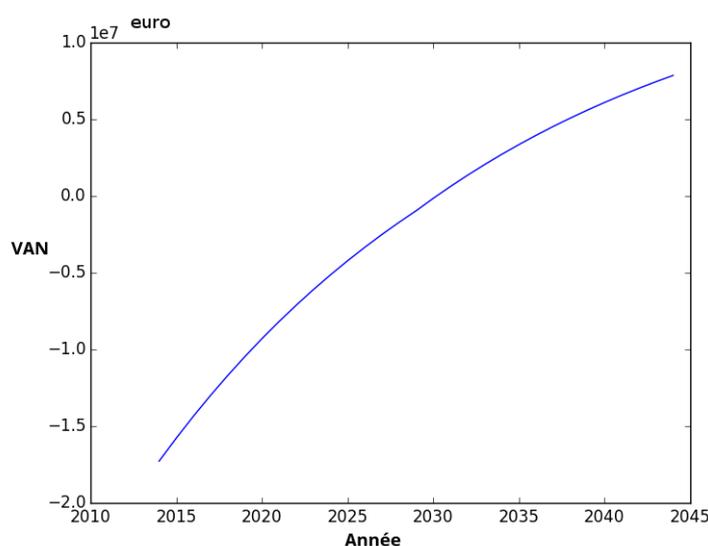


FIGURE 7.4- TRACÉ DE LA VAN RÉALISÉ PAR LE GREFFON

Évaluation environnementale de la nouvelle activité L'évaluation environnementale a été réalisée sur l'ensemble du modèle, c'est-à-dire sur le second système créé regroupant l'ensemble des entités. Le choix se justifie par le fait qu'il s'agit de mesurer l'impact généré par la nouvelle activité et non pas uniquement celui de l'usine (même si cette analyse peut être effectuée). Le module d'évaluation implémenté est assez simple puisqu'il se limite à la récupération des flux de type *émissions* puis, grâce à une base de données réalisée sous Zodb¹² contenant la base de donnée EcoCost¹³, calcule la valeur EcoCost pour chaque type de flux (Fig. 7.5 et Fig. 7.6). Dans cette modélisation, deux types d'impact « *EcoCost* » ont été pris en compte :

- L'impact provenant de l'utilisation de chaque transporteurs
- L'impact de la production d'électricité

On remarque ici encore l'importance du choix de modélisation. En effet, il aurait été possible de diviser l'impact des transporteurs par le nombre de substances émises par la consommation de diesel des camions (en faisant l'hypothèse que la principale source d'émissions est cette dernière). Ceci aurait pour avantage, d'une part de mesurer l'impact EcoCost global, mais aussi de déterminer les émissions polluantes, leurs nombres et leurs types. De même, il est possible de partager les émissions liées à la consommation électrique sur les différentes entités de production. Ici encore le résultat doit être le même, mais cette seconde option à l'avantage de souligner l'importance de certains procédés sur l'impact global la trajectoire.

Les résultats détaillés se trouvent dans le Tableau 7.5.

12. <http://www.zodb.org/en/latest/>, Zodb est sous licence Zope Public License 2.1 <https://pypi.python.org/pypi/ZODB#license> considérée comme libre et compatible avec la GPL <https://www.gnu.org/philosophy/license-list.html#Zope>

13. <http://www.ecocostsvalue.com/EVR/model/theory/subject/5-data.html>

7.2. ÉVALUATION DE L'OUTIL DE MODÉLISATION ET D'ÉVALUATION DES TRAJECTOIRES

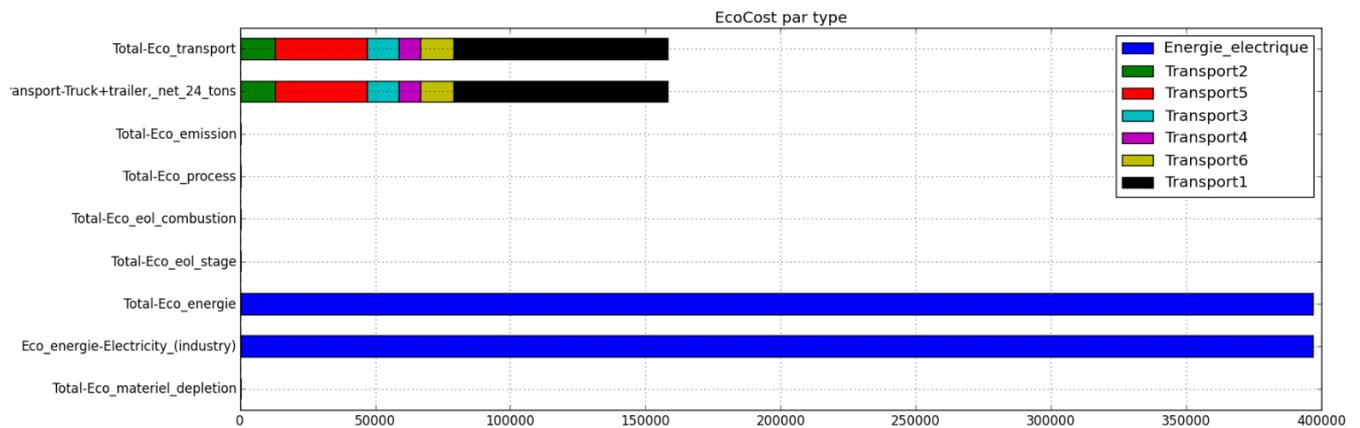


FIGURE 7.5- EcoCOST PAR TYPE ET PAR SOURCE

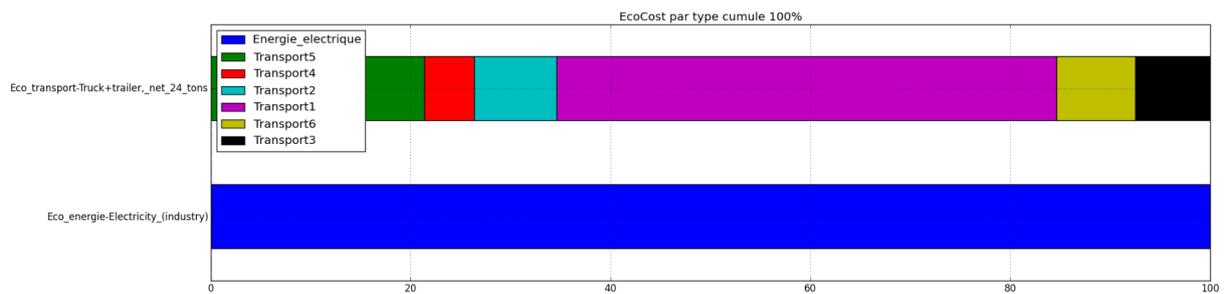


FIGURE 7.6- EcoCOST PAR TYPE ET PAR SOURCE EN POURCENTAGE CUMULÉ

Évaluation sociale de la nouvelle activité Pour cette évaluation, il a été nécessaire d'alimenter certaines entités (celles représentant les sous-traitants du système usine) de paramètres tels que le chiffre d'affaires total, le nombre d'employés ou encore la position géographique de l'activité. En effet, au vu de la modélisation du système, le greffon développé est capable d'estimer le chiffre d'affaires d'un sous-traitant lié à l'activité grâce aux flux économiques provenant de l'usine. Néanmoins, il est impossible de déterminer les autres types de données, comme le nombre d'emplois directs ou le nombre d'habitants.

Le module développé se base sur le même principe que celui pour l'évaluation environnementale. Dans un premier temps, il récupère l'ensemble des données (paramètres) de chaque entité. Pour ce greffon, il est nécessaire de définir un système *Sous_traitants* qui représente l'ensemble de l'activité. Ainsi, le greffon est appliqué sur le système *Usine* qui représentera les emplois directs. Le reste, c'est-à-dire les entités du système *Sous_traitants* qui n'appartiennent pas à *Usine*, seront considérés comme des emplois indirects.

Les résultats obtenus sont détaillés dans le Tableau 7.6. Une représentation graphique de la création d'emplois estimée par type et par zone géographique se trouve sur la Figure 7.7. La pertinence des résultats dépend des paramètres de chaque entité. Ainsi, dans l'exemple que nous nous sommes proposés de réaliser, il y a une grande différence entre le nombre d'emplois directs et indirects qui peut provenir d'une mauvaise estimation de certains paramètres. Néanmoins, cet exemple permet bien de montrer que l'ensemble du système d'évaluation fonctionne sur une modélisation de nouvelle activité.

CHAPITRE 7. ANALYSE, ÉVALUATION ET COMMENTAIRES SUR LA RÉALISATION

	Bordeaux	Carcassonne	Indefini	Lyon	Montpellier	Toulouse	Total
Full-AcheteursFer	0	0	0	0	0	0	0.0
Full-Transport5	0	0	0	69.2	0	0	69.2
Full-Energie_electrique	0	0	0	0	0	0	0.0
Full-sourcePneus	0	0	0	0	0	0	0.0
Full-FabricantsPneus	0	0	0	0	0	0	0.0
Full-AcheteursGomme1	0	0	0	0	0	0	0.0
Full-AcheteursGomme2	0	0	0	0	0	0	0.0
Full-AcheteursGomme3	0	0	0	0	0	0	0.0
Full-Transport6	0	0	0	0	31.5	0	31.5
Full-AcheteursFibre	0	0	0	0	0	0	0.0
Full-Transport4	13.3	0	0	0	0	0	13.3
Full-Transport3	0	12.6	0	0	0	0	12.6
Full-Transport2	0	0	0	0	0	29.8	29.8
Full-Transport1	0	0	0	0	0	0	0.0
Total-Full	13.3	12.6	0	69.2	31.5	29.8	156.4
Usine-Entree	0	0	0	0	0	0	0.0
Usine-GP41	0	0	0	0	0	1	1.0
Usine-Classification	0	0	0	0	0	1	1.0
Usine-GP43	0	0	0	0	0	0	0.0
Usine-GP42	0	0	0	0	0	0	0.0
Usine-Sortie1	0	0	0	0	0	0	0.0
Usine-Sortie3	0	0	0	0	0	0	0.0
Usine-Sortie2	0	0	0	0	0	0	0.0
Usine-Sortie5	0	0	0	0	0	0	0.0
Usine-Sortie4	0	0	0	0	0	0	0.0
Usine-GP1	0	0	0	0	0	5	5.0
Usine-GP2	0	0	0	0	0	3	3.0
Usine-GP3	0	0	0	0	0	2	2.0
Total-Usine	0	0	0	0	0	12	12.0
TOTAL D&I	13.3	12.6	0	69.2	31.5	41.8	168.4
INDUITS	9.921	9.570	0	52.208	24.170	95.871	0.0
TOTAL	23.221	22.170	0	121.408	55.670	137.671	168.4

TABLEAU 7.6- RÉSULTAT DÉTAILLÉ DE L'ÉVALUATION SOCIALE DE LA NOUVELLE ACTIVITÉ

7.2. ÉVALUATION DE L'OUTIL DE MODÉLISATION ET D'ÉVALUATION DES TRAJECTOIRES

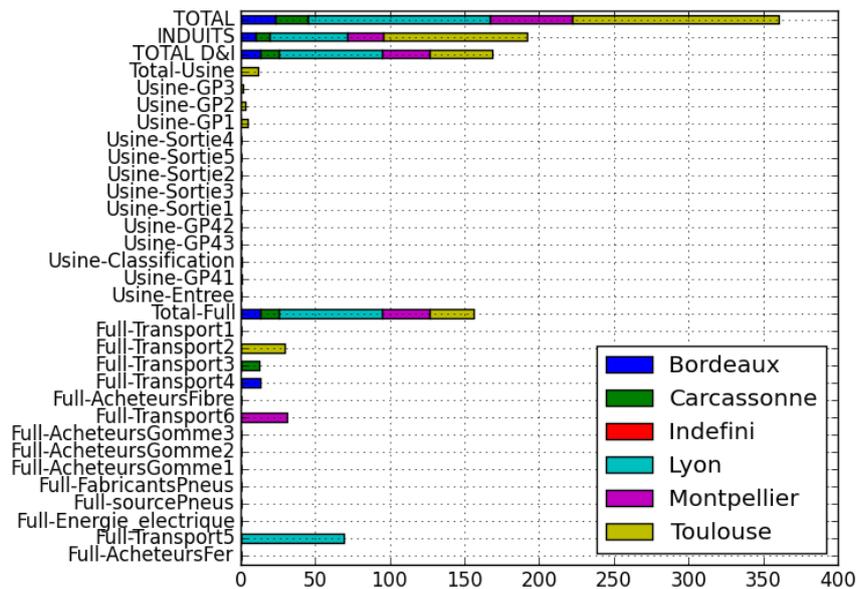


FIGURE 7.7- RÉPARTITION DES EMPLOIS DIRECTS, INDIRECTS ET INDUITS PAR ZONE ET ACTIVITÉ

7.2.4 CONCLUSION

Dans cette partie de l'évaluation, nous avons montré que le second outil proposé, qui a pour but la réalisation d'une modélisation d'une activité puis son évaluation par différents modules, a été validé. Il permet en effet de modéliser des activités et d'estimer les flux entre les entités qui la composent. De plus, l'utilisation de greffons permet de réaliser des études ou des évaluations sur les résultats de la simulation. Nous rappelons ici quelques points importants :

- La possibilité de créer des classes d'entités qui pourront générer des entités qui par la suite seront utilisables et modifiables.
- La possibilité de modéliser n'importe quel type de flux qu'il soit matériel ou non.
- L'utilisation de solveurs non intégrés au système offrant à l'utilisateur de sélectionner celui qui convient le mieux.
- Le système de greffons/solveurs qui permet une personnalisation du système. Ainsi, il est possible d'avoir plusieurs modules réalisant la même chose mais de manière différente.

De manière plus générale, nous avons montré que l'ensemble des objectifs fixés à la partie 7.2.1 sont réalisables et par conséquent que nous avons bien créé un outil modélisant et évaluant des activités et, plus particulièrement, de nouvelles trajectoires de valorisation pour les déchets.

Nous soulignons ici deux points importants qui peuvent être, par la suite, améliorés :

- Le *parser*, c'est-à-dire l'élément que nous avons développé permettant de traduire les contraintes entrées par l'utilisateur sur chaque entité en un système d'équations compréhensibles pour les modules de type *solveurs* est actuellement limité. La raison vient du choix des premiers solveurs utilisés qui n'admettent que des certains types de contraintes. Ce point peut être facilement améliorable.
- Le nombre de solveurs qui est actuellement intégré (c'est-à-dire qui possèdent des modules utilisables) est limité. Néanmoins il est possible de rajouter ces modules (comme des interfaces) aisément en respectant la structuration imposée.

unité : Euros Eco-cost	Energie_electrique	Transport2	Transport5	Transport3	Transport4	Transport6	Transport1	Total
Total-Eco_materiel_depletion	0	0	0	0	0	0	0	0
Eco_energie-Electricity_(industry)	396965	0	0	0	0	0	0	396965
Total-Eco_energie	396965	0	0	0	0	0	0	396965
Total-Eco_eol_stage	0	0	0	0	0	0	0	0
Total-Eco_eol_combustion	0	0	0	0	0	0	0	0
Total-Eco_process	0	0	0	0	0	0	0	0
Total-Eco_emission	0	0	0	0	0	0	0	0
Eco_transport-Truck+trailer,_net_24_tons	0	13050	33812	11864	7909	12457	79094	158188
Total-Eco_transport	0	13050	33812	11864	7909	12457	79094	158188

TABLEAU 7.5- RÉSULTATS OBTENU PAR L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE BASÉE SUR ECOCOST DE LA NOUVELLE ACTIVITÉ

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

C'est l'incertitude qui nous charme. Tout devient merveilleux
dans la brume

LE PORTRAIT DE DORIAN GRAY – OSCAR WILDE –

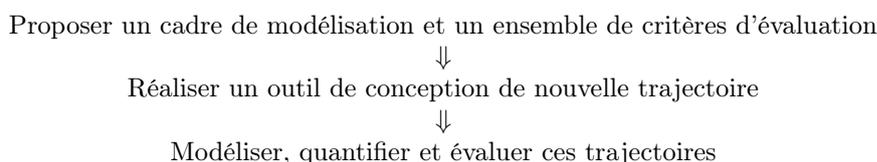
8.1 CONCLUSIONS SUR L'ENSEMBLE DES SUJETS ABORDÉS PAR LA THÈSE



Le travail réalisé dans cette thèse a pour objectif de traiter la problématique de la gestion des déchets. Plusieurs solutions générales ont été proposées dont une des plus pertinentes consiste à redonner de la valeur à ces déchets. Cette valorisation soulève deux questions principales :

1. En quoi revaloriser un déchet, c'est-à-dire comme arriver à lui redonner ou en extraire de la valeur (En quoi?) ?
2. Par quels moyens peut-on lui redonner de la valeur, autrement dit, comment peut-on le transformer pour en tirer une plus-value (Comment?) ?

Cette thèse vise à proposer une méthodologie et des outils permettant de répondre à une partie de ces questions. Pour ce faire, la stratégie employée divise le problème en trois parties :



Dans ce qui suit, nous allons rappeler les principales démarches proposées dans chaque chapitre de cette thèse et en rappeler les principales conclusions obtenues.

8.1.1 INTRODUCTION ET ÉLÉMENTS DE LA LITTÉRATURE

La partie **Introduction** met en contexte cette thèse. Elle décrit dans un premier temps la situation actuelle sur la valorisation des déchets dans la société et introduit progressivement la problématique de la thèse. Plus globalement, cette partie apporte les éléments justifiants la thèse et l'ancre dans un contexte réel. De ce fait, elle présente dans un premier temps les raisons qui justifient de s'interroger sur cette thématique, à savoir :

- La diminution des coûts
- La réduction de l'impact sur l'environnement
- L'amointrissement des pertes de matières premières et plus particulièrement des matières non renouvelables

Au travers de ces points, elle vise à déplacer la situation actuelle qui, pour encore une grande majorité de déchet se base sur une ligne de vie *du berceau à la tombe*¹, à un cycle de vie qualifié comme *du berceau au berceau*².

La partie **État de l'art des thèmes abordés** propose une étude sur le contexte du problème dans la littérature scientifique puis, un état de l'art sur quelques méthodes d'intelligence artificielle dont certaines serviront à la construction de la méthodologie détaillée dans la suite de l'étude. Elle présente aussi certaines recherches qui

1. cradle to grave
2. cradle to cradle

CHAPITRE 8. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

ont été menées et qui visent à résoudre tout ou une partie de la problématique soulevée. Elle introduit également certains concepts qui se révèlent être des éléments clés, par exemple : les notions de similarités et de raisonnement à partir de cas **RàPC**. De plus, une fois les définitions posées, cette partie soulève certains points intéressants, parfois problématiques et contradictoires, qui ont été identifiés par la communauté scientifique.

8.1.2 CADRE DE MODÉLISATION ET CHOIX DES CRITÈRES D'ÉVALUATION

L'objet de la partie **Modélisation des trajectoires de valorisation des déchets** est de présenter la modélisation des trajectoires de valorisation, et de détailler les critères choisis pour évaluer puis choisir la ou les trajectoires qui répondent aux objectifs du décideur. Ainsi, une première partie est constituée par une explication du besoin de modélisation puis tente de définir ce qu'est une trajectoire de valorisation. Par la suite, nous proposons un cadre de modélisation basé sur deux éléments : les blocs qui permettent de modéliser des processus non divisibles, et les systèmes qui regroupent des blocs ou d'autres systèmes. Ces groupes modélisent des structures logiques dans la trajectoire ou encore réalisent des descriptions de cette dernière sous différents niveaux (granularité). Ensuite, cette partie présente les indicateurs choisis pour évaluer une trajectoire de valorisation à savoir : économique, environnemental, social et développement soutenable. En clôture de ce chapitre, un exemple concret est présenté où ces indicateurs sont calculés. Cet exemple permet de mettre en exergue la difficulté de mise en œuvre de ces derniers du fait de l'importante quantité de données qu'il est nécessaire de posséder, et qui de plus sont parfois compliquées à obtenir.

Dans la partie intitulée **Utilisation des données économiques pour l'évaluation du nombre d'emplois d'une activité**, nous faisons une étude sur différentes méthodes permettant d'estimer le nombre d'emplois à partir de données économiques simples. Tout d'abord, le nombre d'emplois générés par une activité a été décomposé en trois catégories : emplois directs, indirects et induits. Ainsi, dans une première partie consacrée à l'étude des emplois directs et indirects, nous proposons plusieurs formules permettant de lier, après hypothèses, le nombre d'employés avec des éléments tels que l'excédant brut d'exploitation (**EBE**), la valeur ajoutée (**VA**) ou encore le chiffre d'affaires (**CA**). Cette étude est réalisée avec plusieurs formules proposées et différentes méthodes, comme la régression linéaire, l'utilisation de solveurs évolutionnistes et l'emploi de réseaux de neurones. Le résultat de cette étude montre qu'il est particulièrement difficile de déduire cet indicateur social uniquement avec le chiffre d'affaires alors qu'une formule basée avec l'**EBE** et la **VA** donne de meilleures estimations. Enfin, nous proposons de simplifier certaines formules comme celle du calcul du nombre d'emplois induits en utilisant notamment la part du **PIB** liée à la consommation des ménages et qui est une donnée plus facile à obtenir que celle de la formule originale.

Principales contributions :

- a) Réalisation d'un cadre³ de modélisation pour les trajectoires de valorisation. Ce cadre est réalisé avec deux principaux éléments : les blocs et les systèmes. Ils permettent une modélisation multi-échelle et sous plusieurs points de vue.
- b) Sélection de quatre indicateurs pour l'évaluation puis la sélection des trajectoires. Trois d'entre eux sont quantitatifs : économique, environnemental et social. Le quatrième est qualitatif permettant la hiérarchisation des méthodes selon une politique de développement soutenable.
- c) Proposition d'une méthode pour le calcul du nombre d'emplois total créés par une nouvelle activité. Le chiffre d'affaires, la valeur ajoutée et l'excédent brut d'exploitation sont utilisés à cette fin.

8.1.3 GÉNÉRATION DE NOUVELLES TRAJECTOIRES

Le problème de la création d'une méthode et d'un outil permettant la génération de nouvelles trajectoires est abordée en utilisant comme point de référence des trajectoires existantes. Cette partie constitue la partie centrale de la thèse. Après une rapide présentation du **RàPC**, nous introduisons notre définition du cas qui est particulière puisque les cas sont générés dynamiquement en fonction des requêtes soumises au système. Elle répond aux problèmes de représentation de la connaissance de la problématique. Cette génération repose sur l'emploi de mécanismes d'inférences permettant de définir l'ensemble problème/solution. La mesure de similarité qui est une partie essentielle de système **RàPC** doit être repensée pour s'adapter à notre représentation des cas. En effet, nous proposons une méthode de mesure qui se base sur la création de *définitions communes* qui représentent la description d'un état qui lui-même est un sous-ensemble commun de la définition de deux autres états origines. Ces définitions sont réalisées par deux types de mécanismes qui sont les mécanismes

3. Deux cadres ont été réalisés, mais le premier n'a pas été pertinent pour l'ensemble de ce travail. Son existence provient du domaine du génie des procédés

8.1. CONCLUSIONS SUR L'ENSEMBLE DES SUJETS ABORDÉS PAR LA THÈSE

d'inférences et les mécanismes d'abstraction. Ces mécanismes s'appuient sur l'utilisation de taxonomies réalisant une hiérarchisation des concepts et par extension de la connaissance. Ces définitions communes permettent de réaliser une recherche de cas originale qui a l'avantage de prendre en compte les spécificités (pondérations) des différents types de problèmes que le système peut être amené à résoudre. De plus, elles permettent une grande flexibilité dans la représentation des états. Toujours dans cette partie théorique, nous décrivons ensuite le mécanisme de résolution de problèmes qui s'appuie sur une décomposition des problèmes en sous problèmes. Ce mécanisme peut être considéré comme récursif et s'appuie sur une taxonomie des relations. Enfin, et pour conclure cette section, nous expliquons brièvement la mise en place de la méthode au travers de la réalisation d'un outil développé sous Prolog et selon le principe **KISS**.

Principales contributions :

- a) Développement d'un système basé sur le raisonnement à partir de cas (RàPC) pour la création de nouvelles trajectoires de valorisation. Le développement de ce RàPC adaptatif a nécessité plusieurs éléments :
 - 1) Développement d'un système de représentation de la connaissance basé sur les réseaux sémantiques.
 - 2) Définition d'un *cas dynamique*, qui est un formalisme particulier de la connaissance en vue de la résolution de problème.
 - 3) Élaboration d'un système d'indexation et de recherche de similarité basé sur la logique.
 - 4) Introduction du principe de *fluidité*. Ce principe s'appuie sur différents mécanismes comme l'abstraction, la conceptualisation et plus généralement sur l'inférence sur les concepts afin d'étendre les raisonnements et de les adapter.
 - 5) Développement d'une méthodologie générale basée sur la récursivité permettant l'adaptation des solutions.
 - 6) Réalisation d'un prototype sous le paradigme de la programmation logique (SWI-Prolog).
- b) Développement d'un système de raisonnement à partir de cas générique : tous les problèmes qui peuvent être décrits sous forme $\acute{E}tat \rightarrow relation \rightarrow \acute{E}tat$ peuvent être pris en compte

8.1.4 MODÉLISER ET ESTIMER CES TRAJECTOIRES

Cette partie concerne la réalisation de l'outil pour la modélisation et l'évaluation de nouvelles trajectoires. En théorie, ce modèle peut être appliqué à n'importe quel type d'activité du moment qu'elle puisse être représentée comme un ensemble de blocs régis par des contraintes. Le langage choisi pour ce développement est le langage Python 2 sous le paradigme de la programmation orientée objet. Pour obtenir un outil à la fois efficace et évolutif, nous avons utilisé de la *méta-programmation*. Ceci a permis le développement d'une *méta-classe* permettant de générer des classes qui représenteront les opérations. Chaque élément de base est défini par un certain nombre d'entrées et de sorties et est régi par des règles afin de définir le comportement des flux entrants ou sortants. Toujours dans un souci de pérennité, le système accepte l'ajout de « greffons » qui sont des modules complémentaires permettant d'effectuer des tâches d'analyse et d'évaluation de la trajectoire étudiée. Nous avons développé trois modules complémentaires pour le calcul des indicateurs à savoir :

- Un module d'évaluation économique
- Un module d'évaluation environnementale
- Un module d'évaluation sociale

L'un des avantages de ce type de conception est qu'il est possible d'avoir plusieurs modules réalisant la même tâche (la même évaluation par exemple), mais de manière différente.

Principales contributions :

- a) Réalisation d'un outil permettant la modélisation puis l'évaluation des trajectoires. Ce dernier possède plusieurs caractéristiques :
 - 1) Utilisation du cadre de modélisation conçu.
 - 2) Mise en place d'un système de génération de blocs (entités) par l'utilisation de la méta-programmation.
 - 3) Utilisation de la programmation sous contraintes pour la description de chaque entité dans la modélisation.
 - 4) Développement d'un outil évolutif avec la possibilité d'ajout de greffons à l'application. Ces derniers permettent l'utilisation de solveurs externes et la mise en place d'outils pour le calcul des indicateurs.
 - 5) Développement de plusieurs greffons solveurs (interfaces) et de trois greffons d'évaluations. Ces derniers calculent les indicateurs précédemment sélectionnés.

CHAPITRE 8. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

8.1.5 TESTER LES CAPACITÉS DE LA MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE

La dernière partie de cette thèse est consacrée à l'analyse et l'évaluation des méthodes et outils proposés. Cette partie se scinde en deux ensembles. La première phase de l'étude se concentre sur l'analyse du comportement de l'outil de génération de nouvelles trajectoires. Les différents tests réalisés cherchent à valider les points suivants :

1. Remémoration de cas simple
2. Remémoration de cas avec inférences
3. Capacité d'abstraction
4. Robustesse de la recherche de cas
5. Capacité de conceptualisation

La seconde étude s'intéressa à l'impact du niveau de description des relations sur la résolution du système. Cette étude a principalement révélé que le système nécessite plusieurs cas pour une même relation pour pouvoir proposer une solution. Le dernier test visait à observer l'impact du paramétrage du nombre de couches lors de la génération des structures de définitions communes. Suite à cette étude, nous n'avons pas pu déterminer la meilleure configuration. L'ensemble de ces tests a démontré, que la méthodologie proposée offre une grande flexibilité quant à la représentation et à l'utilisation de la connaissance. Il montre aussi les limites de la méthodologie, comme la nécessité de posséder plusieurs cas similaires, et les limites du prototype conçu pour ces tests.

La seconde phase vise à vérifier que l'outil de modélisation et d'évaluation peut être utilisé pour des trajectoires de valorisation et par extension pour une quelconque activité. Nous avons pris comme cas d'étude une trajectoire de valorisation de pneus usés transformés en poudrettes de différentes tailles. Ce cas d'étude a permis de montrer que l'outil développé permet de modéliser des activités. La dernière phase de l'étude concerne l'évaluation de la trajectoire à l'aide des trois greffons permettant une évaluation économique, environnementale et sociale. Par là même, le fonctionnement du mécanisme de greffons a été validé.

8.2 DISCUSSION

Dans cette partie nous réalisons une critique du travail effectué. Dans un premier temps nous discutons de chaque partie prise séparément puis, nous traiterons l'ensemble de la méthodologie abordée dans cette thèse.

8.2.1 DISCUSSION SUR LA PARTIE MODÉLISATION

Parmi les indicateurs choisis, plusieurs éléments sont discutables. Dans la partie économique le choix de certains paramètres ou certaines fonctions de calcul peut impacter cet indicateur et par conséquent modifier la prise de position. La partie environnementale contient le plus d'interrogations. Ainsi, le choix pour évaluer cet impact s'est porté sur l'*EcoCost* qui présente l'avantage de réduire l'ensemble des valeurs d'émissions à une même unité. Plusieurs critiques peuvent être néanmoins réalisées. Premièrement, cet indicateur n'est pas destiné par essence à être utilisé pour réaliser des évaluations et analyses environnementales, mais bien plutôt comme élément de sélection pour les décideurs. Le fait de tout regrouper à une seule valeur simplifie l'analyse et la comparaison, mais cette agrégation implique une perte d'information intéressante comme le type d'émissions, sa quantité etc. Certaines définitions de cette base renvoient à d'autres bases telle qu'Impact 2000, qu'il serait nécessaire de posséder. Enfin, la partie sociale est, dans cette thèse, limitée au nombre d'emplois créés. Outre la difficulté d'estimation de ces indicateurs, la principale question que l'on peut se poser ici est son intérêt. En effet du point de vue économique le nombre de travailleurs directs se traduit par une ligne de coût représentant la masse salariale, ce qui par conséquent, détériore les indicateurs économiques. Il est possible de débattre sur l'importance de la création d'emplois dans la société. Néanmoins, nous ne pouvons que constater que cette considération provient d'un parti pris sur la question.

8.2.2 DISCUSSION SUR LA PARTIE GÉNÉRATION DE TRAJECTOIRE

En ce qui concerne le RàPC, la mise en place de structure de description non définie offre une très grande liberté. Cette liberté peut se traduire par des difficultés lors du traitement de l'information. Ainsi, un des principaux points discutables reste la sélection aléatoire possible du cas source et par conséquent le fait que le système devienne non déterministe. Ainsi, lors de la phase d'estimation du résultat de transformation, une étape d'appariement est nécessaire et peut, dans certain cas, générer des résultats surprenants par un appariement qui ne convient pas à la transformation. De plus, la méthode proposée pour le stockage et l'indexation puis la sélection des cas sources pose des problèmes majeurs. Ainsi, pour une configuration de trois couches à 100%, pour 45 états introduits dans la base, environ 5000 *définitions communes* ont été générées. Or, ceci provoque une augmentation exponentielle du temps d'apprentissage lors de l'introduction dans la base de nouveaux cas

et une forte augmentation du nombre de données dans le système, ralentissant ou bloquant ce dernier. Enfin, ce système repose pour beaucoup sur l'utilisation de mécanismes d'inférences et sur la définition de taxonomies. La première remarque est qu'une taxonomie sur des concepts représente déjà une forme de connaissance sujette à interprétation. Or, lors de la recherche de similarité, nous mettons en avant le fait que notre système n'a pas besoin de connaissances sur les *distances* entre cas pour fonctionner, mais s'appuie sur des déductions logiques dont certaines sont basées sur les taxonomies. Par conséquent, bien que notre argument soit valable, il est néanmoins nécessaire de moduler son ampleur.

8.2.3 DISCUSSION SUR LA PARTIE MODÉLISATION ET ÉVALUATION

L'outil de modélisation a quant à lui certaines limites. Ainsi, nous pouvons remarquer qu'un des points limitants de cet outil est le nombre de contraintes que l'on peut modéliser dans les entités. En effet, deux éléments sont à prendre en compte. Le premier est la limitation du *parser* qui a été implémenté et qui permet de traduire les contraintes au niveau entité en contraintes systèmes et permettre par la suite leur compréhension par le solveur choisi⁴. Le deuxième élément est le solveur lui-même qui autorise un nombre limité de contraintes. Enfin, la dernière question que l'on peut se poser est l'utilité ici de la base de données orientée objets **Zodb**. En effet, bien que la possibilité de décrire un type d'opération (génération de classe par la méta-classe) et de pouvoir s'en servir dans notre modèle n'est pas discutable, il est toutefois possible de conserver ces éléments de deux manières. La première est comme nous l'avons fait, la seconde serait l'intégration au système de ces classes d'entités avec un modèle de greffons où des fichiers Python seraient déposés. Cette dernière méthode a l'avantage de ne pas nécessiter d'autre outil que Python mais demande de passer par une phase de programmation. La méthode choisie permet de s'affranchir de cette phase de programmation dans le cas où une interface graphique⁵ serait développée.

8.2.4 DISCUSSION SUR L'ENSEMBLE DES TROIS PARTIES

Ici, nous allons analyser l'ensemble des travaux réalisés dans la thèse, les considérer comme un tout et voir les limites ou remarques qui pourraient être identifiées. L'ensemble de la thèse, qui rappelons le a pour but de tenter de proposer de nouvelles voies de valorisation des déchets, s'articule autour de trois principaux axes. Le premier est la modélisation et l'évaluation théorique de trajectoires. Cette partie vise à fournir un cadre permettant de décrire ces dernières sous un ensemble de structures communes permettant d'obtenir des descriptions homogènes. Le second axe est le développement d'un outil et donc d'un modèle dont le but est de pouvoir générer de nouvelles trajectoires. Enfin, le troisième est la modélisation à proprement dite et l'évaluation des trajectoires. Par conséquent, l'ensemble de la thèse forme, aux premiers abords, un ensemble cohérent qui suit une certaine logique :

Étape	Permet	Fournit	À qui ?
Cadre de modélisation et choix des critères	De décrire des trajectoires de manière uniforme	Des cas unifiés	
	De fournir les indicateurs et la manière de les calculer	Des indicateurs	RàPC
RàPC	La génération de nouvelles trajectoires pour les déchets	Des listes successives d'opérations (transformations)	Outil de modélisation et d'évaluation
Outil de modélisation et d'évaluation	La modélisation d'une trajectoire	Les valeurs des flux et des indicateurs	Utilisateur

TABLEAU 8.1- RELATIONS ENTRE LES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS DE CETTE THÈSE

Plusieurs remarques peuvent être faites quant à l'homogénéité de l'ensemble et plus précisément sur la continuité. Le principal point est le « fossé » qu'il y a entre la réponse fournie par le générateur de trajectoire et les besoins de l'outil de modélisation. En effet, le premier ne fournit qu'une liste d'étapes, alors que le second a besoin d'équipements concrets et de nombreuses données telles que :

- La liste des équipements dimensionnés

4. Un peu comme le ferai un langage de modélisation algébrique comme GNU mathprog <http://lpsolve.sourceforge.net/5.5/MathProg.htm>

5. Par opposition à l'utilisation du terminal

CHAPITRE 8. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

- Les investissements
- La position géographique des unités
- Le prix d'achat des matières premières et le prix de vente
- ...

Ce que ne fournit pas le générateur. Néanmoins, il est possible d'implémenter dans le système des bases de cas où un état décrirait le produit d'entrée, une relation représenterait l'opération de transformation fournie par le générateur et l'état d'arrivée décrirait l'équipement correspondant, ce qui permettrait de fournir une liste des principaux équipements nécessaires à la réalisation de la trajectoire. Malheureusement, les autres données, tels que le dimensionnement, le calcul d'investissement etc, doivent être spécifiées par l'utilisateur. Ce point montre qu'il manque une étape dans le processus de génération de nouvelles trajectoires. Cependant, dans la partie **Perspectives 8.3.3**, nous proposons une approche qui pourrait combler, du moins partiellement, l'écart sur les données.

8.3 PERSPECTIVES

Dans cette partie, nous proposons certaines réflexions qui peuvent conduire à une amélioration de la réalisation ou à de nouvelles approches qui pourraient enrichir notre proposition. Après une première perspective qui découle directement de ce travail, nous proposons deux perspectives d'études, l'une portant sur l'amélioration du générateur de nouvelles trajectoires basé sur un système RàPC, l'autre sur le développement d'un modèle et d'un outil visant à combler le déficit d'information entre le générateur de trajectoires et l'outil d'évaluation. Dans un second temps, nous proposons deux perspectives qui vont beaucoup plus loin que les limites de cette thèse et qui pourraient être des projets à plus long terme.

8.3.1 APPLICATION DE LA MÉTHODE SUR UN CAS RÉEL

La première perspective qui suit directement ce travail de thèse consiste en sa mise en application avec des problèmes réels et par conséquent avec une base de données plus conséquente. Elle suppose donc la réalisation d'un outil basé sur la méthode proposée en vue d'une telle réalisation. En effet, nous soulignons deux points importants qui ont été expliqués dans ce manuscrit. Le premier est que le prototype de RàPC, développé sous la philosophie KISS, n'a été conçu que pour la réalisation des tests afin de valider la méthodologie proposée et uniquement pour une seule structure de cas. Il n'a donc pas pour objectif de générer de nouvelles trajectoires de valorisation réelles et complexes. Le second point est le problème épineux de la mémorisation et de l'indexation des cas dans le système qui produit une augmentation exponentielle de la connaissance ralentissant ou mettant en échec l'outil. Il s'agira donc, avant d'envisager d'utiliser cette méthode à plus grande échelle, de résoudre ces problèmes de manière théorique puis d'implémenter la solution.

8.3.2 AMÉLIORATION DU SYSTÈME DE GÉNÉRATION DE NOUVELLES TRAJECTOIRES

L'outil développé se base sur des mécanismes d'inférences permettant, entre autre, de réaliser des processus de conceptualisation et d'abstraction. Ces derniers s'appuient sur l'utilisation de taxonomies qui permettent une représentation de la connaissance. Nous proposons deux approches d'amélioration.

La première est de remplacer les taxonomies, qui nous le rappelons sont des ontologies limitées, par des ontologies complètes. Ce point permettrait d'une part d'enrichir la connaissance, et d'autre part de faire des raisonnements plus poussés permettant ainsi une amélioration du processus d'analogie que l'on retrouve dans la recherche de similarité ou lors de l'appariement. Ce point soulève la nécessité de développer un ensemble de mécanismes d'inférences basé sur des règles qui auraient du sens. Par exemple, un raisonnement qui pourrait être développé est le suivant. Supposons qu'un objet soit défini comme étant composé par d'autres éléments composés de bois, le raisonnement pourrait être :

L'objet est composé d'objets en bois \Rightarrow L'objet est en bois

Ce que ne fait pas actuellement le système développé. Néanmoins, que se passerait-il si seulement une partie des objets est en bois? Avec cette question, nous souhaitons démontrer la complexité de la tâche car elle suppose une maîtrise complète des déductions qui peuvent être faites.

La seconde approche vise à améliorer le mécanisme d'apprentissage des cas. Ce dernier suppose la création de *définitions communes* qui sont des descriptions d'états. Dans la partie théorique, nous avons amélioré la gestion de la connaissance en évitant d'avoir plusieurs fois la même structure *Objet \rightarrow relation \rightarrow concept* lorsqu'elle est partagée par plusieurs états, mais rien n'est mis en œuvre pour les définitions générées. Une perspective

serait d'améliorer la mémorisation de ces éléments, en supprimant automatiquement les doublons, mais aussi en permettant de concevoir des réseaux qui, après sollicitation s'adaptent pour renvoyer la définition correspondante. Pour illustrer l'idée, il s'agirait d'un réseau conceptuel où les liens entre les objets et d'autres objets ou concepts peuvent être actifs ou non selon la définition demandée.

8.3.3 RÉSOLUTION DE LA PARTIE MANQUANTE \Rightarrow MÉTHODE PERMETTANT LA GÉNÉRATION D'UNE INSTALLATION COHÉRENTE ET RÉALISTE

Comme nous l'avons vu, il existe un « fossé » entre les données fournies par le générateur de trajectoires et celles requises par l'outil de modélisation et d'évaluation. Nous proposons une approche pour le combler. Notre idée est, comme nous le suggérons dans cette thèse, de fournir en premier lieu une suite d'opérations et une liste d'équipements (ou de types d'équipements) permettant de réaliser cette trajectoire.

Une fois que la configuration générale du procédé et la liste des principaux équipements ont été trouvées, nous pensons qu'il serait intéressant de passer par une recherche configurationnelle qui comporterait l'ensemble des équipements décrits sous forme de contraintes. Ainsi, outre sa fonctionnalité, chaque équipement pourrait fournir des conditions d'entrées et de sorties des flux. Ces contraintes devront être mixtes. La démarche globale serait la suivante :

1. Les équipements principaux sont sélectionnés à partir de la liste fournie par le RàPC
2. Ces équipements sont ordonnés de tel sorte qu'ils respectent l'ordre d'opérations fourni par le RàPC
3. L'utilisation d'un solveur de contraintes mixtes serait utilisé pour :
 - Vérifier la cohérence de l'ensemble
 - Si besoin, proposer des équipements intermédiaires qui compléteront et finaliseront la ligne de production

La dernière phase qui vise à compléter la liste d'équipements pourrait être résolue de manière itérative.

Enfin, il est possible de faire deux types de réalisation. La première serait de créer un nouvel outil qui viendrait entre le RàPC et celui d'évaluation. La seconde serait d'intégrer cette partie à l'outil d'évaluation qui, rappelons le, utilise déjà la programmation par contraintes. De même, nous pouvons imaginer dans le même esprit d'enrichir les entités en leur permettant de calculer certaines données comme l'investissement ou le nombre d'emplois comme des paramètres. Il s'agit donc d'automatiser le dimensionnement des équipements et de calculer l'ensemble des données nécessaires à l'évaluation des trajectoires.

Néanmoins, quelle que soit la solution retenue, il faudra toujours l'intervention de l'utilisateur pour paramétrer le système. En effet, il est nécessaire de faire de nombreux choix, comme, un choix sur la configuration de la trajectoire, son emplacement, les prix de ventes etc, qu'ils nous semblent difficile à automatiser.

8.3.4 UTILISATION DE SYSTÈME MULTI-AGENTS POUR LA CRÉATION DE PROCESSUS

Nous avons vu qu'une des difficultés est de choisir les équipements permettant la réalisation concrète des procédés obtenus par l'outil de génération des trajectoires. Cette difficulté provient à la fois de la transition entre action et équipement, mais aussi repose sur un problème configurationnel. Outre l'approche par contraintes, une autre solution serait d'employer un système multi-agents collaboratifs où chaque agent réaliserait un procédé. Dans un premier temps, l'ensemble du système serait soumis à un besoin qui serait la transformation d'un objet en un autre. La perspective proposée consiste à obliger les agents à collaborer et à se reconfigurer. Le système s'arrêterait lors de l'émergence qui serait ici l'état du système où un processus de transformation serait atteint. De plus, on peut imaginer d'introduire des contraintes visant à exclure les configurations qui n'atteignent pas certains critères. Néanmoins, il s'agit de déterminer le comportement de ces agents (outre le procédé qu'il représente). On peut suggérer que le système s'appuie sur des « recettes » permettant de décrire les principales étapes de la transformation souhaitée.

8.3.5 DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE QUI TRANSCENDE LE RAISONNEMENT À PARTIR DE CAS

Comme nous l'avons vu, l'élément fondamental du raisonnement à partir de cas est le *Cas* qui suppose une séparation entre l'espace problème et l'espace solution. Ce type de système implique d'avoir à traiter des problèmes routiniers. Néanmoins, lors de la génération d'idée créative, l'utilisation de solutions d'autres domaines peut être intéressante. Ainsi, dans cette thèse, nous avons essayé de déstructurer le *Cas* afin que ce dernier puisse

CHAPITRE 8. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

être identifié par le système selon ses besoins. Les mécanismes autorisant la fluidité permettent de réaliser des analogies intéressantes. Néanmoins, la méthodologie permet cette fluidité uniquement avec la connaissance et non pas avec les étapes du RàPC. Une perspective serait de créer un système s'appuyant sur l'idée première du RàPC, à savoir la réutilisation de l'expérience pour la résolution de nouveaux problèmes, mais où son propre fonctionnement serait considéré comme de la connaissance. En d'autres termes, l'ensemble des mécanismes permettant la résolution du problème serait considéré comme de l'expérience, comme un *Cas* dans le RàPC classique. Afin d'arriver à un tel système, une approche serait de poursuivre l'idée développée dans cette thèse concernant la structuration de la connaissance, afin qu'elle puisse inclure des mécanismes propres au RàPC. Ainsi, la connaissance stockée pourrait être considérée comme « connaissance » ou comme « actions » pouvant être accomplies. L'intérêt d'un tel système serait : d'élargir la capacité du modèle développé, de rendre beaucoup flexible grâce à une adaptation du processus de résolution en fonction du problème soumis tout en utilisant l'ensemble de ses connaissances, et de permettre une remise en question de ses propres systèmes de raisonnement, afin de trouver « comment » résoudre un problème (puis le résoudre).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ADEME. Bilan environnemental sur les filières de recyclage : l'état des connaissances ACV.
- [2] ADEME. Collecte, tri, recyclage et valorisation des déchets.
- [3] ADEME. La logistique et le transport des déchets ménagers, agricoles et industriels. Technical report, 1997.
- [4] ADEME. Enquête collecte 2009 - la collecte des déchets par le service public en France. Technical report, 2012.
- [5] C.C. Aggarwal and P.S. Yu. On effective conceptual indexing and similarity search in text data. In *ICDM 2001, Proceedings IEEE International Conference on Data Mining, 2001*, pages 3–10, 2001.
- [6] G. Aissaoui, D. Genest, and S. Loiseau. Le modèle des cartes cognitives de graphes conceptuels : un modèle graphique d'aide à la prise de décision. *Actes 2 journées francophones Modèles Formels de l'Interaction (MFI)*, page 243–248, 2003.
- [7] James S. Albus. The engineering of mind. *Information Sciences*, 117(1–2) :1–18, July 1999.
- [8] J.S. Albus. Outline for a theory of intelligence. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 21(3) :473–509, June 1991.
- [9] Aliapur. Analyse du cycle de vie pour 9 voies de valorisation des pneus usagés non réutilisables. Technical report, June 2010.
- [10] Aliapur. Chiffres-clés - CA et coûts, 2012.
- [11] Aliapur. Rapport d'activité 2012. Technical report, 2012.
- [12] T. Amezquita, R. Hammond, M. Salazar, and B. Bras. Characterizing the remanufacturability of engineering systems. In *1995 ASME Advances in Design Automation Conference, DE*, volume 82, page 271–278, 1995.
- [13] ADEME AMORCE. Optimisation de la gestion des déchets municipaux : comment évaluer les impacts environnementaux au moyen de l'analyse de cycle de vie (acv). <http://www.ademe.fr/optimisation-gestion-dechets-municipaux-comment-evaluer-impacts-environnementaux-moyen-lanalyse> 2005.
- [14] John R. Anderson, Jon M. Fincham, and Scott Douglass. The role of examples and rules in the acquisition of a cognitive skill. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, 23(4) :932–945, 1997.
- [15] Maël Andrieu, Xavier Ghewy, Christian Mathery, and Doris Nicklaus. Lexique à l'usage des acteurs de la gestion des déchets. Technical report.
- [16] Charles-Henri d' Arcimoles. *Gestion financière de l'entreprise : analyse financière, méthodologie du diagnostic, gestion des investissements et des financements*. Vuibert, Paris, 2012.
- [17] D. Arnaud. L'écologie industrielle : Retour sur le mythe de l'innovation.
- [18] Association française des ingénieurs et techniciens d'estimation et de planification. *Estimation des coûts d'un projet industriel*. AFNOR, Paris, 1995.
- [19] Fadi Badra. *Extraction de connaissances d'adaptation en raisonnement partir de cas*. PhD thesis, Henri Poincaré– Nancy 1, Nancy, November 2009.
- [20] J. A. Bagnell, S. Kakade, A. Y. Ng, and J. Schneider. Policy search by dynamic programming. *Robotics Institute*, page 79, 2004.
- [21] M. Baziz. *Indexation conceptuelle/sémantique guidée par ontologie pour la recherche d'information*. PhD thesis, Thèse de Doctorat en informatique effectuée à l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT), 2005.

BIBLIOGRAPHIE

- [22] David Bellot. *Fusion de données avec des réseaux bayésiens pour la modélisation des systèmes dynamiques et son application en télémédecine*. PhD thesis, Henri Poincaré - Nancy 1, Nancy, November 2002.
- [23] Florence Le Ber, Jean Lieber, and Amedeo Napoli. Les systèmes à base de connaissances. *Encyclopédie de l'informatique et des systèmes d'information*, pages 1197–1208, 2006.
- [24] Ralph Bergmann and Wolfgang Wilke. On the role of abstraction in case-based reasoning. In Ian Smith and Boi Faltings, editors, *Advances in Case-Based Reasoning*, volume 1168 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 28–43. Springer Berlin / Heidelberg, 1996.
- [25] Gérard Bertolini. *Approche Socio-Economique des Déchets*. Ed. Techniques Ingénieur.
- [26] Gérard Bertolini. Les déchets : rebuts ou ressources? *Economie et statistique*, 258(1) :129–134, 1992.
- [27] J. C. Bertrand, H. Paula, J. Colin, M. R. Mario Plattes, and F. Joëlle Welfring. De l'analyse et la gestion des flux de matière et d'énergie à l'écoconception.
- [28] Gilles Bisson. La similarité : une notion symbolique/numérique.
- [29] Olivier Boiral and Jean Kabongo. Le management des savoirs au service de l'écologie industrielle. *Revue française de gestion*, 30(149) :173–191, April 2004.
- [30] G. Boothroyd and L. Alting. Design for assembly and disassembly. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 41(2) :625–636, 1992.
- [31] Grégoire Borst, Amandine Dubois, and Todd I Lubart. Structures et mécanismes cérébraux sous tendant la créativité : une revue de la littérature. *Approche neuropsychologique des apprentissages de l'enfant (ANAE)*, 18(87) :96–113, 2006.
- [32] P. Bosc, L. Cholvy, D. Dubois, N. Mouaddib, O. Pivert, H. Prade, G. Raschia, and M. C. Rousset. Les informations incomplètes dans les bases de données et en intelligence artificielle. *Information-Interaction-Intelligence Actes des 2e assises nationales du GDR I*, 3 :1–30, 2002.
- [33] D. Bouyer. Le traitement des déchets. Laboratoire de Génie des Procédés d'élaboration des Bioproduits - UMR CIRAD 016 - Université Montpellier 2, 2013.
- [34] R. A. Brooks. A robot that walks ; emergent behaviors from a carefully evolved network. *Neural computation*, 1(2) :253–262, 1989.
- [35] Rodney A. Brooks. Intelligence without representation. *Artificial Intelligence*, 47(1–3) :139–159, January 1991.
- [36] Thomas Bärecke. *Isomorphisme Inexact de Graphes par Optimisation Évolutionnaire*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, October 2009.
- [37] P. Caillou. Raisonnement heuristique réflexif dans un agent temps réel. *JNMR*, 3 :51–66, 2003.
- [38] Jose Canas, Jose Quesada, Adoracion ADORACIÓN Antoli, and Inmaculada Fajardo. Cognitive flexibility and adaptability to environmental changes in dynamic complex problem-solving tasks. *Ergonomics*, 46(5) :482–501, 2003. PMID : 12745698.
- [39] Jose J Canas, Inmaculada Fajardo, and Ladislao Salmeron. Cognitive flexibility, 2006.
- [40] J. G. Carbonell. *Derivational analogy : A theory of reconstructive problem solving and expertise acquisition*. Carnegie-Mellon University, Department of Computer Science, 1985.
- [41] Jaime R. Carbonell, Allan M. Collina, and Bolt Beranek. Natural semantics in artificial intelligence.
- [42] Tatiana Reyes Carillo. *L'éco-conception dans les PME : les mécanismes du cheval de Troie méthodologique et du choix de trajectoires comme vecteurs d'intégration de l'environnement en conception*. PhD thesis, Université du Sud Toulon Var, December 2007.
- [43] T. Cazenave. Système d'Apprentissage par auto-observation. *Application au Jeu de Go. PhD. thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris*, 6, 1996.
- [44] Gemma Cervantes Torre-Marín. Ecologia industrial. July 2001.
- [45] David J. Chalmers, Robert M. French, and Douglas R. Hofstadter. High-level perception, representation, and analogy : A critique of artificial intelligence methodology. *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 4 :185–211, 1992.
- [46] Alain Chauvel, Gilles Fournier, Claude Raimbault, and Alain Pigeyre. *Manuel d'évaluation économique des procédés*. Editions Technip, Paris, 2001.
- [47] Lionel Chauvin. *Modèles de cartes cognitives étendues aux notions de contexte et d'échelle*. PhD thesis, Université d'Angers, September 2010.

- [48] R.W. Chen, D. Navin-Chandra, and F.B. Prinz. Product design for recyclability : a cost benefit analysis model and its application. In , *Proceedings of the 1993 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 1993*, pages 178 –183, May 1993.
- [49] Évelyne Clémen. Approche de la flexibilité cognitive dans la problématique de la résolution de problème. *L'Année psychologique*, 106(03) :415, June 2009.
- [50] Comité National Routier CNR. Référentiel prix de revient / longue distance 40T / indices & statistiques, June 2013.
- [51] A. Cordier, B. Fuchs, L. Lana de Carvalho, J. Lieber, and A. Mille. Opportunistic acquisition of adaptation knowledge and Cases—The IakA approach. *Advances in Case-Based Reasoning*, page 150–164, 2008.
- [52] A. Cordier, B. Fuchs, J. Lieber, A. Mille, et al. Acquisition interactive des connaissances d'adaptation intégrée aux sessions de raisonnement à partir de cas—Principes, architecture IakA et prototype KayaK. 2007.
- [53] A. Cordier, B. Mascret, and A. Mille. Étendre les possibilités du raisonnement à partir de cas grâce aux traces. *RÀPC-2009*, page 71.
- [54] Amélie Cordier, Bruno Mascret, and Alain Mille. Raisonnement à partir de cas dynamique pour la réutilisation contextuelle de l'expérience. *RàPC 2010*, page 49.
- [55] Gabriel Corona. *Utilisation de croyances heuristiques pour la planification multi-agent dans le cadre des Dec-POMDP*. PhD thesis, Université Henri Poincaré - Nancy I, April 2011.
- [56] Nicolas Daoust. Approche cognitive à la résolution de jeux de lettres mélangées, 2011.
- [57] Service de l'observation et des statistiques. Recyclage et réemploi, une économie de ressources naturelles, March 2010.
- [58] FRANCE. Ministère de l'économie des finances et de l'industrie. Technologies clés 2015, 2011.
- [59] Gestion de projet Cours et MOOC de gestion de projet. Résolution de problèmes.
- [60] Joël Dean. Comment fixer le prix d'un nouveau produit ? *Revue économique*, 7(1) :92–100, 1956.
- [61] Olivier Defour. *Formalisation et exploitation de l'expertise de modélisation au sein des logiciels de simulation : couplage des approches système expert et modélisation objet. application à la modélisation de dispositifs électromagnétiques*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, December 2002.
- [62] Jean-Baptiste Denis. Les réseaux bayésiens introduction intuitive, March 2012.
- [63] Comité Stratégique des Eco-Industries (COSEI). Développer la filière française de la valorisation industrielle des déchets. Technical report, 2001.
- [64] Jean-Pierre Desclés. Réseaux sémantiques : la nature logique et linguistique des relateurs. *Langages*, 22(87) :55–78, 1987.
- [65] A. Didierjean. Apprendre à partir d'exemples : abstraction de règles et/ou mémoire d'exemplaires ? *L'année psychologique*, 101(2) :325–348, 2001.
- [66] Divers. Valeur : Définition de valeur. <http://www.cnrtl.fr/definition/valeur>. Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales.
- [67] Divers. *A Handbook of Industrial Ecology*. Cheltenham, Northampton, Edward Elgar Publishing Edition, 2002. Robert U. Ayres and Leslie W. Ayres.
- [68] Marco Dorigo and Luca Maria Gambardella. Ant colonies for the travelling salesman problem. *Biosystems*, 43(2) :73–81, July 1997.
- [69] G. Dreyfus, J. M. Martinez, M. Samuelides, M. B. Gordon, F. Badran, S. Thiria, and L. Héroult. Réseaux de neurones. *Méthodologie et applications*, Eyrolles, 2002.
- [70] A. Drogoul, N. Ferrand, and J. P. Muller. Emergence : l'articulation du local au global. In *Systemes multi-agents / OFTA*, pages 105–136. OFTA, Paris, 2004.
- [71] Alexis Drogoul and J. Ferber. *De la simulation multi-agents à la résolution collective de problèmes : une étude de l'émergence de structures d'organisation dans les systèmes multi-agents*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, 1993.
- [72] Didier Dubois and Henri Prade. La problématique scientifique du traitement de l'information, 2001.
- [73] V. Dufour-Lussier, F. Le Ber, J. Lieber, L. Martin, et al. Adaptation de cas spatiaux et temporels. In *20ème atelier Français de Raisonnement à Partir de Cas*, 2012.

BIBLIOGRAPHIE

- [74] Aurore Dupays. *Apprentissage en résolution de problèmes : influence du mode d'instruction*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, January 2011.
- [75] Philippe Duquenne. *Initiation à l'analyse comptable*, 2008.
- [76] David Duris, Anuj Dawar, Luc Segoufin, Cristina Bazgan, Françoise Delon, and Etienne Grandjean. *Acyclicité des hypergraphes et liens avec la logique sur les structures relationnelles finies*. PhD thesis, PhD thesis, Université Paris Diderot-Paris 7, 2009.
- [77] Jean-Claude Dutailly. Investissement et créations d'emplois : impact par secteur d'activité et taille d'entreprise. *Economie et statistique*, 156(1) :3–14, 1983.
- [78] T. J. D'Zurilla and M. R. Goldfried. Problem solving and behavior modification. *Journal of abnormal psychology*, 78(1) :107, 1971.
- [79] Agence Régionale d'évaluation Environnement et Climat. *Gestion des déchets dans l'entreprise*.
- [80] F. J. Díez. *Introducción al Razonamiento Aproximado*. Edición revisada : noviembre 2005 edition, 1998.
- [81] M. d'Aquin, S. Brachais, J. Lieber, A. Napoli, et al. Vers une acquisition automatique de connaissances d'adaptation par examen de la base de cas—une approche fondée sur des techniques d'extraction de connaissances dans des bases de données. *Actes du 12ème Atelier de Raisonement à Partir de Cas-RàPC*, 4 :41–52, 2004.
- [82] Bernard ESPINASSE. Représentation des connaissances : Introduction aux réseaux sémantiques.
- [83] I. Estevez, S. Dubois, N. Gartiser, J. Renaud, E. Caillaud, et al. Le raisonnement à partir de cas est-il utilisable pour l'aide à la conception inventive. In *14e Atelier de Raisonement à Partir de Cas*, 2006.
- [84] Commission européenne. Evaluer les programmes socio-économiques. Glossaire de 300 concepts et termes techniques. Collection means. vol6. Technical report, 1999.
- [85] Commission européenne. Evaluer les programmes socio-économiques. Principales techniques et outils d'évaluation. Collection means. vol 3. Technical report, 1999.
- [86] Commission européenne politique régionale. Mesurer la création d'emplois comment évaluer les effets des interventions des fonds structurels sur l'emploi. Technical report, 2013.
- [87] Le portail de l'économie et des finances Facil éco. Quels sont les objectifs de l'entreprise ? <http://www.economie.gouv.fr/facileco/quels-sont-objectifs-lentreprise>. Accessed : 2015-09-27.
- [88] Le portail de l'économie et des finances Facil éco. La consommation des ménages, 2013.
- [89] Geraldo Ferrer. The economics of tire remanufacturing. *Resources, Conservation and Recycling*, 19(4) :221–255, April 1997.
- [90] Sarah Filippi. *Stratégies optimistes en apprentissage par renforcement*. PhD thesis, Ecole nationale supérieure des telecommunications - ENST, November 2010.
- [91] E. Fleszner. L'activité d'abstraction. *Enfance*, 20(3) :241–253, 1967.
- [92] S. Franklin. Perceptual memory and learning : Recognizing, categorizing, and relating. In *Symposium on Developmental Robotics. American Association for Artificial Intelligence (AAAI). Stanford University, Palo Alto CA, USA*, 2005.
- [93] Stan Franklin. Autonomous agents as embodied ai. *Cybernetics and Systems*, 28(6) :499–520, 1997.
- [94] F. Fraïsse. *Etude du recyclage de mélanges PET/PC en vue de définir un procédé respectueux de l'environnement pour l'utilisation de profilés dans le bâtiment*. PhD thesis, Ph. D. thesis. France, Blaise Pascal University, 2005.
- [95] Free-Logistics. *Moyens de transport terrestres dimensions et capacité*, 2013.
- [96] Robert M. French. The computational modeling of analogy-making. *Trends in Cognitive Sciences*, 6(5) :200–205, May 2002.
- [97] FEDERC Fédération des entreprises du recyclage. *Les chiffres clés de l'industrie du recyclage*, February 2013.
- [98] Audrey Garric. A force de recycler, la suède doit importer des déchets, September 2012. Eco(lo) - blog Le Monde.
- [99] Ian P. Gent, Chris Jefferson, and Ian Miguel. Minion : A fast, scalable, constraint solver1.
- [100] Michael Georgeff, Barney Pell, Martha Pollack, Milind Tambe, and Michael Wooldridge. The belief-desire-intention model of agency. In Jörg P. Müller, Anand S. Rao, and Munindar P. Singh, editors, *Intelligent Agents V : Agents Theories, Architectures, and Languages*, number 1555 in Lecture Notes in Computer Science, pages 1–10. Springer Berlin Heidelberg, January 1999.

- [101] Matthieu GODICHAUD. *INP Toulouse Theses - Outils d'aide à la décision pour la sélection des filières de valorisation des produits de la déconstruction des systèmes en fin de vie : application au domaine aéronautique*. PhD thesis, Inp de Toulouse, April 2009.
- [102] Robert L Goldstone and Lawrence W Barsalou. Reuniting perception and conception. *Cognition*, 65(2-3) :231–262, January 1998.
- [103] B. González and B. Adenso-Díaz *. A bill of materials-based approach for end-of-life decision making in design for the environment. *International Journal of Production Research*, 43(10) :2071–2099, May 2005.
- [104] Lucie Guchet. *Se mettre à son compte en 10 étapes : comment faire ? Toutes les réponses ! : Lucie Guchet*. Éd. du Puits fleuri.
- [105] Alejandro Guerra Hernández. Apprentissage d'agents rationnels BDI dans un univers multi-agents.
- [106] Alejandro Guerra-Hernández, Amal El Fallah-Seghrouchni, and Henry Soldano. Learning in BDI multi-agent systems. In Jürgen Dix and João Leite, editors, *Computational Logic in Multi-Agent Systems*, number 3259 in Lecture Notes in Computer Science, pages 218–233. Springer Berlin Heidelberg, January 2005.
- [107] Jiwei Zhong Haiping Zhu. An approach for semantic search by matching RDF graphs. 2004.
- [108] Mohamed amine Hamila. *Planification multi-agents dans un cadre markovien : les jeux stochastiques à somme générale*. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, April 2012.
- [109] K. Hamouda, A. Tkouti, M. D. Mouss, C. Hamouda, and A. Malek. Analyse technique et économique de recyclage des modules photovoltaïques. *Revue des Energies Renouvelables*, 15(2) :331–350, 2012.
- [110] Nizar Haoues. *Contribution à l'intégration des contraintes de désassemblage et de recyclage des les premières phases de conception de produits*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Chambéry, June 2006.
- [111] C. Hocquard and D. Guyonnet. Recyclage des métaux rares : contexte et besoins. *Environnement et Technique*, 293 :23–28, 2010.
- [112] Douglas Hofstadter. The copycat project : An experiment in nondeterminism and creative analogies. January 1984.
- [113] Douglas Hofstadter. Le point : Hofstadter : << toute pensée est analogie >>, March 2013.
- [114] Douglas R Hofstadter. *Fluid concepts and creative analogies : Computer models of the fundamental mechanisms of thought*. Basic books, 2008.
- [115] Keith j. Holyoak and Paul Thagard. Analogical mapping by constraint satisfaction. *Cognitive science* 13, page 61, 1989.
- [116] Judith M. Hushon. Expert systems for environmental problems. *Environmental Science & Technology*, 21(9) :838–841, September 1987.
- [117] Insee. Économie - En Midi-Pyrénées, plus de 55 000 emplois salariés sont liés à l'industrie aéronautique, October 2007.
- [118] Insee. Entreprises - principales caractéristiques des unités légales en niveau de nomenclature a10, en 2011 hors auto-entrepreneurs et hors sociétés holding - 1/2, 2011.
- [119] Insee. Les activités induites : de nombreuses retombés dans les communes. Technical report, December 2012.
- [120] Insee. Travail-emploi - population active, 2012.
- [121] Insee and Préfecture de la région Alpes Cote d'azur de la région alpes. L'impact économique de l'établissement nestlé de marseille saint-menet. Technical report, September 2005.
- [122] K. Ishii and B. Lee. Reverse fishbone diagram : a tool in aid of design for product retirement. In *Proceedings of the ASME Design Technical Conference*, 1996.
- [123] Kosuke Ishii, Charles F. Eubanks, and Patrick Di Marco. Design for product retirement and material life-cycle. *Materials & Design*, 15(4) :225–233, 1994.
- [124] J. V. Jackson. Idea for a mind. *SIG ART Newslett*, 1987.
- [125] J.C. Jansen. Cours d'introduction sur l'évaluation économique des projets énergétiques, June 1992.
- [126] M. R. Jean. Emergence et SMA. *Journées Francophones IAD et SMA*. Nice, 1997.
- [127] N. R. Jennings. Specification and implementation of a belief-desire-joint-intention architecture for collaborative problem solving. *Int. Journal of Intelligent and Cooperative Information Systems*, 2(3) :289–318, 1993.

BIBLIOGRAPHIE

- [128] Michael I. Jordan. Graphical models. *Statistical Science*, 19(1) :140–155, February 2004.
- [129] L. P. Kaelbling, M. L. Littman, and A. W. Moore. Reinforcement learning : A survey. *arXiv :cs/9605103*, April 1996. *Journal of Artificial Intelligence Research*, Vol 4, (1996), 237-285.
- [130] Nadine Kafa and Yasmina Hani. CIGI 2013 Évaluation de la performance globale dans la chaîne logistique verte. 2013.
- [131] P. Kanerva. *Sparse distributed memory and related models*. Citeseer, 1992.
- [132] S. Karouach and B. Dousset. Les graphes comme représentation synthétique et naturelle de l'information relationnelle de grande taille. In *Workshop sur la recherche d'information : un nouveau passage à l'échelle, associé à INFORSID*, 2003.
- [133] T. Kohonen. The self-organizing map. *Proceedings of the IEEE*, 78(9) :1464 –1480, September 1990.
- [134] B. Kokinov. A hybrid model of reasoning by analogy. *Advances in connectionist and neural computation theory*, 2 :247–318, 1994.
- [135] E. Kroll and B. S. Carver. Disassembly analysis through time estimation and other metrics. *Robotics and computer integrated manufacturing*, 15(3) :191–200, 1999.
- [136] Tsai Chi Kuo. Combination of case-based reasoning and analytical hierarchy process for providing intelligent decision support for product recycling strategies. *Expert Systems with Applications*, 37(8) :5558–5563, August 2010.
- [137] Albin Kälin. Cradle to Cradle—An innovation path towards a circular economy—Product and project examples from various industries. 2010.
- [138] Sofiane Labidi and Wided Lejouad. De l'intelligence artificielle distribuée aux systèmes multi-agents. 1993.
- [139] Valérie Laforest. *Technologies propres : Méthodes de minimisation des rejets et de choix des procédés de valorisation des effluents. Application aux ateliers de traitement de surface*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, INSA de Lyon, December 1999.
- [140] L. L. G. Lapalme. Raisonnement à base de cas textuels—état de l'art et perspectives. *Revue de l'intelligence artificielle*, X.
- [141] D. Leake, A. Kinley, and D. Wilson. Linking adaptation and similarity learning. In *Proceedings of the Eighteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society*, 1996.
- [142] David B. Leake. Case-based reasoning. In *Encyclopedia of Computer Science*, page 196–197. John Wiley and Sons Ltd., Chichester, UK.
- [143] Lebard, Guigo, and Dubus. Mise au point d'outils d'aide à la décision dans un environnement de résolution de problèmes : la gestion des déchets ménagers / ~development of tools to assist decision making in a problem solving environment management of household waste~. *Revue de géographie alpine*, 85(2) :89–101, 1997.
- [144] Baptiste Lebreton and Axel Tuma. A quantitative approach to assessing the profitability of car and truck tire remanufacturing. *International Journal of Production Economics*, 104(2) :639–652, December 2006.
- [145] J. Leplat. De l'étude de cas à l'analyse de l'activité. *Pistes*, *www.unites.uqam.ca/pistes*, 4(2) :34, 2002.
- [146] Philippe Leray. Réseaux bayésiens définition – inférence.
- [147] Philippe Leray. Réseaux bayésiens introduction et apprentissage modélisation et découverte de connaissances, January 2008.
- [148] J. Lieber. Strong, fuzzy and smooth hierarchical classification for case-based problem solving. In *ECAI*, page 81–85, 2002.
- [149] J. Lieber. *Contributions à la conception de systèmes de raisonnement à partir de cas*. PhD thesis, Université Henri Poincaré-Nancy I, 2008.
- [150] J. Lieber. Le moteur de raisonnement à partir de cas de WIKITAAABLE. In *17ème atelier sur le raisonnement à partir de cas-RàPC-09*, 2009.
- [151] Helen S. Liu, Chris P. Richard, Joey L. Mead, and Ross G. Stacer. Development of novel applications of crosslinked elastomer scrap in thermoplastics (157). In *Technical papers of the annual technical conference-society of plastics engineers incorporated*, volume 3, page 2884–2888, 2000.
- [152] Kevin Fong-Rey Liu and Chih-Wei Yu. Integrating case-based and fuzzy reasoning to qualitatively predict risk in an environmental impact assessment review. *Environmental Modelling & Software*, 24(10) :1241–1251, October 2009.
- [153] John W Lloyd. *Foundations of logic programming*. Springer Science & Business Media, 2012.

- [154] FAQ Logistique. Présentation des postes de coûts liés au transport par route. <http://www.faq-logistique.com/Couts-transport-routier.htm>, 2013.
- [155] Maryvonne Longeart. Ressemblance et analogie. définitions. <http://www.ac-grenoble.fr/PhiloSophie/logphil/reperes/analogie.htm>. Philosophie du LOG.
- [156] Véronique Malleret. Peut-on gérer le couple coûts-valeur? In *27ÈME CONGRES DE L'AFC*, May 2006.
- [157] Jean-Pierre Mano. *Etude de l'émergence fonctionnelle au sein d'un réseau de neuro-agents coopératifs*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, May 2006.
- [158] J.P. Mano and P. Glize. Property analysis of open networks of cooperative neuro-agents using AMAS theory. In *13th IEEE International Workshops on Enabling Technologies : Infrastructure for Collaborative Enterprises, 2004. WET ICE 2004*, pages 409 – 414, June 2004.
- [159] A. B. Markman and D. Gentner. Structural alignment during similarity comparisons. *Cognitive Psychology*, 25 :431–431, 1993.
- [160] James B. Marshall and Douglas R. Hofstadter. The metacat project : A self-watching model of analogy-making. *Cognitive Studies*, 4(4) :4_57–4_71, 1997.
- [161] James B. Marshall, James B. Marshall, Dr David, and B. Leake. Metacat : A self-watching cognitive architecture for analogy-making and high-level perception. Technical report, In Proceedings of the 24th Annual Conference of the Cognitive Science Society, 1999.
- [162] J.B. Marshall. Metacat : a program that judges creative analogies in a microworld. In *Proceedings to the Second Workshop on Creative Systems*, 2002.
- [163] J. Mathieu and E. Cauzinille-Marmeche. Généralisation des connaissances et résolution de problèmes. *L'année psychologique*, 94(3) :461–484, 1994.
- [164] 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 multicritères de la recyclabilité du produit et sur l'identification de ses points faibles de conception*. PhD thesis, Arts et Métiers ParisTech, 2002.
- [165] T.L. McCauley, S. Franklin, et al. An architecture for emotion. In *AAAI Fall Symposium Emotional and Intelligent : The Tangled Knot of Cognition*, page 122–127, 1998.
- [166] ANIKA MICHALOWSKA. Pour mesurer le potentiel d'un nouveau produit - etudier - MICROTTEST (RESEARCH INTERNATIONAL), March 1998. emarketing.fr.
- [167] Steven J Mithen. The prehistory of the mind a search for the origins of art, religion and science. 1996.
- [168] F. Molnar. Quoi de nouveau dans la perception visuelle de la forme? *L'année psychologique*, 80(2) :599–629, 1980.
- [169] Banque mondiale BIRD-IDA. Dépenses de consommation finale des ménages, etc. (% du PIB) | données | tableau, 2012.
- [170] Marie-Laure Mugnier and Michel Chein. Représenter des connaissances et raisonner avec des graphes. <http://www.lirmm.fr/~mugnier/ArticlesPostscript/RIA96MuCh.ps>.
- [171] Pascale NAQUIN. Filières de valorisation des déchets : ce qui marche, ce qui ne marche pas, February 2011.
- [172] Institut national de la santé et de la recherche médicale. Neurones. <http://www.inserm.fr/thematiques/neurosciences-sciences-cognitives-neurologie-psychiatrie/dossiers-d-information/neurones>.
- [173] Ana Navarro Bosch. Estrategias de reciclaje. sb10mad - Sustainable building conference.
- [174] D. Navinchandra. Steps toward environmentally compatible product and process design : A case for green engineering. Technical report, DTIC Document, 1990.
- [175] P. Naïm, P. H. Wuillemin, P. Leray, O. Pourret, and A. Becker. Réseaux bayésiens. *Paris : Eyrolles*, 1999.
- [176] A. Newell and H. A. Simon. *Human problem solving*, volume 14. Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 1972.
- [177] Teleroute News. FlashTransport | coût du transport par véhicules, December 2012.
- [178] R. F. Noss. Indicators for monitoring biodiversity : a hierarchical approach. *Conservation biology*, 4(4) :355–364, 1990.
- [179] OCDE. Manuel d'application pour la mise en œuvre de la recommandation de l'OCDE c(2004)100 sur la gestion écologique des déchets (GED).

BIBLIOGRAPHIE

- [180] Alberto Ochoa, José-Alberto Hernández, Francisco J. Alvarez, Gennadiy Bur-lak, and Jaime Muñoz. Más allá del razonamiento basado en casos y una aproximación al modelado de sociedades utilizando minería de datos. page 10, 2006.
- [181] Journal officiel de l'Union européenne. Directive 2008/98/ce du parlement européen et du conseil, 2008.
- [182] X. Olsthoorn, D. Tyteca, W. Wehrmeyer, and M. Wagner. Environmental indicators for business : a review of the literature and standardisation methods. *Journal of Cleaner Production*, 9(5) :453–463, 2001.
- [183] Katherine Ortegon, Loring F. Nies, and John W. Sutherland. Preparing for end of service life of wind turbines. *Journal of Cleaner Production*, 39(0) :191–199, January 2013.
- [184] L. Ortolano and A. C. Steinemann. New expert systems in environmental engineering. *Journal of computing in civil engineering*, 1(4) :298–302, 1987.
- [185] EPAL Paletten-System. Palettes en containers, poids lourds et wagons. <http://www.epal-pallets.org/fr/produkte/vergleich.php>, 2013.
- [186] François Parmentier. *Spécification d'une architecture émergente fondée sur le raisonnement par analogie. Application aux références bibliographiques*. PhD thesis, Université Henri Poincaré - Nancy I, June 1998.
- [187] D. Pastre. EURISKO (DB lenat). 2002.
- [188] Judea Pearl. Bayesian network. *Department of Statistics Papers, Department of Statistics, UCLA, UC Los Angeles*, August 2011.
- [189] Markus F. Peschl and Alexander Riegler. Does representation need reality. pages 9–17, 1999.
- [190] Gauthier Picard. *Méthodologie de développement de systèmes multi-agents adaptatifs et conception de logiciels à fonctionnalité émergente*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, December 2004.
- [191] Pnich.com. Transport fluvial de marchandises. <http://www.pnich.com/Transport-fluvial-de-marchandises.htm>, 2009.
- [192] ÉcoRessources Consultants pour la FQCF. Rapport préliminaire : évaluation économique de la filière de la biomasse forestière destinée aux projets de chaufferies. Technical report, March 2012.
- [193] Guide Pratique des déchets en Languedoc Roussillon. Qu'est-ce qu'un déchet ? <http://www.guide-dechets.com/dechet.php3>. Chambre Régionale de Commerce et d'Industrie Languedoc-Roussillon.
- [194] A. M. Y. Prié. Une théorie de la trace informatique pour faciliter l'adaptation dans la confrontation logique d'utilisation/logique de conception. 2006.
- [195] PROCHEMIST. Similarité. <http://pro.chemist.online.fr/cours/similarite.htm>.
- [196] Ivana Rasovska. *Contribution à une méthodologie de capitalisation des connaissances basée sur le raisonnement à partir de cas : Application au diagnostic dans une plateforme d'e-maintenance*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, July 2006.
- [197] Olivier Ratheaux. *L'évaluation économique des projets par l'analyse coûts - avantages*. 2009.
- [198] Recyconcept. Recyclage des pneus présentation technique, 2012.
- [199] Recylum. Gros plan sur le recyclage des tubes et lampes usagés. <http://www.recylum.com/la-filiere/gros-plan-sur-le-recyclage/>.
- [200] Recylum. Gros plan sur le recyclage des tubes fluorescents usagés. <http://www.recylum.com/wp-content/uploads/FILIERE-recyclage-decoupage-lampes-RECYLUM.pdf>.
- [201] A. Richard. *La résolution de problèmes*. PhD thesis, Université Laval., 1979.
- [202] M. RIFQI. Mesures de similarité, raisonnement et modélisation de l'utilisateur.
- [203] T. Ripoll and D. Coulon. Le raisonnement par analogie : une analyse descriptive et critique des modèles du mapping. *L'année psychologique*, 101(2) :289–323, 2001.
- [204] T. Ripoll and J. Eynard. La détection d'analogies potentielles sans mapping est-elle possible ? *Actes Jour. Nat. sur les Modèles de Raisonnement (JNMR'03), Paris*, page 27–28.
- [205] C. M. Rose, K. A. Beiter, K. Ishii, and K. Masui. Characterization of product end-of-life strategies to enhance recyclability. In *ASME Design for Manufacturing Symposium, Atlanta, Georgia. ASME Paper98-DETC/DFM-5742*, 1998.
- [206] C.M. Rose, K.A. Beiter, and K. Ishii. Determining end-of-life strategies as a part of product definition. In *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 1999. ISEE -1999*, pages 219 –224, 1999.

- [207] C.M. Rose, K. Ishii, and K. Masui. How product characteristics determine end-of-life strategies. In *Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 1998. ISEE-1998*, pages 322–327, May 1998.
- [208] Faten SADAKA. *Etude de la dégradation contrôlée de polydiènes : Application au recyclage des déchets pneumatiques*. PhD thesis, Université Du Maine, November 2010.
- [209] Isabelle Saillot, Marylene Patou-Mathis, Jean-François Richard, Emmanuel Sander, and Sébastien Poitrenaud. Modéliser les activités cognitives des hommes au paléolithique. *Mathématiques et sciences humaines. Mathematics and social sciences*, (159), 2002.
- [210] William A. Scott. Cognitive complexity and cognitive flexibility. *Sociometry*, 25(4) :pp. 405–414, 1962.
- [211] OG Selfridge. *Pandemonium : a paradigm for learning in mechanisation of thought processes*. pages 513–526. HMSO, 1958.
- [212] Dominique Serio and Benoît Serio. *Indépendant auto-entrepreneur, EIRL le guide pratique : 2015*. Prat Editions.
- [213] S. Sorlin. *Mesurer la similarité de graphes*. PhD thesis.
- [214] S. Sorlin, P. A. Champin, and C. Solnon. Mesurer la similarité de graphes étiquetés. *9èmes Journées Nationales sur la résolution pratique de problèmes NP-Complets (JNPC 2003)*, page 325–339, 2003.
- [215] S. Sorlin and C. Solnon. Similarité de graphes : une mesure générique et un algorithme tabou réactif.
- [216] John F. Sowa. Conceptual graphs as a universal knowledge representation. *Computers & Mathematics with Applications*, 23(2–5) :75–93, January 1992.
- [217] H. Srinivasan, N. Shyamsundar, and R. Gadh. A virtual disassembly tool to support environmentally conscious product design. In *Electronics and the Environment, 1997. ISEE-1997., Proceedings of the 1997 IEEE International Symposium on*, page 7–12, 1997.
- [218] W. Stahel. *Les déchets, les éliminer, les revaloriser, les éviter*. Service du Film de Recherche Scientifique, 2001.
- [219] Nicolas Stroppa and F. Yvon. Apprentissage par analogie et proportions formelles : contributions méthodologiques et expérimentales.
- [220] A. Stuber, S. Hassas, and A. Mille. Combiner le paradigme multi-agents et le raisonnement à partir d'Expérience pour assister la réalisation collective de tâches. 2004.
- [221] B. Thomas, D. Tamblyn, and B. Baetz. Expert systems in municipal solid waste management planning. *Journal of Urban Planning and Development*, 116(3) :150–155, 1990.
- [222] Ellis Paul Torrance. *Torrance tests of creative thinking*. Personnel Press, Incorporated, 1968.
- [223] Francky Trichet, Michel Leclere, and Christophe Choquet. Construire un système à base de connaissances de type tâche/méthode à l'aide des graphes conceptuels. pages 13–21.
- [224] D. Tyteca. Problématique des indicateurs environnementaux et de développement durable. *Congrès de la Société de l'Industrie Minérale*, 2002.
- [225] P. Veerakamolmal and S. M. Gupta. A case-based reasoning approach for automating disassembly process planning. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 13(1) :47–60, 2002.
- [226] P. Vergès and B. Bouriche. L'analyse des données par les graphes de similitude. *Sciences humaines*, 2001.
- [227] Pierre Vergès and Alain Degenne. Introduction à l'analyse de similitude. *Revue française de sociologie*, 14(4) :471–511, 1973.
- [228] G. Villalba, M. Segarra, J.M. Chimenos, and F. Espiell. Using the recyclability index of materials as a tool for design for disassembly. *Ecological Economics*, 50(3-4) :195–200, October 2004.
- [229] G. Villalba, M. Segarra, A. I. Fernandez, J. M. Chimenos, and F. Espiell. A proposal for quantifying the recyclability of materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 37(1) :39–53, 2002.
- [230] VNF. Voies navigables de France- projet de mise a grand gabarit de la liaison fluviale entre bray-sur-seine et nogent-sur-seine : Notice de calcul du nombre d'emplois créés ou confortés par les travaux et l'exploitation du projet de mise à grand gabarit. Technical report, January 2012.
- [231] VNF and Ademe. Etude comparatives des efficacités énergétiques et des émissions unitaires de CO2 des modes de transports de marchandises. Technical report, January 2006.
- [232] Joost G. Vogtländer. "Fast track" LCA for dummies. Technical report, 2010. Delft University of Technology.
- [233] Joost G. Vogtländer. Eco-efficient value creation, 2011. Delft University of Technology.

BIBLIOGRAPHIE

- [234] Joost G. Vogtländer. Life cycle assessment, 2011. Delft University of Technology, Design for Sustainability.
- [235] Joost G. Vogtländer, Han C. Brezet, and Charles F. Hendriks. The virtual eco-costs '99 a single LCA-based indicator for sustainability and the eco-costs-value ratio (EVR) model for economic allocation. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 6(3) :157–166, May 2001. 00029.
- [236] P. Weber, M. C. Suhner, et al. Modélisation de processus industriels par réseaux bayésiens orientés objet (RBOO)-Application à l'analyse des performances d'un processus industriel. *Revue d'intelligence artificielle*, 18 :299–326, 2004.
- [237] Annick Weil-Barais, Jacques Mathieu, and Evelyne Cauzinille-Marmèche. Raisonnement analogique et résolution de problèmes. *L'année psychologique*, 85(1) :49–72, 1985.
- [238] Divers Wikipedia. Pensée abstraite, November 2012. Page Version ID : 67169501.
- [239] N. Wiratunga, S. Craw, and R. Rowe. Learning to adapt for case-based design. *Advances in Case-Based Reasoning*, page 119–139, 2002.
- [240] Zhibiao Wu and Martha Palmer. Verbs semantics and lexical selection. In *Proceedings of the 32Nd Annual Meeting on Association for Computational Linguistics*, ACL '94, pages 133–138, Stroudsburg, PA, USA, 1994. Association for Computational Linguistics.
- [241] www.groupeisf.net. Chapitre 1 les transports terrestres de marchandises.
http://www.groupeisf.net/logistique_et_transports/Transport/1/chapitre_1.htm, 2010.
- [242] Bo-Suk Yang, Seok Kwon Jeong, Yong-Min Oh, and Andy Chit Chiow Tan. Case-based reasoning system with petri nets for induction motor fault diagnosis. *Expert Systems with Applications*, 27(2) :301–311, August 2004.
- [243] Cheng Jung Yang and Jahau Lewis Chen. Accelerating preliminary eco-innovation design for products that integrates case-based reasoning and TRIZ method. *Journal of Cleaner Production*, 19(9-10) :998–1006, June 2011.
- [244] I. Zeid, S. M. GUPTA, and T. BARDASZ. A case-based reasoning approach to planning for disassembly. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 8(2) :97–106, 1997.
- [245] Margueni Zelfani and Fatma-Zohra Benouhiba. WASTEMAN, serveur web d'aide pour le traitement et la valorisation des déchets industriels spéciaux. pages Vol1.331–345.
- [246] H. C. Zhang and T. C. Kuo. A graph-based disassembly sequence planning for EOL product recycling. In *Electronics Manufacturing Technology Symposium, 1997., Twenty-First IEEE/CPMT International*, page 140–151, 1997.
- [247] Jean-Daniel Zucker. A grounded theory of abstraction in artificial intelligence. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B : Biological Sciences*, 358(1435) :1293–1309, July 2003.
- [248] Aurora Zugarramurdi and María A. Parin. 3. COUTS D'INVESTISSEMENT, 1999. Ingénierie Économique Appliquée aux Industries de la Pêche.

ANNEXE : FORMULES UTILISÉES POUR LA CALCUL DES INDICATEURS ÉCONOMIQUES

Dans ce qui suit est présentée une méthode de calcul des indicateurs économiques basée sur le manuel [46].

Investissements

I_1 Investissement en limites des unités de fabrication \Rightarrow

Prix des principaux équipements posés. Il peut être obtenu par devis, connaissances historiques ou par estimation par des méthodes comme Pré-Estime.

$$I_{2-1}, \text{ Stockages} \Rightarrow I_{2-1} = 0.25 * I_1 \quad (\text{A.1})$$

$$I_{2-2}, \text{ Services généraux} \Rightarrow I_{2-2} = 0.15 * I_1 \quad (\text{A.2})$$

$$I_2, \text{ Services généraux et stockages} \Rightarrow I_2 = I_{2-1} + I_{2-2} \quad (\text{A.3})$$

$$TI_1, \text{ Investissements unités} \Rightarrow TI_1 = I_1 + I_2 \quad (\text{A.4})$$

$$I_3, \text{ Ingénierie} \Rightarrow I_3 = 0.12 * TI_1 \quad (\text{A.5})$$

$$I_4, \text{ Stock de pièces de rechanges} \Rightarrow I_4 = 0.3 * I_1 \quad (\text{A.6})$$

$$I_5, \text{ Frais de contracteurs} \Rightarrow I_5 = 0.05 * TI_1 \quad (\text{A.7})$$

$$CF, \text{ Capital fixe} \Rightarrow CF = TI_1 + I_3 + I_4 + I_5 \quad (\text{A.8})$$

$$I_6, \text{ Intérêts intercalaires} \quad (\text{A.9})$$

$$I_7, \text{ Frais de démarrage} \Rightarrow I_7 = 1/24 * TFO \text{ où } TFO \text{ sont les frais opératoires pour une année} \quad (\text{A.10})$$

$$CA, \text{ Capital amortissable} \Rightarrow CA = CF + I_6 + I_7 + I_8 \quad (\text{A.11})$$

$$FR, \text{ Fonds de roulement} \Rightarrow FR = 1/12 * TFO \quad (\text{A.12})$$

ANNEXE A. ANNEXE : FORMULES UTILISÉES POUR LA CALCUL DES INDICATEURS ÉCONOMIQUES

$$TI, \text{ Total investissements} \Rightarrow TI = CA + FR \quad (A.13)$$

Chiffre d'affaire

$$Cha, \text{ Chiffre d'affaires} \Rightarrow \text{Volume des ventes annuelles} \quad (A.14)$$

Frais opératoires

$$F1, \text{ Mains d'œuvre} \Rightarrow F1 = MCop * \text{Nombre.d'heure.operateur} \quad (A.15)$$

Le calcul de la main d'œuvre se fait par le calcul du nombre d'heures opérateur en utilisant la formule Chauvel :

$$\frac{\text{Nombre.d'heure.operateur/jour}}{\text{tonne.de.produit}} = t * \frac{\text{nombre.d'etapes.du.procedes}}{(\text{capacite.en.tonne/jour})^{0.78}} \quad (A.16)$$

avec :

t = 23 si opérations discontinues

t = 17 si installations continues avec une instrumentation moyenne

t = 10 si installations continues avec une instrumentation bonne

t = 7 si installations continues ligne de régulation

$$\text{Nombre d'heures opérateur} = \text{Nombre d'heures opérateur/j} * \text{Nombre de jours par an} \quad (A.17)$$

$$MSb, \text{ Salaire brut moyen de référence} \quad (A.18)$$

$$MPa, \text{ Primes d'ancienneté} \Rightarrow MPa = 0.1 * MSb \quad (A.19)$$

$$MPv, \text{ Primes de vacances et de rendement} \Rightarrow MPv = 0.135 * MSb \quad (A.20)$$

$$MPp, \text{ Primes de panier et de quart} \Rightarrow MPp = 0.3 * MSb \quad (A.21)$$

$$MCp, \text{ Charges patronales} \Rightarrow MCp = 0.1 * 0.6 \quad (A.22)$$

$$MPa, \text{ Supervision} \Rightarrow MPa = 0.2 * MSb \quad (A.23)$$

$$MTS, \text{ Total salaire moyen mensuel} \Rightarrow MTS = MSb + Mpa + Mpv + MPp + MCp + MPa \quad (A.24)$$

$$MCop, \text{ Coût heure opérateur} \Rightarrow MCop = \frac{MTS}{\text{Nombre.d'heure.travailler.par.mois}} \quad (A.25)$$

$$F2, \text{ Frais divers} \quad (A.26)$$

$$F3, \text{ Utilités} \quad (A.27)$$

$$F4, \text{ Coût matière première} \quad (A.28)$$

$$TFo, \text{ Total des frais opératoires} \Rightarrow TFo = F1 + F2 + F3 + F4 \quad (A.29)$$

Charges fixes

$$C1, \text{ Frais g\u00e9n\u00e9raux} \Rightarrow C1 = 0.01 * TI1 \quad (\text{A.30})$$

$$C2, \text{ Taxes et assurances} \Rightarrow C2 = 0.02 * I1 \quad (\text{A.31})$$

$$C3, \text{ Entretien} \Rightarrow C3 = 0.04 * TI1 \quad (\text{A.32})$$

$$C4, \text{ Frais financiers} \Rightarrow C4 = 0.04 * TI1 \quad (\text{A.33})$$

$$TC, \text{ Total charges fixes} \Rightarrow TC = C1 + C2 + C3 + C4 \quad (\text{A.34})$$

$$EBE, \text{ Exc\u00e9dent brut d'exploitation} \Rightarrow EBE = Cha + TFo + TC \quad (\text{A.35})$$

$$A, \text{ Dotation amortissement}^1 \Rightarrow A = CA * Ta * \frac{(1 + Ta)^{DA}}{(1 + Ta)^{DA} - 1} \quad (\text{A.36})$$

avec :

Da : dur\u00e9e d'amortissement

Ta : taux d'actualisation. Le coefficient d'actualisation est une somme qui \u00e0 partir du taux d'actualisation permet de calculer la valeur d'une somme future [125].

L'amortissement permet de pr\u00e9voir le renouvellement de l'\u00e9quipement une fois leurs dur\u00e9es de vie \u00e9coul\u00e9e. Plusieurs facteurs entrent en compte sur cette dur\u00e9e comme l'usure et obsolescence sous l'effet de l'\u00e9volution technologique [125].

Rentabilit\u00e9

$$\frac{1}{1 + a} \text{ o\u00f9 } a \text{ est l'ann\u00e9e} \quad (\text{A.37})$$

$$BI, \text{ Base imposable} \Rightarrow BI = EBE + A \quad (\text{A.38})$$

$$Imp, \text{ Imp\u00f4ts} \Rightarrow Imp = BI * TaxeIS \quad (\text{A.39})$$

$$Rnet, \text{ R\u00e9sultat net} \Rightarrow Rnet = BI + Imp \quad (\text{A.40})$$

$$CF, \text{ Cash-flow} \Rightarrow CF = A + Rnet \quad (\text{A.41})$$

$$CFA, \text{ Cash-flow actualis\u00e9} \Rightarrow CFA = \frac{CF}{(1 + Ta)^a} \text{ o\u00f9 } a \text{ est l'ann\u00e9e} \quad (\text{A.42})$$

$$VAN, \text{ Valeur actuelle nette} \Rightarrow VAN = TI + \sum CFA \quad (\text{A.43})$$

$$TRI, \text{ Taux de rentabilit\u00e9 interne} \Rightarrow TRI = Ta \text{ tel que la VAN} = 0 \quad (\text{A.44})$$

$$DRC, \text{ D\u00e9lai de r\u00e9cup\u00e9ration du capital} \Rightarrow \text{D\u00e9lai pour que la VAN vaille } 0 \quad (\text{A.45})$$

1. M\u00e9thode de l'amortissement \u00e9conomique constant (Sinking Fund Method)

ANNEXE A. ANNEXE : FORMULES UTILISÉES POUR LA CALCUL DES INDICATEURS ÉCONOMIQUES

ANNEXE : DONNÉES POUR L'ÉVALUATION DE LA GÉNÉRATION DE TRAJECTOIRE

A TRAJECTOIRES DE VALORISATION

① VOIE : VALORISATION DU POLYPROPYLENE

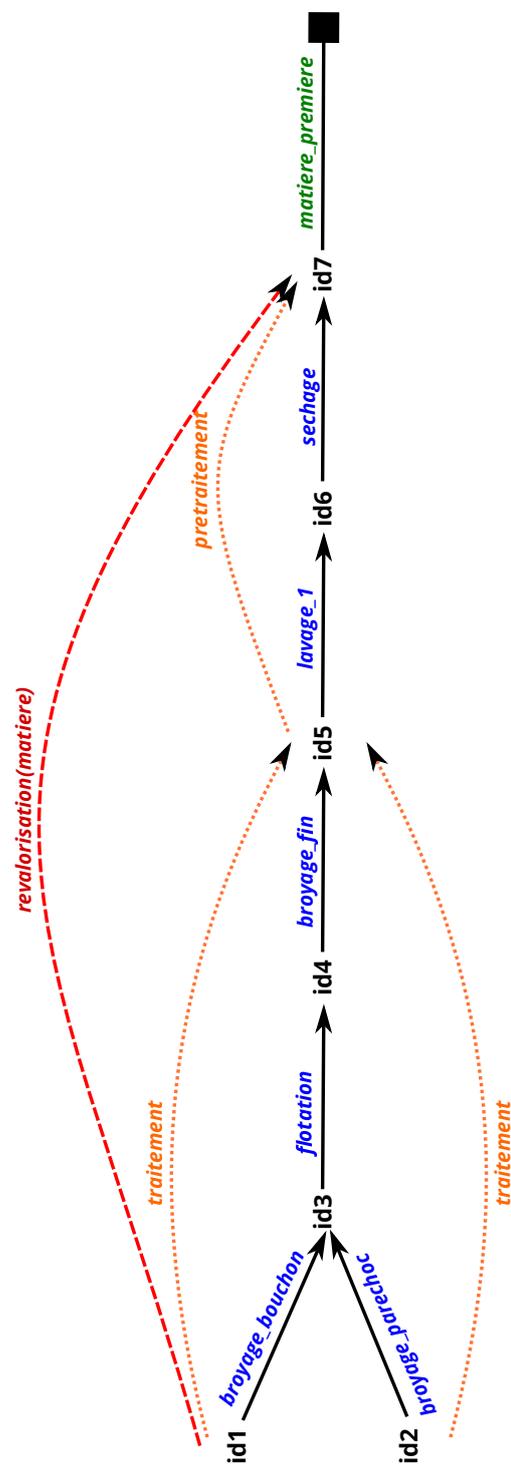


FIGURE B.1- TRAJECTOIRE DE REVALORISATION DU POLYPROPYLENE

② VOIE : RECYCLAGE TÉLÉVISEUR (ATHODIQUE)

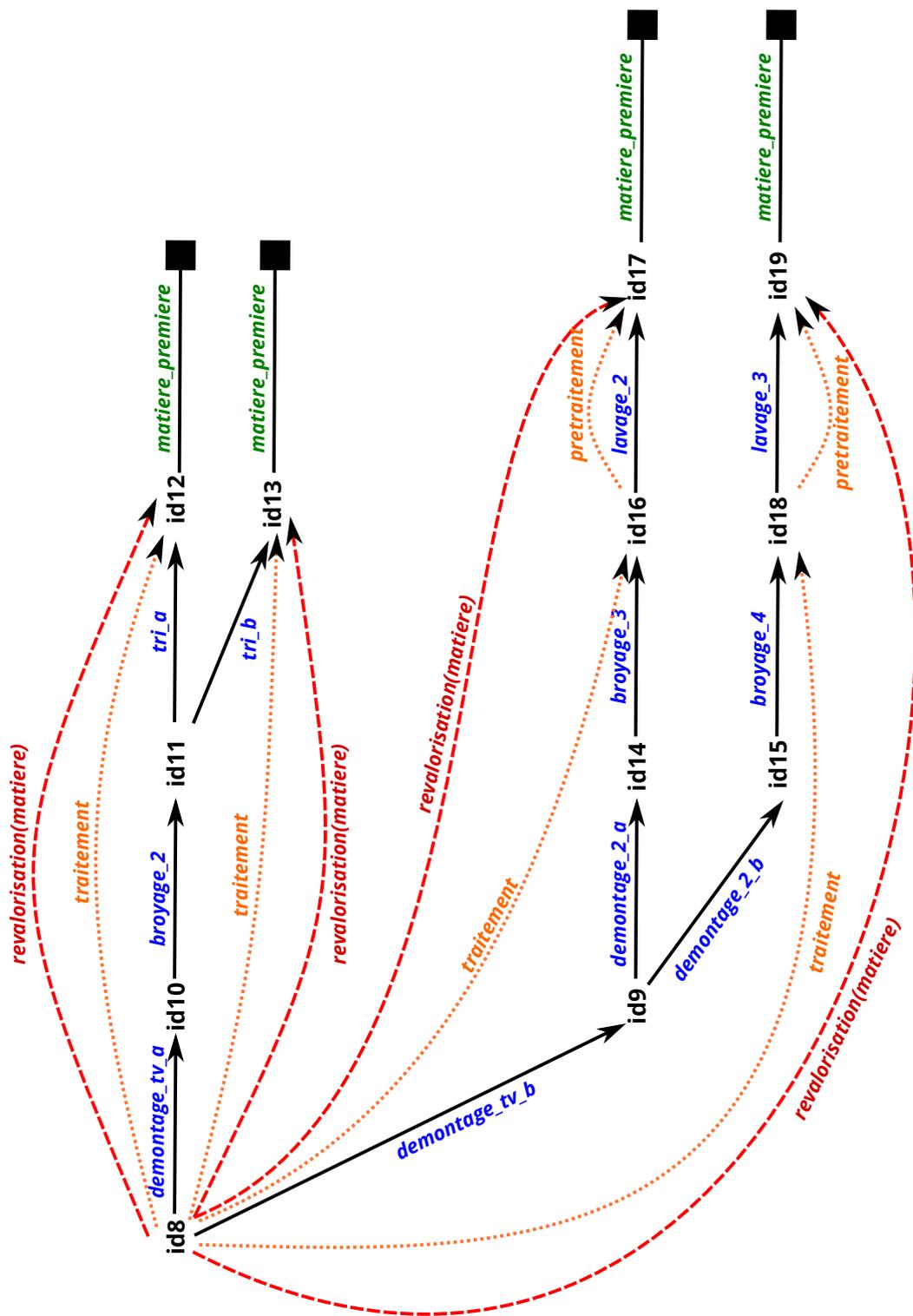


FIGURE B.2- TRAJECTOIRE DE RECYCLAGE DE TÉLÉVISEUR CATHODIQUE

3 VOIE : RECYCLAGE TUBE NÉON

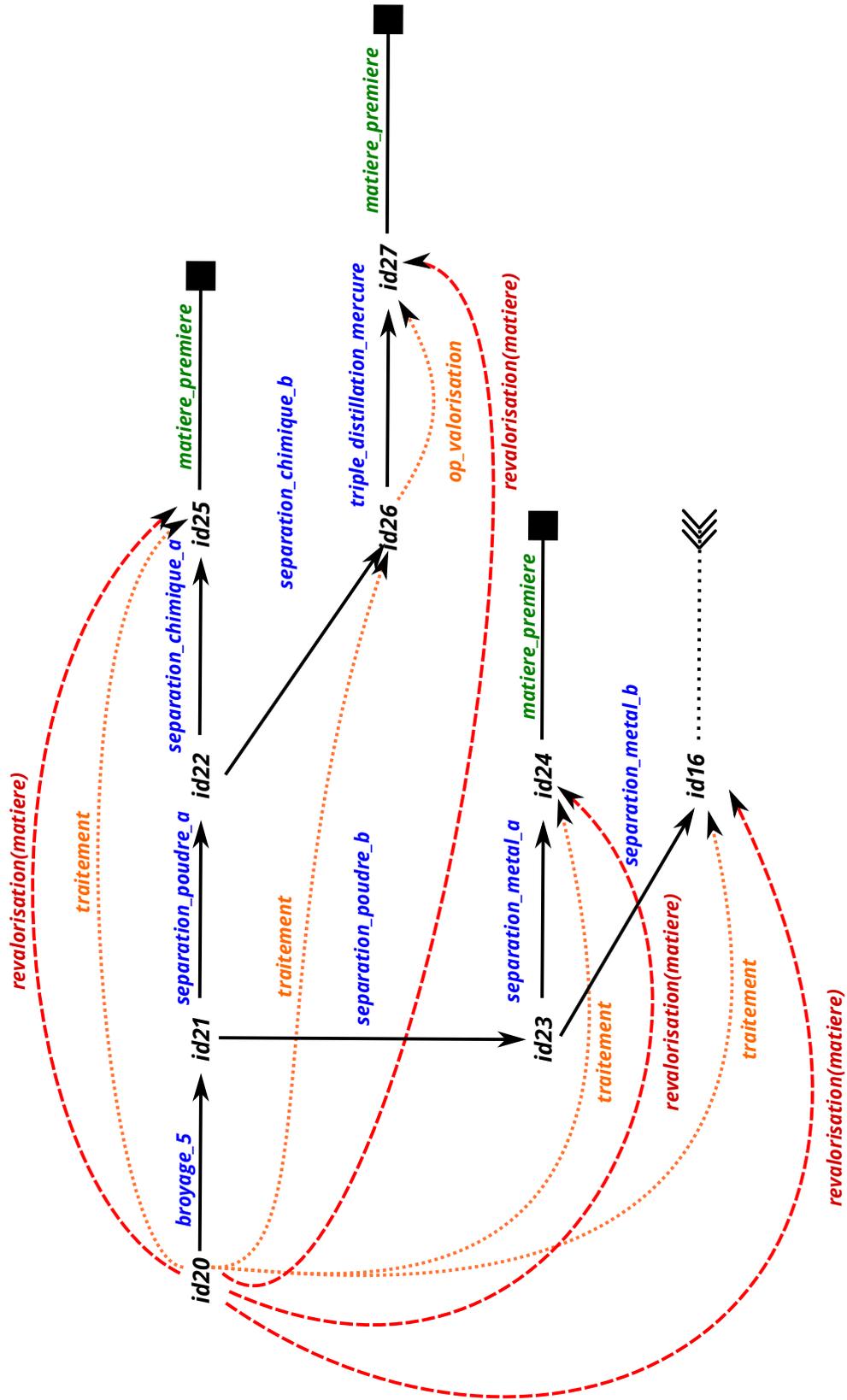


FIGURE B.3- TRAJECTOIRE DE RECYCLAGE DE TUBE NÉON

4) VOIE : RECYCLAGE BOUTEILLE VERRE

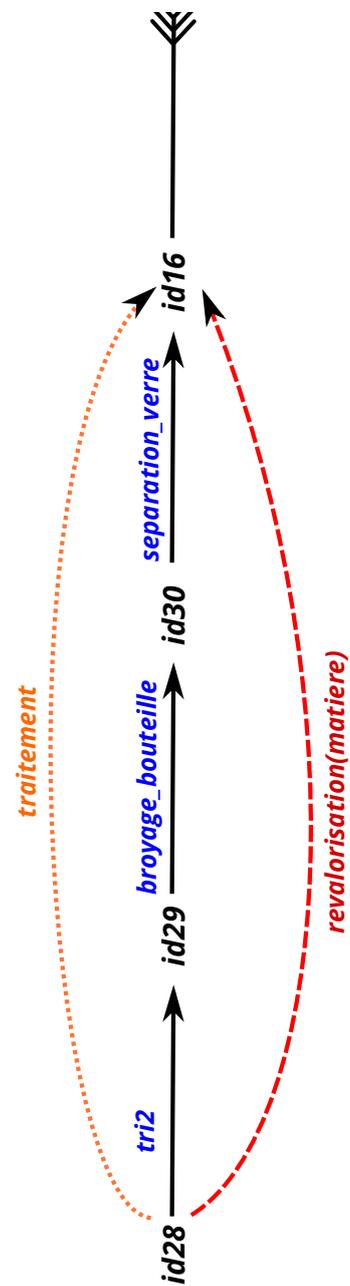


FIGURE B.4- TRAJECTOIRE DE RECYCLAGE DE BOUTEILLE EN VERRE

5 VOIE : REVALORISATION DE L'ALUMINIUM

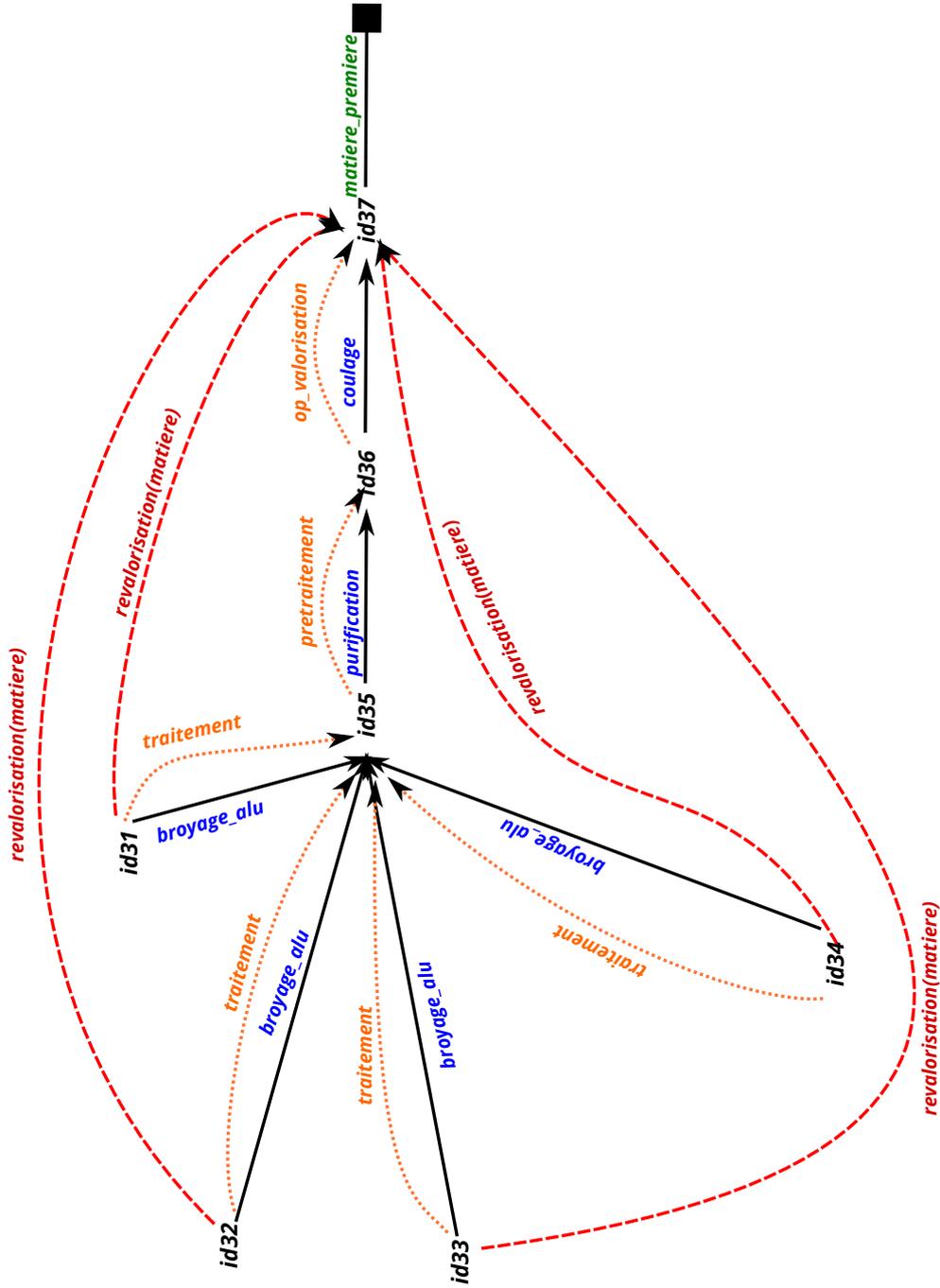


FIGURE B.5- TRAJECTOIRE DE REVALORISATION DE L'ALUMINIUM

6 VOIE : RECYCLAGE BATTERIE

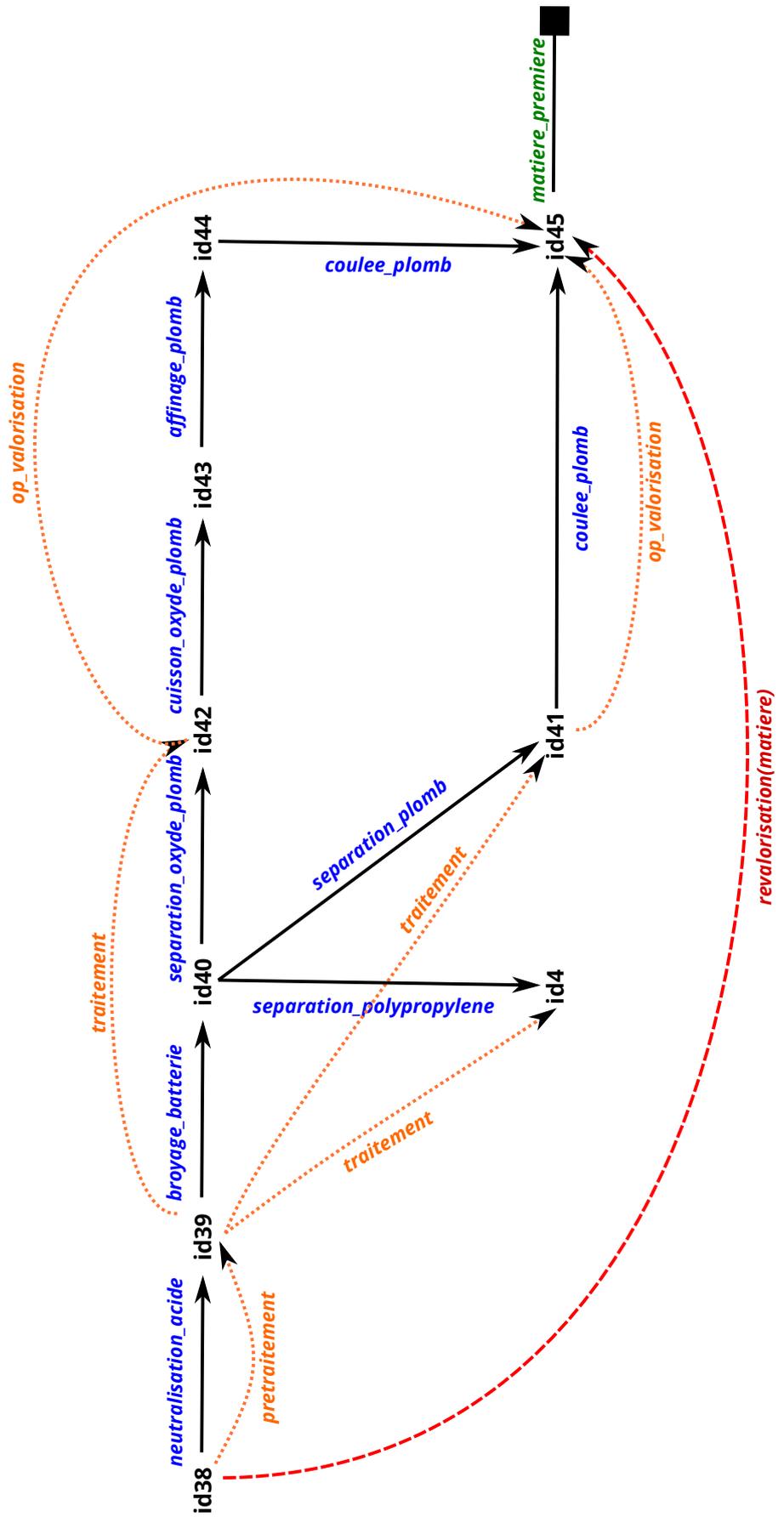


FIGURE B.6- TRAJECTOIRE DE RECYCLAGE BATTERIE

B TAXONOMIES UTILISÉES

TAXONOMIE SUR LES OPÉRATIONS

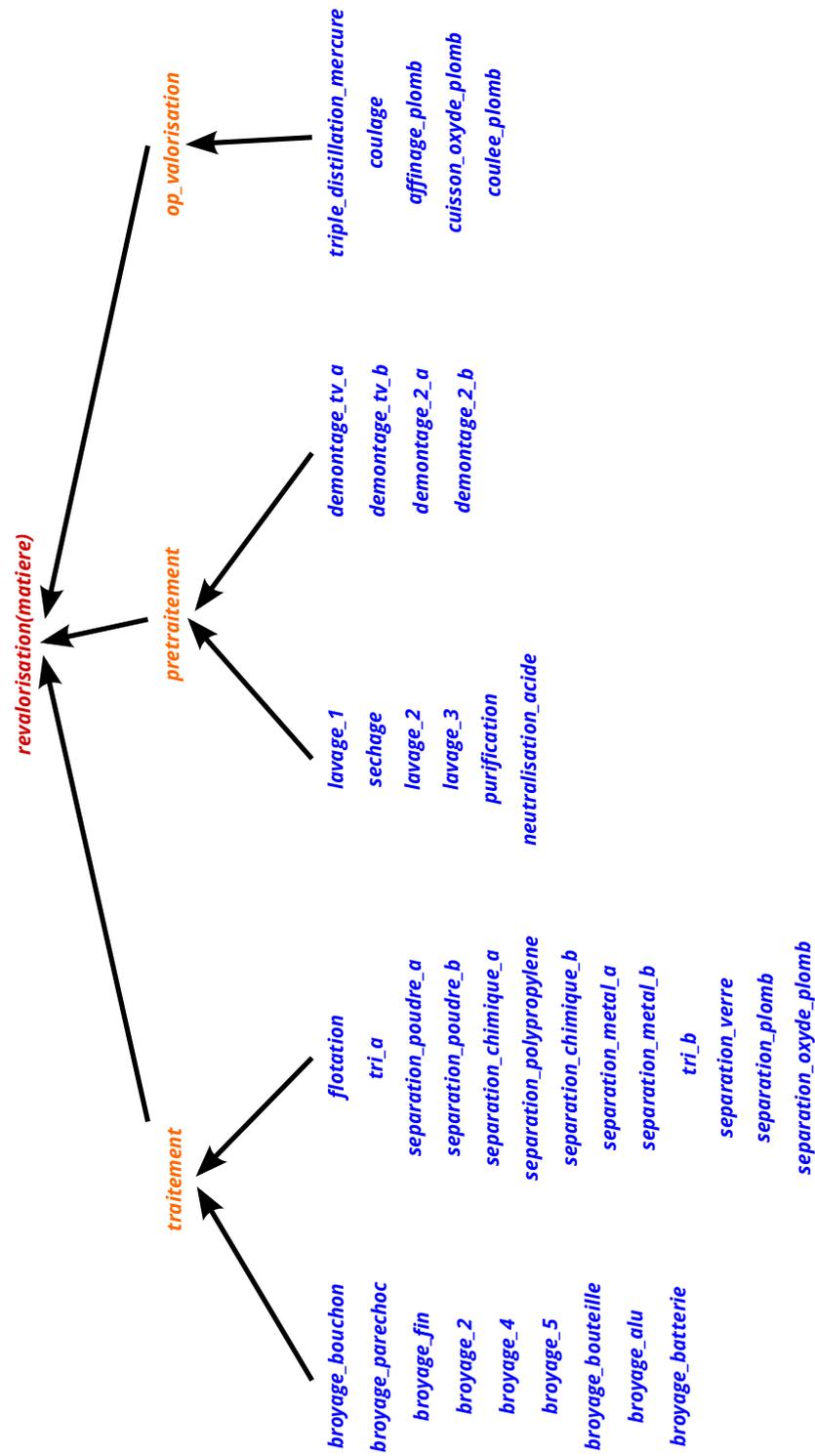


FIGURE B.7- TAXONOMIE DES OPÉRATIONS

TAXONOMIE SUR LES CONCEPTS

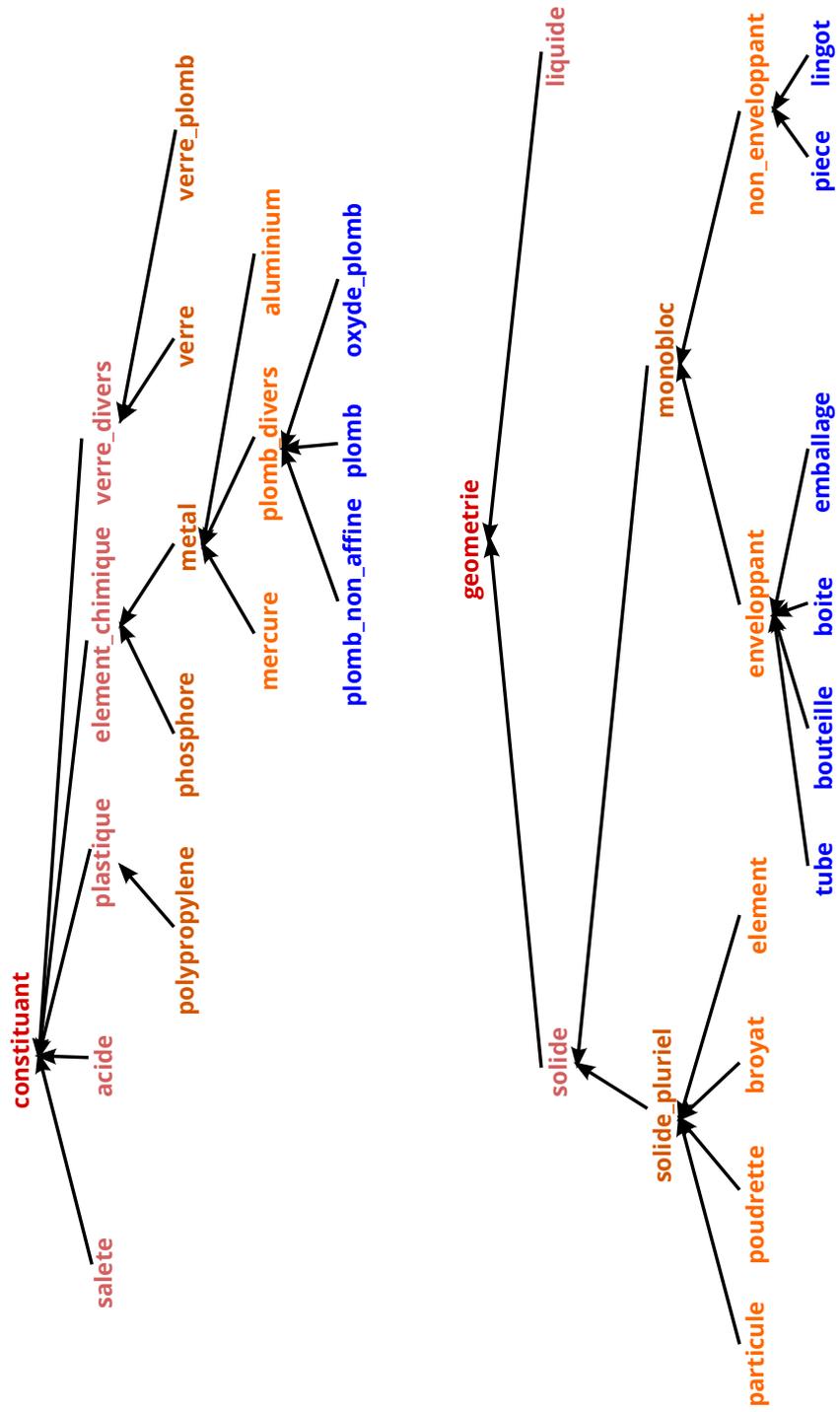


FIGURE B.8- TAXONOMIE DES CONCEPTS

C SCRIPT UTILISÉ POUR INITIALISER LA BASE DE CAS

```
%Entree des etats
%***** Trajectoire 1
% → *****
%bouchon
donnees1:-
    Liste=(def(compose,bouchon,_,_,_,polypropylene),
    def(contient_trace,bouchon,_,_,_,metal),
    def(taille,bouchon,3,_,cm,_),
    def(forme,bouchon,_,_,_,tube)
    ),
    ajouter_etat(Liste,ID1),
    ajouter_type(bouchon,objet),

    write('fin_1'),write('\n'),

%pare-choc
    Liste2=(def(compose,pare_choc,_,_,_,polypropylene),
    def(contient_trace,pare_choc,_,_,_,metal),
    def(taille,pare_choc,2,_,m,_),
    def(forme,pare_choc,_,_,_,monobloc)
    ),
    ajouter_etat(Liste2,ID2),
    ajouter_type(pare_choc,objet),

%broyat polypropylene sale
    Liste3=(def(compose,broyat_polypropylene_sale,_,_,_,polypropylene),
    def(contient_trace,broyat_polypropylene_sale,_,_,_,metal),
    def(taille,broyat_polypropylene_sale,1,3,cm,_),
    def(forme,broyat_polypropylene_sale,_,_,_,broyat)
    ),
    ajouter_etat(Liste3,ID3),
    ajouter_type(broyat_polypropylene_sale,objet),

%broyat polypropylene
    Liste4=(def(compose,broyat_polypropylene,_,_,_,polypropylene),
    def(taille,broyat_polypropylene,1,3,cm,_),
    def(forme,broyat_polypropylene,_,_,_,broyat)
    ),
    ajouter_etat(Liste4,ID4),
    ajouter_type(broyat_polypropylene,objet),

%particule metale
% Liste5x=(def(compose,particule_metale,_,_,_,metal),
% def(taille,particule_metale,1,3,mm,_),
% def(forme,particule_metale,_,_,_,particule)
% ),
% ajouter_etat(Liste5x,ID5x),
% ajouter_type(particule_metale,objet),

%poudrette polypropylene sale
    Liste5=(def(compose,poudrette_polypropylene_sale,_,_,_,polypropylene),
    def(taille,poudrette_polypropylene_sale,1,3,mm,_),
    def(forme,poudrette_polypropylene_sale,_,_,_,poudrette),
```

C. SCRIPT UTILISÉ POUR INITIALISER LA BASE DE CAS

```

def(contient_trace ,poudrette_polypropylene_sale ,_,_,_, salete)
),
ajouter_etat(Liste5 ,ID5) ,
ajouter_type(poudrette_polypropylene_sale ,objet) ,

%poudrette polypropylene humide
Liste6=(def(compose ,poudrette_polypropylene_humide ,_,_,_, polypropylene) ,
def(taille ,poudrette_polypropylene_humide ,1,3 ,mm,_) ,
def(forme ,poudrette_polypropylene_humide ,_,_,_, poudrette) ,
def(contient_trace ,poudrette_polypropylene_humide ,_,_,_, eau)
),
ajouter_etat(Liste6 ,ID6) ,
ajouter_type(poudrette_polypropylene_humide ,objet) ,

%poudrette polypropylene
Liste7=(def(compose ,poudrette_polypropylene ,_,_,_, polypropylene) ,
def(taille ,poudrette_polypropylene ,1,3 ,mm,_) ,
def(forme ,poudrette_polypropylene ,_,_,_, poudrette)
),
ajouter_etat(Liste7 ,ID7) ,
ajouter_type(poudrette_polypropylene ,objet) ,

%***** Trajectoire 2
→ *****
%IV
Liste8=(def(contient ,tv ,_,_,_, tube_cathodique) ,
def(contient ,tv ,_,_,_, armature_tv) ,
def(forme ,armature_tv ,_,_,_, monobloc) ,
def(compose ,armature_tv ,_,_,_, plastique) ,
def(contient ,tube_cathodique ,_,_,_, piece_eletrique) ,
def(contient ,tube_cathodique ,_,_,_, tube_verre) ,
def(compose ,tube_verre ,_,_,_, verre) ,
def(compose ,tube_verre ,_,_,_, verre_plomb) ,
def(compose ,piece_eletrique ,_,_,_, metal)
),
ajouter_etat(Liste8 ,ID8) ,
ajouter_type(tv ,objet) ,
ajouter_type(armature_tv ,objet) ,
ajouter_type(tube_cathodique ,objet) ,
ajouter_type(tube_verre ,objet) ,
ajouter_type(piece_eletrique ,objet) ,

%tube cathodique
Liste9=(
def(contient ,tube_cathodique ,_,_,_, piece_eletrique) ,
def(contient ,tube_cathodique ,_,_,_, tube_verre) ,
def(compose ,tube_verre ,_,_,_, verre) ,
def(compose ,tube_verre ,_,_,_, verre_plomb) ,
def(compose ,piece_eletrique ,_,_,_, metal)
),
ajouter_etat(Liste9 ,ID9) ,

%armature_tv
Liste10=(
def(compose ,armature_tv ,_,_,_, plastique) ,
def(forme ,armature_tv ,_,_,_, monobloc)
),
ajouter_etat(Liste10 ,ID10) ,

```

ANNEXE B. ANNEXE : DONNÉES POUR L'ÉVALUATION DE LA GÉNÉRATION DE TRAJECTOIRE

```
write(' fin_10 '), write('\n'),  
  
%broyat armature tv  
Liste11=(  
  def(compose, armature_tv, _, _, _, plastique),  
  def(forme, armature_tv, _, _, _, broyat),  
  def(contient_trace, armature_tv, _, _, _, salete)  
),  
ajouter_etat(Liste11, ID11),  
  
%broyat plastique  
Liste12=(  
  def(compose, broyat_plastique, _, _, _, plastique),  
  def(forme, broyat_plastique, _, _, _, broyat)  
),  
ajouter_etat(Liste12, ID12),  
ajouter_type(broyat_plastique, objet),  
  
%residu  
Liste13=(  
  def(compose, residu, _, _, _, salete),  
  def(forme, residu, _, _, _, broyat)  
),  
ajouter_etat(Liste13, ID13),  
ajouter_type(residu, objet),  
  
write(' fin_13 '), write('\n'),  
  
%tube_tube_cathodique  
Liste14=(  
  def(compose, tube_tube_cathodique, _, _, _, verre),  
  def(forme, tube_tube_cathodique, _, _, _, monobloc)  
),  
ajouter_etat(Liste14, ID14),  
ajouter_type(tube_tube_cathodique, objet),  
  
write(' fin_14 '), write('\n'),  
  
%verre-broye-sale  
Liste16=(  
  def(compose, verre_broye_sale, _, _, _, verre),  
  def(forme, verre_broye_sale, _, _, _, broyat),  
  def(contient_trace, verre_broye_sale, _, _, _, salete)  
),  
ajouter_etat(Liste16, ID16),  
ajouter_type(verre_broye_sale, objet),  
  
write(' fin_16 '), write('\n'),  
  
%verre-broye  
Liste17=(  
  def(compose, verre_broye, _, _, _, verre),  
  def(forme, verre_broye, _, _, _, broyat)  
),  
ajouter_etat(Liste17, ID17),  
ajouter_type(verre_broye, objet),  
  
write(' fin_17 '), write('\n'),  
%ecran_cathodique
```

```

Liste15=(
def(compose,ecran_cathodique,_,_,_,verre_plomb),
def(forme,ecran_cathodique,_,_,_,monobloc)
),
ajouter_etat(Liste15,ID15),
ajouter_type(ecran_cathodique,objet),

write('fin_15'),write('\n'),

%verre-plomb-broye-sale
Liste18=(
def(compose,verre_plomb_broye_sale,_,_,_,verre_plomb),
def(forme,verre_plomb_broye_sale,_,_,_,broyat),
def(contient_trace,verre_plomb_broye_sale,_,_,_,salete)
),
ajouter_etat(Liste18,ID18),
ajouter_type(verre_plomb_broye_sale,objet),

%verre-plomb-broye
Liste19=(
def(compose,verre_plomb_broye,_,_,_,verre_plomb),
def(forme,verre_plomb_broye,_,_,_,broyat)
),
ajouter_etat(Liste19,ID19),
ajouter_type(verre_plomb_broye,objet),

%***** Trajectoire 3
↳ *****

%tube_neon
Liste20=(
def(contient,tube_neon,_,_,_,tube_verre),
def(compose,tube_verre,_,_,_,verre),
def(contient,tube_neon,_,_,_,poudre_PhM),
def(compose,poudre_PhM,_,_,_,phosphore),
def(compose,poudre_PhM,_,_,_,mercure),
def(contient,tube_neon,_,_,_,piece_metal),
def(compose,piece_metal,_,_,_,metal),
def(forme,tube_verre,_,_,_,tube)
),
ajouter_etat(Liste20,ID20),
ajouter_type(tube_neon,objet),
ajouter_type(tube_verre,objet),
ajouter_type(poudre_PhM,objet),
ajouter_type(piece_metal,objet),

%broyat_tube_neon
Liste21=(
def(contient,broyat_tube_neon,_,_,_,tube_verre),
def(compose,broyat_tube_verre,_,_,_,verre),
def(contient,broyat_tube_neon,_,_,_,poudre_PhM),
def(compose,poudre_PhM,_,_,_,phosphore),
def(compose,poudre_PhM,_,_,_,mercure),
def(contient,broyat_tube_neon,_,_,_,broyat_piece_metal),
def(compose,broyat_piece_metal,_,_,_,metal),
def(forme,broyat_tube_verre,_,_,_,broyat)
),

```

ANNEXE B. ANNEXE : DONNÉES POUR L'ÉVALUATION DE LA GÉNÉRATION DE TRAJECTOIRE

```
ajouter_etat (Liste21 ,ID21) ,  
ajouter_type (broyat_tube_neon ,objet) ,  
ajouter_type (broyat_tube_verre ,objet) ,  
ajouter_type (broyat_piece_metal ,objet) ,
```

%poudre_PhM

```
Liste22=(  
def (compose ,poudre_PhM ,_ ,_ ,_ ,phosphore) ,  
def (compose ,poudre_PhM ,_ ,_ ,_ ,mercure) ,  
def (forme ,poudre_PhM ,_ ,_ ,_ ,poudre)  
) ,  
ajouter_etat (Liste22 ,ID22) ,
```

%broyat_tube_neon

```
Liste23=(  
def (contient ,broyat_tube_neon ,_ ,_ ,_ ,tube_verre) ,  
def (compose ,broyat_tube_verre ,_ ,_ ,_ ,verre) ,  
def (contient ,broyat_tube_neon ,_ ,_ ,_ ,broyat_piece_metal) ,  
def (compose ,broyat_piece_metal ,_ ,_ ,_ ,metal) ,  
def (forme ,broyat_tube_verre ,_ ,_ ,_ ,broyat)  
) ,  
ajouter_etat (Liste23 ,ID23) ,
```

%poudre_PhM

```
Liste25=(  
def (compose ,poudre_phosphore ,_ ,_ ,_ ,phosphore) ,  
def (forme ,poudre_phosphore ,_ ,_ ,_ ,poudre)  
) ,  
ajouter_etat (Liste25 ,ID25) ,  
ajouter_type (poudre_phosphore ,objet) ,
```

%liquide_mercure_sale

```
Liste26=(  
def (compose ,liquide_mercure_sale ,_ ,_ ,_ ,mercure) ,  
def (forme ,liquide_mercure_sale ,_ ,_ ,_ ,liquide) ,  
def (contient_trace ,liquide_mercure_sale ,_ ,_ ,_ ,salete)  
) ,  
ajouter_etat (Liste26 ,ID26) ,  
ajouter_type (liquide_mercure_sale ,objet) ,
```

%liquide_mercure

```
Liste27=(  
def (compose ,liquide_mercure ,_ ,_ ,_ ,mercure) ,  
def (forme ,liquide_mercure ,_ ,_ ,_ ,liquide)  
) ,  
ajouter_etat (Liste27 ,ID27) ,  
ajouter_type (liquide_mercure ,objet) ,
```

%broyat_piece_metal

```
Liste24=(  
def (compose ,broyat_piece_metal ,_ ,_ ,_ ,metal) ,  
def (forme ,broyat_piece_metal ,_ ,_ ,_ ,broyat)  
) ,  
ajouter_etat (Liste24 ,ID24) ,
```

```

write('fin_24'), write('\n'),
%***** Trajectoire 4
↳ *****
%bouteille_verre_sale
Liste28=(
def(compose, bouteille_verre_sale, _, _, _, verre_divers),
def(forme, bouteille_verre_sale, _, _, _, bouteille),
def(contient, bouteille_verre_sale, _, _, _, salete)
),
ajouter_etat(Liste28, ID28),
ajouter_type(bouteille_verre_sale, objet),

%bouteille_verre
Liste29=(
def(compose, bouteille_verre, _, _, _, verre_divers),
def(forme, bouteille_verre, _, _, _, bouteille)
),
ajouter_etat(Liste29, ID29),
ajouter_type(bouteille_verre, objet),

%broyat_verre_divers
Liste30=(
def(compose, broyat_verre_divers, _, _, _, verre_divers),
def(forme, broyat_verre_divers, _, _, _, broyat)
),
ajouter_etat(Liste30, ID30),
ajouter_type(broyat_verre_divers, objet),

%***** Trajectoire 5
↳ *****
%canette
Liste31=(
def(compose, canette, _, _, _, aluminium),
def(forme, canette, _, _, _, tube)
),
ajouter_etat(Liste31, ID31),
ajouter_type(canette, objet),

%conserve
Liste32=(
def(compose, conserve, _, _, _, aluminium),
def(forme, conserve, _, _, _, boite)
),
ajouter_etat(Liste32, ID32),
ajouter_type(conserve, objet),

%emballage_alu
Liste33=(
def(compose, emballage_alu, _, _, _, aluminium),
def(forme, emballage_alu, _, _, _, emballage)
),
ajouter_etat(Liste33, ID33),
ajouter_type(emballage_alu, objet),

%piece_alu
Liste34=(

```

ANNEXE B. ANNEXE : DONNÉES POUR L'ÉVALUATION DE LA GÉNÉRATION DE TRAJECTOIRE

```
def( compose , piece_alu , _ , _ , _ , aluminium ) ,
def( forme , piece_alu , _ , _ , _ , piece )
) ,
ajouter_etat ( Liste34 , ID34 ) ,
ajouter_type ( piece_alu , objet ) ,
```

%broyat_alu_sale

```
Liste35=(
def( compose , broyat_alu_sale , _ , _ , _ , aluminium ) ,
def( forme , broyat_alu_sale , _ , _ , _ , broyat ) ,
def( contient_trace , broyat_alu_sale , _ , _ , _ , salete )
) ,
ajouter_etat ( Liste35 , ID35 ) ,
ajouter_type ( broyat_alu_sale , objet ) ,
```

%broyat_alu

```
Liste36=(
def( compose , broyat_alu , _ , _ , _ , aluminium ) ,
def( forme , broyat_alu , _ , _ , _ , broyat )
) ,
ajouter_etat ( Liste36 , ID36 ) ,
ajouter_type ( broyat_alu , objet ) ,
```

%lingot_alu

```
Liste37=(
def( compose , lingot_alu , _ , _ , _ , aluminium ) ,
def( forme , lingot_alu , _ , _ , _ , lingot )
) ,
ajouter_etat ( Liste37 , ID37 ) ,
ajouter_type ( lingot_alu , objet ) ,
```

*%***** Trajectoire 6*

→ *****

%batterie

```
Liste38=(
def( contient , batterie , _ , _ , _ , carcasse_batterie ) ,
def( contient , batterie , _ , _ , _ , partie_plomb ) ,
def( contient , batterie , _ , _ , _ , partie_oxyde_plomb ) ,
def( contient , batterie , _ , _ , _ , liquide_acide ) ,
def( compose , carcasse_batterie , _ , _ , _ , polypropylene ) ,
def( compose , partie_plomb , _ , _ , _ , plomb ) ,
def( compose , partie_oxyde_plomb , _ , _ , _ , oxyde_plomb ) ,
def( compose , liquide_acide , _ , _ , _ , acide ) ,
def( forme , carcasse_batterie , _ , _ , _ , monobloc ) ,
def( forme , partie_plomb , _ , _ , _ , element ) ,
def( forme , partie_oxyde_plomb , _ , _ , _ , element ) ,
def( etat , partie_oxyde_plomb , _ , _ , _ , oxyde ) ,
def( etat , partie_plomb , _ , _ , _ , non_oxyde ) ,
def( forme , liquide_acide , _ , _ , _ , liquide )
) ,
ajouter_etat ( Liste38 , ID38 ) ,
ajouter_type ( batterie , objet ) ,
ajouter_type ( carcasse_batterie , objet ) ,
ajouter_type ( partie_plomb , objet ) ,
ajouter_type ( partie_oxyde_plomb , objet ) ,
ajouter_type ( liquide_acide , objet ) ,
```

C. SCRIPT UTILISÉ POUR INITIALISER LA BASE DE CAS

```
Liste39=(
def( contient , batterie ,_,_,_, carcasse_batterie ) ,
def( contient , batterie ,_,_,_, partie_plomb ) ,
def( contient , batterie ,_,_,_, partie_oxyde_plomb ) ,
def( compose , carcasse_batterie ,_,_,_, polypropylene ) ,
def( compose , partie_plomb ,_,_,_, plomb ) ,
def( compose , partie_oxyde_plomb ,_,_,_, oxyde_plomb ) ,
def( forme , carcasse_batterie ,_,_,_, monobloc ) ,
def( forme , partie_plomb ,_,_,_, element ) ,
def( etat , partie_oxyde_plomb ,_,_,_, oxyde ) ,
def( etat , partie_plomb ,_,_,_, non_oxyde ) ,
def( forme , partie_oxyde_plomb ,_,_,_, element )
) ,
ajouter _etat ( Liste39 , ID39 ) ,
```

```
Liste40=(
def( contient , batterie ,_,_,_, carcasse_batterie ) ,
def( contient , batterie ,_,_,_, partie_plomb ) ,
def( contient , batterie ,_,_,_, partie_oxyde_plomb ) ,
def( compose , carcasse_batterie ,_,_,_, polypropylene ) ,
def( compose , partie_plomb ,_,_,_, plomb ) ,
def( compose , partie_oxyde_plomb ,_,_,_, oxyde_plomb ) ,
def( forme , carcasse_batterie ,_,_,_, broyat ) ,
def( forme , partie_plomb ,_,_,_, broyat ) ,
def( etat , partie_oxyde_plomb ,_,_,_, oxyde ) ,
def( etat , partie_plomb ,_,_,_, non_oxyde ) ,
def( forme , partie_oxyde_plomb ,_,_,_, broyat )
) ,
ajouter _etat ( Liste40 , ID40 ) ,
```

```
Liste41=(
def( compose , partie_plomb ,_,_,_, plomb ) ,
def( etat , partie_plomb ,_,_,_, non_oxyde ) ,
def( forme , partie_plomb ,_,_,_, broyat )
) ,
ajouter _etat ( Liste41 , ID41 ) ,
```

```
Liste42=(
def( compose , partie_oxyde_plomb ,_,_,_, oxyde_plomb ) ,
def( etat , partie_oxyde_plomb ,_,_,_, oxyde ) ,
def( forme , partie_oxyde_plomb ,_,_,_, broyat )
) ,
ajouter _etat ( Liste42 , ID42 ) ,
```

```
Liste43=(
def( compose , bloc_plomb ,_,_,_, plomb_non_affine ) ,
def( forme , bloc_plomb ,_,_,_, bloc )
) ,
ajouter _etat ( Liste43 , ID43 ) ,
ajouter _type ( bloc_plomb , objet ) ,
```

```
Liste44=(
def( compose , bloc_plomb ,_,_,_, plomb ) ,
def( forme , bloc_plomb ,_,_,_, bloc )
```

ANNEXE B. ANNEXE : DONNÉES POUR L'ÉVALUATION DE LA GÉNÉRATION DE TRAJECTOIRE

```
    ),
    ajouter_etat (Liste44 ,ID44) ,

    Liste45=(
    def (compose ,lingot _plomb ,_ ,_ ,_ ,plomb) ,
    def (forme ,lingot _plomb ,_ ,_ ,_ ,lingot)
    ) ,
    ajouter_etat (Liste45 ,ID45) ,

    write( ' fin_etat ' ) , write( '\n' ) ,

%***** Creation des liens
→ *****
%ligne 1
    %niveau 2
    ajouter_transformation (broyage_bouchon ,ID1 ,ID3) ,
    ajouter_transformation (broyage_parechoc ,ID2 ,ID3) ,
    ajouter_transformation (flotation ,ID3 ,ID4) ,
    ajouter_transformation (broyage_fin ,ID4 ,ID5) ,
    ajouter_transformation (lavage_1 ,ID5 ,ID6) ,
    ajouter_transformation (sechage ,ID6 ,ID7) ,
    ajouter_usage (matiere_premiere ,ID7) ,

    %niveau 1
    ajouter_relation (traitement ,ID1 ,ID5) ,
    ajouter_relation (traitement ,ID2 ,ID5) ,
    ajouter_relation (pretraitement ,ID5 ,ID7) ,

    %niveau 0
    ajouter_relation (revalorisation (matiere) ,ID1 ,ID7) ,
    ajouter_relation (revalorisation (matiere) ,ID2 ,ID7) ,

%ligne 2
    %niveau 2
    ajouter_transformation (demontage_tv_a ,ID8 ,ID10) ,
    ajouter_transformation (broyage_2 ,ID10 ,ID11) ,
    ajouter_transformation (tri_a ,ID11 ,ID12) ,
    ajouter_transformation (tri_b ,ID11 ,ID13) ,
    ajouter_transformation (demontage_tv_b ,ID8 ,ID9) ,
    ajouter_transformation (demontage_2_a ,ID9 ,ID14) ,
    ajouter_transformation (demontage_2_b ,ID9 ,ID15) ,
    ajouter_transformation (broyage_3 ,ID14 ,ID16) ,
    ajouter_transformation (lavage_2 ,ID16 ,ID17) ,
    ajouter_transformation (broyage_4 ,ID15 ,ID18) ,
    ajouter_transformation (lavage_3 ,ID18 ,ID19) ,
    ajouter_usage (matiere_premiere ,ID17) ,
    ajouter_usage (matiere_premiere ,ID19) ,

    %niveau 1
    ajouter_relation (pretraitement ,ID8 ,ID10) ,
    ajouter_relation (traitement ,ID10 ,ID12) ,
    ajouter_relation (traitement ,ID10 ,ID13) ,
    ajouter_relation (pretraitement ,ID8 ,ID14) ,
    ajouter_relation (pretraitement ,ID8 ,ID15) ,
    ajouter_relation (traitement ,ID14 ,ID16) ,
    ajouter_relation (traitement ,ID15 ,ID18) ,
```

C. SCRIPT UTILISÉ POUR INITIALISER LA BASE DE CAS

```
ajouter_relation(pretraitement ,ID16 ,ID17) ,
ajouter_relation(pretraitement ,ID18 ,ID19) ,
%ajouter_relation(pretraitement ,ID1 ,ID5) ,

%niveau 0
ajouter_relation(revalorisation(matiere) ,ID8 ,ID12) ,
ajouter_relation(revalorisation(matiere) ,ID8 ,ID13) ,
ajouter_relation(revalorisation(matiere) ,ID8 ,ID17) ,
ajouter_relation(revalorisation(matiere) ,ID8 ,ID19) ,

%***** Creation des liens
  ↳ *****
%ligne 3
%niveau2
ajouter_transformation(broyage_5 ,ID20 ,ID21) ,
ajouter_transformation(separation_poudre_a ,ID21 ,ID22) ,
ajouter_transformation(separation_chimique_a ,ID22 ,ID25) ,
ajouter_transformation(separation_chimique_b ,ID22 ,ID26) ,
ajouter_transformation(triple_distillation_mercure ,ID26 ,ID27) ,
ajouter_transformation(separation_poudre_b ,ID21 ,ID23) ,
ajouter_transformation(separation_metal_a ,ID23 ,ID24) ,
ajouter_transformation(separation_metal_b ,ID23 ,ID16) ,
ajouter_usage(matiere_premiere ,ID25) ,
ajouter_usage(matiere_premiere ,ID27) ,
ajouter_usage(matiere_premiere ,ID24) ,

%niveau 1
ajouter_relation(traitement ,ID20 ,ID25) ,
ajouter_relation(traitement ,ID20 ,ID26) ,
ajouter_relation(traitement ,ID20 ,ID24) ,
ajouter_relation(op_valorisation ,ID26 ,ID27) ,
ajouter_relation(traitement ,ID20 ,ID16) ,

%niveau 0
ajouter_relation(revalorisation(matiere) ,ID20 ,ID25) ,
ajouter_relation(revalorisation(matiere) ,ID20 ,ID27) ,
ajouter_relation(revalorisation(matiere) ,ID20 ,ID24) ,

%***** Creation des liens
  ↳ *****
%ligne 4
%niveau2
ajouter_transformation(tri2 ,ID28 ,ID29) ,
ajouter_transformation(broyage_bouteille ,ID29 ,ID30) ,
ajouter_transformation(separation_verre ,ID30 ,ID16) ,

%niveau 1
ajouter_relation(traitement ,ID28 ,ID16) ,

%niveau 0
ajouter_relation(revalorisation(matiere) ,ID28 ,ID16) ,

%***** Creation des liens
  ↳ *****
%ligne 5
%niveau2
ajouter_transformation(broyage_alu ,ID31 ,ID35) ,
```

ANNEXE B. ANNEXE : DONNÉES POUR L'ÉVALUATION DE LA GÉNÉRATION DE TRAJECTOIRE

```
ajouter_transformation(broyage_alu , ID32 , ID35) ,
ajouter_transformation(broyage_alu , ID33 , ID35) ,
ajouter_transformation(broyage_alu , ID34 , ID35) ,
ajouter_transformation(purification , ID35 , ID36) ,
ajouter_transformation(coulage , ID36 , ID37) ,
ajouter_usage(matiere_premiere , ID37) ,

%niveau 1
ajouter_relation(traitements , ID31 , ID35) ,
ajouter_relation(traitements , ID32 , ID35) ,
ajouter_relation(traitements , ID33 , ID35) ,
ajouter_relation(traitements , ID34 , ID35) ,
ajouter_relation(pretraitement , ID35 , ID36) ,
ajouter_relation(op_valorisation , ID36 , ID37) ,

%niveau 0
ajouter_relation(revalorisation(matiere) , ID31 , ID37) ,
ajouter_relation(revalorisation(matiere) , ID32 , ID37) ,
ajouter_relation(revalorisation(matiere) , ID33 , ID37) ,
ajouter_relation(revalorisation(matiere) , ID34 , ID37) ,

%***** Creation des liens
→ *****
%ligne 6
%niveau2
ajouter_transformation(neutralisation_acide , ID38 , ID39) ,
ajouter_transformation(broyage_batterie , ID39 , ID40) ,
ajouter_transformation(separation_oxyde_plomb , ID40 , ID42) ,
ajouter_transformation(cuisson_oxyde_plomb , ID42 , ID43) ,
ajouter_transformation(affinage_plomb , ID43 , ID44) ,
ajouter_transformation(coulee_plomb , ID44 , ID45) ,
ajouter_transformation(separation_plomb , ID40 , ID41) ,
ajouter_transformation(coulee_plomb , ID41 , ID45) ,
ajouter_transformation(separation_polypropylene , ID40 , ID4) ,
ajouter_usage(matiere_premiere , ID45) ,

%niveau 1
ajouter_relation(pretraitement , ID38 , ID39) ,
ajouter_relation(traitements , ID39 , ID42) ,
ajouter_relation(traitements , ID39 , ID41) ,
ajouter_relation(traitements , ID39 , ID4) ,
ajouter_relation(op_valorisation , ID42 , ID45) ,
ajouter_relation(op_valorisation , ID41 , ID45) ,

%niveau 0
ajouter_relation(revalorisation(matiere) , ID38 , ID45) ,

write('fin_relation') , write('\n') ,

%***** defintion onotologie procede
→ *****
%traitement
%broyage
ajout_ontologie(transformation(broyage_bouchon) , traitement) ,
ajout_ontologie(transformation(broyage_parechoc) , traitement) ,
ajout_ontologie(transformation(broyage_fin) , traitement) ,
ajout_ontologie(transformation(broyage_2) , traitement) ,
```

C. SCRIPT UTILISÉ POUR INITIALISER LA BASE DE CAS

```
ajout_ontologie(transformation(broyage_3), traitement),
ajout_ontologie(transformation(broyage_4), traitement),
ajout_ontologie(transformation(broyage_5), traitement),
ajout_ontologie(transformation(broyage_bouteille), traitement),
ajout_ontologie(transformation(broyage_alu), traitement),
ajout_ontologie(transformation(broyage_batterie), traitement),

%separation
ajout_ontologie(transformation(flotation), traitement),
ajout_ontologie(transformation(tri_a), traitement),
ajout_ontologie(transformation(tri_b), traitement),
ajout_ontologie(transformation(separation_poudre_a), traitement),
ajout_ontologie(transformation(separation_poudre_b), traitement),
ajout_ontologie(transformation(separation_chimique_a), traitement),
ajout_ontologie(transformation(separation_chimique_b), traitement),
ajout_ontologie(transformation(tri2), traitement),
ajout_ontologie(transformation(separation_metal_a), traitement),
ajout_ontologie(transformation(separation_metal_b), traitement),
ajout_ontologie(transformation(separation_verre), traitement),
ajout_ontologie(transformation(separation_oxyde_plomb), traitement),
ajout_ontologie(transformation(separation_plomb), traitement),
ajout_ontologie(transformation(separation_polypropylene), traitement),

%pretraitement
%lavage
ajout_ontologie(transformation(lavage_1), pretraitement),
ajout_ontologie(transformation(sechage), pretraitement),
ajout_ontologie(transformation(lavage_2), pretraitement),
ajout_ontologie(transformation(lavage_3), pretraitement),
ajout_ontologie(transformation(purification), pretraitement),
ajout_ontologie(transformation(neutralisation_acide), pretraitement),

%demontage
ajout_ontologie(transformation(demontage_tv_a), pretraitement),
ajout_ontologie(transformation(demontage_tv_b), pretraitement),
ajout_ontologie(transformation(demontage_2_a), pretraitement),
ajout_ontologie(transformation(demontage_2_b), pretraitement),

%op_valorisation
ajout_ontologie(transformation(triple_distillation_mercure),
↳ op_valorisation),
ajout_ontologie(transformation(coulage), op_valorisation),
ajout_ontologie(transformation(cuisson_oxyde_plomb), op_valorisation),
ajout_ontologie(transformation(affinage_plomb), op_valorisation),
ajout_ontologie(transformation(coulee_plomb), op_valorisation),

%valorisation_matiere
ajout_ontologie(traitement, revalorisation(matiere)),
ajout_ontologie(pretraitement, revalorisation(matiere)),
ajout_ontologie(op_valorisation, revalorisation(matiere)),

%***** defintion onotologie concepts
↳ *****
%constituant
ajout_ontologie(salete, constituant),
ajout_ontologie(acide, constituant),
```


ANNEXE B. ANNEXE : DONNÉES POUR L'ÉVALUATION DE LA GÉNÉRATION DE
TRAJECTOIRE

ANNEXE : DONNÉES SUR LA MODÉLISATION DE LA TRAJECTOIRE DE VALORISATION DU PNEU USÉ

A SCRIPT PYTHON UTILISÉ POUR LA MODÉLISATION

```
from Projet import Projet
from Flux import Flux
from datetime import date, time, datetime, timedelta
```

```
#
```

```
↳ *****
↳
```

```
#_____Modélisation de la filiere de valorisation matiere du pneu
#_____Production de 3 types de gommés
#_____Extraction du fer et de la fibre (corde)
```

```
#_____debut du projet 2015
#_____fin 2030
#_____annee0 2014
```

```
#
```

```
↳ *****
↳
```

```
Proj=Projet("ModelisationPneu")
```

```
#ajout des composants
```

```
Proj.ajouterComposants('Euro',Unite='E')
Proj.ajouterComposants('Pneu',Unite='kg')
Proj.ajouterComposants('Gomme150',Unite='kg') # 150 mm
Proj.ajouterComposants('Gomme25',Unite='kg') # 25 mm
Proj.ajouterComposants('Gomme1',Unite='kg') # 2 a 4 mm
Proj.ajouterComposants('Gomme2',Unite='kg') # 1 a 2 mm
Proj.ajouterComposants('Gomme3',Unite='kg') # 0 a 1mm
Proj.ajouterComposants('Fer',Unite='kg')
Proj.ajouterComposants('Fibre',Unite='kg')
Proj.ajouterComposants('Diesel',Unite='l')
Proj.ajouterComposants('Electricite',Unite='kWh')
Proj.ajouterComposants('Electricity_industry',Unite='kWh')
#EcoCost
```

ANNEXE C. ANNEXE : DONNÉES SUR LA MODÉLISATION DE LA TRAJECTOIRE DE VALORISATION DU PNEU USÉ

```

Proj.ajouterComposants('T18',Unite='km')
Proj.ajouterComposants('N21',Unite='kWh')

#creation d une entite
↪ *****
↪
#transport

#fonction calcul prix un trajet
def transport_PrixUni(obj):
    try:
        kmvide=obj.Parametres['kmvide']
        kmcharge=obj.Parametres['kmcharge']
        cout_km=obj.Parametres['cout_km']
        tps_service=obj.Parametres['tps_service']
        cout_jour=obj.Parametres['cout_jour']
        tpscharge=(kmvide+kmcharge)/68
        prixuni=cout_km*kmvide+cout_km*kmcharge+tps_service*tpscharge+
            ↪ cout_jour/9*tpscharge #9heure par jour
    except:
        prixuni=0
    return prixuni

def transport_Consouni(obj):
    try:
        kmvide=obj.Parametres['kmvide']
        kmcharge=obj.Parametres['kmcharge']
        base_conso100km=obj.Parametres['base_conso100km']
        conso=(kmcharge+kmvide)/100*base_conso100km
    except:
        conso=0
    return conso

def transport_kmTotal(obj):
    try:
        kmvide=obj.Parametres['kmvide']
        kmcharge=obj.Parametres['kmcharge']
        km=kmvide+kmcharge
    except:
        km=0
    return km

Regles={1:'E1_mat>@_=_S1_mat>@'} # 5 euro le kg transporte
Regles[12]='charge_max*nbcamions-kgmasse=0' #un camion transporte 25tonnes
↪ monochargeement
Regles[15]='PrixUni*nbcamions-E1_eco>Euro=0'
Regles[18]='kgmasse=10000'

Regles[23]='Consouni*nbcamions-E1_resnat>Diesel=0' #cosnommation diesel litre

Regles[30]='kmTotal*nbcamions-_1*S1_emis>T18_=_0' #emission Eco
↪ Truck_trailer_net_24_tons

Entrees=['E1_mat','E1_eco','E1_resnat']
Sorties=['S1_mat','S1_eco','S1_emis']
ComposantsX=['Euro','Diesel']

VariablesX=['nbcamions','kgmasse']

```

A. SCRIPT PYTHON UTILISÉ POUR LA MODÉLISATION

```

ParametresX={'kmcharge':200,'kmvide':20,'cout_km':0.455,'tps_service':22.12,'
↳ cout_jour':153.44,'charge_max':25000,'base_conso100km':30}
#base_conso = 2.1737898 Mj/t.km source Ademe
FonctionsX={'PrixUni':transport_PrixUni,'Consouni':transport_Consouni,'kmTotal':
↳ transport_kmTotal}
Proj.creerModelEntite("transport",Regles,Entrees,Sorties,Parametres=ParametresX,
↳ Fonctions=FonctionsX,Composants=ComposantsX,Variables=VariablesX)

#Process*****
#hypotheses
#Nombre de jour travaille par an : 200 jours
#nombre d heures de fonctionnement par jour : 21 heures (3 postes)

def process_EnergieConsomme(obj):
    try:
        NbJoursTravail=obj.Parametres['NbJoursTravail']
        NbHeuresJour=obj.Parametres['NbHeuresJour']
        Puissance_kw=obj.Parametres['Puissance_kw']
        EnergieConsomme= NbJoursTravail*NbHeuresJour*Puissance_kw
    except:
        EnergieConsomme=0
    return EnergieConsomme

#process une entree une sortie => GP1, GP2, GP4-2, GP4-3, classification
Regles={1:'E1_mat>@_=_S1_mat>@'}
Regles={10:'EnergieConsomme_=_E1_energ>Electricite'}
Entrees=['E1_mat','E1_energ']
Sorties=['S1_mat','S1_eco']
ComposantsX=[]
VariablesX=[]
FonctionsX={'EnergieConsomme':process_EnergieConsomme}
ParametresX={'NbJoursTravail':200,'NbHeuresJour':21,'Puissance_kw':10}
Proj.creerModelEntite("process1-1",Regles,Entrees,Sorties,Parametres=ParametresX,
↳ Fonctions=FonctionsX,Composants=ComposantsX,Variables=VariablesX)

#process une entree 3 sorties => GP3, GP4-1
Regles={1:'E1_mat>@_=_S1_mat>@'} #regles a definir au cas par cas
Regles={10:'EnergieConsomme_=_E1_energ>Electricite'}
Entrees=['E1_mat','E1_energ']
Sorties=['S1_mat','S2_mat','S3_mat','S1_eco']
ComposantsX=[]
VariablesX=[]
FonctionsX={'EnergieConsomme':process_EnergieConsomme}
ParametresX={'NbJoursTravail':200,'NbHeuresJour':21,'Puissance_kw':10}
Proj.creerModelEntite("process1-3",Regles,Entrees,Sorties,Parametres=ParametresX,
↳ Fonctions=FonctionsX,Composants=ComposantsX,Variables=VariablesX)

#entree/sortie
Regles={1:'E1_mat>@_=_S1_mat>@'}
Entrees=['E1_mat','E1_eco']
Sorties=['S1_mat','S1_eco']
ComposantsX=[]
VariablesX=[]
ParametresX={}
Proj.creerModelEntite("entreeSortie",Regles,Entrees,Sorties,Parametres=
↳ ParametresX,Fonctions={},Composants=ComposantsX,Variables=VariablesX)

#acheteurs

```

ANNEXE C. ANNEXE : DONNÉES SUR LA MODÉLISATION DE LA TRAJECTOIRE DE VALORISATION DU PNEU USÉ

```

Regles={1: 'S1_eco>@=0'} #regles economique a definir
Entrees=['E1_mat']
Sorties=['S1_eco']
ComposantsX=[]
VariablesX=[]
ParametresX={}
Proj.creerModelEntite("acheteur",Regles,Entrees,Sorties,Parametres=ParametresX,
    ↪ Fonctions={},Composants=ComposantsX,Variables=VariablesX)

#source
Regles={1: 'S1_mat>@=0'} #regles economique a definir
Entrees=[]
Sorties=['S1_mat','S1_eco']
ComposantsX=[]
VariablesX=[]
ParametresX={}
Proj.creerModelEntite("source",Regles,Entrees,Sorties,Parametres=ParametresX,
    ↪ Fonctions={},Composants=ComposantsX,Variables=VariablesX)

#source multipport E/S
#10 entrees et 10 sorties
#sorties matieres, entrees economiques
Regles={} #regles economique a definir
Entrees=['E1_eco','E2_eco','E3_eco','E4_eco','E5_eco','E6_eco','E7_eco','E8_eco',
    ↪ 'E9_eco','E10_eco']
Sorties=['S1_mat','S2_mat','S3_mat','S4_mat','S5_mat','S6_mat','S7_mat','S8_mat',
    ↪ 'S9_mat','S10_mat']
ComposantsX=[]
VariablesX=[]
ParametresX={'PrixDieselCts':93}
Proj.creerModelEntite("source_multiportEM",Regles,Entrees,Sorties,Parametres=
    ↪ ParametresX,Fonctions={},Composants=ComposantsX,Variables=VariablesX)

Regles={} #regles economique a definir
Regles[1]='PrixkWhMilliemeEuros*S1_energ>Electricite_-1000*E1_eco>Euro=0_'
Regles[2]='PrixkWhMilliemeEuros*S2_energ>Electricite_-1000*E2_eco>Euro=0_'
Regles[3]='PrixkWhMilliemeEuros*S3_energ>Electricite_-1000*E3_eco>Euro=0_'
Regles[4]='PrixkWhMilliemeEuros*S4_energ>Electricite_-1000*E4_eco>Euro=0_'
Regles[5]='PrixkWhMilliemeEuros*S5_energ>Electricite_-1000*E5_eco>Euro=0_'
Regles[6]='PrixkWhMilliemeEuros*S6_energ>Electricite_-1000*E6_eco>Euro=0_'
Regles[7]='PrixkWhMilliemeEuros*S7_energ>Electricite_-1000*E7_eco>Euro=0_'
Regles[8]='PrixkWhMilliemeEuros*S8_energ>Electricite_-1000*E8_eco>Euro=0_'
Regles[9]='PrixkWhMilliemeEuros*S9_energ>Electricite_-1000*E9_eco>Euro=0_'
Regles[10]='PrixkWhMilliemeEuros*S10_energ>Electricite_-1000*E10_eco>Euro=0_'

Regles[11]='1*S1_energ>Electricite_+1*S2_energ>Electricite_+1*S3_energ>
    ↪ Electricite_+1*S4_energ>Electricite_+1*S5_energ>Electricite_+1*S6_energ>
    ↪ Electricite_+1*S7_energ>Electricite_+1*S8_energ>Electricite_+1*S9_energ>
    ↪ Electricite_+1*S10_energ>Electricite_-1*S1_emis>N21=0_'

#Regles[11]='S1_emis>N21=77777'

Entrees=['E1_eco','E2_eco','E3_eco','E4_eco','E5_eco','E6_eco','E7_eco','E8_eco',
    ↪ 'E9_eco','E10_eco']
Sorties=['S1_energ','S2_energ','S3_energ','S4_energ','S5_energ','S6_energ',
    ↪ 'S7_energ','S8_energ','S9_energ','S10_energ','S1_emis']
ComposantsX=[]

```

```

VariablesX=[]
ParametresX={'PrixkWhMilliemeEuros':76}
Proj.creerModelEntite("source_multiportEE",Regles,Entrees,Sorties,Parametres=
    ↪ ParametresX,Fonctions={},Composants=ComposantsX,Variables=VariablesX)

#source multipport E
#10 entrees et 10 sorties
#entrees matieres
Regles={} #regles economique a definir
Entrees=['E1_emis','E2_emis','E3_emis','E4_emis','E5_emis','E6_emis','E7_emis','
    ↪ E8_emis','E9_emis','E10_emis']
Sorties=[]
ComposantsX=[]
VariablesX=[]
ParametresX={}
Proj.creerModelEntite("source_multiportM",Regles,Entrees,Sorties,Parametres=
    ↪ ParametresX,Fonctions={},Composants=ComposantsX,Variables=VariablesX)

#
    ↪ *****
    ↪
#creation d une simulation
Proj.creerSimulation(1,2015,30) #simulation 1, debut 2015, duree 30 ans
#
    ↪ *****
    ↪
#Creation des entites
Proj.Simulation[1].creerEntite('Transport1',"transport")
Proj.Simulation[1].creerEntite('Transport2',"transport")
Proj.Simulation[1].creerEntite('Transport3',"transport")
Proj.Simulation[1].creerEntite('Transport4',"transport")
Proj.Simulation[1].creerEntite('Transport5',"transport")
Proj.Simulation[1].creerEntite('Transport6',"transport")

Proj.Simulation[1].creerEntite('GP1',"process1-1")
Proj.Simulation[1].creerEntite('GP2',"process1-1")
Proj.Simulation[1].creerEntite('GP42',"process1-1")
Proj.Simulation[1].creerEntite('GP43',"process1-1")
Proj.Simulation[1].creerEntite('Classification',"process1-1")

Proj.Simulation[1].creerEntite('GP3',"process1-3")
Proj.Simulation[1].creerEntite('GP41',"process1-3")

Proj.Simulation[1].creerEntite('Entree',"entreeSortie")
Proj.Simulation[1].creerEntite('Sortie1',"entreeSortie")
Proj.Simulation[1].creerEntite('Sortie2',"entreeSortie")
Proj.Simulation[1].creerEntite('Sortie3',"entreeSortie")
Proj.Simulation[1].creerEntite('Sortie4',"entreeSortie")
Proj.Simulation[1].creerEntite('Sortie5',"entreeSortie")

Proj.Simulation[1].creerEntite('AcheteursGomme1',"acheteur")
Proj.Simulation[1].creerEntite('AcheteursGomme2',"acheteur")
Proj.Simulation[1].creerEntite('AcheteursGomme3',"acheteur")
Proj.Simulation[1].creerEntite('AcheteursFer',"acheteur")
Proj.Simulation[1].creerEntite('AcheteursFibre',"acheteur")

Proj.Simulation[1].creerEntite('sourcePneus',"source")
Proj.Simulation[1].creerEntite('FabricantsPneus',"source")

```

ANNEXE C. ANNEXE : DONNÉES SUR LA MODÉLISATION DE LA TRAJECTOIRE DE VALORISATION DU PNEU USÉ

```
Proj.Simulation [1].creerEntite('Ressources_naturelles',"source_multiportEM")
Proj.Simulation [1].creerEntite('Energie_electrique',"source_multiportEE")
Proj.Simulation [1].creerEntite('Environnement',"source_multiportM")

#parametrages des differents elements
#GP1
Proj.Simulation [1].Entites ['GP1'].Composants=['Pneu','Gomme150','Fer','Fibre']
#Proj.Simulation [1].Entites ['GP1'].Regles [1]='S1_mat>Pneu=0'
Proj.Simulation [1].Entites ['GP1'].Regles [2]='75*E1_mat>Pneu_100*S1_mat>Gomme150
→ =0'
Proj.Simulation [1].Entites ['GP1'].Regles [3]='15*E1_mat>Pneu_100*S1_mat>Fer=0'
Proj.Simulation [1].Entites ['GP1'].Regles [4]='10*E1_mat>Pneu_100*S1_mat>Fibre=0'
Proj.Simulation [1].Entites ['GP1'].Regles [5]='S1_mat>Pneu=0'
Proj.Simulation [1].Entites ['GP1'].Parametres ['Puissance_kw']=885 #puissance en kW
Proj.Simulation [1].Entites ['GP1'].Parametres ['NB_emplois']=115 #puissance en kW
Proj.Simulation [1].Entites ['GP1'].Parametres ['Zone_geographique']=61 #Toulouse

##GP2
Proj.Simulation [1].Entites ['GP2'].Composants=['Gomme25','Gomme150','Fer','Fibre']
Proj.Simulation [1].Entites ['GP2'].Regles [2]='E1_mat>Gomme150=S1_mat>Gomme25'
Proj.Simulation [1].Entites ['GP2'].Regles [3]='E1_mat>Fer=S1_mat>Fer'
Proj.Simulation [1].Entites ['GP2'].Regles [4]='E1_mat>Fibre=S1_mat>Fibre'
Proj.Simulation [1].Entites ['GP2'].Parametres ['Puissance_kw']=21 #puissance en kW

##GP3
Proj.Simulation [1].Entites ['GP3'].Composants=['Gomme25','Gomme1','Fer','Fibre']
Proj.Simulation [1].Entites ['GP3'].Regles [2]='E1_mat>Fer=S3_mat>Fer'
Proj.Simulation [1].Entites ['GP3'].Regles [3]='57*E1_mat>Gomme25-100*S2_mat>Gomme1
→ =0' #57 % de la gomme sort
Proj.Simulation [1].Entites ['GP3'].Regles [4]='43*E1_mat>Gomme25-100*S1_mat>Gomme1
→ =0' #sortie principale
Proj.Simulation [1].Entites ['GP3'].Regles [5]='E1_mat>Fibre=S1_mat>Fibre' #sortie
→ principale
Proj.Simulation [1].Entites ['GP3'].Parametres ['Puissance_kw']=43 #puissance en kW

##GP41
Proj.Simulation [1].Entites ['GP41'].Composants=['Gomme2','Gomme1','Fibre']
Proj.Simulation [1].Entites ['GP41'].Regles [2]='E1_mat>Fibre=S3_mat>Fibre'
Proj.Simulation [1].Entites ['GP41'].Regles [3]='21*E1_mat>Gomme1-43*S2_mat>Gomme2=0
→ ' #21 % de la gomme sort
Proj.Simulation [1].Entites ['GP41'].Regles [4]='22*E1_mat>Gomme1-43*S1_mat>Gomme2=0
→ ' #sortie principale
Proj.Simulation [1].Entites ['GP41'].Parametres ['Puissance_kw']=17 #puissance en kW

##GP42
Proj.Simulation [1].Entites ['GP42'].Composants=['Gomme2']
Proj.Simulation [1].Entites ['GP42'].Regles [2]='E1_mat>Gomme2=S1_mat>Gomme2'
Proj.Simulation [1].Entites ['GP42'].Parametres ['Puissance_kw']=18 #puissance en kW

##GP43
Proj.Simulation [1].Entites ['GP43'].Composants=['Gomme2','Gomme3']
Proj.Simulation [1].Entites ['GP43'].Regles [2]='E1_mat>Gomme2=S1_mat>Gomme3'
Proj.Simulation [1].Entites ['GP43'].Parametres ['Puissance_kw']=8 #puissance en kW

##classification
Proj.Simulation [1].Entites ['Classification'].Composants=['Gomme3']
```

A. SCRIPT PYTHON UTILISÉ POUR LA MODÉLISATION

```

Proj. Simulation [1]. Entites [ 'Classification' ]. Regles [1]= 'E1_mat>Gomme3=S1_mat>
↳ Gomme3'
Proj. Simulation [1]. Entites [ 'Classification' ]. Parametres [ 'Puissance_kw' ]=5 #
↳ puissance en kW

#####parametrage acheteurs
Proj. Simulation [1]. Entites [ 'AcheteursGomme1' ]. Regles [1]= '135*E1_mat>Gomme1-1000*
↳ S1_eco>Euro=0' #135 euros tonnes
Proj. Simulation [1]. Entites [ 'AcheteursGomme2' ]. Regles [1]= '185*E1_mat>Gomme2-1000*
↳ S1_eco>Euro=0' #185 euros tonnes
Proj. Simulation [1]. Entites [ 'AcheteursGomme3' ]. Regles [1]= '190*E1_mat>Gomme3-1000*
↳ S1_eco>Euro=0' #190 euros tonnes
Proj. Simulation [1]. Entites [ 'AcheteursFer' ]. Regles [1]= '62*E1_mat>Fer-1000*S1_eco>
↳ Euro=0' #62 euros tonnes
Proj. Simulation [1]. Entites [ 'AcheteursFibre' ]. Regles [1]= '15*E1_mat>Fibre-1000*
↳ S1_eco>Euro=0' #15 euros tonnes

#####source
Proj. Simulation [1]. Entites [ 'sourcePneus' ]. Composants=[ 'Pneu' ]
Proj. Simulation [1]. Entites [ 'sourcePneus' ]. Regles [2]= 'S1_mat>Pneu=21000000'

#####entreeusine
Proj. Simulation [1]. Entites [ 'Entree' ]. Composants=[ 'Euro' ]
Proj. Simulation [1]. Entites [ 'Entree' ]. Regles [2]= '1000*E1_eco>Euro-21*E1_mat>Pneu=0
↳ ' #prix traitement 21 euros tonne

#####Transport
Proj. Simulation [1]. Entites [ 'Transport1' ]. Regles [18]= 'kgmasse=E1_mat>Pneu'
Proj. Simulation [1]. Entites [ 'Transport1' ]. Parametres [ 'NB_emplois' ]=44
Proj. Simulation [1]. Entites [ 'Transport1' ]. Parametres [ 'Zone_geographique' ]=9101 #
↳ carcassonne
Proj. Simulation [1]. Entites [ 'Transport1' ]. Parametres [ 'Chiffre_affaire' ]=100000 #
↳ chiffre d'affaire total de l entreprise

Proj. Simulation [1]. Entites [ 'Transport2' ]. Regles [18]= 'kgmasse=E1_mat>Gomme3'
Proj. Simulation [1]. Entites [ 'Transport2' ]. Parametres [ 'NB_emplois' ]=99
Proj. Simulation [1]. Entites [ 'Transport2' ]. Parametres [ 'Zone_geographique' ]=61 #
↳ Toulouse
Proj. Simulation [1]. Entites [ 'Transport2' ]. Parametres [ 'Chiffre_affaire' ]=100000 #
↳ chiffre d'affaire total de l entreprise

Proj. Simulation [1]. Entites [ 'Transport3' ]. Regles [18]= 'kgmasse=E1_mat>Fer'
Proj. Simulation [1]. Entites [ 'Transport3' ]. Parametres [ 'NB_emplois' ]=23
Proj. Simulation [1]. Entites [ 'Transport3' ]. Parametres [ 'Zone_geographique' ]=9101 #
↳ carcassonne
Proj. Simulation [1]. Entites [ 'Transport3' ]. Parametres [ 'Chiffre_affaire' ]=50000 #
↳ chiffre d'affaire total de l entreprise

Proj. Simulation [1]. Entites [ 'Transport4' ]. Regles [18]= 'kgmasse=E1_mat>Fibre'
Proj. Simulation [1]. Entites [ 'Transport5' ]. Regles [18]= 'kgmasse=E1_mat>Gomme1'
Proj. Simulation [1]. Entites [ 'Transport6' ]. Regles [18]= 'kgmasse=E1_mat>Gomme2'

#####ressources naturelles
Proj. Simulation [1]. Entites [ 'Ressources_naturelles' ]. Regles [1]= 'PrixDieselCts*
↳ S1_mat>Diesel-100*E1_eco>Euro=0'

```

ANNEXE C. ANNEXE : DONNÉES SUR LA MODÉLISATION DE LA TRAJECTOIRE DE VALORISATION DU PNEU USÉ

```

Proj.Simulation [1].Entites [ 'Ressources_naturelles ' ].Regles [2]= 'PrixDieselCts*
    ↳ S2_mat>Diesel-100*E2_eco>Euro=0'
Proj.Simulation [1].Entites [ 'Ressources_naturelles ' ].Regles [3]= 'PrixDieselCts*
    ↳ S3_mat>Diesel-100*E3_eco>Euro=0'
Proj.Simulation [1].Entites [ 'Ressources_naturelles ' ].Regles [4]= 'PrixDieselCts*
    ↳ S4_mat>Diesel-100*E4_eco>Euro=0'
Proj.Simulation [1].Entites [ 'Ressources_naturelles ' ].Regles [5]= 'PrixDieselCts*
    ↳ S5_mat>Diesel-100*E5_eco>Euro=0'
Proj.Simulation [1].Entites [ 'Ressources_naturelles ' ].Regles [6]= 'PrixDieselCts*
    ↳ S6_mat>Diesel-100*E6_eco>Euro=0'

```

*#***** Energie_electrique*

#Fermeture des connecteurs non relies

```

Proj.Simulation [1].Entites [ 'Energie_electrique ' ].Regles [20]= 'S8_energ>Electricite
    ↳ =0'
Proj.Simulation [1].Entites [ 'Energie_electrique ' ].Regles [21]= 'S9_energ>Electricite
    ↳ =0'
Proj.Simulation [1].Entites [ 'Energie_electrique ' ].Regles [22]= 'S10_energ>
    ↳ Electricite=0'

```

#

```

    ↳ *****
    ↳

```

#creation du systeme usine

#creation d un systeme

#Economique

```

Proj.creerSysteme (1, 'Usine ', 'Economique ')
Proj.ajouterEntiteSysteme (1, 'Usine ', 'Entree ')
Proj.ajouterEntiteSysteme (1, 'Usine ', 'GP1 ')
Proj.ajouterEntiteSysteme (1, 'Usine ', 'GP2 ')
Proj.ajouterEntiteSysteme (1, 'Usine ', 'GP3 ')
Proj.ajouterEntiteSysteme (1, 'Usine ', 'GP41 ')
Proj.ajouterEntiteSysteme (1, 'Usine ', 'GP42 ')
Proj.ajouterEntiteSysteme (1, 'Usine ', 'GP43 ')
Proj.ajouterEntiteSysteme (1, 'Usine ', 'Classification ')
Proj.ajouterEntiteSysteme (1, 'Usine ', 'Sortie1 ')
Proj.ajouterEntiteSysteme (1, 'Usine ', 'Sortie2 ')
Proj.ajouterEntiteSysteme (1, 'Usine ', 'Sortie3 ')
Proj.ajouterEntiteSysteme (1, 'Usine ', 'Sortie4 ')
Proj.ajouterEntiteSysteme (1, 'Usine ', 'Sortie5 ')

```

#Eco

```

Proj.creerSysteme (1, 'Full ', 'Matiere ')
Proj.ajouterEntiteSysteme (1, 'Full ', 'Entree ')
Proj.ajouterEntiteSysteme (1, 'Full ', 'GP1 ')
Proj.ajouterEntiteSysteme (1, 'Full ', 'GP2 ')
Proj.ajouterEntiteSysteme (1, 'Full ', 'GP3 ')
Proj.ajouterEntiteSysteme (1, 'Full ', 'GP41 ')
Proj.ajouterEntiteSysteme (1, 'Full ', 'GP42 ')
Proj.ajouterEntiteSysteme (1, 'Full ', 'GP43 ')
Proj.ajouterEntiteSysteme (1, 'Full ', 'Classification ')
Proj.ajouterEntiteSysteme (1, 'Full ', 'Sortie1 ')
Proj.ajouterEntiteSysteme (1, 'Full ', 'Sortie2 ')
Proj.ajouterEntiteSysteme (1, 'Full ', 'Sortie3 ')
Proj.ajouterEntiteSysteme (1, 'Full ', 'Sortie4 ')
Proj.ajouterEntiteSysteme (1, 'Full ', 'Sortie5 ')

```

```

Proj.ajouterEntiteSysteme (1, 'Full ', 'AcheteursFer ')

```

```

Proj.ajouterEntiteSysteme(1,'Full','AcheteursFibre')
Proj.ajouterEntiteSysteme(1,'Full','AcheteursGomme1')
Proj.ajouterEntiteSysteme(1,'Full','AcheteursGomme2')
Proj.ajouterEntiteSysteme(1,'Full','AcheteursGomme3')
Proj.ajouterEntiteSysteme(1,'Full','Transport1')
Proj.ajouterEntiteSysteme(1,'Full','Transport2')
Proj.ajouterEntiteSysteme(1,'Full','Transport3')
Proj.ajouterEntiteSysteme(1,'Full','Transport4')
Proj.ajouterEntiteSysteme(1,'Full','Transport5')
Proj.ajouterEntiteSysteme(1,'Full','Transport6')
Proj.ajouterEntiteSysteme(1,'Full','sourcePneus')
Proj.ajouterEntiteSysteme(1,'Full','FabricantsPneus')
Proj.ajouterEntiteSysteme(1,'Full','Energie_electrique')

#defintion de l univers pour le systeme Usine => Permet le calcul de l impact
↳ social
Proj.Simulation[1].Systemes['Usine'].Parametres['Sous_traitants']=Proj.Simulation
↳ [1].Systemes['Full']

#*****CONNECTIONS
↳ *****
#connections matieres
Proj.Simulation[1].connecterEntites("Fix1","Matiere","sourcePneus","S1_mat",
↳ Transport1","E1_mat")
Proj.Simulation[1].connecterEntites("Fix2","Matiere","Transport1","S1_mat",
↳ Entree","E1_mat")
Proj.Simulation[1].connecterEntites("Fix3","Matiere","Entree","S1_mat","GP1",
↳ E1_mat")
Proj.Simulation[1].connecterEntites("Fix4","Matiere","GP1","S1_mat","GP2","E1_mat
↳ ")
Proj.Simulation[1].connecterEntites("Fix5","Matiere","GP2","S1_mat","GP3","E1_mat
↳ ")
Proj.Simulation[1].connecterEntites("Fix6","Matiere","GP3","S1_mat","GP41",
↳ E1_mat")
Proj.Simulation[1].connecterEntites("Fix7","Matiere","GP41","S1_mat","GP42",
↳ E1_mat")
Proj.Simulation[1].connecterEntites("Fix8","Matiere","GP42","S1_mat","GP43",
↳ E1_mat")
Proj.Simulation[1].connecterEntites("Fix9","Matiere","GP43","S1_mat",
↳ Classification","E1_mat")
Proj.Simulation[1].connecterEntites("Fix10","Matiere","Classification","S1_mat",
↳ Sortie5","E1_mat")
Proj.Simulation[1].connecterEntites("Fix11","Matiere","Sortie5","S1_mat",
↳ Transport2","E1_mat")
Proj.Simulation[1].connecterEntites("Fix12","Matiere","Transport2","S1_mat",
↳ AcheteursGomme3","E1_mat")
Proj.Simulation[1].connecterEntites("Fix13","Matiere","GP3","S2_mat","Sortie2",
↳ E1_mat")
Proj.Simulation[1].connecterEntites("Fix14","Matiere","Sortie2","S1_mat",
↳ Transport5","E1_mat")
Proj.Simulation[1].connecterEntites("Fix15","Matiere","Transport5","S1_mat",
↳ AcheteursGomme1","E1_mat")
Proj.Simulation[1].connecterEntites("Fix16","Matiere","GP3","S3_mat","Sortie1",
↳ E1_mat")
Proj.Simulation[1].connecterEntites("Fix17","Matiere","Sortie1","S1_mat",
↳ Transport3","E1_mat")

```

ANNEXE C. ANNEXE : DONNÉES SUR LA MODÉLISATION DE LA TRAJECTOIRE DE VALORISATION DU PNEU USÉ

```
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix18", "Matiere", "Transport3", "S1_mat", "
    ↳ AcheteursFer", "E1_mat")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix19", "Matiere", "GP41", "S2_mat", "Sortie3", "
    ↳ E1_mat")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix20", "Matiere", "Sortie3", "S1_mat", "
    ↳ Transport6", "E1_mat")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix21", "Matiere", "Transport6", "S1_mat", "
    ↳ AcheteursGomme2", "E1_mat")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix22", "Matiere", "GP41", "S3_mat", "Sortie4", "
    ↳ E1_mat")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix23", "Matiere", "Sortie4", "S1_mat", "
    ↳ Transport4", "E1_mat")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix24", "Matiere", "Transport4", "S1_mat", "
    ↳ AcheteursFibre", "E1_mat")

#connections economiques
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix25", "Economique", "AcheteursFibre", "S1_eco
    ↳ ", "Sortie4", "E1_eco")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix26", "Economique", "AcheteursFer", "S1_eco",
    ↳ "Sortie1", "E1_eco")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix27", "Economique", "AcheteursGomme1", "
    ↳ S1_eco", "Sortie2", "E1_eco")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix28", "Economique", "AcheteursGomme2", "
    ↳ S1_eco", "Sortie3", "E1_eco")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix29", "Economique", "AcheteursGomme3", "
    ↳ S1_eco", "Sortie5", "E1_eco")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix30", "Economique", "FabricantsPneus", "
    ↳ S1_eco", "Entree", "E1_eco")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix31", "Economique", "FabricantsPneus", "
    ↳ S1_eco", "Transport1", "E1_eco")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix32", "Economique", "Sortie1", "S1_eco", "
    ↳ Transport3", "E1_eco")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix33", "Economique", "Sortie2", "S1_eco", "
    ↳ Transport5", "E1_eco")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix34", "Economique", "Sortie3", "S1_eco", "
    ↳ Transport6", "E1_eco")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix35", "Economique", "Sortie4", "S1_eco", "
    ↳ Transport4", "E1_eco")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix36", "Economique", "Sortie5", "S1_eco", "
    ↳ Transport2", "E1_eco")

#connections ressources
#E1_resnat>Diesel
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix37", "Ressources_naturelles", "
    ↳ Ressources_naturelles", "S1_mat", "Transport1", "E1_resnat")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix38", "Economique", "Transport1", "S1_eco", "
    ↳ Ressources_naturelles", "E1_eco")

Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix39", "Ressources_naturelles", "
    ↳ Ressources_naturelles", "S2_mat", "Transport2", "E1_resnat")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix40", "Economique", "Transport2", "S1_eco", "
    ↳ Ressources_naturelles", "E2_eco")

Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix41", "Ressources_naturelles", "
    ↳ Ressources_naturelles", "S3_mat", "Transport3", "E1_resnat")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix42", "Economique", "Transport3", "S1_eco", "
    ↳ Ressources_naturelles", "E3_eco")
```

```

Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix43", "Ressources_naturelles", "
    ↳ Ressources_naturelles", "S4_mat", "Transport4", "E1_resnat")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix44", "Economique", "Transport4", "S1_eco", "
    ↳ Ressources_naturelles", "E4_eco")

Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix45", "Ressources_naturelles", "
    ↳ Ressources_naturelles", "S5_mat", "Transport5", "E1_resnat")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix46", "Economique", "Transport5", "S1_eco", "
    ↳ Ressources_naturelles", "E5_eco")

Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix47", "Ressources_naturelles", "
    ↳ Ressources_naturelles", "S6_mat", "Transport6", "E1_resnat")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix48", "Economique", "Transport6", "S1_eco", "
    ↳ Ressources_naturelles", "E6_eco")

#connections ressources electriques
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix49", "Energetique", "Energie_electrique", "
    ↳ S1_energ", "GP1", "E1_energ")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix50", "Economique", "GP1", "S1_eco", "
    ↳ Energie_electrique", "E1_eco")

Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix51", "Energetique", "Energie_electrique", "
    ↳ S2_energ", "GP2", "E1_energ")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix52", "Economique", "GP2", "S1_eco", "
    ↳ Energie_electrique", "E2_eco")

Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix53", "Energetique", "Energie_electrique", "
    ↳ S3_energ", "GP3", "E1_energ")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix54", "Economique", "GP3", "S1_eco", "
    ↳ Energie_electrique", "E3_eco")

Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix55", "Energetique", "Energie_electrique", "
    ↳ S4_energ", "GP4", "E1_energ")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix56", "Economique", "GP4", "S1_eco", "
    ↳ Energie_electrique", "E4_eco")

Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix57", "Energetique", "Energie_electrique", "
    ↳ S5_energ", "GP5", "E1_energ")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix58", "Economique", "GP5", "S1_eco", "
    ↳ Energie_electrique", "E5_eco")

Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix59", "Energetique", "Energie_electrique", "
    ↳ S6_energ", "GP6", "E1_energ")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix60", "Economique", "GP6", "S1_eco", "
    ↳ Energie_electrique", "E6_eco")

Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix61", "Energetique", "Energie_electrique", "
    ↳ S7_energ", "Classification", "E1_energ")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix62", "Economique", "Classification", "S1_eco
    ↳ ", "Energie_electrique", "E7_eco")

#connections impact environmental
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix63", "Eco_energie", "Energie_electrique", "
    ↳ S1_emis", "Environnement", "E1_emis")

Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix64", "Eco_transport", "Transport1", "S1_emis
    ↳ ", "Environnement", "E2_emis")

```

ANNEXE C. ANNEXE : DONNÉES SUR LA MODÉLISATION DE LA TRAJECTOIRE DE VALORISATION DU PNEU USÉ

```
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix65", "Eco_transport", "Transport2", "S1_emis
↳ ", "Environnement", "E3_emis")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix66", "Eco_transport", "Transport3", "S1_emis
↳ ", "Environnement", "E4_emis")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix67", "Eco_transport", "Transport4", "S1_emis
↳ ", "Environnement", "E5_emis")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix68", "Eco_transport", "Transport5", "S1_emis
↳ ", "Environnement", "E6_emis")
Proj.Simulation [1].connecterEntites ("Fix69", "Eco_transport", "Transport6", "S1_emis
↳ ", "Environnement", "E7_emis")

#parametrage duree amortissement
Proj.Simulation [1].Systemes ['Usine'].Parametres ['DureeAmortissement']=15

#***** creation de la simulation t=0 et parametrage investissement
↳ *****

##creation de copie de la simulation 1
Proj.creerCopieSimulation(2,1) #simulation 2 copie de la simulation 1
Proj.Simulation [2].Date=2014 #simulation 2 commence en 2014
Proj.Simulation [2].Duree=1 #duree 1 annee 0

##mise a zero de la production
Proj.Simulation [2].Entites ['sourcePneus'].Regles [2]= 'S1_mat>Pneu=0'

#mise a zero de la consommation electrique
Proj.Simulation [2].Entites ['GP1'].Parametres ['NbJoursTravail']=0
Proj.Simulation [2].Entites ['GP2'].Parametres ['NbJoursTravail']=0
Proj.Simulation [2].Entites ['GP3'].Parametres ['NbJoursTravail']=0
Proj.Simulation [2].Entites ['GP41'].Parametres ['NbJoursTravail']=0
Proj.Simulation [2].Entites ['GP42'].Parametres ['NbJoursTravail']=0
Proj.Simulation [2].Entites ['GP43'].Parametres ['NbJoursTravail']=0
Proj.Simulation [2].Entites ['Classification'].Parametres ['NbJoursTravail']=0
#mise en place de l investissement
Proj.Simulation [2].Entites ['GP1'].Parametres ['Investissement']=6300000
Proj.Simulation [2].Entites ['GP2'].Parametres ['Investissement']=3500000
Proj.Simulation [2].Entites ['GP3'].Parametres ['Investissement']=296000
Proj.Simulation [2].Entites ['GP41'].Parametres ['Investissement']=90000
Proj.Simulation [2].Entites ['GP42'].Parametres ['Investissement']=71000
Proj.Simulation [2].Entites ['GP43'].Parametres ['Investissement']=80000
Proj.Simulation [2].Entites ['Classification'].Parametres ['Investissement']=21000

print 'utilisation_du_solveur_glpk'
solution= Proj.resolutionSimulation (1, 'glpk')
solution= Proj.resolutionSimulation (2, 'glpk')

#Proj.Simulation [1].Systemes ['Usine'].lancerModules ('EvaluationEconomique')#====>
↳ okkkk
```

A. SCRIPT PYTHON UTILISÉ POUR LA MODÉLISATION

```
#Proj. Simulation [2]. Systemes ['Usine ']. lancerModules ('EvaluationEconomique')#====>
↪ okkk
Proj. lancerModules ('EvaluationEconomique ', 'Usine ')

#Proj. Simulation [1]. Systemes ['Full ']. lancerModules ('EvaluationEcoCost ') #====>okk

##Proj. Simulation [1]. Systemes ['Usine ']. lancerModules ('EvaluationSociale ')#====>ok

#affichage graphe

Proj. diagramme_simulation (1, nomGraph='Full_sim1 ', systeme='Usine ')
#Proj. diagramme_simulation (2, nomGraph='Full_sim2 ') , systeme='Usine ')
#Proj. diagramme_simulation (1, nePasAfficher=["Ressources_naturelles "], nomGraph='
↪ EcoMat ')
#Proj. diagramme_simulation (1, nePasAfficher=["Matiere ", "Economique "], nomGraph='
↪ EcoRn ')

print "Test_—ok"
```


A	
Abstraction	53, 109, 110, 144
ACV	
Analyse du Cycle de Vie	38
Adaptation	43, 96
Aide à la décision	119
Aléatoire	110
Analogie	52
Exemples	53
RàPC	53
Analyse	133
Limite	134
Objectif	133
Appariement	<i>voir</i> Mapping
Apprentissage	43, 44, 50, 108
Approches du problème	92
B	
Base de données	127
Orientée Objet	
ZODB	127
BSD	<i>voir</i> Licence
C	
C++	124
CA	76
Cadre de modélisation	58
Calcul	127
Flux	129
Cas	95
Dyanmique	97
Relation	101
Représentation	96
Structuration	97
Chiffre d'affaires	<i>voir</i> CA
Classe	125
Clause de Horn	116
Coût	32
Notion	34
Réduction	38
Coûts de traitement	36
Cohérence, Notion de	106
Commission européenne	25
Composants électroniques	35
Concept	137
Définition	47
Conception	33, 38
Conceptualisation	109, 110
Configuration générique	58
Définition	58
Connecteur	122, 125, 126
Consommation énergétique	32
Consommation des ménages	89
Conteneur	125
Contraintes	120, 129
Modèle	124
Critères	26
Economiques	63
Environnementaux	63
D	
Décharges	36
Déchet	
Définition	33
Organique	33, 34
Traitements	33
Historique	33
Valorisation	34
Démographie	26
Désassemblage	37
Développement durable	26
Définition commune	103
Délai de récupération du capital	64
Désassemblage	
RàPC	39
Développement	125
Directives officielles	68
Dynamique	126, 128
E	
EBE	76
Eco-conception	33, 38
Eco-Cost	65, 128
Ecologie	
Problématique	32
Economie	
Problématique	32
Economies	34
Émergence	44, 45
Emplois	
Directs	66
Prositon de calcul	89
Indirects	67
Prositon de calcul	89

INDEX

Induits	67
Proposition de calcul	89
Empreinte carbone	65
Enfouissement	36
Entrée/Sortie	122, 129
Entreprise	
Avantages	35
ACV	38
Nouvelles politiques	33
Environnement	
Préservation	34
Esprit humain	51
Estimation	63
Nombre d'emplois	78
Etat	98
Définition	98
Relation	101
État transitoire	123
Evaluation	38
Structure	130
Évaluation	63
Module	128
Excédent brut d'exploitation	<i>voir</i> EBE

F

Fait	116
Filtre	109
Flexibilité	51, 52
Abstraction	109
Conceptualisation	109
Flexible	
Outil	125
Fluidité	
Valeur numérique	112
Fluidité conceptuelle	110
Flux	121, 125, 127, 130
Capitaux	129
Énergie	129
Matière	129
Calcul	129
Fonction	125
Fonctionnements mentaux	51
Abstraction	53
Analogie	52
Résolution de problèmes	51
FSF	124

G

Génération	
de Classe	126
Gestion	32
GPL	<i>voir</i> Licence
Graphe conceptuel	47
Green engineering	
Eco-conception	33, 38
Greffon	127, 128
Évaluation	127
Solveur	127

H

Horn, Clause de	<i>voir</i> Clause de Horn
Hypergraphe	47

I

IA	40
Analogie	52, 53
Apprentissage	44
Définition	40
Fonctionnements mentaux	51
RaPC	<i>voir</i> RaPC
Réseau bayésien	48
Réseau de neurones	45
Système expert	40
Système multi-agents	44
Implémentation	127
Indexation	109
Indicateurs	62, 63, 128
Choix	63
Critères	63
Economiques	63, 128
Annuels	64
Projets	64
Environnementaux	65, 128
Eco-Cost	65
Empreinte carbone	65
Mode de calcul	62, 69
Economiques	69
Environnementaux	70
Sociaux	70
Recyclage	67
Sociaux	66, 128
Emplois	66
Inférence	97, 110, 116
Information	48
Incomplète	48
Innovation	38
Intelligence artificielle	<i>voir</i> IA
Interface	127
Interrogation	26
Investissement	64

K

KISS	117
------------	-----

L

Langage de programmation	
C++	124
Prolog	114
Python	124
LG3, le Laboratoire de Génie Chimique de Toulouse	25
Libre	
Langage	124
Logiciel	124
Licence	127
BSD	124
GPL	124
Logistique	58, 59

- M**
- Mapping 50
 - Masse salariale 76
 - Matières premières
 - Problématique 32
 - Mécanismes
 - Analogie 52
 - Méta-classe 126
 - Modèle unifié 130
 - Modélisation 126, 127
 - Dynamique 123
 - Objectifs 57
 - Opération 125
 - Outil 120
 - Trajectoire de valorisation 58
 - Module d'Évaluation 130
 - Moteur d'inférences 48
 - Multi-Solveur 127
- N**
- Neurolab 84
 - Neurone *voir* Réseau de neurones
 - Niveau supérieur 122
 - Non déterminisme 110
- O**
- Objet 124
 - Ontologie 47
 - Taxonomie 108
 - Opération unitaire 58, 60
- P**
- Paradigme 124
 - POO 124
 - Programmation logique 114
 - Paramètres 126
 - Parties de la thèse 28
 - Patron 126
 - Perceptron 84
 - PIB 89
 - Pickable 127
 - Plasticité 52
 - Plug-in *voir* Greffon
 - POO 124
 - Classe 125
 - Méta-classe 126
 - Pré-Traitement 58
 - Principe de développement
 - KISS 117
 - Problématique 26, 37
 - Ecologique 32
 - Economie 32
 - Matières premières 32
 - Problèmes
 - Technologiques 37
 - Problèmes similaires 94
 - Programmation 124
 - par Contraintes 129
 - Programmation logique 114
 - Fait 116
 - Inférence 116
 - Règle 116
 - Programmation Orientée Objet *voir* POO
 - Projet
 - Simulation 123
 - Prolog 114
 - Propagation 129
 - PSI, Procédés et Systèmes Industriels 25
 - Python 124
 - Neurolab 84
- R**
- Réemploi 35
 - Révolution industrielle 31
 - Raisonnement à partir de cas *voir* RaPC
 - RaPC 91
 - Adaptation 42, 43, 96
 - Analogie 53
 - Apprentissage 43, 50, 96, 108
 - Cas *voir* Cas
 - Critique 43
 - Définition 41, 94
 - Désassemblage 39
 - Évaluation 96
 - Exemple 42
 - Fonctionnement générale 95
 - Mécanismes 41
 - Récurtivité 114
 - Recyclage 39
 - Remémoration du cas 95
 - Réutilisation 41
 - Sélection 106
 - Similarité 49, 95, 102
 - Stockage 43
 - Structure 95
 - Trace 42
 - Utilisation 94
 - Récurtivité 114
 - Recyclage 25
 - RàPC 39
 - Recyclage fonctionnel 35
 - Règle 116, 122, 125, 129
 - Régression lineaire 78
 - Relation 101, 137
 - Représentation 46, 51, 52, 96
 - Données 48
 - Flux 121
 - Graphe conceptuel 47
 - Ontologie 47
 - Opération 120, 122
 - Réseaux sémantiques 47
 - Trajectoire 125
 - Réseau
 - Bayésien 48
 - Réseaux de Pétri 48
 - Réseaux sémantiques 47
 - Réseau bayésien 48
 - Réseau conceptuel 99
 - Réseau de neurones 45, 84

INDEX

- Feed Forward Multiplayer Perceptiob ... 84
- Neurolab *voir* Neurolab
- Perceptron 84
- Réseau sémantique 96
- Réseaux sémantiques 47
- Résolution 113
 - Équation 127
- Resolution de problèmes
 - Fonctionnements mentaux 51
- Ressources naturelles 32

- S**
- Santé 32
- Scénario 123
- Sciences cognitives 51
- Selection
 - Sélection 119
- Similarité 49, 95, 102
 - Définition commune 103
 - Distance 102
 - Humain 49
 - Incertitudes 50
 - Indexation 109
 - Mapping 50
 - Mesure de 49
 - Partielle 104
 - RàPC 49
- Simulation 123
- Société de consommation 26
- Solveur 127
- Solveur évolutionnaire 78
- Source de pollution
 - Stockage 36
- Stockage 36, 43
 - Données 127
- Stratégies 38
- Structure
 - Programme 125
- SWI-Prolog 114
- Synergie 35, 38
- Système 122, 127
- Système expert 40
- Système multi-agents 44

- T**
- Taille moyenne des familles 89
- Taux de rentabilité interne *voir* TRI

- Taxonomie 108, 110, 137
 - Concept 137
 - Relation 137
- Trace 42
- Traitement
 - Désassemblage 37
 - Historique 33
 - Réutilisation 33, 36
 - Recyclage 33
 - Recyclage fonctionnel 35
 - Stockage 33, 36
 - Valorisation énergétique 33, 35
 - Valorisation matière 33, 35
- Traitement générique 58
- Traitements
 - Déchet 33
- Trajectoire 119
- Trajectoire de valorisation 57, 91
 - Décomposition 58
 - Définition 57
 - Modélisation 58
 - Problème soulevé 91
- Transformation des contraintes 130
- TRI 64
 - Calcul 69

- U**
- Usage 36

- V**
- Valeur 26, 32
 - Notion 34
- Valeur actuelle nette *voir* VAN
- Valorisation 34
 - Énergétique 35
 - Matière 35
 - Problématique 31
 - Procédés
 - Désassemblage 37
 - Réutilisation 36
 - Trajectoire 57
- VAN 64, 76
 - Calcul 69

- Z**
- ZODB 127