



HAL
open science

Modélisation pour la simulation de la chaîne logistique globale dans un environnement de production PME mécatroniques

Jihène Tounsi

► **To cite this version:**

Jihène Tounsi. Modélisation pour la simulation de la chaîne logistique globale dans un environnement de production PME mécatroniques. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Savoie, 2009. Français. NNT: . tel-00563977

HAL Id: tel-00563977

<https://theses.hal.science/tel-00563977>

Submitted on 7 Feb 2011

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 Savoie

Ecole Doctorale « Sciences et Ingénierie des Systèmes, de l'Environnement et des Organisations »

THESE

Présentée par

Jihène Tounsi

Pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE SAVOIE

Spécialité : Génie Industriel

Modélisation pour la simulation de la chaîne logistique globale dans un environnement de production PME mécatroniques

Soutenue publiquement le 04 Décembre 2009 devant le jury composé de

M. Samir Lamouri (Président)	Professeur à Supméca -Paris
M. Jean-Pierre Campagne (Rapporteur)	Professeur à l'INSA de Lyon
M. Michel Gourgand (Rapporteur)	Professeur à l'université de Clermont Ferrand
M. Mhamed Itmi (Examineur)	Maître de Conférences HDR à l'INSA de Rouen
M. Georges Habchi (Directeur de thèse)	Professeur à l'université de Savoie
M. Julien Boissière (Co-directeur de thèse)	Maître de Conférences à l'université de Savoie

Préparée au sein de SYMME

« Laboratoire des Systèmes et Matériaux pour la Mécatronique »

*A la mémoire de la femme la plus
adorable « Mima » pour son amour
éternel et ses sacrifices*

*A mon papa « Jaâfar » pour avoir
toujours cru en moi et m'avoir poussé à
donner le meilleur de moi même*

*A ma maman «Moufida » pour son
amour, sa tendresse et sa gentillesse
inépuisable*

*A mon frère « Marouene » pour la
complicité que nous avons et son
soutien inconditionnel*

*A toutes les personnes qui ont rendu ma
vie agréable et enjouée*

Je leur dédie ce travail de thèse

Remerciements

Le travail de recherche présenté dans ce manuscrit a été réalisé dans le cadre d'une thèse au sein du laboratoire Systèmes et Matériaux pour la Mécatronique (SYMME) à Polytech'Annecy dans le cadre d'un financement de l'Assemblée des Pays de Savoie (APS).

Je tiens à présenter mes plus vifs remerciements à mon directeur de thèse M. Georges Habchi, Professeur à l'Université de Savoie, et mon co-directeur M. Julien Boissière, maître de conférences à l'Université de Savoie, pour m'avoir encadrée tout au long de ces trois années de thèse et pour leurs directives, leurs recommandations, leurs remarques constructives et pertinentes, et leur disponibilité. Leurs qualités scientifiques et humaines ont été une source d'enrichissement et ont largement contribué à l'aboutissement de ce travail de doctorat.

Je tiens à remercier chaleureusement M. Michel Gourgand et M. Jean-Pierre Campagne pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de rapporter ce travail. Je remercie également, M. Samir Lamouri qui m'a fait l'honneur de présider le jury, ainsi que M. Mhamed Itmi d'avoir accepté d'être examinateur. Je suis reconnaissante aux membres du jury pour les nombreuses suggestions qu'ils ont apportés.

Je désire remercier M. Jacques Lottin directeur du laboratoire SYMME pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire. De même, je remercie les doctorants, les enseignants-chercheurs ainsi que le personnel administratif du laboratoire SYMME. Je remercie aussi toute l'équipe pédagogique de l'UFR Sciences Fondamentales et Appliquées de l'Université de Savoie (SFA) pour l'enrichissement pédagogique qu'ils m'ont apporté en enseignement.

Je n'oublie pas d'adresser un grand remerciement à Awa Sene, Barbara Lyonnet, Virginie Pouzoles, Selma Azaiez, Rym Ben Bachouche, Souhir Benounis et Safouane Ayed pour leur soutien et leur amitié.

Je ne peux enfin clore cette liste sans remercier d'une manière plus personnelle, mes parents, mon frère ainsi que tous les membres de ma famille pour leur confiance et leur soutien inconditionnel.

Table des Matières

Introduction générale et démarche scientifique

Introduction.....	19
Démarche scientifique et organisation du manuscrit.....	21
a. L'approche ArchMDE.....	22
b. Application de l'approche ArchMDE et organisation du manuscrit.....	23

Chapitre 1 : Contexte et Problématique

Introduction	29
1.1 La chaîne logistique.....	30
1.1.1 Définition du concept chaîne logistique	30
1.1.2 Les flux de la chaîne logistique.....	32
1.1.2.1 Le flux physique	32
1.1.2.2 Le flux de données	32
1.1.2.3 Le flux financier.....	33
1.1.3 Les acteurs de la chaîne logistique	34
1.1.4 Les processus.....	35
1.2 La gestion de la chaîne logistique.....	36
1.2.1 Définition générale	37
1.2.1.1 Le SCM comme « philosophie de gestion »	37
1.2.1.2 Le SCM comme « un ensemble d'activités »	38
1.2.1.3 Le SCM comme « un ensemble de processus à gérer ».....	40
1.2.2 Bilan	41
1.3 Les PME dans la chaîne logistique	41
1.3.1 Rôle des PME dans la chaîne logistique	42
1.3.1.1 Les spécificités des « groupements de PME ».....	42
1.3.1.2 Les avantages d' « un groupement de PME ».....	43

1.3.2	Les PME mécatroniques savoyardes	44
1.3.2.1	Démarche d'étude de l'existant	45
1.3.2.2	Caractéristiques de la chaîne logistique dans un contexte de PME mécatronique	46
1.3.3	Bilan	47
1.4	Les mécanismes de concertation dans la chaîne logistique.....	47
1.4.1	La coordination	48
1.4.2	La coopération.....	48
1.4.3	La collaboration.....	48
1.4.4	Bilan	49
1.5	Problématique.....	50
1.6	Conclusion.....	51

<i>Chapitre 2 : La conception et la modélisation pour la simulation de la chaîne logistique</i>

Introduction	55
2.1 La conceptualisation de la chaîne logistique.....	56
2.1.1 Orientation « Produit / Entreprise »	57
2.1.1.1 La « Vision Produit »	58
2.1.1.2 La « Vision Entreprise »	58
2.1.1.3 Synthèse	59
2.1.2 Orientation « Structure / Processus »	60
2.1.2.1 La « Vision Processus »	60
2.1.2.2 La « Vision Structure »	61
2.1.2.3 Synthèse	61
2.1.3 Bilan	62
2.2 La modélisation de la chaîne logistique.....	63
2.2.1 La modélisation statique.....	63
2.2.2 La modélisation dynamique	64
2.2.2.1 L'approche analytique.....	66
2.2.2.2 Approche de simulation	67
2.3 Le couplage de la modélisation à la simulation ?	70
2.4 Génération du modèle conceptuel du domaine et passage au métamodèle.....	71

2.4.1	Une méthodologie de modélisation conceptuelle.....	71
2.4.1.1	Vision Produit	73
2.4.1.2	Vision Structure	73
2.4.1.3	Vision Processus	74
2.4.2	Application de la méthodologie	75
2.4.2.1	Application de la « Vision Produit ».....	76
a.	Le modèle abstrait	76
b.	Le métamodèle abstrait du domaine	77
2.4.2.2	Application de la « Vision Structure ».....	78
a.	Le modèle conceptuel intermédiaire.....	78
b.	Le métamodèle intermédiaire	83
2.4.2.3	Application de la Vision Processus.....	84
a.	Le modèle Conceptuel du domaine	84
b.	Le métamodèle du domaine.....	87
2.5	Conclusion et Bilan.....	90

<p><i>Chapitre 3 : les systèmes multi-agent - une approche de modélisation pour la simulation de la chaîne logistique</i></p>

Introduction	95
3.1 Les systèmes multi-agents.....	96
3.1.1 La vue agent	98
3.1.1.1 L'agent réactif.....	100
3.1.1.2 L'agent cognitif.....	102
3.1.1.3 L'agent hybride	104
3.1.2 La vue environnement.....	105
3.1.3 La vue interaction.....	106
3.1.3.1 Le cadre collectif.....	108
3.1.3.2 Le cadre conflictuel.....	110
3.1.4 La vue organisation	111
3.2 L'intérêt des agents pour la modélisation et la simulation de la chaîne logistique.....	113
3.3 Agentification du métamodèle du domaine.....	115

3.3.1	Le métamodèle multi-agent.....	115
3.3.1.1	Le métamodèle agent	115
3.3.1.2	Le métamodèle environnement.....	117
3.3.1.3	Le métamodèle interaction.....	118
3.3.1.4	Le métamodèle organisation	119
3.3.1.5	Synthèse	120
3.3.2	Génération du métamodèle du domaine agentifié.....	122
3.4	Intégration des mécanismes de concertation	127
3.4.1	La synchronisation des processus	127
3.4.1.1	Mise en place du protocole au niveau du système d'exécution	128
3.4.1.2	Mise en place du protocole au niveau du système de pilotage	131
3.4.2	Le protocole de contrôle et de pilotage	134
3.5	Passage à l'implémentation	137
3.5.1	Raffinement du métamodèle du domaine agentifié.....	137
3.5.2	Choix de la plate-forme d'implémentation	143
3.6	Conclusion.....	145

Chapitre 4 : Modélisation et implémentation d'un cas industriel

Introduction	149
4.1 Description d'un cas industriel	149
4.1.1 Les acteurs du groupement « Grp-France »	150
4.1.2 Les processus.....	152
4.1.3 Cartographie des flux	155
4.2 Modèle d'implémentation du cas industriel.....	157
4.2.1 Etude et conceptualisation du cas industriel.....	158
4.2.2 Génération du modèle d'implémentation du cas industriel.....	163
4.3 Conclusion.....	165

Chapitre 5 : Conclusion générale et perspectives

5.1 Bilan des travaux	169
5.2 Perspectives des travaux	171
Annexe A	173

Annexe B.....	177
Glossaire et abréviations.....	181
Bibliographie.....	185

Liste des illustrations

Figure 0. 1 Processus de développement ArchMDE (Tounsi et al., 2009).....	23
Figure 0. 2 Structure des chapitres de la thèse	26
Figure 1. 1 La partie analyse de ArchMDE	29
Figure 1. 2 La chaîne logistique directe.....	34
Figure 1. 3 La chaîne logistique étendue.....	35
Figure 1. 4 La chaîne logistique globale.....	35
Figure 2. 1 La partie conception d'ArchMDE.....	55
Figure 2. 2 Le processus de modélisation.....	56
Figure 2. 3 Le modèle SCOR version 8.0 (Source SCC)	59
Figure 2. 4 Croisement « Vision Produit » et « Vision Entreprise ».....	59
Figure 2. 5 Classification des processus clés.....	60
Figure 2. 6 Différentes visions pour la modélisation conceptuelle	62
Figure 2. 7 Notre approche de conceptualisation	63
Figure 2. 8 Classification des approches de modélisation dynamique	66
Figure 2. 9 Méthodologie de modélisation conceptuelle (Tounsi et al., 2009a).....	72
Figure 2. 10 Le modèle abstrait.....	77
Figure 2. 11 Le métamodèle abstrait du domaine	78
Figure 2. 12 Les couches de la SSC.....	79
Figure 2. 13 La couche Monitoring System	80
Figure 2. 14 La couche Execution System.....	81
Figure 2. 15 La couche Physical System.....	82
Figure 2. 16 Le modèle conceptuel intermédiaire de la SSC.....	82
Figure 2. 17 Le métamodèle intermédiaire du domaine	83
Figure 2. 18 Le modèle conceptuel de la SSC.....	86
Figure 2. 19 Modèle de la chaîne logistique globale.....	86
Figure 2. 20 Le métamodèle du domaine.....	89
Figure 2. 21 Le métamodèle du domaine (Version détaillée).....	91
Figure 3. 1 La partie modélisation d'ArchMDE.....	96
Figure 3. 2 Modèle d'un agent réactif.....	101
Figure 3. 3 Architecture de Subsumption (Brooks, 1986)	102
Figure 3. 4 Architecture délibérative (Wooldridge, 1999)	102
Figure 3. 5 l'architecture InteRRaP (Fischer et al., 1995a)	105
Figure 3. 6 Le Contract Net Protocol	109
Figure 3. 7 Topologie à structure hiérarchique	111

<i>Figure 3. 8 Topologie à structure de marché.....</i>	<i>112</i>
<i>Figure 3. 9 Topologie à structure de communauté</i>	<i>112</i>
<i>Figure 3. 10 Topologie à structure de société</i>	<i>112</i>
<i>Figure 3. 11 Le métamodèle agent.....</i>	<i>116</i>
<i>Figure 3. 12 le métamodèle environnement</i>	<i>117</i>
<i>Figure 3. 13 Le métamodèle interaction</i>	<i>118</i>
<i>Figure 3. 14 Le métamodèle Organisation</i>	<i>119</i>
<i>Figure 3. 15 Le métamodèle multi-agent</i>	<i>121</i>
<i>Figure 3. 16 Le métamodèle du domaine agentifié.....</i>	<i>126</i>
<i>Figure 3. 17 Le comportement dynamique de l'acteur Exécutif (EA)</i>	<i>129</i>
<i>Figure 3. 18 Le diagramme de séquence pour la coordination des flux physiques</i>	<i>134</i>
<i>Figure 3. 19 Diagramme de séquence du processus de contrôle et de pilotage</i>	<i>136</i>
<i>Figure 3. 20 Le métamodèle d'implémentation</i>	<i>142</i>
<i>Figure 3. 21 Structuration de la communication entre les agents</i>	<i>145</i>
<i>Figure 4. 1 La phase implémentation de ArchMDE</i>	<i>149</i>
<i>Figure 4. 2 Le réseau de « Grp- France »</i>	<i>152</i>
<i>Figure 4. 3 Circulation des flux dans « Grp-France ».....</i>	<i>155</i>
<i>Figure 4. 4 Modèle conceptuel de la chaîne logistique de Grp-France.....</i>	<i>158</i>
<i>Figure 4. 5 Modèle de la SSC-France</i>	<i>164</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau 1. 1 Définitions de la chaîne logistique.....</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 1. 2 Comparatif des 3C</i>	<i>49</i>
<i>Tableau 2. 1 Objectifs Finaux de la simulation.....</i>	<i>68</i>
<i>Tableau 3. 1 Analogie entre la chaîne logistique et le système multi-agent.....</i>	<i>113</i>
<i>Tableau 3. 2 Agentification des concepts du domaine.....</i>	<i>122</i>
<i>Tableau 3. 3 Raffinement des concepts agentifiés pour l'implémentation</i>	<i>138</i>
<i>Tableau 4. 1 Indicateurs du groupement « Grp-France ».....</i>	<i>157</i>
<i>Tableau 4. 2 Instanciation des acteurs et des ressources de « SSC-France »</i>	<i>160</i>
<i>Tableau 4. 3 Identification et instanciation des processus physiques</i>	<i>161</i>
<i>Tableau 4. 4 Définition des indicateurs et des actions</i>	<i>162</i>

Introduction Générale

Et

Démarche Scientifique

Introduction

L'environnement économique est en perpétuelle mutation induisant ainsi une instabilité et une concurrence mondiale auxquelles les entreprises doivent faire face. Cette mutation est principalement due au renversement du rapport entre l'offre et la demande, à la globalisation des marchés économiques mais aussi aux mutations techniques et technologiques. Ainsi, la survie des entreprises dépend de leur réactivité et de leur capacité d'adaptation aux changements. Dans cette optique, les entreprises créent de plus en plus d'alliances pour pallier aux limites et aux faiblesses individuelles face aux pressions de l'environnement mondial. Ces alliances ont donné lieu à de nouvelles formes organisationnelles et relationnelles dans lesquelles s'inscrivent les chaînes logistiques.

La chaîne logistique n'est pas un concept contemporain. Depuis des décennies, les matières premières ou les produits finis traversent les continents pour arriver aux clients. Cependant, le développement et le progrès important des technologies et plus précisément ceux de l'information et de la communication ont intensifié le besoin de formaliser les interactions entre les différents acteurs et d'intégrer des nouvelles pratiques de management afin de piloter et d'optimiser le fonctionnement de tout le réseau. Cette intégration a complexifié la structure organisationnelle et la prise de décision dans le but de réguler les flux dans la chaîne logistique.

Dans ce contexte, des nouvelles structures de type groupements de PME émergent et intègrent la chaîne logistique comme une seule entité autonome. En effet, ces PME unissent leurs compétences similaires ou complémentaires en formant des réseaux (« clusters ») afin de fournir un service unique et de faire face aux exigences externes de la chaîne logistique.

Cette nouvelle organisation émergente est un des piliers de l'économie de la région savoyarde, riche en PME spécialisées en mécatronique. Ces PME collaborent afin d'atteindre un objectif commun et d'achever une activité commune au sein de la chaîne logistique globale. Ce cadre constitue l'essence des travaux présentés dans ce manuscrit de thèse. Le manque de travaux de recherche pour ce type d'entreprises ainsi que le besoin expressif des décideurs d'avoir un outil d'aide à la décision, ont motivé notre orientation vers l'étude de la

structure organisationnelle et le comportement dynamique des groupements de PME mécatroniques en interne mais aussi dans la chaîne logistique globale.

L'expérimentation et l'étude de tels systèmes sont difficilement réalisables sur des cas industriels réels. Ainsi le recours à des modèles reflétant la réalité des systèmes et par la suite la simulation de leurs comportements, est devenu un besoin nécessaire pour faciliter l'étude et l'analyse de la chaîne logistique. Dans cette optique, l'approche basée sur la modélisation et la simulation a fait ses preuves depuis des années dans la recherche scientifique et plus spécialement dans le domaine des systèmes de production et de la chaîne logistique.

Dans ce contexte, notre travail de recherche a comme objectif de fournir un cadre méthodologique et une solution de modélisation reflétant de la manière la plus fidèle notre champ d'application. Pour cette raison, nous avons puisé dans les travaux théoriques et industriels afin de mieux cerner l'existant et les avancées technologiques qui pourront nous aider à atteindre l'objectif de la solution. Ainsi, nous avons choisi d'adopter un processus de développement basé sur l'approche « Ingénierie Dirigée par les Modèles » (IDM) qui nous permettra de suivre l'évolution de notre solution dès la capture des besoins jusqu'à l'implémentation. Ce processus offre un cadre méthodologique de développement, d'exécution, d'évolution et de réutilisation des métamodèles grâce à sa technique de séparation des artefacts de la solution selon le besoin ou la phase de développement.

Ce cadre de développement, nous a permis de mener deux études dans deux domaines différents. Le premier domaine issu du génie industriel concerne l'étude des groupements de PME et leur intégration dans la chaîne logistique globale. Dans ce premier axe, nous avons proposé un cadre méthodologique pour la génération du modèle conceptuel à partir de l'étude du terrain. Dans nos travaux, ce cadre a permis de formaliser la génération des concepts du domaine ainsi que la mise en place de leurs propriétés structurales et comportementales. Le deuxième axe a attiré notre attention vers les outils scientifiques permettant d'étudier le comportement du premier artefact. Dans cette optique, le domaine multi-agent nous a paru approprié d'une part par son analogie évidente avec le concept de la chaîne logistique et d'autre part par la puissante flexibilité dont il fait preuve dans l'étude des organisations et des interactions. En se basant sur les outils et les techniques offertes par le paradigme multi-agent, nous avons proposé une agentification de nos concepts qui nous a permis de construire les

protocoles d'interaction et de modéliser ainsi le comportement dynamique du métamodèle du domaine. Par conséquent, cette étude des relations, nous permettra d'aboutir à un métamodèle d'implémentation exprimant la vue statique et la vue dynamique du domaine d'application.

Ainsi, dans ce manuscrit nous présentons des travaux entrepris dans deux domaines. D'une part, nous proposons un cadre méthodologique pour la conceptualisation de la chaîne logistique en général qui acheminera notre raisonnement pour la génération des concepts modélisant le domaine d'étude. D'une autre part, nous proposons une solution de modélisation basée sur les systèmes multi-agents. Dans nos travaux nous mettons l'accent sur les différentes phases de construction et d'évolution de cette solution.

Démarche scientifique et organisation du manuscrit

Comme il été énoncé dans l'introduction, notre solution de modélisation se base sur les systèmes multi-agents. Notre objectif de travail était d'avoir un modèle du domaine réutilisable, flexible et sûr. Pour ce faire, nous nous sommes orientés vers les avancées faites dans le domaine du génie logiciel et plus spécifiquement ceux qui traitent des systèmes multi-agents.

Adoptant cet esprit de recherche, nous avons structuré ce manuscrit autour d'un processus de développement appelé ArchMDE qui nous a permis, d'un côté, d'avoir les critères de réutilisation, sûreté et flexibilité au niveau de notre solution et, d'un autre côté, de combiner deux domaines de recherche en préservant l'intégrité de chacun. En effet, le premier axe se focalise sur l'étude des approches de modélisation dans la littérature et des éléments du terrain. L'analyse qui en découle nous permet de proposer une méthodologie de conception et de générer notre modèle du domaine. Le deuxième axe qui s'inscrit dans le cadre du développement logiciel, nous permet de fusionner la technologie multi-agent avec le modèle conceptuel obtenu au niveau du premier axe en gardant intact les caractéristiques de chaque domaine (contexte et multi-agent).

Afin de mieux cerner, l'approche nous allons détailler dans ce qui suit les fondements du processus de développement.

a. L'approche ArchMDE

ArchMDE, pour Architecture Model Driven Engineering, est un processus de développement de logiciel utilisant les systèmes multi-agents (Azaiez, 2007). Il est basé sur la combinaison de deux approches d'ingénierie très sollicitées en ce moment dans le génie logiciel qui sont : l'Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM) et l'approche centrée architecture ((Azaiez, 2007) ; (Kent, 2002)). En effet, un des principes de la combinaison de ces deux approches est la séparation des différents aspects du problème. Chaque problème doit être traité séparément afin de se concentrer plus efficacement sur chacun d'entre eux. Cette approche permet ainsi de contrôler le processus de développement d'un logiciel dans ses différentes phases (de l'analyse jusqu'à l'implémentation) et ceci en produisant et en combinant par la suite des solutions répondant à la problématique (Tounsi et al., 2009). Ces solutions sont des métamodèles qui sont définis comme une représentation informatique des concepts étudiés et une définition des relations entre eux et ceci en gardant un haut niveau d'abstraction. Par conséquent, l'approche ArchMDE définit trois métamodèles :

- ✎ Le métamodèle du domaine : qui décrit les concepts utilisés dans le domaine étudié ainsi que leurs relations et propriétés architecturales.
- ✎ Le métamodèle orienté agent : qui décrit les concepts agents ainsi que leurs principales relations et propriétés architecturales.
- ✎ Le métamodèle de la plateforme d'implémentation : qui décrit les concepts qui sont implémentés par une plateforme orientée objet ou agent.

Ainsi, tout au long du processus ces trois métamodèles constituent des artefacts nécessaires pour la réalisation du logiciel. Selon ArchMDE, pour créer un cadre de développement spécifique à un domaine d'application, deux niveaux sont à considérer :

- ✎ Le premier niveau consiste à spécifier les trois métamodèles et les relations de fusion entre eux.
- ✎ Le deuxième niveau consiste à générer des modèles basés sur ces métamodèles à partir de cas réels.

En se basant sur les principes de l'approche énoncés dans cette sous section, nous détaillons, dans ce qui suit, l'application de l'approche ArchMDE en considérant notre domaine d'application qui est la chaîne logistique dans un contexte de PME mécatroniques.

b. Application de l'approche ArchMDE et organisation du manuscrit

Comme décrit précédemment, ArchMDE est une approche permettant de spécifier un cadre de développement pour un domaine d'application donné. Dans notre travail de thèse, nous adoptons ce processus pour générer une solution répondant à notre problématique (cf. section 1.5) et aboutissant à la construction d'un prototype d'une plateforme de simulation dédiée aux PME mécatroniques.

Par conséquent, en adoptant le processus de développement ArchMDE, nous structurons notre manuscrit en deux phases (voir Figure 0.1).

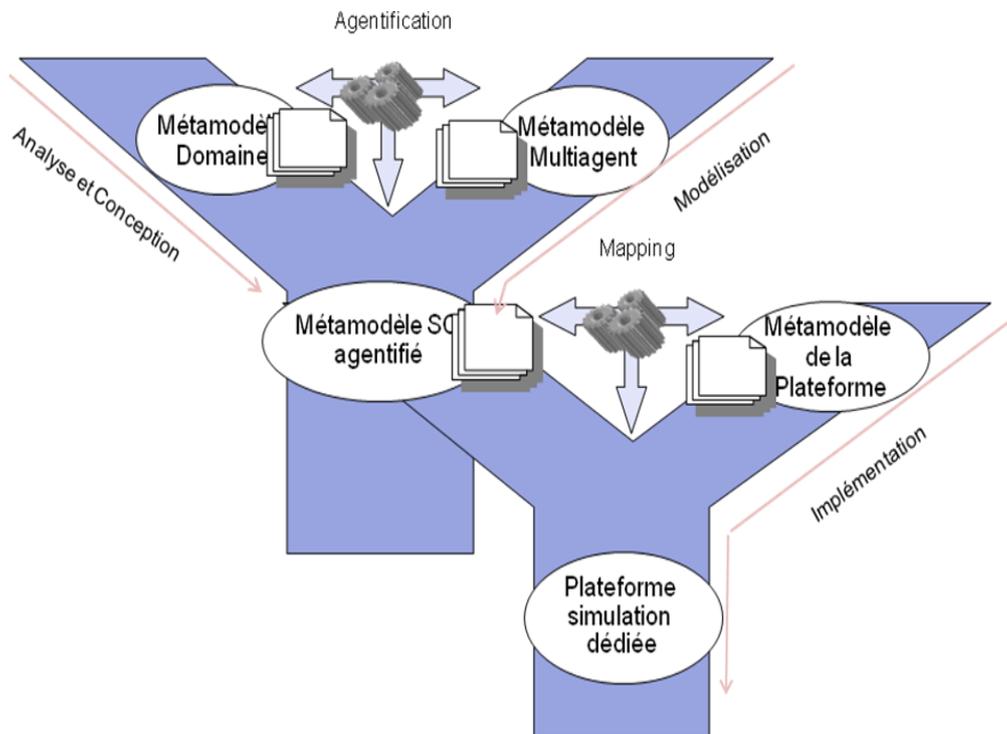


Figure 0. 1 Processus de développement ArchMDE (Tounsi et al., 2009)

La première phase est représentée par le premier « Y ». Elle est définie par deux tâches essentielles :

- ✎ L'analyse et la conception : cette première étape est définie au niveau du chapitre 1 et du chapitre 2 de ce manuscrit
 - *Le chapitre 1* décrit le contexte et la problématique de recherche. Il constitue la définition et l'étude de l'existant dans le domaine de la chaîne logistique et de son management mais aussi de l'identification des caractéristiques des groupements de PME mécatroniques de la région savoyarde. Cette étude du contexte nous permettra d'appréhender des éléments clés du domaine d'application et d'orienter notre vision sur la problématique qui en découle. A la fin de ce chapitre, nous mettons l'accent sur un processus de développement qui orientera la mise en place de la solution décrite dans ce manuscrit.
 - *Le chapitre 2* analyse les différentes approches et visions de conception et de modélisation de la chaîne logistique. Par la suite, sur la base de cette analyse, nous définirons une méthodologie de conception facilitant la définition et la construction d'un modèle de la chaîne logistique. Cette méthodologie servira à générer les concepts et les propriétés de la chaîne logistique dans un contexte de PME mécatroniques. A la fin de la tâche d'analyse, une description du modèle conceptuel avec le langage de modélisation UML (Unified Modeling Language) donnera lieu au métamodèle du domaine. La recherche faite au niveau de l'activité d'analyse concerne le domaine du génie industriel et plus spécialement celui de la chaîne logistique dans un contexte de PME mécatroniques.
- ✎ La modélisation fait l'objet du *chapitre 3*. Cette deuxième activité du processus ArchMDE est subdivisée en deux tâches essentielles. La première tâche se focalise sur la définition des systèmes multi-agents ainsi que leur apport au niveau de la modélisation et de la simulation de la chaîne logistique. Suite à

l'état de l'art concernant ce paradigme informatique de modélisation, nous proposons un métamodèle du système multi-agent inspiré du métamodèle présenté dans l'approche ArchMDE. Cette première tâche de l'activité de conception s'achève par une fusion des deux métamodèles obtenus en comparant leurs propriétés et caractéristiques organisationnelles et structurales. Cette fusion est appelée au niveau de l'approche ArchMDE « agentification ». Elle permet de générer un métamodèle agentifié du métamodèle du domaine. A la fin de cette fusion, la deuxième tâche de cette activité prend place et porte sur la mise en place des processus de concertation dans le métamodèle agentifié du domaine c'est-à-dire une description du comportement dynamique de chaque concept défini précédemment.

A la fin de cette première phase, nous obtenons une description agentifiée de notre domaine de recherche. Ce métamodèle, représentant une architecture abstraite, est la base de l'application de la phase suivante. Cette deuxième phase est constituée d'une seule activité :

✂ L'implémentation : fait l'objet de la dernière section du *chapitre 3* et du *chapitre 4*. Au cours de cette activité, nous implémentons nos concepts agentifiés et leurs comportements grâce à une plateforme de programmation (*c.f chapitre 3*) puis nousinstancions notre métamodèle (*c.f chapitre 4*).

- La dernière section du *chapitre 3* est consacrée à l'implémentation de la plateforme de simulation dédiée. Le premier point de cette section aborde le raffinement du métamodèle agentifié du domaine en intégrant les éléments informationnels nécessaires au codage (attributs et méthodes). Cette étape donne lieu à un métamodèle finale aboutie prêt à être coder appelé métamodèle d'implémentation. Le second point met l'accent sur le choix d'implémentation en termes de plate-forme de programmation et de mapping entre les outils et les bibliothèques du langage avec les concepts du métamodèle agentifié du domaine ainsi que sur la structuration de la communication entre les agents du métamodèle.

- Dans *le chapitre 4*, nous présentons un cas industriel d'une chaîne logistique dont le groupement PME mécatroniques est situé dans la vallée de l'Arve en Haute-Savoie. L'analyse du cas industriel, nous permet de générer un modèle qui est une instance du métamodèle agentifié prédéfini dans le chapitre précédent. Ce modèle est un prototype de simulation pour donner une vision future de l'outil de simulation qui sera implémenté suite à ce travail de thèse.

En résumé, la figure 0.2 récapitule la structuration de la thèse en adoptant le processus de développement ArchMDE.

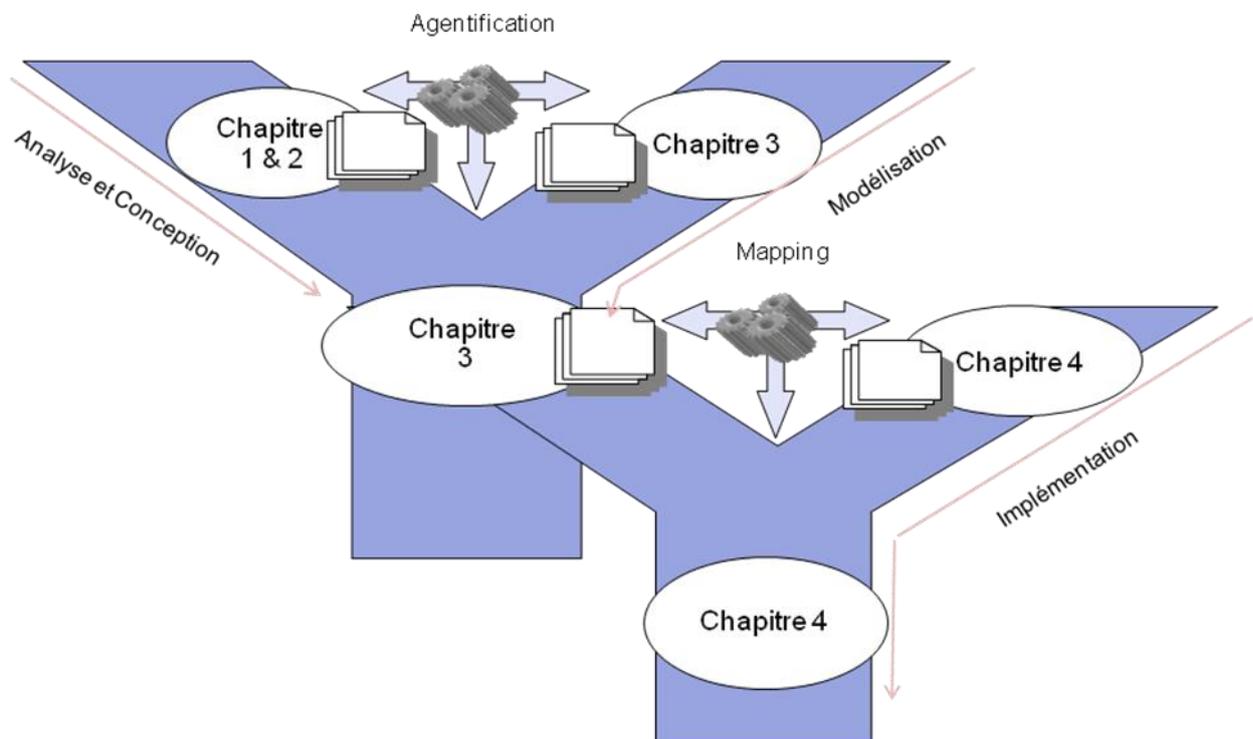


Figure 0. 2 Structure des chapitres de la thèse

Chapitre 1

Contexte et problématique

Introduction

Le travail de thèse présenté dans ce manuscrit traite de la modélisation de la chaîne logistique dans un contexte de PME mécanique. Afin de mieux cerner le contexte et la problématique de la recherche, ce premier chapitre fait l'objet d'un panorama sur les théories et les pratiques existantes dans le domaine de la chaîne logistique et la gestion de la chaîne logistique. Ainsi, les deux premières sections définissent respectivement les concepts « chaîne logistique » et « gestion de la chaîne logistique » selon les théories émises par la communauté scientifique. La troisième section se focalise sur les pratiques et les recherches effectuées sur la structure et l'intégration des groupements de PME, et plus spécifiquement des PME mécaniques de la région savoyarde. Au niveau de la quatrième partie, nous nous intéressons aux différents mécanismes de concertation dans l'intégration de la chaîne logistique et à l'identification de la nuance entre les pratiques courantes. Finalement, sur la base de ce tour d'horizon, nous introduisons en cinquième section la problématique de notre recherche ainsi que la solution envisagée qui fait l'objet de ce manuscrit.

Ce chapitre 1 s'inscrit dans la première phase du processus de développement ArchMDE. Il met l'accent sur l'analyse faite sur le terrain de recherche afin d'éclaircir la compréhension des éléments clés du contexte ainsi que les objectifs principaux de ce travail de recherche (voir Figure 1.1).

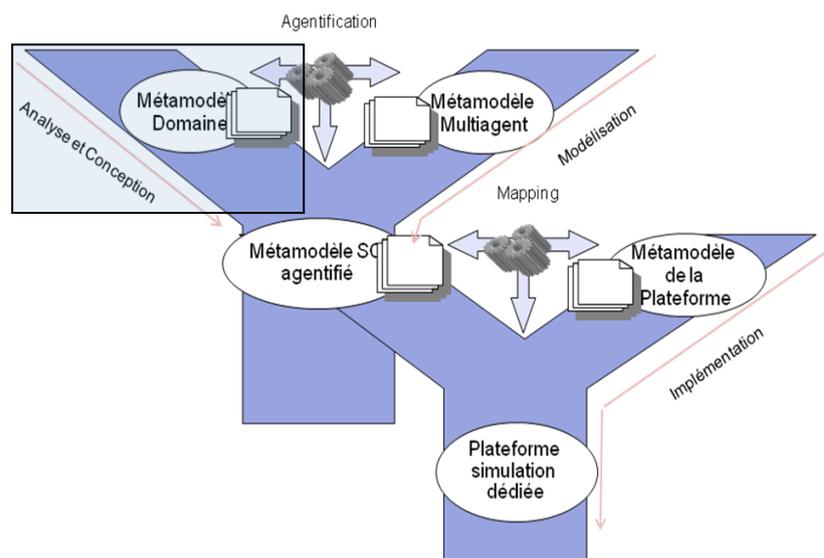


Figure 1. 1 La partie analyse de ArchMDE

1.1 La chaîne logistique

1.1.1 Définition du concept chaîne logistique

La première question qui se pose dans ce manuscrit concerne la signification du terme « chaîne logistique » qui s'apparente à la terminologie anglophone « supply chain»? Dans cette section, nous présentons plusieurs définitions afin d'éclaircir le sens de ce terme en lui-même et les concepts qu'il englobe.

Le concept de chaîne logistique a vu le jour dans les années 90 lorsque les techniques de management dans le monde socio-économique ont évolué d'une logistique séparée vers une logistique intégrée et par la suite à une logistique coopérée (Akbari jokar, 2001). C'est dans cette évolution de l'environnement que les entreprises se sont orientées vers des alliances et des partenariats stratégiques afin de former des réseaux logistiques. Ces réseaux ont changé la vision de compétitivité et de survie d'une entreprise forteresse à celle d'un réseau d'entreprises qui se coordonnent et collaborent afin de réaliser une valeur ajoutée (Min et Zhou, 2002). Au premier abord, nous pouvons dire que le terme « chaîne logistique » reflète l'image statique d'un ensemble d'entreprises qui travaillent sur plusieurs activités (de conception, d'approvisionnement, de production, de distribution et de vente) afin de transformer de la matière première en produit de consommation et pour l'acheminer vers ses clients. En règle générale, une entreprise utilise ses ressources et ses processus pour achever un rôle qui lui est dédié dans le réseau. Selon La Londe et Masters (La Londe et Masters, 1994) ce rôle peut être décliné en : producteur de matières premières et de composants, assembleur, grossiste ou transporteur.

La chaîne logistique est un domaine qui a suscité depuis des années l'intérêt de la communauté scientifique. Plusieurs définitions ont vu le jour aussi intéressantes les unes que les autres mais se basant sur des niveaux décisionnels différents (stratégique, tactique, opérationnel). Telle (Telle, 2003) dans ses travaux de thèse a proposé un tour d'horizon des définitions existantes du terme « chaîne logistique ». Ces définitions sont recensées dans le tableau 1.1 :

Tableau 1. 1 Définitions de la chaîne logistique

Référence	Définition
<i>Christopher 92</i>	La chaîne logistique peut être considérée comme le réseau d'entreprises qui participent, en amont et en aval, aux différents processus et activités qui créent de la valeur sous forme de produits et de services apportés au consommateur final. En d'autres termes, une chaîne logistique est composée de plusieurs entreprises, en amont (fourniture de matières et composants) et en aval (distribution), et du client final.
<i>Lee et Billington 93</i>	Un réseau d'installations qui assure les fonctions d'approvisionnement en matières premières, de transformation de ces matières premières en composants puis en produits finis, et de distribution des produits finis vers le client.
<i>La Londe et Masters 94</i>	Une chaîne logistique est un ensemble d'entreprises qui se transmettent des matières. En règle générale, plusieurs acteurs indépendants participent à la fabrication d'un produit et à son acheminement jusqu'à l'utilisateur final - producteurs de matières premières et de composants, assembleurs, grossistes, distributeurs et transporteurs sont tous membres de la chaîne logistique.
<i>Ganeshan et Harrison 95</i>	Une chaîne logistique est un réseau d'installation et de distribution qui assure la fonction d'approvisionnement en matières premières, la transformation de ces derniers en produits semi-finis et finis, et la distribution des produits finis au client.
<i>Rota 98</i>	La chaîne logistique d'un produit fini se définit comme l'ensemble des entreprises qui interviennent dans les processus de fabrication, de distribution et de vente du produit, du premier des fournisseurs au client ultime.
<i>Tayur et al. 1999</i>	Un système de sous-traitants, de producteurs, de distributeurs, de détaillants et de clients entre lesquels s'échangent les flux matériels dans le sens des fournisseurs vers les clients et des flux d'information dans les deux sens.

Référence	Définition
<i>Mentzer et al 2001</i>	Une chaîne logistique est un groupe d'au moins trois entités directement impliquées dans les flux amont et aval de produits, services, finances et/ou information, qui vont d'une source jusqu'à un client.

Dans le tableau 1.1, les définitions proposées sont très variées mais évoquent toutes les mêmes éléments clés de la chaîne logistique suivant des visions différentes. Ces visions seront détaillées ultérieurement (cf. Chapitre 2). Dans ce qui suit, nous synthétisons ces éléments par type et rôle dans la chaîne logistique.

1.1.2 Les flux de la chaîne logistique

Les flux correspondent à toute entité, palpable ou non, circulante entre les maillons de la chaîne logistique. Dans la littérature, nous distinguons trois catégories de flux : le flux physique, le flux de données et le flux financier. Dans ce qui suit, nous définissons la nature de chaque flux et son rôle dans la chaîne logistique.

1.1.2.1 Le flux physique

C'est une entité palpable qui circule au niveau de la chaîne logistique de l'amont vers l'aval (du fournisseur vers le client) afin de fournir de la valeur ajoutée au client final. Le flux physique peut représenter un produit final, de la matière première, des composants d'assemblage, etc.

1.1.2.2 Le flux de données

Il représente les données qui circulent au niveau de la chaîne logistique dans les deux sens. Les données sont par ailleurs utilisées par les acteurs de la chaîne afin de coordonner leurs activités mais aussi pour planifier et prévoir les demandes futures, de l'approvisionnement jusqu'à la livraison au client final. L'analyse des définitions et des travaux dans la chaîne logistique, nous a permis de classer les données en trois grandes catégories :

- ☞ *Les données informationnelles* : sont les données de gestion (valeurs, ratios, prix, capacité, etc.) et les données informatiques (statiques, dynamiques ou historiques).
- ☞ *Les données décisionnelles* : sont les données qui caractérisent une décision prise par l'ensemble des acteurs de la chaîne à long, moyen et court terme (plan de production, plan d'approvisionnement, etc.)
- ☞ *Les métriques* : sont les indicateurs et les mesures qui permettent de piloter la chaîne logistique et de mesurer sa performance à long, moyen et court terme.

Cependant, Millet et Botta-Genoulaz (*Millet et Botta-Genoulaz, 2006*) ont aussi proposé une classification plus détaillée des données selon leur nature et leur place dans les relations entre acteurs. Le résultat est basé sur dix classes d'information que nous énumérons en : (1) Actor (les caractéristiques, identification ou localisation d'une entité organisationnelle ou d'une ressource vue comme acteur), (2) Rules (les règles et les conditions du pilotage de l'activité), (3) Plan (prévisions, plannings et programmes qui déterminent un cadre de décision), (4) Object (définition et caractérisation des produits, ressources, moyens, procédés et services conçus, réalisés et livrés), (5) Resource (point de vue capacitaire des objets définis), (6) Condition (les règles et les conditions du pilotage des relations), (7) Decision (information caractérisant des décisions proposées, confirmées ou en cours de réalisation et impliquant des flux physiques ou financiers), (8) Flow (flux et évènements liés aux relations : flux physiques, temps passés, anomalies, réceptions, livraisons, etc.), (9) Journal (données historiques, traces, listes d'évènements datés et qui ne sont plus modifiés), et (10) Metric (données représentatives de l'activité aux niveaux stratégique, tactique ou opérationnel).

1.1.2.3 Le flux financier

Le flux financier appelé aussi flux monétaire, circule dans le sens inverse du flux physique. Il représente la valeur totale de ventes et d'achats dans une période comptable. Ce flux est échangé entre les acteurs de la chaîne logistique mais il est considéré comme une résultante monétaire palpable lors d'une fin d'activité. Il ne nécessite aucune activité de synchronisation ou de gestion comme dans le cas des deux autres flux.

1.1.3 Les acteurs de la chaîne logistique

Toute organisation qui participe à l'acheminement des flux du point de départ jusqu'à sa destination dans les meilleures conditions est appelée maillon ou acteur dans la chaîne logistique. Dans n'importe quelle structure de la chaîne logistique, les organisations prennent des rôles spécifiques : fournisseurs, producteurs, prestataires, détaillants ou client final (Hugos, 2003 ; Tayur et al., 1999). Le nombre d'organisations impliquées définit la structure et le type de la chaîne logistique étudiée. Selon Mentzer et al. (Mentzer et al., 2001), une chaîne logistique peut prendre trois formes possibles :

☞ *Une chaîne logistique directe* : dans ce cas, le réseau se limite à l'entreprise productrice, son fournisseur direct et son client final. C'est la forme minimale de la chaîne logistique.

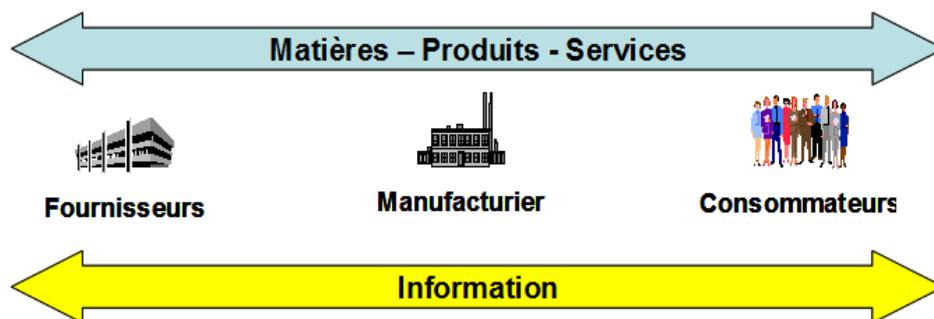


Figure 1. 2 La chaîne logistique directe

☞ *Une chaîne logistique étendue* : ce type de réseau inclut trois autres catégories d'acteurs à la structure minimale de la chaîne logistique : le fournisseur du fournisseur ou le fournisseur final en amont ainsi que le client du client ou le client final en aval.

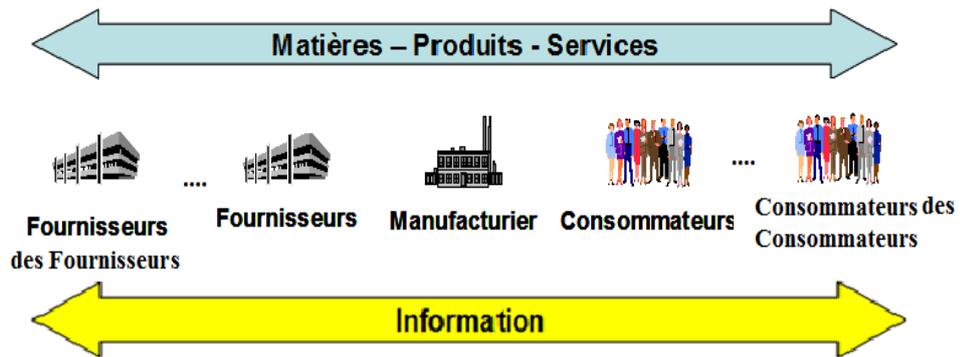


Figure 1. 3 La chaîne logistique étendue

☞ *Une chaîne logistique globale* : cette forme de réseau tient compte de toutes les organisations impliquées dans la chaîne logistique. Ce type de réseau est très complexe à étudier. Cette complexité est due d'une part au nombre de maillons présents et d'une autre part à la variété des relations existantes.

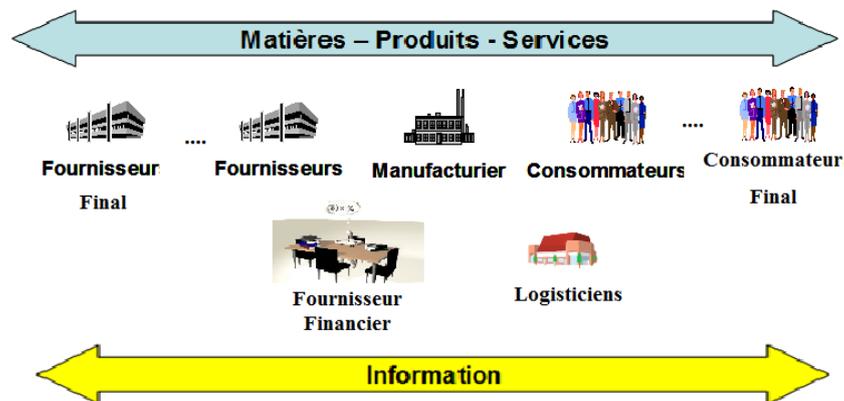


Figure 1. 4 La chaîne logistique globale

1.1.4 Les processus

Dans la littérature, un processus est défini comme étant un ensemble d'activités corrélées ou interactives qui transforment des éléments d'entrée en éléments de sortie. Dans une chaîne logistique, plusieurs processus se combinent et se complètent afin de fournir un bien au consommateur final. Ces processus varient selon les secteurs d'activité de l'entreprise

et mettent en relation un maillon avec un autre ou avec plusieurs maillons du réseau. Cooper et al. (Cooper et al., 1997) et Lambert (Lambert, 2006) ont identifié dans leurs ouvrages les processus clés de la chaîne logistique qui peuvent être catégorisés en cinq macro processus : la planification, la production, l'approvisionnement, la distribution et la gestion de retour. Dans ce qui suit nous détaillons chaque processus en prenant comme référence le modèle « SCOR 8.0 » qui a été développé par « le Supply Chain Council » (SCC).

✎ **La planification** : est un processus ayant pour but l'organisation des autres processus de la chaîne logistique. Il porte généralement sur trois activités fondamentales : la prévision de la demande, la gestion du stock et la planification de la production.

✎ **La production** : représente l'ensemble des activités nécessaires pour réaliser le produit, le fabriquer et le stocker. Il se base essentiellement sur la conception du produit et la gestion de la production et des services.

✎ **L'approvisionnement** : est défini à travers les activités nécessaires pour récupérer de la matière première afin de fabriquer le produit.

✎ **La distribution** : englobe toutes les activités prenant en charge les commandes clients et leur livraison. Il inclut la gestion de la commande (entrée de commande et traitement), la gestion du transport et la livraison aux clients.

✎ **La gestion des retours** : est un processus récent dans le modèle prenant en compte toutes les activités nécessaires pour gérer le retour du produit par le client ou par un autre maillon du réseau.

1.2 La gestion de la chaîne logistique

Dans cette section, nous présentons le concept de « gestion de la chaîne logistique » (GCL), plus connu sous l'appellation anglophone « supply chain management » (SCM). En effet, la chaîne logistique existe avant même la naissance du SCM mais l'amalgame des deux termes est très courant. Dans la section précédente, nous avons présenté les différentes

définitions de la chaîne logistique qui mettent l'accent sur l'aspect statique du réseau. Dans ce qui suit, nous définissons à travers le SCM l'aspect dynamique de ce dernier.

1.2.1 Définition générale

Dans la littérature, le paradigme « *SCM* » ou « *GCL* » existe depuis la fin des années 80 mais a suscité un vif intérêt des chercheurs pendant les années 90. Les définitions de ce terme sont abondantes et diffèrent selon les auteurs et la vision adoptée. Mentzer et al. (*Mentzer et al., 2001*) ont proposé de classifier les définitions du concept « *SCM* » selon trois catégories : une philosophie de gestion, une mise en œuvre de la philosophie et un ensemble de processus à gérer.

1.2.1.1 Le SCM comme « philosophie de gestion »

Comme philosophie de gestion, le SCM est une vision globale de la chaîne logistique. Elle définit les fondements du SCM et les bonnes pratiques de cette dernière afin de permettre aux différents acteurs de cerner ce concept et de les intégrer dans leur réseau. Ainsi, d'un point de vue « philosophie de gestion », les caractéristiques du SCM peuvent être déclinées en trois points essentiels :

- ☞ Une approche système mettant l'accent, d'une part, sur la nécessité de considérer la chaîne logistique comme étant une seule entité plutôt qu'un ensemble d'entités isolées (*Houlihan, 1988 ; Ellram et Cooper, 1990 ; Tyndall et al., 1998*); et d'autre part sur la gestion des flux physiques du fournisseur au client final (*Jones et Riley, 1985 ; Ellram et Cooper, 1990 ; Cooper et al., 1997*).
- ☞ Une orientation stratégique favorisant les efforts coopératifs dans le but de synchroniser les activités opérationnelles et stratégiques des différents acteurs de telle sorte que nous convergions vers une structure unifiée (*Langley et Holcomb, 1992 ; Ross, 1998*).
- ☞ Une approche se focalisant sur la satisfaction du client en créant de la valeur ajoutée pour le client (*Ellram et Cooper, 1990 ; Tyndall et al., 1998*).

1.2.1.2 Le SCM comme « un ensemble d'activités »

Dans cette optique, les chercheurs se sont efforcés de définir les activités nécessaires afin d'implémenter efficacement le SCM comme il est défini par la philosophie. Mentzer *et al.* (Mentzer *et al.*, 2001) ont recensé dans leurs travaux de recherche les principales activités du SCM en se basant sur une abondante bibliographie. Ces activités définissent le SCM comme une mise en place effective des bonnes pratiques sur le terrain et que nous pouvons décliner en :

- ✎ *Un comportement d'intégration des acteurs* : dans ce cas le SCM est considéré comme un ensemble d'activités qui nécessitent une collaboration totale entre tous les partenaires du réseau (du fournisseur au client final) et un effort de coordination des tâches afin de répondre dynamiquement aux attentes du client (Greene, 1991 ; Bowersox et Closs, 1996).
- ✎ *Un partage mutuel de l'information* : pour avoir un comportement d'intégration, le partage d'information et la communication entre les différents acteurs est nécessaire et spécialement dans le pilotage des processus et la planification (Elram et Cooper, 1990 ; Novack *et al.*, 1995 ; Cooper *et al.*, 1997 ; Cooper *et al.*, 1997b ; Tyndall *et al.*, 1998). Ce partage d'information donnera lieu à une mise à jour continue des données circulant entre les acteurs de la chaîne. Par conséquent, ceci entraînera une réduction de l'incertitude entre les partenaires et une meilleure performance de la gestion de la chaîne logistique (Lush et Brown, 1996 ; Andel, 1997 ; Lewis et Talalayevsky, 1997 ; Salcedo et Grackin, 2000).
- ✎ *Un partage mutuel des bénéfices et des risques* : afin de mettre en place le SCM, le partage des bénéfices et des risques doit être pris en compte par les différents acteurs dans une optique de coopération à long terme (Elram et Cooper, 1990 ; Novack *et al.*, 1995 ; Cooper *et al.*, 1997 ; Cooper *et al.*, 1997b ; Tyndall *et al.*, 1998).

☞ *La coopération* : dans leur article, Mentzer et al. (Mentzer et al., 2001) font référence à une coordination des activités similaires ou complémentaires qui sont prises en charge par plusieurs acteurs dans le but de produire un résultat mutuel ou individuel (Anderson et Narus, 1990). La coopération, la coordination et la collaboration sont des mécanismes de concertation entre les acteurs de la chaîne logistique permettant de piloter et de contrôler les flux collectivement. Dans la suite de ce chapitre, nous avons consacré une section sur ces différents mécanismes de concertation pouvant être pris en considération dans la chaîne logistique (cf. section 1.4). En effet, dans ce travail de thèse nous différencions les mécanismes de concertation selon différents critères (objectifs, bénéfiques, risques, partage des ressources et de l'information, etc.) en nous basant sur un état de l'art de la littérature dans le domaine économique.

☞ *Un objectif commun* : La Londe et Masters (La Londe et Masters, 1994) insistent sur la nécessité d'avoir un objectif commun entre les acteurs de la chaîne logistique comme un pilier important pour l'intégration du SCM dans la chaîne logistique. Selon Lassar et Zinn (Lassar et Zinn, 1995), avoir un objectif commun entre les différents acteurs est une règle d'intégration qui permettra d'éviter la redondance et le chevauchement des informations circulantes au niveau de la chaîne logistique tout étant efficace à moindre coût.

☞ *Une intégration des processus* : l'implémentation du SCM se base entre autre sur l'intégration des processus au niveau de l'approvisionnement, la production et la distribution (Elram et Cooper, 1990 ; Novack et al., 1995 ; Cooper et al., 1997 ; Cooper et al., 1997b ; Tyndall et al., 1998). Stevens (Stevens, 1989) a identifié quatre phases d'intégration des processus dans la chaîne logistique :

- *Phase 1* : elle représente la situation de départ. Dans ce cas, la chaîne logistique est un ensemble d'opérations fragmentées au sein d'une même entreprise et qui sont caractérisées par : un stock propre à chaque service, un système de contrôle et de

procédures incompatibles et indépendants et une ségrégation fonctionnelle.

- *Phase 2* : elle se focalise sur l'intégration en interne. Cette phase met l'accent sur la réduction des coûts plutôt que l'amélioration de la performance, des stocks tampons et la réactivité du service client.
- *Phase 3* : c'est une continuité de la phase 2. Elle est caractérisée par une visibilité totale de l'achat à travers la distribution, la planification à moyen terme, la vision tactique plutôt que stratégique, l'accent sur l'efficacité, l'utilisation des supports électroniques dans l'échange des informations et l'approche réactive continue du client.
- *Phase 4* : termine l'intégration des processus au niveau de la chaîne logistique en étendant les phases citées précédemment à travers les différents acteurs.

☞ *Une alliance de partenaires et un maintien des relations à long terme* : Cooper et al. (Cooper et al., 1997) insistent d'un côté sur la nécessité d'étendre les relations et les alliances des acteurs de la chaîne logistique au-delà de la durée d'un contrat ; et d'un autre côté sur l'avantage concurrentiel issu d'une facilité de coopération au niveau d'un réseau formé d'un nombre réduit de partenaires. Ainsi, la formation des alliances stratégiques entraîne selon Langley et Holcomb, (Langley et Holcomb, 1992) un avantage compétitif à travers la création de la valeur ajoutée auprès du client.

1.2.1.3 Le SCM comme « un ensemble de processus à gérer »

Contrairement à la vision précédente du SCM, les scientifiques s'inscrivant dans cette catégorie considèrent le SCM comme un ensemble de processus à gérer. Davenport (Davenport, 1993) définit un processus comme un ensemble d'activités structurées et mesurées conçu pour produire un bien spécifique pour un client ou un marché ciblé. La Londe

(La Londe, 1997), à son tour présente le SCM comme des processus de gestion des relations entre les acteurs, de l'information et des ressources au-delà des frontières de l'entreprise afin de renforcer le service client et la valeur ajoutée à travers une synchronisation des flux physiques et informationnels de l'approvisionnement jusqu'à la livraison au client final. En d'autres termes, un processus peut être défini en général comme étant un ordonnancement des activités dans le temps et dans l'espace, avec un début et une fin clairement identifiés et avec une structure de plan d'action (Elram et Cooper, 1990 ; Novack et al., 1995 ; Cooper et al., 1997 ; Cooper et al., 1997b ; Tyndall et al., 1998). Cette vision du SCM se focalise sur « les processus clés » répondant aux besoins du client. Les acteurs de la chaîne logistique sont organisés autour de ces processus clés.

1.2.2 Bilan

Dans ces deux premières sections, nous avons présenté le concept de la chaîne logistique et de la gestion de la chaîne logistique afin de pouvoir introduire par la suite le contexte de notre recherche et notre problématique. Force est de constater que le paradigme SC ou CL et SCM se basent sur plusieurs éléments que nous détaillons tout au long de ce travail de thèse.

1.3 Les PME dans la chaîne logistique

Tout d'abord, nous trouvons dans la littérature de nombreux travaux traitant de l'intégration de la chaîne logistique d'un point de vue grande entreprise. L'entreprise est considérée comme le cœur de la structure de la chaîne logistique. Cette vision est plus centrée sur la performance de l'entreprise productrice et pousse les autres maillons à se plier aux exigences de cette dernière ou à se synchroniser avec son système manufacturier. Dans ce travail de thèse, nous considérons la chaîne logistique d'un point de vue petites et moyennes entreprises (PME) et plus particulièrement d'un point de vue « *groupement de PME* ».

Ainsi, dans cette troisième section, nous introduisons la chaîne logistique dans un contexte de PME en nous basant sur un état de l'art de la littérature. Par la suite, nous allons nous focaliser particulièrement sur notre champ d'étude qui est les PME mécatroniques dans la

région des Savoie. L'analyse du domaine se basera sur des investigations entreprises auprès de plusieurs PME de la région.

1.3.1 Rôle des PME dans la chaîne logistique

La chaîne logistique est un macro-système complexe dû, d'une part, à la variété des structures organisationnelles intervenantes et des relations existantes entre elles ; et d'autre part, à des décisions stratégiques de décentralisation et de délocalisation des différentes tâches liées à la production, causées par les évolutions de l'environnement. En effet, les PME évoluent dans un environnement économique instable et complexe. Cette complexité et instabilité sont causées d'une part par des facteurs internes à la chaîne logistique comme les acteurs influents, les délais, la satisfaction du consommateur final, etc. ; et d'une autre part, par des facteurs externes liés au marché tels que : la concurrence, les aléas, les imprévisions, etc. Par conséquent, afin de survivre et de pouvoir supporter les exigences des chaînes logistiques dans lesquelles elles sont impliquées et du marché, les PME collaborent entre elles pour réaliser leurs objectifs sans pour autant perdre leur autonomie et leur identité (Julien, 1997 ; Villarreal Lizarraga et al., 2005). Selon Julien (Julien, 1997), afin de trouver l'équilibre entre grandes entreprises et PME, les PME doivent maintenir et même améliorer leur compétitivité dans un marché de plus en plus concurrentiel. Cette compétitivité passe évidemment par le contrôle de l'information et des processus mais aussi par la mise en place d'une structure en réseau.

Afin de mieux expliciter cette vision de « groupement de PME », cette sous section sera déclinée en deux parties essentielles. La première définit la notion de « groupement » ou « réseau de PME » et la seconde mettra le point sur les avantages d'une telle structure.

1.3.1.1 Les spécificités des « groupements de PME »

L'intégration du SCM représente un défi important pour les PME et une solution inévitable pour maîtriser la complexité de l'environnement économique et accroître leur réactivité. En effet, une PME dans une chaîne logistique, devient plus performante quand elle évolue en réseau. La théorie de « groupement/réseau » de PME, qui se fonde sur la collaboration, la coopération et la coordination, constitue un rond point crucial dans la

stratégie de management de ces dernières. Ces alliances permettront de réduire leur vulnérabilité et de supporter les contraintes d'intégration du SCM dans une chaîne logistique globale. Cette philosophie est ainsi expliquée par Assens (Assens, 1994) : « *le réseau d'entreprises repose sur un tissu de PME autonomes et indépendantes entre elles, interagissant sur la base de rapports de confiance mutuelle pour réduire l'incertitude de leur environnement. Au cours de ces interactions locales récurrentes, une forme d'organisation globale émerge en l'absence d'entité de régulation centrale* ».

De même, Villarreal Lizarraga, (Villarreal Lizarraga, 2005), a recensé dans son travail de thèse les spécificités d'« un groupement de PME ». Ainsi, elle décrit les groupements de PME comme des entités distinctes en coopération, avec une structure de type réseau et ayant les caractéristiques suivantes :

- ☞ Constitués d'entreprises, sous-traitantes ou non, généralement nombreuses. Le groupement constitue une solution pour des PME ayant la volonté d'améliorer leur compétitivité et pour les PME sous-traitantes pour réguler les variations de charge.
- ☞ Liés par des aspects formels, c'est-à-dire prenant une forme juridique spécifique.
- ☞ Intégrés horizontalement et / ou verticalement dans la réalisation des activités. L'intégration est dite horizontale quand les entreprises réalisent des activités de même type (même stade du processus), et elle est verticale quand les activités réalisées par les entreprises sont à des stades différents du processus.
- ☞ Localisés le plus souvent dans le même territoire géographique, même si on trouve des groupements inter-régions et plus rarement formés par des PME situées dans différents pays.

1.3.1.2 Les avantages d' « un groupement de PME »

L'émergence de ces groupements de PME est une réponse à de nouveaux enjeux concurrentiels tout en conservant leur autonomie. Elle est favorisée par la structure flexible et

intrinsèque des PME, et pour la plupart d'entre elles, par leur disposition naturelle à la coopération, développée par des liens stables de sous-traitance (*Burlat et Boucher, 2001*). Ainsi, Mallidi et al., (*Mallidi et al., 1999*) mettent l'accent sur les principaux avantages pour une PME d'intégrer un groupement :

- ☞ Accéder à des nouveaux marchés en fabricant de nouveaux produits qui sont hors de la portée d'une seule PME.
- ☞ Augmenter la productivité en accumulant et en linéarisant la capacité productive de chaque PME du réseau.
- ☞ Améliorer la réactivité par la réponse commune aux perturbations qui sont insupportables par une seule PME.
- ☞ Améliorer l'utilisation des ressources en évitant la duplication des fonctions dans le groupement.

Néanmoins, comme dans toute structure ou organisation complexe, beaucoup de difficultés apparaissent dues au nombre d'interactions qui rend problématique la mise en œuvre d'une structure opérationnelle et l'édification de règles pour le travail commun (*Mazneveski et Chudoba, 2000*).

1.3.2 Les PME mécatroniques savoyardes

Dans cette partie, nous abordons le champ d'application de notre recherche à savoir la chaîne logistique constituée essentiellement de PME mécatroniques dans la région savoyarde. La mécatronique est un nouveau concept qui a vu le jour dans plusieurs domaines de l'industrie qui ont besoin d'intégrer des caractéristiques mécaniques, électroniques et informatiques simultanément. En effet, la région savoyarde représente un des berceaux les plus connus mondialement dans ce domaine de production. Les PME étudiées sont intégrées dans des réseaux d'entreprises qui participent à un ou plusieurs processus de transformation et de distribution des produits mécatroniques d'où l'appellation « PME mécatroniques » que nous leur avons attribué.

Notre étude de l'existant s'est fondée sur une étude bibliographique et une littérature peu abondante dans ce domaine mais aussi sur des investigations auprès des entreprises de la région. Dans ce qui suit, nous présentons la démarche suivie pour l'étude du contexte ainsi que les résultats qui en découlent.

1.3.2.1 Démarche d'étude de l'existant

L'étude du terrain s'est faite en deux phases. La première phase consiste en une étude des travaux traitant du tissu industriel de la région menés sous la direction d'un acteur public « Thésame » (Guizzi, 2005). Durant la seconde phase, nous avons élaboré un questionnaire visant à identifier les spécificités de la chaîne logistique dans laquelle évoluent les PME mécatroniques. Les questions ont été sélectionnées à partir d'une étude globale réalisée en 2006 par le Council of Supply Chain (CSC) et d'une synthèse de l'état de l'art. Les questions se subdivisent en quatre grandes catégories :

- ✎ Caractérisation de l'entreprise : secteur d'activité et type de l'entreprise.
- ✎ Caractérisation de la chaîne logistique dans laquelle est intégrée l'entreprise : portée de la chaîne, rôle de l'entreprise dans la chaîne, les types de relation entre les partenaires, alignement des objectifs, niveau d'intégration de la chaîne logistique, les processus pris en charge par le groupement.
- ✎ Identification des indicateurs mis en place pour évaluer la performance de la chaîne logistique.
- ✎ Identification des outils d'aide à la décision utilisés au sein de la chaîne et intérêt apporté à la simulation.

Par la suite, afin d'appuyer et d'approfondir l'analyse faite des réponses reçues à ces investigations, nous avons réalisé des entretiens privés avec les directeurs logistiques de quelques entreprises de la région.

1.3.2.2 Caractéristiques de la chaîne logistique dans un contexte de PME mécatronique

La démarche d'étude de l'existant, décrite ci-dessus, nous a permis de dégager plusieurs spécificités de la chaîne logistique constituée de PME mécatroniques. Selon Guizzi, (Guizzi, 2005), « le tissu industriel de la région repose sur une concentration géographique et sectorielle de PME indépendantes, mais complémentaires. Ces dernières tirent leur succès d'interrelations entre différentes unités de production, développant des relations non exclusivement marchandes où s'élaborent des dispositifs complexes de régulation, d'apprentissage et de coordination ». En complément à cette description, nous pouvons décliner les caractéristiques de la chaîne logistique composée de PME mécatroniques en trois points essentiels (Tounsi et al., 2010) :

- ✎ Complexité : la chaîne est composée de plusieurs acteurs autonomes et indépendants. Les relations entre les acteurs diffèrent selon les objectifs et la situation géographique. En effet, nous trouvons des notions de groupement d'entreprises qui collaborent afin de réaliser un processus donné. Chaque acteur possède des savoir-faire dans une activité précise.

- ✎ Décentralisation/Délocalisation : c'est une décision stratégique due au phénomène de mondialisation et à la volonté de réduire les coûts. Les groupements de PME mécatroniques de la région sont en majorité des sous-traitants et ne sont généralement pas localisés dans la même région ou même dans le même pays que les autres acteurs de la chaîne globale.

- ✎ Manque de visibilité de toute la chaîne : les PME mécatroniques collaborent en réseau en enchaînant leurs activités afin de réaliser un objectif ou un processus donné. Or, en conséquence des caractéristiques énoncées précédemment (délocalisation et décentralisation), la chaîne logistique est subdivisée dans la plupart des cas sur plusieurs sites géographiques selon leurs objectifs ou leurs fonctionnalités dans la chaîne globale (distribution, fabrication, approvisionnement, etc.). Ces sites ont seulement une visibilité locale mais se coordonnent avec les autres sites à travers les flux physiques et de données.

1.3.3 Bilan

Dans cette section, nous nous sommes focalisés sur la chaîne logistique dans un contexte de groupement de PME et plus particulièrement les PME mécatroniques de la région Savoie. Ainsi, nous avons mis l'accent sur les caractéristiques d'un groupement de PME au niveau de la chaîne logistique globale. Dans ce qui suit, nous définissons les différents types de relations qui peuvent exister au niveau d'une chaîne logistique.

1.4 Les mécanismes de concertation dans la chaîne logistique

Un des facteurs de l'intégration des pratiques de management dans une chaîne logistique est l'utilisation de mécanismes de concertation afin de synchroniser les flux (flux physiques et flux de données). Dans ce travail de thèse, nous définissons un mécanisme de concertation comme étant « un cadre (Framework) formalisant l'interaction entre les différents acteurs du réseau et les règles qui la régissent ». En effet, un mécanisme de concertation, indépendamment de son type, fixera les règles et le cadre d'échange des informations et des processus entre les différentes entités de la chaîne logistique. Cette interaction est un processus gérant la mutualité qui est une mesure définissant l'aptitude à abandonner son objectif individuel dans le but de satisfaire l'objectif global, la particularité et les compétences de chaque acteur (*Ford et al., 2002*).

Dans une chaîne logistique, nous pouvons trouver plusieurs formes d'interaction (ou relation) entre les différentes entités. Ces interactions se différencient par la nature des objectifs que les acteurs se fixent et leur degré d'engagement dans la chaîne. En effet, *Wong et al. (Wong et al., 2004)* soulignent que dans une chaîne logistique, le SCM se base sur différents types de relations : la coordination, la coopération et la collaboration (connues par les 3C). Dans la plupart des cas, ces mécanismes de concertation sont utilisés sans discernement. Or, selon la littérature économique et managériale, chaque mécanisme a son principe. Nous allons voir qu'avant de qualifier une relation entre deux acteurs d'une chaîne logistique, il faut étudier le degré d'importance des critères liés aux objectifs, aux risques, aux bénéfices, aux ressources, à la prise de décision ou aussi au formalisme des échanges entre les acteurs.

Dans ce qui suit, nous détaillerons les différents mécanismes de concertation qui peuvent exister dans une chaîne logistique en mettant l'accent sur les différents critères cités précédemment.

1.4.1 La coordination

Selon Merriam-Webster (*Merriam-Webster, 2003*), la coordination peut être perçue comme un processus qui se base sur la prise en charge commune des actions ou d'une condition ou encore sur le fait d'agir dans une voie de concertation. Les fondements de ce mécanisme sont, d'une part des rapports formels et, d'autre part, une compréhension des missions compatibles. Ainsi, la planification, la division des rôles et les canaux de communication sont bien définis. L'allocation des ressources est mutuellement reconnue, et les risques et les bénéfices sont partagés ou compensés. Cependant, la prise de décision pour le mécanisme de coordination, peut être soit décentralisée (la décision est partagée entre tous les acteurs de la chaîne logistique), soit centralisée en se reposant sur une seule organisation (*Mattessich et al., 2001*). D'un autre côté, la transformation du produit se fait individuellement par les organisations mais en restant dans un cadre de mutualité.

1.4.2 La coopération

Contrairement à la coordination, la coopération comme mécanisme de concertation implique des rapports moins formels et un faible degré d'engagement pour regrouper les buts (*Mattessich et al., 2001*). En effet, une relation de coopération nécessite un partage d'informations selon le besoin et la prise de décision est maintenue par chaque organisation ce qui induit la disparition virtuelle du risque (*Wong et al., 2004*). Chaque acteur dans la chaîne logistique traite individuellement ses ressources et ses bénéfices (*Mattessich et al., 2001*). Le produit est transformé individuellement par chaque organisation.

1.4.3 La collaboration

De manière analogue à la coordination, la collaboration comme mécanisme de concertation est définie comme étant une relation bien définie avec des bénéfices mutuels entre deux ou plusieurs organisations pour réaliser des objectifs communs (*Mattessich et al., 2001*). Néanmoins, elle se distingue par sa structure collaborative qui détermine (i) la prise de

décision collective et décentralisée dans la structure (ii) les ressources mises en commun ou conjointement sécurisées et (iii) la prise en charge partagée du produit (Wong et al., 2004).

1.4.4 Bilan

Dans cette section, nous avons différencié les différents mécanismes de concertation qui prêtent parfois à confusion au niveau de la littérature. Cette étape, nous paraît fondamentale pour pouvoir définir par la suite notre modèle du domaine (cf. chapitre 2). En effet, L'identification des types de relations dans une chaîne logistique est une étape importante afin que nous puissions élaborer un modèle compatible avec l'existant en tenant compte des degrés de partage de l'information, des ressources et des objectifs. Le tableau 1.2 récapitule les caractéristiques de chaque mécanisme.

Tableau 1. 2 Comparatif des 3C

	Collaboration	Coopération	Coordination
Objectifs	Un objectif en commun	Peu regroupés	Plusieurs objectifs non conflictuels
Prise de décision	Commune	Individuelle	Commune ou acteur décideur
Bénéfices	Partagés	Traités séparément	Partagés
Ressources	Mises en commun	Traités séparément	Mutuellement reconnues
Formalisme des relations	Formel	Peu formel	Formel
Risques	Partagés	Disparus	Partagés
Aspect temporel dans la transformation du produit	Partagé	Individuel	Individuel

1.5 Problématique

Dans les sections précédentes de ce premier chapitre, nous avons situé le cadre général de ce travail de thèse. Ainsi, dans les différentes sections, nous avons défini les caractéristiques de la chaîne logistique et de son management (SCM), du rôle des PME au niveau de la chaîne logistique et particulièrement des PME mécatroniques dans la région savoyarde et enfin des mécanismes de concertation qui définissent les différentes techniques d'intégration et de partage de l'information dans la chaîne logistique.

En resituant le contexte dans lequel s'inscrit cette thèse, nous décrivons notre domaine d'application comme étant un tissu industriel constitué de plusieurs PME produisant dans le domaine de la mécatronique et qui collaborent en réseau pour réaliser une activité ou un objectif commun. Ces groupements de PME constituent, d'une part des organisations complexes comme nous l'avons décrit précédemment (section 1.3), et d'autre part un enjeu économique et un avantage concurrentiel pour la pérennité et la prospérité de l'économie de la région. Le manque de travaux de recherche pour ce type de réseau et particulièrement dans le domaine de la mécatronique, ainsi que le besoin exprimé par la région, nous ont conduit à étudier la structure de ces groupements et les différents mécanismes d'intégration définissant la dynamique du réseau.

Pour pallier à ces limites et pour répondre aux exigences de la région, nous avons étudié les différentes avancées faites dans le domaine du génie industriel et du génie logiciel afin de trouver une solution adéquate et adaptée à notre contexte. Cette solution sera fondée sur la modélisation et la simulation afin de développer un prototype de plateforme de simulation basé sur les systèmes multi-agents et dédiée aux PME mécatroniques de la région Savoyarde. Le choix des systèmes multi-agents se justifie par son orientation naturelle pour modéliser et simuler la structure et le comportement de la chaîne logistique. En effet, l'étude des deux domaines (chaîne logistique et système multi-agents) montre une forte similarité entre les concepts et les pratiques organisationnelles. Cette analogie privilégie l'utilisation des agents pour modéliser et simuler la chaîne logistique. Cette comparaison sera détaillée et approfondie tout au long des chapitres suivants (cf. chapitre 2 et chapitre 3).

Cependant, il est nécessaire de souligner que la résolution de notre problématique s'est focalisée sur une approche de développement ArchMDE permettant d'avoir un haut niveau d'abstraction des concepts proposés, et une séparation entre les éléments du domaine et ceux du système multi-agents. En effet, ArchMDE (cf. Introduction générale et démarche scientifique) combine deux approches d'ingénierie. D'une part, nous avons l'approche centrée sur l'architecture qui permet un développement focalisé sur l'organisation des éléments du système et leurs propriétés les plus cruciales. D'autre part, nous avons l'approche dirigée par les modèles qui conçoit l'intégralité du cycle de vie de notre solution de modélisation comme un processus de production, de raffinement itératif et d'intégration de modèles. Ainsi, cette approche nous permet de structurer le développement de notre solution de modélisation et d'adresser les différents aspects répondant aux exigences du domaine.

1.6 Conclusion

En résumé, dans ce premier chapitre nous avons mis l'accent sur les différents axes de recherche dans lesquels va s'inscrire le travail de thèse. En effet, nous avons présenté les fondements des paradigmes chaîne logistique, gestion de la chaîne logistique et mécanismes de concertation qui représentent les piliers sur lesquels reposent la thèse. De même, nous avons décrit le contexte de notre recherche en détaillant l'environnement économique dans lequel baignent les PME mécatroniques et particulièrement les groupements de PME dans la région Savoyarde. A partir de cet état de l'art, nous avons finalisé ce chapitre, en cernant la problématique qui justifie ce travail de thèse ainsi que les objectifs à atteindre.

Dans la suite de ce manuscrit, nous nous basons sur cette étude de l'existant pour générer la solution à notre problématique. La construction de la solution suit le schéma de développement du processus ArchMDE et par conséquent elle se fait au fur à mesure des chapitres suivants.

Chapitre 2

*La conception et la modélisation
pour la simulation de la chaîne
logistique*

Introduction

Après avoir mis l'accent sur les fondements de la chaîne logistique et de son management, nous finalisons la première étape de la construction de la solution répondant à la problématique de ce travail de thèse. Ainsi, sur la base de l'analyse du terrain, ce deuxième chapitre se focalise sur la partie « conception » de la première phase du processus de développement adopté « ArchMDE » (cf. Figure 2.1).

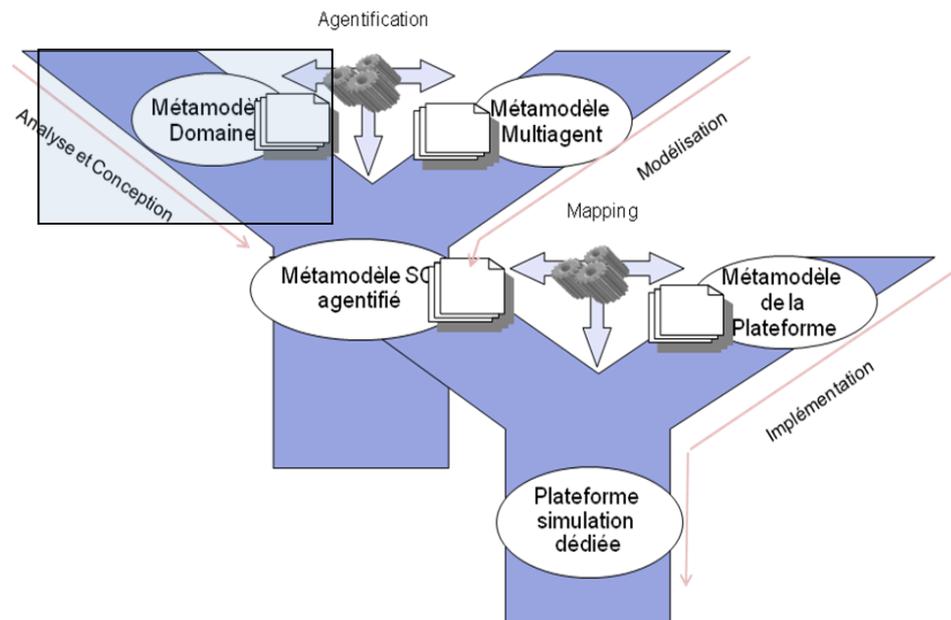


Figure 2. 1 La partie conception d'ArchMDE

Pour structurer la tâche de « conception », ce chapitre est organisé autour de deux principales parties. La première partie mettra l'accent sur l'état de l'art dans le domaine de la conception et de la modélisation de la chaîne logistique (sections 2.1 et 2.2). Au niveau de cette étude bibliographique, nous identifions les pratiques courantes dans la communauté afin de construire les modèles reflétant la chaîne logistique dans un domaine d'application donné. Ce tour d'horizon mettra l'accent sur le processus de modélisation d'abord en partant de la conceptualisation des éléments du terrain, puis en passant par la modélisation pour arriver enfin au résultat escompté (voir Figure 2.2).

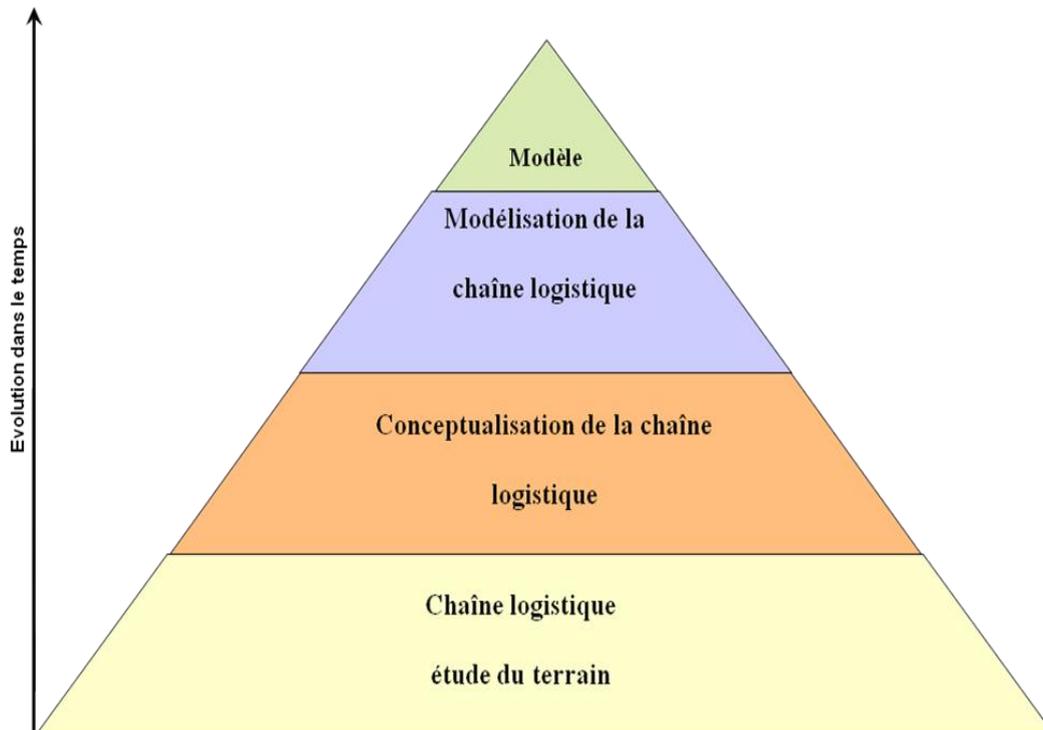


Figure 2. 2 Le processus de modélisation

La deuxième partie de ce chapitre puise dans l'analyse de l'existant (cf. section 1.3) et dans l'état de l'art afin de proposer une méthodologie permettant de générer un modèle conceptuel traduisant le domaine d'application qui, rappelons-le, est la chaîne logistique dans un contexte de PME mécatroniques. A la fin de cette partie, nous obtiendrons le premier artefact présentant le métamodèle du domaine (cf. section 2.5).

2.1 La conceptualisation de la chaîne logistique

L'étude des besoins de la phase d'analyse nécessite le plus souvent une représentation abstraite et simplifiée du système réel. Les modèles à ce niveau de développement, sont appelés des « *modèles conceptuels* ». Selon Mylopoulos (*Mylopoulos, 1992*) un modèle conceptuel décrit les aspects physiques et sociaux du monde réel dans le but de faciliter sa compréhension et la communication entre les différents acteurs d'un projet. En effet, un modèle conceptuel définit les entités impliquées ainsi que les paramètres permettant d'analyser le comportement dynamique du système en variant les scénarii et par conséquent en variant les paramètres d'entrée (*Longo et Mirabelli, 2008*). En d'autres termes, ce modèle, qui est dans la plupart des cas graphique, est utilisé pour représenter d'une part l'aspect

statique d'un système (entités et propriétés) et d'une autre part l'aspect dynamique (processus et évènements) (*Wand et Weber, 2002*).

Kung et Solvberg (*Kung et Solvberg, 1986*) déclinent quatre motivations pour appuyer la nécessité du modèle conceptuel :

- ✎ Fournir un support de communication entre les développeurs et les utilisateurs
- ✎ Aider les analystes à comprendre un domaine donné
- ✎ Pourvoir un support pour la phase de modélisation
- ✎ Fournir un document de référence pour les travaux futurs.

Bien que la recherche soit unanime sur l'importance du modèle conceptuel, cette phase reste très complexe et peu étudiée (*Batra et al.1990 ; Goldstein et Storey, 1990 ; Prietula et March, 1991 ; Batra et Marakas, 1995 ; Hitchman, 1995 ; Maier, 1996*).

Dans le domaine de la chaîne logistique, le modèle conceptuel s'inscrit dans une démarche de compréhension et d'amélioration de l'organisation et des processus de création de valeur. Afin de représenter au mieux le système réel, d'appréhender et de définir la chaîne logistique, plusieurs façons se distinguent par leur orientation et leur nature. Dans la littérature nous avons identifié deux principales orientations de modélisation conceptuelle. D'un côté, Thierry (*Thierry, 2003*) distingue, dans ses travaux, une orientation de modélisation basée sur la « Vision Produit » ou la « Vision Entreprise ». D'un autre côté (*Chopra et Meindl, 2001*), (*Stevens, 1989*) et (*Cooper et al., 1997b*) définissent une orientation de modélisation basée sur deux visions : la « Vision Structure » et la « Vision Processus ». Dans ce qui suit, nous détaillons chaque orientation et son apport au niveau de la modélisation conceptuelle.

2.1.1 Orientation « Produit / Entreprise »

Thierry (*Thierry, 2003*) différencie les approches de modélisation centrées sur la circulation du produit (ou une famille de produits) et celles définissant les chaînes logistiques d'un point de vue entreprise. Ces deux visions permettent de modéliser le système en prenant comme référence le produit lui-même ou l'entreprise étudiée.

2.1.1.1 La « Vision Produit »

Cette vision prend en compte la chaîne logistique dédiée au produit depuis la matière première jusqu'au client (produit fini). On se focalise ainsi sur la circulation du produit pour définir le point de départ et le point d'arrêt de la chaîne c'est-à-dire en d'autres termes les frontières d'étude du réseau en considérant toutes les organisations impliquées dans la gestion des flux. Ainsi, Rota et al. (*Rota et al., 2002*) définissent la chaîne logistique dédiée au produit (ou à une gamme de produit) comme « *l'ensemble des entreprises qui interviennent dans les processus de fabrication, de distribution et de vente du produit, du premier des fournisseurs au client ultime* ». Dans cette optique, la chaîne logistique considérée est étendue (cf. section 1.1.3).

Afin de concevoir la chaîne logistique en adoptant la « Vision Produit », New et Payne (*New et Payne, 1995*) proposent de représenter les activités et les entreprises impliquées dans cette chaîne qui commencent de l'extraction de la matière première en passant par les entreprises de production, les grossistes, les détaillants jusqu'au client final. Une autre approche plus opérationnelle proposée par Lee et Billington (*Lee et Billington, 1993*) fait le rapprochement naturel entre la chaîne logistique et un réseau d'installation qui fait apparaître les fonctions d'approvisionnement (relation entre fournisseur et producteur), de transformation (par la production de biens) et de distribution (du produit final vers le ou les clients).

2.1.1.2 La « Vision Entreprise »

Cette vision considère une entreprise comme le cœur de la chaîne logistique. En effet cette approche se focalise sur une entreprise référence pour étudier ses relations avec les autres acteurs de la chaîne ainsi que tous les produits qu'elle manufacture. Dans cette optique, plusieurs modèles ont été proposés dont les plus connus dans la littérature sont les modèles SCOR (cf. figure 2.3) et celui proposé par Kearney (*Kearney, 1994*).

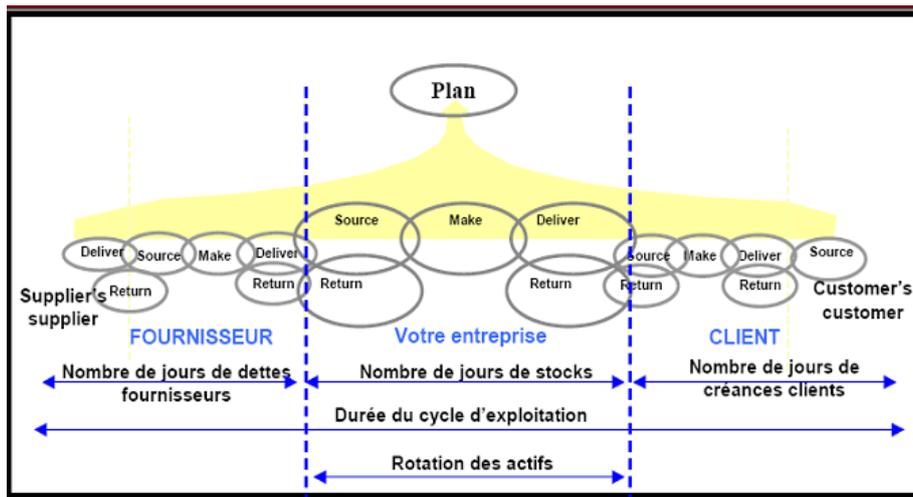


Figure 2. 3 Le modèle SCOR version 8.0 (Source SCC)

2.1.1.3 Synthèse

D'un côté, nous avons une vision centrée sur le produit et d'un autre côté une vision centrée sur une entreprise au cœur de la chaîne. Ces deux visions sont orthogonales et ne peuvent être prises en compte que séparément. En effet, comme nous pouvons le voir dans la Figure 2.4, considérer les deux visions en même temps revient à prendre en compte toutes les entreprises avec tous les produits qu'elles manufacturent. Ceci induit au croisement d'un nombre important de chaînes logistiques. Dans ce cas de figure, la considération de la chaîne globale devient complexe et à lisibilité très réduite.

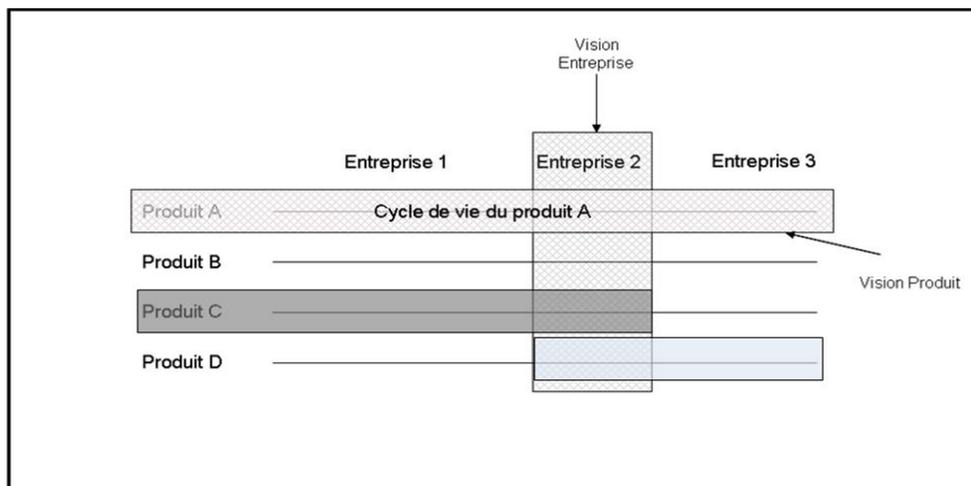


Figure 2. 4 Croisement « Vision Produit » et « Vision Entreprise »

2.1.2 Orientation « Structure / Processus »

L'orientation « Structure / Processus » a été définie dans la littérature par *Stevens, 1989 ; Cooper et al., 1997b ; Chopra et Meindl, 2001*. Cette orientation conçoit la chaîne logistique en considérant un point de vue processus ou un point de vue structure. Dans ce qui suit nous mettons l'accent sur les spécificités de ces deux visions.

2.1.2.1 La « Vision Processus »

Cette vision se focalise sur la classification des processus selon les trois axes décisionnels : stratégique, tactique et opérationnel. Elle réorganise les différentes activités de la chaîne autour de processus clés définissant le point de départ et le point final du réseau (cf. section 1.2.1.3). *Chopra, Meindl et Stevens (Chopra et Meindl, 2001 ; Stevens, 1989)* ont proposé une classification des processus clés selon les niveaux décisionnels (voir figure 2.5).

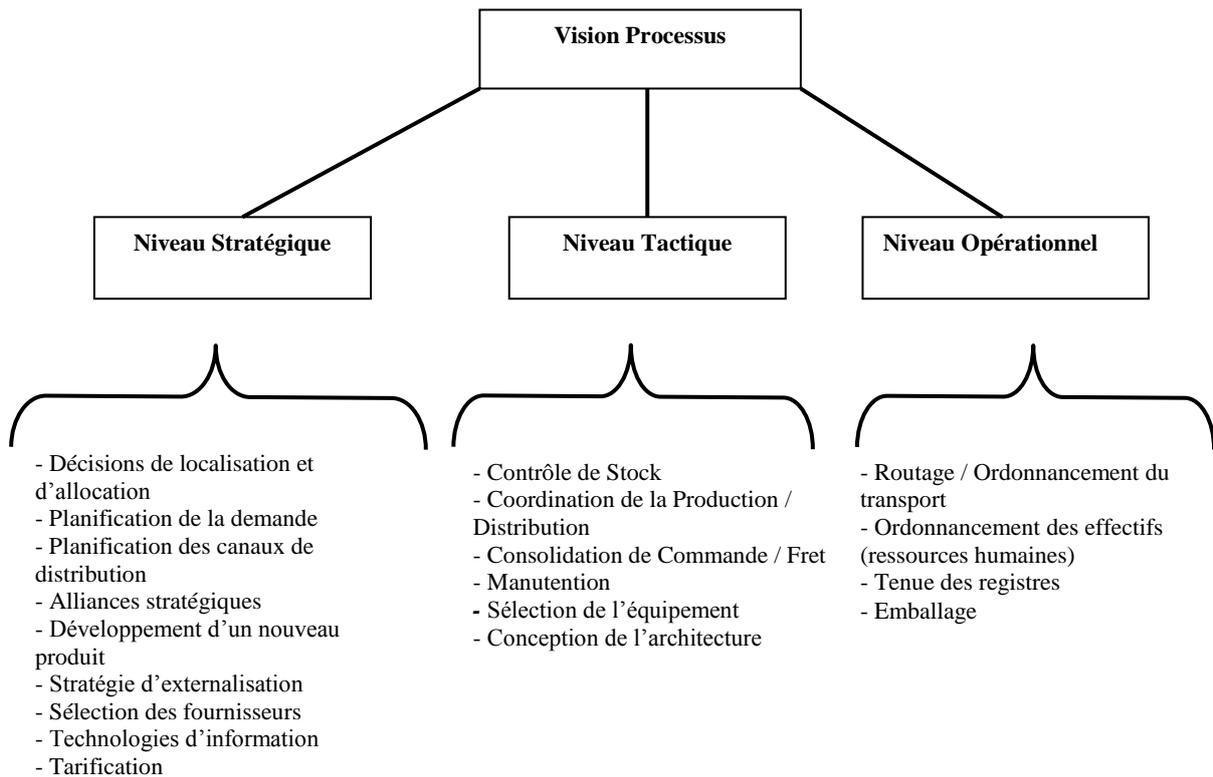


Figure 2. 5 Classification des processus clés

2.1.2.2 La « Vision Structure »

Cette vision a été proposée par Cooper et al. (*Cooper et al., 1997b*). Elle définit la chaîne logistique d'un point de vue architectural. Cette approche permet de structurer les différentes entités dans le réseau ainsi que les relations existantes entre elles. Ainsi la « Vision Structure » identifie quatre points essentiels à considérer pour concevoir la chaîne logistique :

- ✎ Structure du réseau : définie selon deux dimensions. D'une part, la dimension horizontale identifie les différents rôles existants dans la chaîne logistique (producteurs, fournisseurs, distributeur, etc.). D'autre part, la dimension verticale identifie le nombre d'acteurs prenant part à chaque rôle défini auparavant par la dimension horizontale.
- ✎ Type d'acteur : identifie les acteurs de la chaîne logistique selon leur granularité décisionnelle. Il catégorise les acteurs en deux grandes classes : (i) les acteurs primaires qui prennent part à la prise de décision au niveau du réseau (ii) les acteurs secondaires qui synchronisent le flux et ne font que mettre en place les décisions prises par les acteurs primaires.
- ✎ Type de relation : définit les relations existantes entre les acteurs du réseau. Ces relations définissent le cadre de travail dans lequel les acteurs vont gérer les processus du réseau (pilotage, contrôle, management, etc.)

2.1.2.3 Synthèse

En résumé, cette orientation définit deux visions. D'abord, la « Vision Processus » qui souligne l'importance d'identification des processus clés sur lesquels se basent la gestion de la chaîne logistique et la détermination par la suite de l'organisation des entités qui prennent part au fonctionnement du réseau. Ensuite, la seconde vision, « Vision Structure », qui se focalise sur la définition de l'architecture interne de la chaîne logistique ainsi que sur les entités impliquées. Cette synthèse montre que ces deux visions sont complémentaires vu que chacune d'entre elles considère la chaîne logistique en sa totalité avec des points de référence différents. En effet, elles peuvent être adoptées simultanément.

2.1.3 Bilan

Dans cette section, nous avons mis l'accent sur l'importance de la conception pour représenter la chaîne logistique réelle en tenant compte de ses aspects physiques et managériaux. Cette représentation conceptuelle est fondée la plupart du temps sur l'une des visions présentées lors de cette section. Dans cette optique, nous avons établi un état de l'art de ces différentes visions afin de pouvoir construire par la suite le modèle conceptuel traduisant les caractéristiques de la chaîne logistique dans le contexte des PME mécatroniques savoyardes. La figure 2.6 résume les principaux points à considérer dans chaque vision.

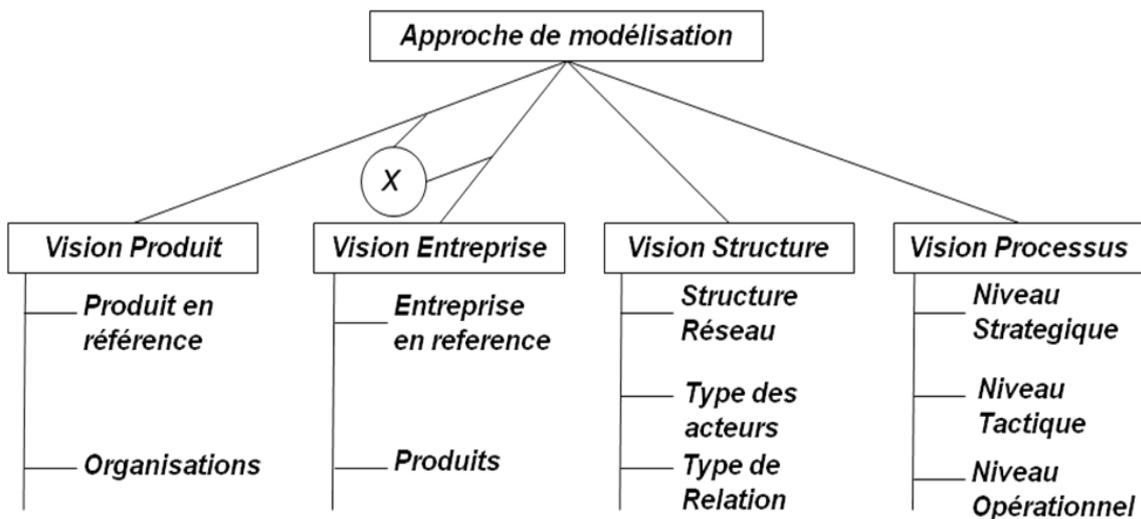


Figure 2. 6 Différentes visions pour la modélisation conceptuelle

Dans ce travail de thèse, nous ne considérons pas la « Vision Entreprise » vu qu'elle se focalise sur l'étude et la modélisation de la chaîne logistique dédiée à une entreprise et non à l'étude d'un réseau constitué principalement de PME. Cependant, les trois autres visions vont constituer les piliers sur lesquels nous allons bâtir notre solution de modélisation pour le domaine d'application (Figure 2.7).

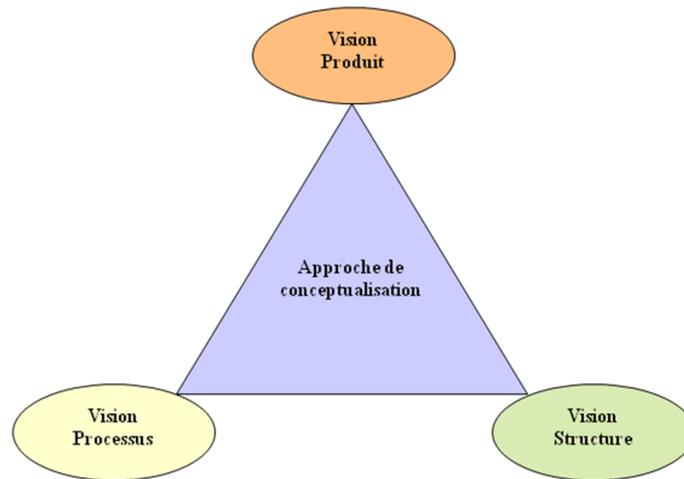


Figure 2. 7 Notre approche de conceptualisation

2.2 La modélisation de la chaîne logistique

Après la phase de conceptualisation de la chaîne logistique, prend place la phase de modélisation (scientifique, informatique, numérique, graphique.... Cette phase correspond à une représentation abstraite des concepts obtenus en utilisant une approche et un langage de modélisation qui traduit la structure et la dynamique des concepts du système. Selon Treuil et al. (Treuil et al., 2008), un modèle est « une construction abstraite qui permet de comprendre le fonctionnement d'un système de référence en répondant à une question qui le concerne. Représentation simplifiée de ce système, un modèle s'appuie sur une théorie générale et il est exprimé dans un langage spécifique appelé langage de modélisation ». Dans la construction des modèles, il y a deux phases essentielles. La première phase, appelée la modélisation statique, consiste à définir un modèle statique qui est la représentation de la structure d'un système de référence sans allusion à son évolution dans le temps. La deuxième phase est la modélisation dynamique. Elle définit le dynamisme du modèle statique en incluant dans la représentation des hypothèses ou des règles concernant l'évolution dans le temps du système de référence.

2.2.1 La modélisation statique

D'après la définition précédente, la modélisation statique traduira avec un langage spécifique un modèle de référence. Le modèle de référence sera un modèle qui reflète un cas

réel ou un modèle conceptuel. La modélisation statique se fera par la définition de variables dans le cas d'un cadre mathématique de modélisation ou par l'intermédiaire d'une représentation informatique des concepts. La modélisation mathématique est introduite par la suite dans la modélisation dynamique. La modélisation informatique statique puise sa syntaxe dans des formalismes tels qu'UML. UML pour Unified Modeling Language, est un standard né de la fusion des trois méthodes qui ont le plus influencé la modélisation objet au milieu des années 90 : Booch, OMT et OOSE (Fowler, 2004). A la base, UML a été utilisé pour modéliser les systèmes complexes utilisant l'approche objet pour leur apporter plus de formalisme et de méthodologie. Cependant avec l'évolution du concept objet et l'apparition du concept agent, beaucoup de travaux utilisent ce standard pour structurer leurs modèles de référence. Ce standard est fondé sur la définition du diagramme de classe afin de formaliser l'aspect statique du modèle conceptuel. Ce formalisme pourra être appelé un modèle informatique ou un métamodèle ou méta-métamodèle selon son niveau d'abstraction.

2.2.2 La modélisation dynamique

Comme énoncé précédemment, un modèle statique aura besoin d'une traduction de son comportement par le biais d'approches informatique ou mathématique. Dans cette sous section nous faisons le tour des approches existantes dans le domaine de la modélisation dynamique des systèmes complexes en général avec des exemples d'utilisation dans la chaîne logistique. Dans la littérature, il existe une panoplie de taxonomies d'approches et de méthodes utilisées pour modéliser la dynamique d'un système complexe. Par exemple, Beamon (Beamon, 1998), Min et Zhou (Min et Zhou, 2002) et Labarthe (Labarthe, 2006) ont présenté dans leurs travaux une taxonomie de ces différentes approches de modélisation en se basant sur l'école de pensée dont découle cette approche.

Min et Zhou (Min et Zhou, 2002) présentent dans leurs travaux une taxonomie qui se base sur les aspects déterministes ou stochastiques des variables du modèle. Ils ont défini quatre catégories :

- ✎ Les modèles déterministes qui sont des modèles non probabilistes et construits autour de paramètres connus et fixés avec certitude. Ils peuvent être subdivisés en deux catégories : les modèles à un seul objectif et les modèles multi-

objectifs. Les modèles déterministes sont développés pour tenir compte de la nécessité d'harmoniser les objectifs conflictuels de chaque acteur de la chaîne logistique.

- ✎ Les modèles stochastiques qui sont des modèles probabilistes prenant en compte des paramètres aléatoires et inconnus. Dans la littérature, cette approche de modélisation peut être subdivisée en deux sous classes : la théorie de contrôle optimale et la programmation dynamique.
- ✎ Les modèles hybrides qui sont un mixage d'éléments de l'approche déterministe et de l'approche stochastique. Ces modèles incluent en même temps les aspects de la simulation et de la théorie des inventaires pour répondre à la fois à aux aspects certain et incertain des paramètres.
- ✎ Les modèles dirigés par les IT (technologies de l'information) : ce sont des modèles qui visent à intégrer et coordonner les différentes phases de la planification en temps réel de la chaîne logistique et ceci en utilisant des logiciels dédiés afin d'améliorer la visibilité au niveau de la chaîne logistique. Parmi ces applications, nous pouvons citer : WMS, TMS (Transportation Management System), ERP (Enterprise Resources Planning), CPFR (Collaborative Planning and Forecasting Replenishment), MRP (Material Requirements Planning, DRP (Distribution Resource Planning), et GIS (Geographic Information Systems).

D'autre part, en adoptant un autre angle de vue, Beamon (*Beamon, 1998*) et Labarthe (*Labarthe, 2006*) ont proposé de leur côté une classification basée sur la nature des outils utilisés au niveau du modèle. Ainsi, Beamon a distingué trois courants : l'approche économique, l'approche analytique (déterministe et stochastique) et l'approche de simulation. Labarthe, de son côté, rejoint la taxonomie de Beamon au niveau de l'approche analytique et de simulation et ceci en soulignant dans chaque classe les méthodes les plus courantes et les plus utilisées. Cependant, Labarthe définit une autre catégorie qui est l'approche organisationnelle qui considère la chaîne logistique à partir de ses entités, ses activités, ses processus et ses fonctions. Cette modélisation peut être hiérarchique c'est-à-dire cartésienne

et systémique ou bien hétérarchique et dans ce cas nous parlons d'entités autonomes reliées par des canaux de communication (approche par processus, approche holonique, approche par émergence et approche multi-agent). Dans notre recherche, nous ne nous intéressons pas à l'étude de cette classe. En effet, cette approche décrit l'aspect statique de l'organisation qui dans notre processus de développement ArchMDE (cf. section 1.6) est déjà prise en compte dans la conceptualisation et la modélisation statique du domaine d'application.

Dans ce qui suit, nous présentons un panorama des outils d'analyse dynamique qui existent dans la littérature. Ainsi, la figure 2.6 définit une taxonomie des approches utilisées pour la modélisation dynamique, ceci en reliant les différentes classifications adoptées par la communauté scientifique.

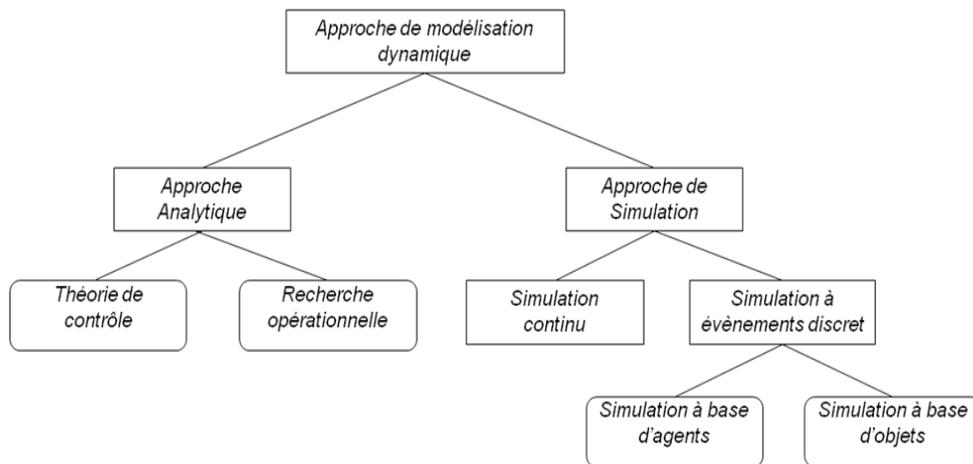


Figure 2. 8 Classification des approches de modélisation dynamique

Nous définissons dans les sous sections qui suivent les deux approches en mettant l'accent sur leurs avantages et leurs inconvénients ainsi que des exemples de méthodes découlant de chacune d'entre elle.

2.2.2.1 L'approche analytique

Les modèles analytiques sont des modèles mathématiques fondés sur des équations mathématiques afin de résoudre les problèmes d'une manière quantitative. En effet, l'approche analytique décrit les entités du système et leurs relations à l'aide d'une fonction d'analyse mathématique. L'exécution d'un tel modèle est considérée comme une évaluation

des entités et des relations. Ces modèles analytiques se subdivisent en deux catégories : les modèles déterministes où tous les paramètres sont connus et les modèles probabilistes où les paramètres sont aléatoires. Beamon (*Beamon, 1998*) présente un état de l'art des projets et des travaux se basant sur les deux types de modèles.

Dans la modélisation dynamique de la chaîne logistique, la théorie du contrôle et la recherche opérationnelle sont deux méthodes analytiques très connues dans la communauté scientifique (*Parunak et al., 1999*). D'un côté, « la théorie du contrôle » modélise la chaîne logistique à partir d'équations différentielles ou aux différences et utilise l'analyse de transformation afin d'explorer son comportement. Cette méthode est dynamique mais s'appuie sur des hypothèses de linéarisation du comportement. D'où, les modèles qui en résultent nécessitent une adaptation des conditions du modèle réel et ne permettent pas de représenter l'ensemble des chaînes logistiques dans toute leur complexité. D'un autre côté, la « recherche opérationnelle » repose sur les théories d'optimisation, la théorie des jeux, les statistiques et l'algorithmique. Cette méthode ne tient pas compte du temps ce qui rend la modélisation du comportement dynamique des entités difficiles à exprimer. Parunak et al. (*Parunak et al., 1999*) proposent une présentation approfondie de l'approche « théorie du contrôle » et de l'approche « recherche opérationnelle » avec des exemples de travaux dans chaque type de modélisation.

2.2.2.2 Approche de simulation

La simulation repose sur l'exploitation d'un ensemble de modèles et méthodes permettant d'approcher, d'imiter, de simuler le comportement d'un système physique réel (*Law et Kelton, 1982*). Shannon (*Shannon, 1998*) considère que la simulation est à un modèle dynamique ce que l'expérimentation est à un système réel. Dans cette perspective où le modèle représente une certaine forme de compréhension d'un système de référence, la simulation est un ensemble de tests grâce auxquels il est possible pour un scientifique de raffiner cette compréhension et d'en tirer des connaissances nouvelles. D'un point de vue plus informatique, Treuil et al. (*Treuil et al., 2008*) définissent la simulation comme « *l'activité au cours de laquelle, selon un protocole et avec un objectif précis, on utilise un simulateur pour faire évoluer les entrées d'un modèle dynamique, l'exécuter, et en recueillir les sorties. Tout modèle écrit en respectant le métamodèle associé au simulateur et comportant au moins un*

paramètre d'entrée peut se prêter à ce processus de simulation ». Dans nos travaux, nous allons adopter cette définition afin de structurer notre solution. En effet, cette définition de la simulation prend en compte toutes les notions définies dans le processus de développement ArchMDE dont :

- ✎ La séparation de la méta-modélisation qui exprimera les concepts du domaine, leurs propriétés et leurs relations indépendamment de l'outil informatique
- ✎ La génération des modèles exécutables à partir du métamodèle
- ✎ La simulation de ces modèles en adoptant une technique ou un outil spécifique.

Dans la littérature, la simulation est utilisée afin d'atteindre des fins différentes. Ces différents usages et objectifs influencent évidemment sur le choix des hypothèses de simplification, sur le niveau de représentation du système de référence, sur le degré de fidélité que le modèle devra posséder à son égard, ou sur la façon dont il pourra être validé. En plus d'influencer le contenu du modèle, ils peuvent influencer le choix de la technique de modélisation et de simulation qui seront utilisées. Dans le tableau suivant, Treuil et al., (*Treuil et al., 2008*), présentent une classification de ses objectifs.

Tableau 2. 1 Objectifs Finaux de la simulation

<i>La simulation peut être utilisée à des fins de...</i>	
Validation, Evaluation, Vérification	La simulation a comme objectif de tester une hypothèse du modèle du système de référence, de le vérifier ou d'accréditer la théorie qui a servi à le construire.
Communication, Formation, Visualisation	La simulation a comme objectif de « montrer » et de partager le modèle de la dynamique du système de référence.
Compréhension, Exploration, Explicitation	La simulation sert à comprendre le fonctionnement du système de référence en considérant le modèle comme une réplique miniature qui pourra être étudiée plus facilement.
Contrôle, Action, Pilotage	La simulation a comme objectif de servir de support à une prise de décision ou à un contrôle qui influera sur l'état (réel) du système de référence.
Prévision, Prédiction, Anticipation	La simulation sert à prévoir les évolutions possibles du système de référence en fonction d'évolutions ou de perturbations spécifiques.

Afin d'atteindre ces objectifs, la technique de simulation du modèle se fait en adoptant soit une approche continue soit une approche à événements discrets. La simulation continue est fondée sur un modèle de système d'équations différentielles ou de différences qui ne fait qu'évaluer un système et que nous pouvons homologuer à la théorie de contrôle (cf. section 2.3.1). De ce fait, elle présente les mêmes limites que cette dernière. De son côté, la simulation à événements discrets vise d'une part à émuler le comportement du système et d'une autre part à faire émerger une organisation visant à améliorer le fonctionnement du système.

Selon Labarthe (*Labarthe, 2006*), la majorité des travaux de simulation de chaînes logistiques reposent sur des modèles à événements discrets (variables discrètes ou phénomènes continus discrétisés). Cette technique permet de mieux prendre en compte la non linéarité du comportement des systèmes complexes. Dans la littérature, les travaux de recherche dans le domaine de la modélisation et de la simulation à événements discrets utilisent le plus souvent deux approches informatiques :

☞ Les objets : qui sont des entités encapsulant leur état (les données) et possédant un comportement (méthodes). Les objets sont dynamiques et interagissent entre eux. Cette interaction se fait par activation de l'une des méthodes de l'objet. Un objet ne peut pas refuser de répondre à un appel d'un autre objet (manque d'autonomie). Dans un modèle de simulation, ils sont soit des entités qui sont transformées par les activités soit des ressources utilisées pour réaliser cette transformation (*Botta-Genoulaz et al., 2008*). L'absence de rationalité et d'intelligence dans cette approche rend l'émulsion et l'émergence des phénomènes difficiles à atteindre. Dans Labarthe (*Labarthe, 2006*), nous pouvons trouver une description de plusieurs travaux de simulation réalisés en se basant sur l'approche objet.

☞ Les agents : un agent, à l'image de l'objet, possède un état mental et un comportement. Dans un système multi-agent, les agents interagissent par envoi de message. Contrairement à l'objet, l'agent est une entité capable de décider d'elle-même de ses actions et de répondre ou non à une requête provenant d'un autre agent : « *Objects do it for free, agents do it for money* » (*Wooldridge,*

1999). En résumé, l'agent possède une autonomie et une capacité d'évolution dans le temps ce qui explique son succès dans la modélisation et la simulation de la chaîne logistique. Cette approche sera abordée par la suite dans le chapitre 3.

2.3 Le couplage de la modélisation à la simulation ?

Dans la précédente section, nous avons fait un tour d'horizon sur les taxonomies des techniques de modélisation existantes dans la communauté scientifique. Force est de constater que le nombre de taxonomies est abondant. En effet, la classification des approches et des techniques prend en compte soit le type des variables utilisées (classification de Min et Zhou) soit la nature de la méthode utilisée (classification de Beamon et Labarthe).

La modélisation et la simulation (M&S) de la chaîne logistique est une approche permettant d'aborder des systèmes complexes et combinant deux techniques puissantes que sont la modélisation informatique puis la simulation. Le choix de cette approche se justifie, d'une part, par l'absence actuellement de modèles analytiques capables de modéliser la chaîne avec toute sa complexité, et d'autre part, par la puissance de la simulation à gérer le comportement stochastique des chaînes logistiques avant leur implantation (*Lee et al., 2002*). La modélisation, quant à elle, est un mécanisme reflétant le système réel qui, quand il est couplé à la simulation, fournit un outil d'aide à la décision qui tient compte de la dynamique du système et du comportement des différents acteurs autonomes. La littérature est unanime sur le rôle positif apporté par la simulation dans l'étude dynamique des systèmes complexes, dans l'analyse et dans l'évaluation des performances. Citons à titre d'exemple certains auteurs Ingalls (*Ingalls, 1998*), Lee et al. (*Lee et al., 2002*) et Longo et Mirabelli (*Longo et Mirabelli, 2008*) qui soulignent les caractéristiques et les avantages d'un outil d'aide à la décision fondé sur la modélisation et la simulation à événements discrets. L'approche M&S est adoptée dans plusieurs travaux afin de réduire la complexité de la gestion de la chaîne logistique et d'évaluer sa performance (*Bagchi et al., 1998 ; Telle, 2003 ; Labarthe et al., 2007*).

En se basant sur l'état de l'art présenté ultérieurement, l'approche agent est très adaptée et naturellement orientée pour la modélisation et la simulation de la structure de la chaîne logistique et du comportement dynamique de ses entités. Ceci est dû d'une part à l'analogie

intuitive entre ces deux domaines et d'une autre part aux avantages qu'offrent les agents pour évaluer et prévoir le fonctionnement de la chaîne logistique (cf. chapitre 3).

2.4 Génération du modèle conceptuel du domaine et passage au métamodèle

Tout au long du premier chapitre, nous avons défini le contexte de notre recherche et la problématique qui se pose à nous. Afin de pouvoir construire une solution de modélisation répondant à tous les aspects du problème, nous avons choisi d'adopter un processus de développement basé sur les approches MDE et IDM afin de pouvoir traiter séparément l'aspect industriel et l'aspect informatique (cf. section 1.6). Dans cette partie, nous nous proposons d'entamer l'analyse du champ d'application et la proposition d'une solution de modélisation représentant d'une manière simplifiée les complexités structurales et fonctionnelles de la chaîne logistique composée essentiellement de PME mécatroniques. Cette modélisation part de l'analyse des éléments du terrain pour fournir deux artefacts essentiels : (1) le modèle conceptuel qui est une représentation graphique et simplifiée du domaine de recherche (2) un métamodèle du domaine qui sera une description des concepts et de leurs relations en utilisant un langage de modélisation informatique (UML).

Dans cette perspective et pour atteindre nos deux premiers objectifs fixés, nous avons puisé dans les travaux et les visions existantes dans la littérature afin de construire un cadre méthodologique. Cette démarche structure les étapes de génération d'un modèle fidèle à l'image réelle du domaine d'application et aussi d'un métamodèle formalisant informatiquement le modèle. Ainsi, dans cette section, nous mettons l'accent sur la méthodologie ainsi que sur son application sur le domaine pour obtenir nos deux artefacts.

2.4.1 Une méthodologie de modélisation conceptuelle

Dans la section consacrée à l'état de l'art dans le domaine de la modélisation conceptuelle (cf. section 2.2), nous avons fait un tour d'horizon des différentes visions existantes et nous avons positionné notre recherche par rapport à ces orientations. Dans ce qui suit, nous présentons notre méthodologie pour structurer la génération du modèle conceptuel

du domaine. En effet, notre approche combine à la fois les trois visions : « Vision Produit », « Vision Structure » et « Vision Processus » (cf. Figure 2.8).

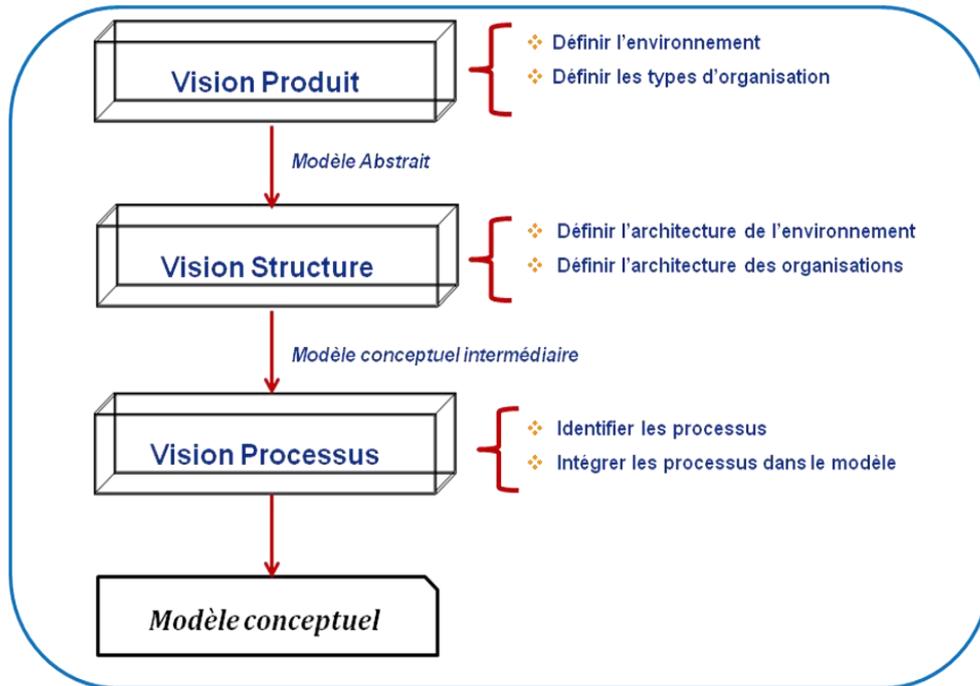


Figure 2. 9 Méthodologie de modélisation conceptuelle (Tounsi et al., 2009a)

En appliquant cette méthodologie, chaque étape fait appel à une vision pour construire et raffiner le modèle conceptuel. Chaque artefact d'une vision (modèle abstrait ou intermédiaire) est le fondement sur lequel la vision suivante va détailler ou compléter la construction du modèle. Ainsi, après l'application des trois étapes, nous obtenons le modèle conceptuel représentant les propriétés du domaine de recherche. L'application de la méthodologie offre une démarche scientifique afin de construire un modèle conceptuel fidèle à l'image réelle du système de référence. Cette démarche que nous présentons est générique et peut être adoptée dans la génération d'un modèle conceptuel de la chaîne logistique indépendamment de son environnement de production et des organisations impliquées. Néanmoins le réseau de référence doit être considéré d'un point de vue circulation d'un produit ou d'une gamme de produit et non d'un point de vue d'une entreprise cible.

Dans ce qui suit nous détaillons l'apport de chaque étape dans la génération du premier artefact : le modèle conceptuel.

2.4.1.1 Vision Produit

Cette vision, comme décrite précédemment (cf. section 2.2.1), prend en compte la chaîne logistique dédiée au produit ou à une gamme de produits. Nous nous focalisons ainsi sur la circulation de ce dernier pour définir l'environnement de production et les organisations impliquées. Ces éléments définis d'une manière générale et globale représentent le cadre abstrait de la solution. Ainsi dans la méthodologie proposée, la «Vision Produit » nous permet de construire le premier modèle pour aboutir à une solution qu'on appelle le modèle abstrait. D'une manière plus générale, le modèle conceptuel abstrait nous permet de définir :

- ✎ L'environnement qui est essentiellement caractérisé par la circulation du flux physique et les phases de transformation du produit ainsi que les aléas et les perturbations associées.
- ✎ Les organisations assurant la gestion des flux physiques et des données. Ces organisations prennent en charge une ou plusieurs étapes de transformation du produit. Sachant que nous sommes dans un contexte de PME mécatroniques, les organisations impliquées sont le plus souvent des groupements de PME se concertant afin de réaliser une ou plusieurs tâches.

2.4.1.2 Vision Structure

A la fin de l'application de la « Vision Produit », nous aboutissons à un modèle abstrait représentant l'environnement et les organisations d'une manière globale sans spécification de leur architecture interne ni de leur comportement au sein de la chaîne. Ainsi, lors de cette deuxième étape de la méthodologie, nous détaillons la structure interne des organisations impliquées ainsi que l'environnement de production représentant leur terrain d'action. Dans cette optique, l'application de cette vision consiste en l'identification des différentes entités, leur organisation verticale et horizontale et la caractérisation des relations existantes entre elles. Par conséquent, en reprenant les points définis au niveau de la première étape de la méthodologie, la « Vision Structure » se focalise sur :

- ✎ L'architecture de l'environnement : cette partie du modèle regroupe les entités nécessaires aux organisations pour gérer le flux physique et accomplir leurs tâches. Généralement, ces éléments sont passifs envers eux-mêmes mais déclenchent ou sollicitent l'intervention des organisations. Ainsi, nous avons besoin de modéliser le flux physique avec les ressources nécessaires à son acheminement et à sa transformation.

- ✎ L'architecture des organisations : elle consiste en l'identification des acteurs de la chaîne logistique globale et dans notre cas les maillons formant les groupements mécatroniques. Les maillons sont hiérarchisés dans l'organisation selon leur implication dans le niveau décisionnel et les tâches qui leur seront attribuées. Les relations de gestion du flux de données seront différentes selon le niveau décisionnel.

A la fin de l'application de la « Vision Structure », nous obtenons un modèle intermédiaire conceptuel construit sur la base du modèle abstrait. Ce modèle a permis de détailler l'architecture des organisations impliquées dans le groupement mais aussi dans la chaîne logistique globale ainsi que l'environnement physique.

2.4.1.3 Vision Processus

Cette vision représente la dernière étape de la méthodologie. Sur la base du modèle intermédiaire, l'application de la « Vision Processus » identifie les différentes catégories de processus nécessaires pour supporter la dynamique de notre modèle. En effet, ces processus sont classifiés selon le niveau décisionnel, mais aussi suivant le type de relation existante entre les maillons. Ces relations peuvent être classées en deux grandes catégories :

- ✎ Le pilotage et le contrôle : c'est le fait de s'assurer de la bonne mise en œuvre des décisions dans l'optique d'une amélioration continue de la performance des processus en termes de valeur ajoutée.

- ✎ La synchronisation : c'est échanger des informations et des flux physiques selon un schéma déjà conçu et prédéfini des processus par les couches décisionnelles.

A la fin de cette dernière étape, nous aboutissons à un modèle graphique mettant en relief les concepts avec leurs propriétés structurales et comportementales. Dans la suite de ce chapitre, nous appliquons la méthodologie décrite sur notre domaine de recherche afin de conceptualiser la chaîne logistique faisant intervenir des groupements de PME mécatroniques.

2.4.2 Application de la méthodologie

Après avoir défini une méthodologie qui nous permettra de formaliser la génération du premier artefact de notre solution de modélisation, nous allons appliquer pas à pas cette démarche à notre contexte. Rappelons que notre champ d'application se focalise sur la chaîne logistique composée essentiellement de groupements de PME mécatroniques dans la région savoyarde (cf. section 1.3.2). Le travail portant sur l'étude de l'existant a permis de dégager la structure dans laquelle sont impliqués les groupements de PME ainsi que les différents mécanismes de concertation adoptés lors de la gestion des flux au niveau du groupement et de la chaîne globale. Ainsi, nous avons constaté que la chaîne logistique globale est composée de plusieurs sites géographiques répartis selon leur fonction ou leur intervention au niveau de la gestion du flux physique. Chaque site est pris en charge par une ou plusieurs entreprises. Selon l'étude que nous avons menée au sein des PME mécatroniques de la région Savoyarde, le site est composé de plusieurs PME complémentaires qui travaillent dans un cadre de collaboration pour achever un ou plusieurs activités de transformation sur le produit. Le groupement de PME, représentant le site, se coordonne avec les autres sites géographiques à travers les flux. Cette coordination permet de pallier aux limites causées par :

- ✎ La diversité et l'hétérogénéité des organisations impliquées
- ✎ La décentralisation des centres de manufacture
- ✎ Le manque de visibilité d'un site de l'ensemble des composantes de la chaîne globale.

Nous présentons dans ce qui suit la génération de la solution conceptuelle sur la base de la méthodologie que nous avons décrite précédemment. La formalisation des caractéristiques structurales et relationnelles du modèle conceptuel avec le langage UML donnera lieu au métamodèle du domaine. Tout au long du manuscrit nous avons opté pour des notations

anglophones pour garder la cohérence avec les publications internationales qui ont été faites et qui vont suivre.

2.4.2.1 Application de la « Vision Produit »

Suivant la méthodologie de modélisation, l'objet de cette première étape est d'identifier le cadre général de notre contexte en prenant comme référence la circulation d'un produit ou d'une famille de produits.

a. Le modèle abstrait

En appliquant, la « Vision Produit », nous avons identifié le type de l'environnement ainsi que les organisations impliquées. En se focalisant premièrement sur ces deux objectifs, nous avons dégagé les concepts suivants :

- ✎ La Sous Supply Chain (SSC) : dans le contexte étudié, la SSC modélise le groupement de PME de manière abstraite. C'est l'organisation dans laquelle les PME se concertent pour réaliser un objectif interne et / ou l'objectif global de la chaîne logistique. La SSC est chargée de la transformation du produit à une certaine phase de son cycle de vie.
- ✎ L'environnement : il représente le concept abstrait qui regroupe tous les éléments nécessaires pour caractériser l'environnement physique et qui peuvent influencer l'activité des organisations impliquées dans la gestion de la chaîne globale.
- ✎ Le périmètre d'influence de la SSC : est la partie visible de l'environnement aux organisations et particulièrement aux groupements de PME. Ce concept représentera graphiquement les différents sites composant notre chaîne globale. Ainsi, ce périmètre définira l'espace alloué au groupement pour agir par concertation. Cette concertation peut être interne au groupement si l'action ne perturbe pas l'environnement hors de sa visibilité, ou dans le cas contraire suscitera une concertation globale avec les autres organisations de la chaîne globale (SC).

- ☞ Zone d'influence partagée : c'est une zone de croisement entre deux périmètres d'influence. Elle représente une zone de transfert de flux et une zone nécessitant une coordination des activités de ces deux dernières.

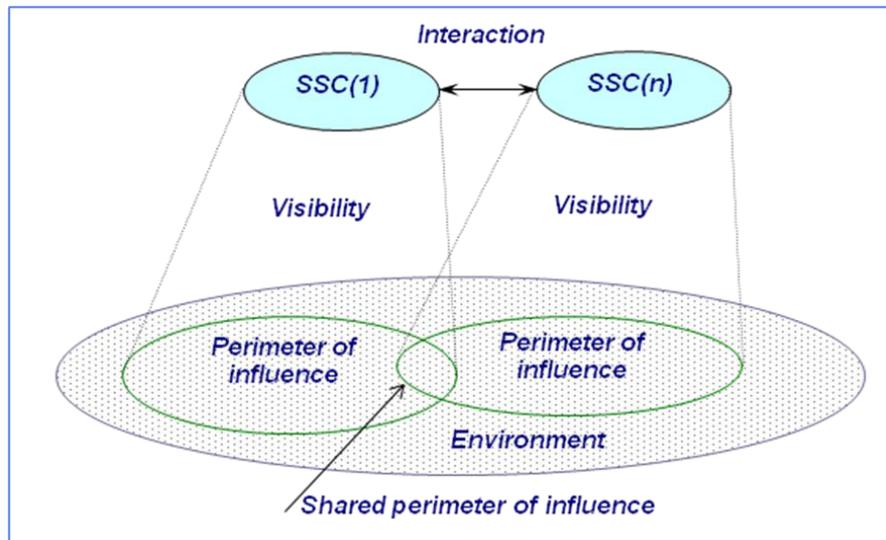


Figure 2. 10 Le modèle abstrait

A la fin de cette première étape, nous avons identifié les concepts définissant le cadre général de la chaîne logistique avec un niveau d'abstraction élevé. Ce modèle abstrait est le premier résultat de l'application de la méthodologie et qui est la base sur laquelle nous appliquerons la deuxième vision.

b. Le métamodèle abstrait du domaine

Le métamodèle abstrait est le formalisme du modèle conceptuel abstrait en utilisant la notation UML. Il fait l'objet d'un diagramme de classe qui définit l'aspect statique de l'organisation de la chaîne globale et de ses entités.

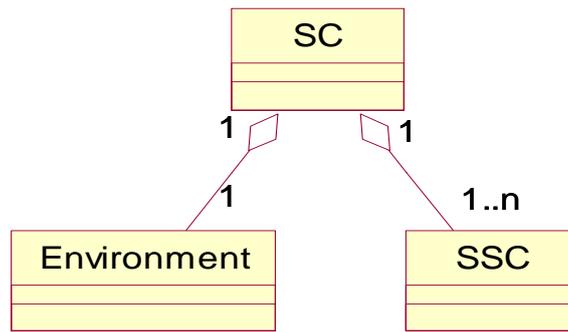


Figure 2. 11 Le métamodèle abstrait du domaine

Ainsi selon le diagramme de classe, la chaîne logistique (SC) est composée d'une ou plusieurs organisations (SSC) et d'un environnement physique. La SSC modélise à ce niveau les groupements de PME. A cette étape de la modélisation, nous n'avons pas représenté le périmètre d'influence et la zone partagée parce qu'ils nécessitent une abstraction moins élevée et donc nous aurons une confusion avec les résultats fournis par l'étape suivante. Le raffinement du modèle conceptuel se traduit par l'enrichissement du métamodèle du domaine.

2.4.2.2 Application de la « Vision Structure »

Cette deuxième étape consiste à raffiner le modèle conceptuel abstrait fourni par l'étape précédente. En appliquant la vision Structure, le détail de la structure interne de la SSC est généré ainsi que son périmètre d'influence (partie visible de l'environnement à la SSC).

a. Le modèle conceptuel intermédiaire

La définition de l'architecture verticale et horizontale de la SSC se fait par l'identification du type des entités impliquées dans le groupement et leurs relations. D'un autre côté, la définition de l'architecture interne du périmètre d'influence repose sur l'identification des éléments nécessaires à la SSC pour réaliser ses activités. Ainsi, nous modélisons la SSC comme étant une composition de 3 couches représentant les différents niveaux décisionnels : le système de pilotage (*Monitoring System*), le système d'exécution (*Execution System*) et le système physique (*Physical System*).

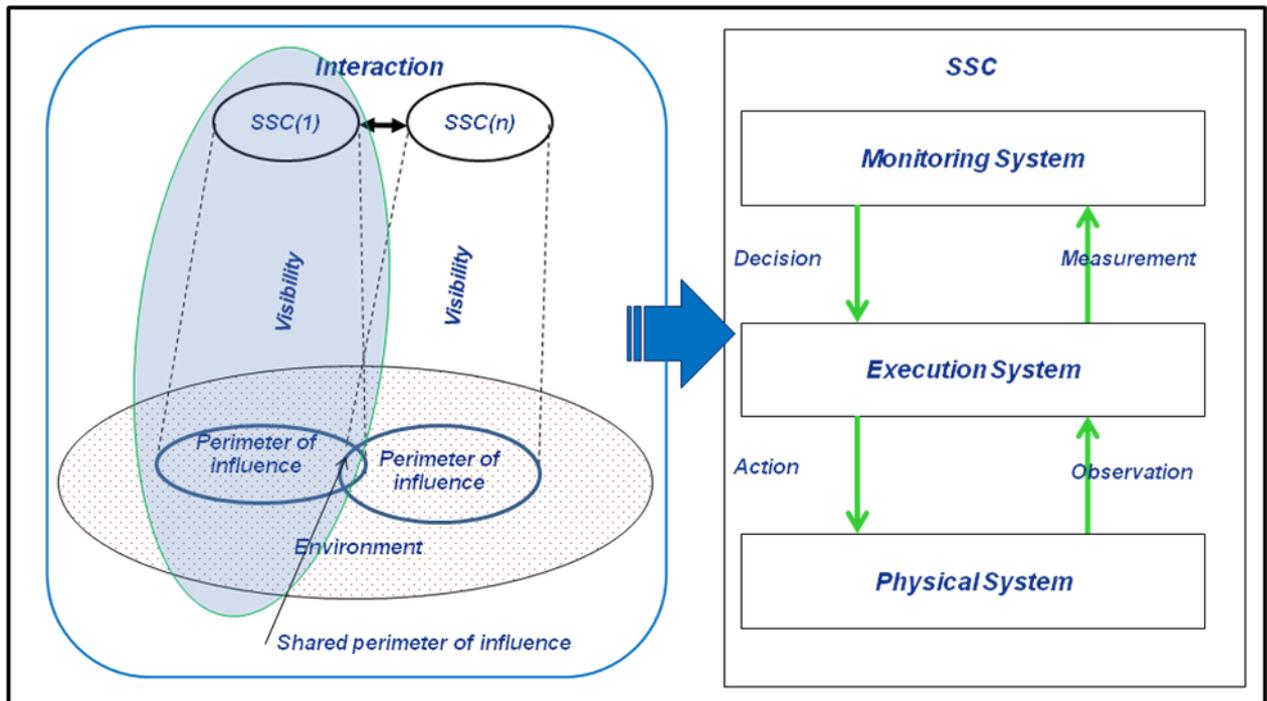


Figure 2. 12 Les couches de la SSC

Les deux premières couches (*Monitoring System* et *Execution System*) modélisent les couches de management et de pilotage de la SSC. La couche *Physical System* modélise le périmètre d'influence de la SSC. Chaque couche de la SSC est composée de plusieurs concepts et joue un rôle spécifique dans la SSC :

✎ *Le système de pilotage (Monitoring System)* : c'est la couche intelligente de notre groupement (SSC) qui assure le pilotage et le contrôle des deux autres couches de la SSC ainsi que la coordination de ses activités avec les autres SSC de la chaîne globale. En effet, le *système de pilotage* analyse les informations remontant de la couche d'exécution (*Execution System*) et établit des métriques pour évaluer la performance en interne du groupement et mettre en place les actions nécessaires afin de piloter et contrôler au mieux le fonctionnement de la SSC. De plus, la couche de pilotage (*Monitoring System*) est responsable de la coordination des activités de la SSC et de son implication dans la prise de décision au niveau de la chaîne globale. Cette coordination permet d'optimiser la circulation du flux physique et de satisfaire l'objectif global de la chaîne. La couche de pilotage est composée de plusieurs acteurs

qui prennent part à la prise de décision au niveau du groupement et qui ont un rôle de pilotage et de contrôle. Un acteur de cette couche va être modélisé au niveau de la SSC par le concept *Monitoring Actor* (MA). Un MA représente un acteur primaire (cf. section 2.5.1.2) modélisant, dans notre cas, une PME mécatronique qui prend part au pilotage et au contrôle de la SSC en interne et dans la chaîne globale.

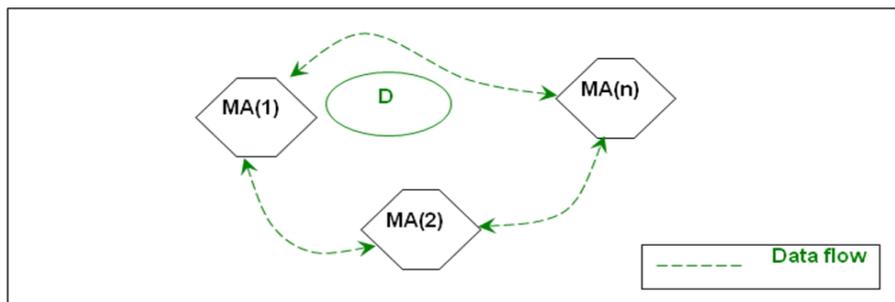


Figure 2. 13 La couche Monitoring System

✂ *Le système d'exécution (Execution System)*: c'est la couche réactive du groupement qui synchronise et contrôle le flux physique. Ainsi d'une part, *le système d'exécution* synchronise la circulation du flux physique selon un plan de production préétabli par la couche de pilotage (*Monitoring System*). D'autre part, il se base sur les informations qu'il récolte du système physique (*Physical System*) pour détecter les dérives et les rectifier. En cas d'évènement exceptionnel, *le système d'exécution* se réfère au *système de pilotage* pour trouver une solution et corriger le dysfonctionnement. La couche réactive est composée essentiellement de deux types d'acteurs :

- *Execution Actor* (EA): ce concept modélise les acteurs secondaires dans le groupement qui ne font qu'exécuter les décisions de la couche intelligente. Le « EA » représente un acteur ayant un comportement réactif pour contrôler et synchroniser la couche physique. De ce fait, il observe le périmètre d'action de la SSC et agit en conséquence pour gérer le flux et corriger les déviations.

- *Monitoring Actor* (MA) : le « MA » n'a pas la même granularité décisionnelle que les EA. Cependant, il assure les mêmes fonctionnalités que ce dernier en faisant abstraction de sa faculté intelligente. Dans certains groupements de PME, nous trouvons des acteurs qui interviennent dans la mise en place et l'exécution des décisions. C'est en réponse à cette spécificité que nous avons fait le choix de faire apparaître le MA au niveau de la couche d'exécution même si ce dernier a ici un rôle similaire au EA.

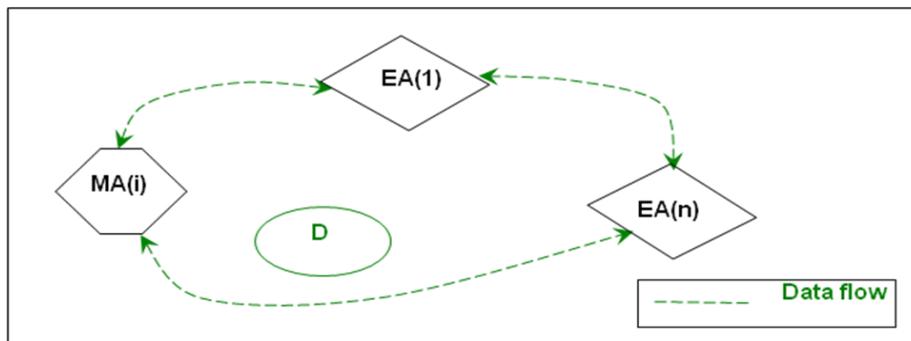


Figure 2. 14 La couche Execution System

☞ *Physical System* : est la partie visible de l'environnement à la SSC correspondant ainsi à son périmètre d'influence. Cette couche représente le champ d'observation et d'action de la SSC afin d'atteindre son objectif local ou global et de réaliser la tâche qui lui est attribuée au niveau de la chaîne globale. De ce fait, le *Physical System* regroupe tous les éléments qui sont passifs envers eux-mêmes et qui sont contrôlés par les autres couches de la SSC et / ou qui activent le comportement des acteurs exécutifs (EA). Au niveau de cette couche physique, nous identifions deux concepts :

- *Moving Entity* (ME) : qui modélise le produit en circulation au niveau de la chaîne logistique. La transformation du ME est pilotée par les EA. Sa circulation qui induit son changement d'état, active le comportement des EA.

- *Resource (R)*: ce concept modélise les ressources nécessaires à l'*Execution System* pour effectuer des transformations sur le ME.

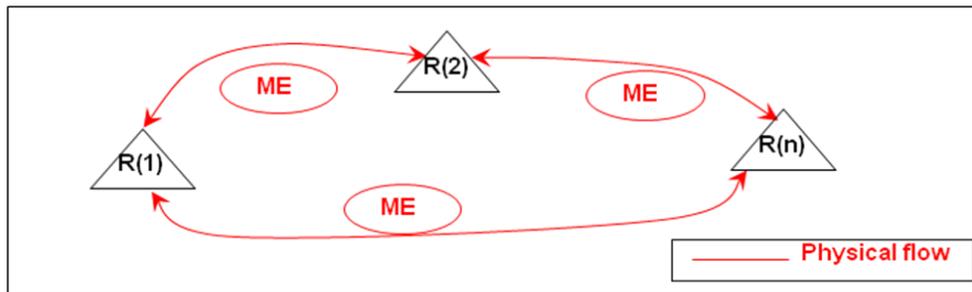


Figure 2. 15 La couche Physical System

Ainsi en regroupant les concepts des trois couches définis précédemment, nous obtenons le modèle conceptuel intermédiaire de la SSC et de son périmètre d'influence (voir Figure 2.16).

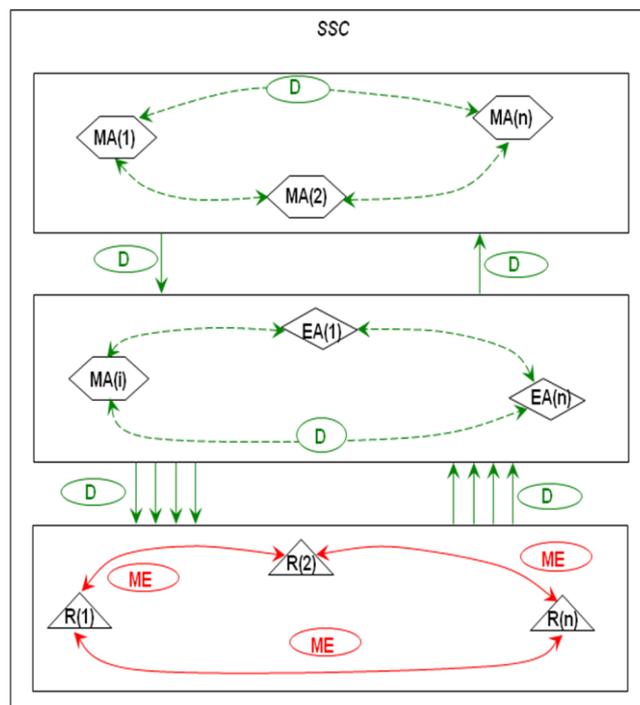


Figure 2. 16 Le modèle conceptuel intermédiaire de la SSC

b. Le métamodèle intermédiaire

Après avoir défini le modèle conceptuel intermédiaire, nous raffinons le métamodèle abstrait du domaine en intégrant les nouveaux concepts. Pour une meilleure visibilité des résultats obtenus en appliquant la « Vision Structure », les concepts associés apparaissent avec une couleur de fond différente.

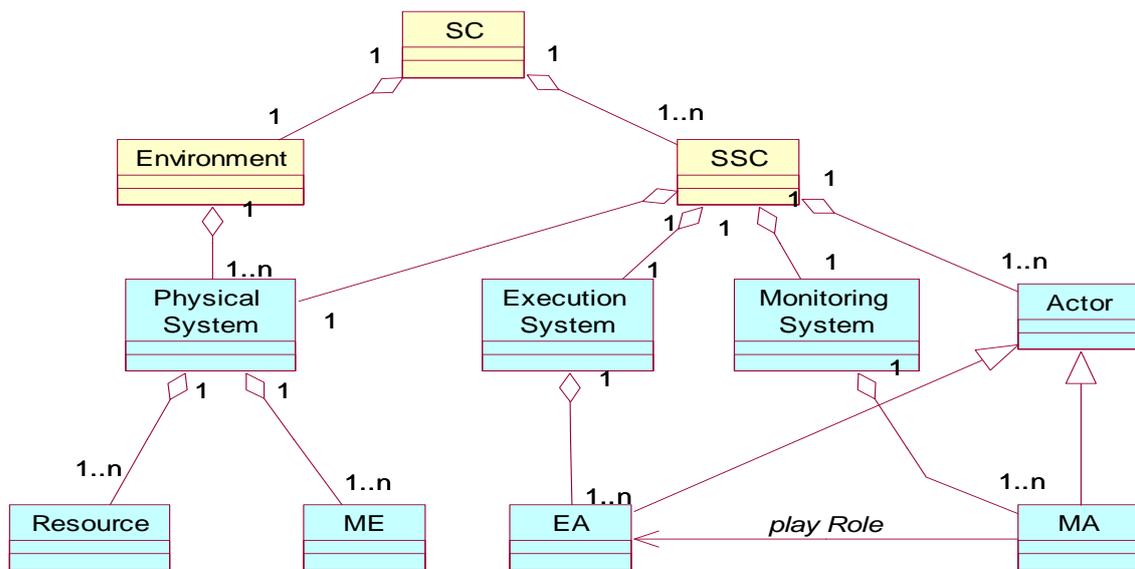


Figure 2. 17 Le métamodèle intermédiaire du domaine

Ainsi, dans le digramme de classe raffiné, nous constatons que la SSC est composée des trois couches : d’un système de pilotage (*Monitoring System*), d’un système d’exécution (*Execution System*) et d’un système physique (*Physical System*) qui est une partie intégrante également de l’environnement. Le système physique représente le périmètre d’influence de la SSC. Nous avons omis d’intégrer le périmètre d’influence comme une composante dans le diagramme de classe vu qu’il a des caractéristiques identiques au système physique. Une double composition n’engendre qu’une redondance dans le métamodèle. Ainsi, conformément au modèle intermédiaire, nous avons intégré les concepts composant chaque couche. Le système physique (*Physical System*) d’une SSC est formé d’une ou de plusieurs ressources et d’un ou de plusieurs lots de produits en circulation. Le système d’exécution (*Execution System*) est quant à lui composé essentiellement de EA mais avec des MA qui jouent le rôle des EA. Le système de pilotage (*Monitoring System*) se compose uniquement de MA.

D'autre part, les deux types d'acteurs *MA* et *EA* héritent tous les deux de la classe *Actor* qui représente les caractéristiques structurelles et comportementales d'un acteur de la chaîne sans considérer sa granularité décisionnelle. Cependant les caractéristiques individuelles de chacun seront considérées dans la classe *MA* et *EA*.

2.4.2.3 Application de la Vision Processus

Lors de l'étape précédente, nous avons obtenu un modèle intermédiaire de la chaîne logistique en identifiant la structure des différentes organisations impliquées et celle de l'environnement de production dans lequel elles interviennent. L'application de la « Vision Processus » nous permet d'identifier et d'intégrer les processus qui définissent le comportement dynamique des concepts définis précédemment en tenant compte du cadre de concertation qui régule l'interaction.

a. Le modèle Conceptuel du domaine

L'analyse faite sur le cadre de travail au sein des groupements de PME et au sein de la chaîne logistique globale, a révélé la présence de deux mécanismes de concertation définissant les types de contrat entre les acteurs et le niveau de visibilité et de partage des ressources entre elles. Ainsi, en accord avec les critères d'identification de ces mécanismes (cf. section 1.4), nous avons identifié que les différentes entités interagissant dans la SSC, utilisent un mécanisme de collaboration pour atteindre l'objectif interne du groupement. Cependant, les différentes SSCs s'échangent les flux de données dans un cadre de coordination vu que chaque SSC possède son propre objectif mais qui est complémentaire avec les objectifs des autres SSCs de la chaîne logistique globale.

En effet, à travers la couche de pilotage (*Monitoring System*) et plus précisément à travers les MA, la SSC coordonne son fonctionnement avec les autres nœuds de la chaîne logistique globale. Cependant, les MA appartenant à la même SSC travaillent dans un cadre collaboratif pour piloter et contrôler le fonctionnement des autres couches du groupement. Le système d'exécution (*Execution System*), composé des EA qui collaborent, assure la synchronisation et le contrôle du système physique (*Physical System*).

En accord avec les mécanismes de concertation existant dans la SSC et la SC globale et avec la description de la Vision Processus (cf. section 2.5.1), nous enrichissons le modèle en identifiant et en intégrant les différents types de processus au niveau des couches et ceci selon leur rôle et leur degré décisionnel. Dans le tableau suivant, nous proposons une classification de ces processus.

Tableau 2 Classification des processus

<i>Couches SSC</i>	<i>Classe Processus</i>	<i>Rôle</i>
Monitoring System	Processus stratégique (SP)	- Coordonne les décisions à long terme
	Processus de contrôle et de pilotage (MCP)	- Pilote et contrôle des activités de la SSC - Evalue la performance de la SSC dans la chaîne logistique globale
Execution System	Processus de contrôle opérationnel (OCP)	- Synchronise et contrôle le <i>Physical System</i>
Physical System	Processus physique (PhP)	- Définit les étapes de transformation du produit

Sur la base de cette classification, ces processus sont représentés sur le modèle conceptuel final (voir Figure 2.18 et Figure 2.19). Pour plus de clarté, nous avons choisi de diviser le modèle conceptuel en deux modèles. Le premier représente les concepts et les processus supportés à l'intérieur d'un groupement :

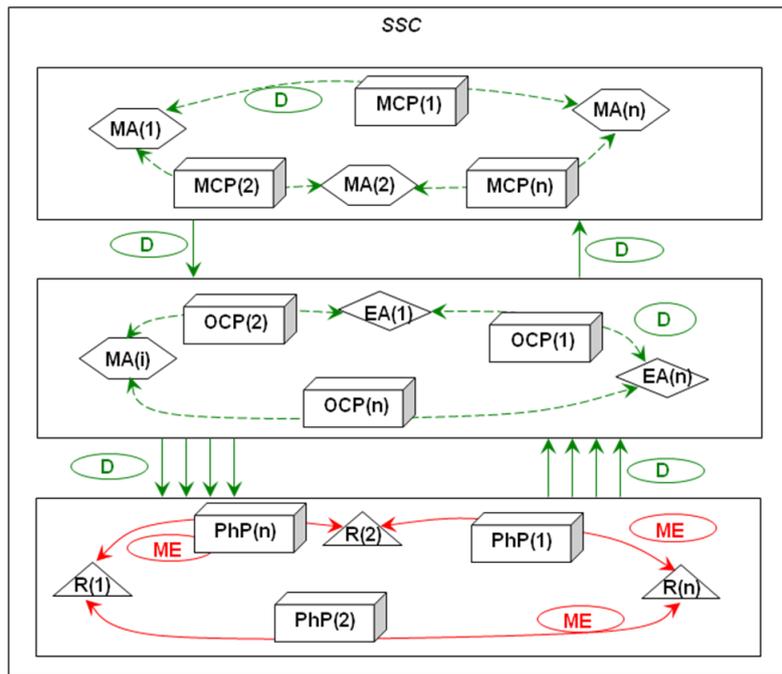


Figure 2. 18 Le modèle conceptuel de la SSC

Le second modèle conceptuel représente la chaîne logistique globale avec tous les flux circulant entre les différents nœuds (Figure 2.19) :

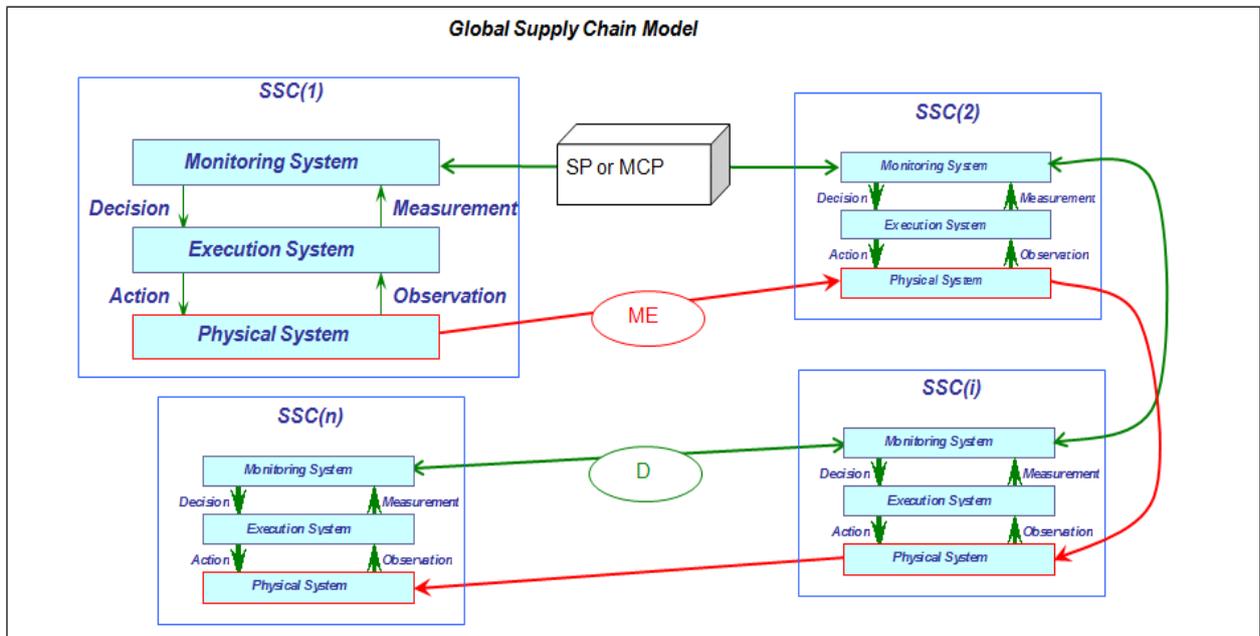


Figure 2. 19 Modèle de la chaîne logistique globale

b. Le métamodèle du domaine

Le métamodèle du domaine traduit selon le formalisme UML les différents processus identifiés dans la section précédente. Ainsi, au niveau de la couche physique (*Physical System*), nous identifions les processus physiques (PhP) qui définissent les étapes de transformation du produit. Cette famille de processus sera intégrée en tant que classe dans notre métamodèle du domaine afin de permettre au système d'exécution la synchronisation des flux.

Au niveau du système de pilotage et du système d'exécution, les familles de processus identifiées correspondent à des processus de management. Ils décrivent le comportement dynamique de la SSC en interne mais aussi au niveau de la chaîne logistique globale. Cette dynamique basée sur l'échange de données et sur le contrôle et le pilotage décisionnel, prend forme en utilisant des mécanismes de communication. Dans l'optique de modéliser ces mécanismes de communication, les concepts EA et MA auront besoin de plus d'éléments informationnels afin de pouvoir supporter cette dynamique. De ce fait, les acteurs de la SSC (EA et MA) auront besoin de trois concepts pour consolider leur architecture interne :

☞ **Indicator** : c'est un concept sur lequel les acteurs se basent pour évaluer le fonctionnement de la couche physique et leur propre performance au niveau de la SSC. Les EA détectent la déviation du système physique en comparant les observations relatives à un indicateur donné aux objectifs fixés. Quant aux MA, ils auront accès à des indicateurs évaluant la performance du fonctionnement global de la SSC et de chaque acteur de la chaîne.

☞ **Action** : pour chaque déviation d'un indicateur nous avons des actions qui sont mises en place afin de rectifier la situation de dérive.

☞ **Organizational Knowledge** : c'est une base regroupant les informations pertinentes que détient un acteur sur les autres maillons (ses accointances). Comme il a été spécifié précédemment, le cadre de travail de collaboration induit à ce que chaque acteur du groupement connaît les ressources de tous les acteurs appartenant à cette SSC. Donc les connaissances organisationnelles d'un EA et d'un MA porteront sur tous les acteurs de la SSC. Néanmoins, les

MA interviennent au niveau de la chaîne globale dans un cadre de travail formalisé selon les critères spécifiques du mécanisme de coordination. Ainsi, outre ces accointances internes, le MA possède des connaissances sur les autres SSC mais limitées qui nécessitent une mise à jour continue. Cette sélection des accointances et leur mise à jour sera abordée en détail dans le chapitre suivant.

D'un autre côté, les acteurs de pilotage MA, en plus des concepts identifiés précédemment, auront besoin des éléments suivants afin de pouvoir assurer leur rôle dans la SSC et dans la chaîne logistique globale :

- ✎ Objective : ce concept modélise l'objectif du groupement lui permettant de coordonner ses activités avec les autres nœuds de la chaîne globale.

- ✎ Constraint : c'est un concept modélisant les contraintes qu'un MA doit prendre en considération dans sa prise de décision et la mise en place de nouvelles actions.

Ainsi, en intégrant ces éléments informationnels nécessaires aux EA et MA afin de réaliser leur tâche interne et globale, nous obtenons le métamodèle du domaine (voir Figure 2.20) :

2.5 Conclusion et Bilan

Dans ce deuxième chapitre, nous avons présenté la génération du premier artefact qui sera par la suite un des éléments essentiels à la construction de la solution finale de modélisation selon l'approche de développement ArchMDE.

Dans cette perspective, nous avons présenté les différentes visions et techniques de modélisation courantes dans la communauté scientifique. Ainsi, nous avons fait un tour d'horizon sur les différentes visions adoptées dans la conceptualisation de la chaîne logistique. Cette analyse nous a permis de mettre en place une méthodologie pour générer les concepts décrivant notre contexte de recherche. De la même façon, nous avons analysé les pratiques de modélisation informatique statique et dynamique afin d'argumenter le choix d'une approche adéquate à la construction de ce premier artefact. Le formalisme des résultats obtenus suite à l'application de la méthodologie avec le langage UML, nous a permis de générer le premier artefact qui est le métamodèle du domaine. Ce métamodèle est une représentation statique des caractéristiques structurelles et comportementales de notre champ d'application. La figure 2.21 résume les résultats de ce chapitre en cernant à chaque étape de la méthodologie, les concepts générés.

Dans le chapitre suivant du manuscrit, nous abordons la deuxième tâche du processus ArchMDE. Elle met l'accent sur la modélisation informatique du métamodèle du domaine en adoptant le paradigme multi-agents.

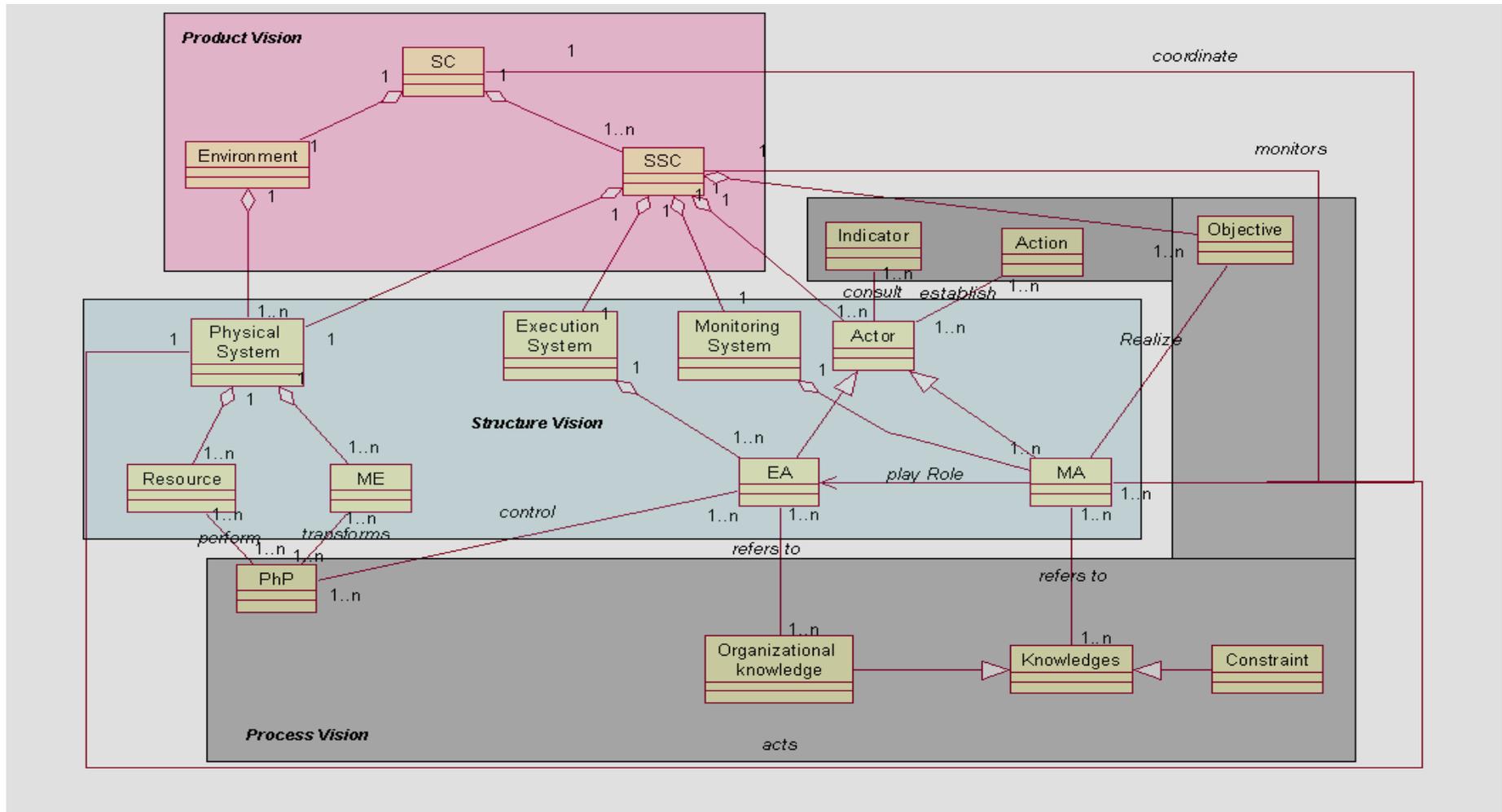


Figure 2. 21 Le métamodèle du domaine (Version détaillée)

Chapitre 3

*Les systèmes multi-agent, une approche
de modélisation pour la simulation de
la chaîne logistique*

Introduction

Ce troisième chapitre se focalise d'une part sur la phase « modélisation » du processus de développement ArchMDE et d'autre part sur la phase « implémentation ». La phase de « modélisation » nous permet d'étudier le comportement du métamodèle du domaine d'application en utilisant une approche de modélisation fondée sur les agents. La phase d'« implémentation » nous permet de mettre en place les fondements nécessaires à la programmation de notre métamodèle finale.

Le système multi-agent est une technologie logicielle très sollicitée pour modéliser et simuler le comportement dynamique des systèmes complexes et décentralisés. Afin de mieux cerner le paradigme multi-agent et son adoption dans l'étude de notre solution de modélisation, nous consacrons les quatre premières sections à la phase de « modélisation ». Ainsi, au niveau de la première section, nous détaillons les définitions et les spécificités de l'approche multi-agent en puisant dans des références bibliographiques de la communauté scientifique et plus spécialement celle orientée agent. La deuxième section est un état de l'art sur l'intérêt porté par la communauté scientifique aux systèmes multi-agents et les apports de ce paradigme dans la modélisation et la simulation de la chaîne logistique. Finalement, les deux dernières sections présentent la suite de la construction de notre solution de modélisation. En effet, d'une part, nous mettons l'accent sur un métamodèle décrivant les caractéristiques architecturales et structurales des systèmes multi-agents ainsi que l'agentification du métamodèle du domaine en adoptant le métamodèle multi-agent. D'autre part, nous identifions les protocoles nécessaires pour la mise en place des processus décrivant le comportement dynamique des concepts du domaine. A la fin de ce chapitre, la cinquième section met l'accent sur le passage de la phase de modélisation à la phase d'implémentation. Cette section traduit d'un côté le raffinement du métamodèle agentifié du domaine d'application en intégrant les données et le comportement des concepts. Cette action permet d'avoir un métamodèle d'implémentation aboutie. D'un autre côté, cette dernière section du chapitre souligne le choix de la plate-forme d'implémentation ainsi que la structuration de la communication entre les agents du métamodèle d'implémentation.

La figure 3.1 met l'accent sur les phases importantes d'ArchMDE qui font l'objet de ce troisième chapitre, à savoir, la description du métamodèle multi-agent et le modèle agentifié

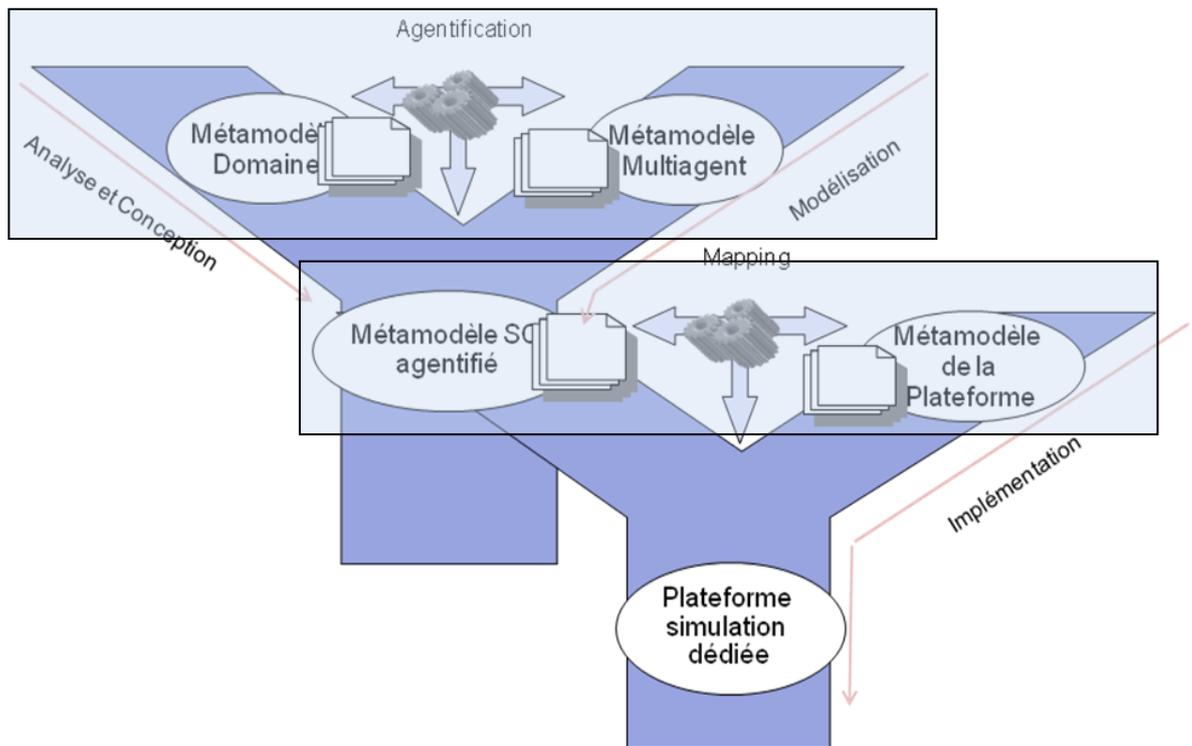


Figure 3. 1 La partie modélisation d'ArchMDE

3.1 Les systèmes multi-agents

Historiquement, les systèmes multi-agents se positionnent au carrefour de la programmation (logiciels), de l'intelligence artificielle (autonomie de décision), et des systèmes répartis (décentralisation). Le domaine des systèmes multi-agents a vu le jour pendant les années 80 sous le nom d'Intelligence Artificielle Distribuée (Huhns, 1987) aux Etats Unis et d'Intelligence Artificielle Décentralisée (Demazeau et Müller, 1990) ou systèmes multi-agents en Europe.

La nécessité de passer du comportement individuel au comportement collectif, a poussé la communauté de l'IA classique à se tourner vers des systèmes plus autonomes et plus coopérants afin de pouvoir résoudre des problèmes complexes. En effet, selon Müller (Müller, 2000), l'IA s'appuie sur la métaphore du penseur isolé alors que les systèmes multi-agents s'appuient sur la métaphore de l'organisation collective. Sur le plan technologique, ce domaine cherche à comprendre comment intégrer des ressources computationnelles, cognitives et même humaines dans un système intégré permettant de résoudre des problèmes complexes pour lesquels il n'existe que des solutions partielles et locales (diagnostic de

pannes dans des réseaux de distribution, logistique, conception concourante, etc.). Sur le plan scientifique, il s'agit d'essayer de comprendre comment un système complexe peut produire des compétences et performances globales qui excèdent les compétences et les performances des entités qui y participent par le jeu des interactions entre ces entités et avec leur environnement.

Dans ce contexte, la communauté agent a proposé plusieurs définitions des systèmes multi-agents. Une des définitions les plus utilisées par la communauté francophone est celle suggérée par (*Ferber, 2005*) qui définit un SMA comme :

- ✎ Un ensemble B d'entités plongées dans un Environnement E (E est caractérisé par l'ensemble des états S de l'environnement).
- ✎ Un ensemble A d'agents avec $A \subseteq B$.
- ✎ Un système d'action (opérations) permettant à des agents d'agir dans E (une opération est une fonction de $S \Rightarrow S$).
- ✎ Un système de communication entre Agents (envoi de messages, diffusion de signaux,...).
- ✎ Une organisation O structurant l'ensemble des agents et définissant les fonctions remplies par les agents (notion de rôle et éventuellement de groupes).
- ✎ Eventuellement, une relation à des utilisateurs U qui agissent dans ce SMA via des agents interfaces $U \subseteq A$.

Dans ce travail de thèse, nous avons adopté l'approche voyelle (AEIO) présentée par (*Demazeau, 1996*). Cette vision reprend les mêmes éléments présentés dans la définition précédente avec un niveau d'abstraction plus élevée. Ainsi, elle décompose le système multi-agents selon 4 vues :

- ✎ La vue Agent (A) : étudie la typologie et la structure interne de l'agent.

- ✎ La vue Environnement (E) : décrit l'environnement dans lequel évolue l'agent et qui définit « ... tous les éléments extérieurs à l'agent » (FIPA¹).
- ✎ La vue Interaction (I) : définit la relation dynamique entre les agents selon des protocoles et des langages d'interaction.
- ✎ La vue Organisation (O) : décrit la structure de tout l'ensemble en termes de groupes d'agents, hiérarchisation, relations et de structures de l'environnement.

Chaque vue a été sujette à plusieurs travaux et théories. Dans ce qui suit, nous développons les différentes pratiques liées à l'élaboration de chacune d'entre elles.

3.1.1 La vue agent

Dans la littérature, une panoplie de définitions existent pour décrire ce qu'est un agent. Cependant, les définitions proposées par Ferber en 1995 et par Jennings et al. en 1998 sont très largement utilisées dans la communauté scientifique et plus spécifiquement la communauté francophone. Ainsi, Ferber, (*Ferber, 1995*), définit un agent comme étant une entité physique ou virtuelle :

- ✎ qui est capable d'agir dans un environnement,
- ✎ qui peut communiquer directement avec d'autres agents,
- ✎ qui est mue par un ensemble de tendance (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser),
- ✎ qui possède des ressources propres,
- ✎ qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement,

¹ Foundations of Intelligent Physical Agents

- ✎ qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune),
- ✎ qui possède des compétences et offre des services,
- ✎ qui peut éventuellement se reproduire,
- ✎ dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit.

De leur côté, Jennings et al. (*Jennings et al., 1998*) offrent une définition plus concise et abstraite qui stipule que : « un agent est un système informatique, situé dans un environnement et qui agit d'une façon autonome et flexible pour atteindre les objectifs pour lesquels il a été conçu ».

Ces deux définitions mettent l'accent sur certaines propriétés qualifiant les agents. Wooldrige et Jennings (*Wooldrige et Jennings, 1995*) énumèrent dans leurs travaux les caractéristiques suivantes :

- ✎ *Autonomie* : un agent opère seul sans l'intervention directe d'un tiers (humaine ou autre), et ne subit aucun contrôle sur les actions qu'il réalise, ni sur son état interne.
- ✎ *Capacité sociale* : les agents sont en interaction entre eux (et probablement avec des humains) grâce à des langages de communication et des règles de sociabilité communes.
- ✎ *Réactivité* : l'agent perçoit son environnement (physique ou modèle) et répond d'une manière opportune aux changements qui se produisent dans celui-ci.
- ✎ *Pro-activité* : les agents ne réagissent pas simplement à des stimuli provenant de leur environnement, ils doivent être capables de montrer des comportements dirigés par des buts internes et ceci en prenant des initiatives.

Ces propriétés ne sont pas systématiquement présentes dans la modélisation d'un agent. Elles apparaissent selon les besoins applicatifs. Dans cette optique, plusieurs modèles d'agents ont vu le jour depuis la naissance du paradigme multi-agent. La taxonomie de ces modèles se fait généralement dans la littérature en adoptant un de ces trois critères :

✎ *La granularité décisionnelle* fait référence au degré d'intelligence de l'agent et distingue ainsi trois types d'agent : l'agent réactif, l'agent cognitif ou délibératif et l'agent hybride.

✎ *La mobilité* se base sur la faculté de l'agent à migrer d'un site à un autre en transportant son état interne et son code. On distingue alors deux grandes familles d'agents : les agents mobiles et les agents stationnaires.

✎ *La fonctionnalité* met l'accent sur la fonction attribuée à l'agent afin d'assister ou de réaliser une tâche pour d'autres logiciels ou mêmes des êtres humains : agent d'assistance (ex : secrétaire virtuelle), agent de commerce, agent logiciel, agent d'information.

Dans nos recherches, nous tenons compte du premier critère pour identifier les familles d'agent qui seront intégrées par la suite dans notre solution de modélisation. En effet, le critère de choix, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, est le degré d'implication des acteurs dans la prise de décision au niveau du groupement de PME. Pour cette raison, l'étude de la granularité décisionnelle de nos agents est le critère principal de classification. Dans ce qui suit, nous décrivons l'architecture interne des trois grandes familles d'agents identifiés (cognitif, réactif et hybride) ainsi que les composantes nécessaires à leur implémentation.

3.1.1.1 L'agent réactif

Les agents réactifs possèdent une architecture décisionnelle simple. Comme leur nom l'indique, ils sont munis d'une intelligence réactive. Ulrich (*Ulrich, 1998*) définit ce type d'intelligence comme une base de connaissances régie par une série de règles ou un arbre de décision sensible aux stimuli de l'environnement. Le processus de recherche de solution apporte une solution adéquate pour la situation actuelle et consiste en une procédure de

recherche dans la base de connaissances individuelle. En d'autres termes, un agent réactif perçoit son environnement et agit en conséquence des stimuli reçus (Figure 3.2).

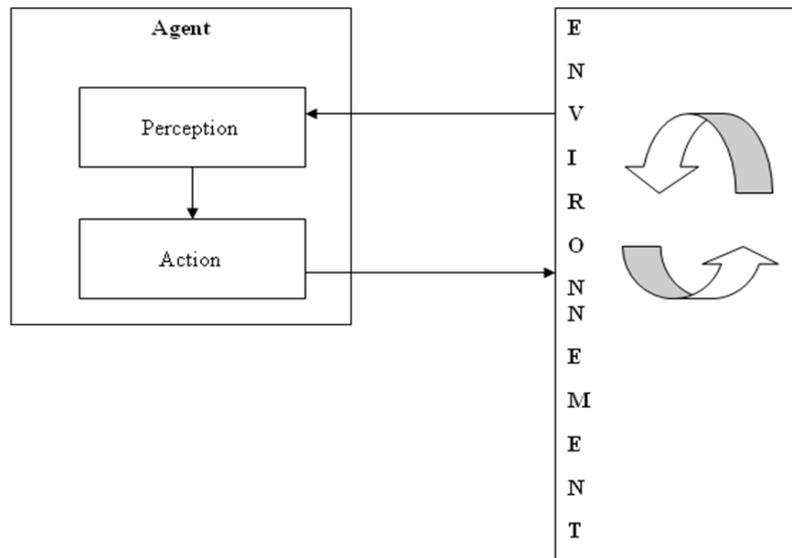


Figure 3. 2 Modèle d'un agent réactif

De plus, un agent réactif ne possède aucune représentation de son environnement et ne tient pas compte des événements passés pour réagir à une situation actuelle. Ils n'ont pas de buts explicites et ils utilisent un langage et des protocoles de communication réduits. Ainsi, le comportement individuel d'un agent réactif est de très faible intelligence que certains chercheurs qualifieront d'inexistante. Cependant, l'interaction existante entre une communauté composée uniquement d'agents réactifs peut faire émerger un type d'intelligence décrit par des actions coordonnées et beaucoup plus évoluées. Cette métaphore est souvent associée à l'étude d'une société de fourmis et qui a été entreprise par Drogoul (*Drogoul, 1993*). Bonabeau et al. présentent plusieurs modèles qui sont inspirés de comportements de groupe issus de sociétés d'insectes (*Bonabeau et al., 1999*).

Les premiers travaux réalisés dans cette première famille d'agent reposent sur l'architecture de Subsumption présentée par Brooks (*Brooks, 1986*). L'architecture de Subsumption est composée de plusieurs modules reliés à des capteurs (Sensors). La sortie de chaque module est un ensemble de contrôles à appliquer par la couche inférieure. Dans ce cas, les actions de la couche la plus supérieure seront prises en compte, bien sûr si celle-ci répond à son tour à la perception, et éliminera toutes les autres actions des modules inférieurs (Figure 3.3).

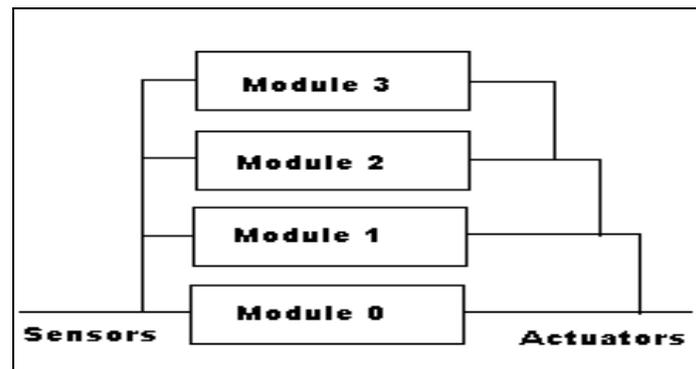


Figure 3. 3 Architecture de Subsumption (Brooks, 1986)

3.1.1.2 L'agent cognitif

Contrairement à l'agent réactif, un agent cognitif (ou délibératif ou encore intentionnel) possède une représentation explicite et symbolique de son environnement (de soi, du groupe, des autres, de la tâche) dans sa base de connaissances. Cette base de connaissances lui sert de support pour raisonner et aussi prédire des événements futurs. Ainsi, un agent cognitif possède une intelligence cognitive qui est dirigée par des buts et qui lui permettent de choisir l'action adéquate afin de faire face à une situation complexe (Figure 3.4). Une intelligence cognitive est décrite par Ulrich (Ulrich, 1998) comme une intelligence plus exigeante dans la résolution des problèmes. Elle se base sur des procédures qui sélectionnent des méthodes prédéfinies et prêtes à l'emploi selon l'objectif à réaliser. Ces méthodes sont mises en place selon des critères pertinents qui tendent à fournir la meilleure solution.

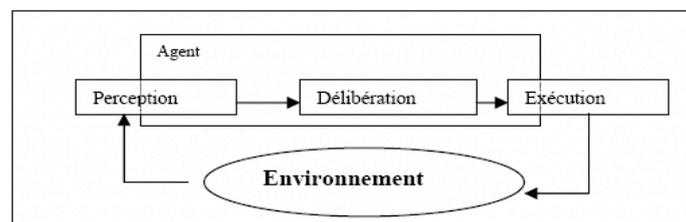


Figure 3. 4 Architecture délibérative (Wooldridge, 1999)

Dans le développement d'un agent cognitif, une des architectures les plus connues et étudiées est l'architecture BDI (Belief-Desire-Intention). Cette architecture est fondée sur la logique

BDI énoncée dans les années 80 par (*Bratman et al., 1988*). Elle est caractérisée par trois éléments clés :

- ✎ Belief (B) : il s'agit des croyances de l'agent sur le monde extérieur, les autres agents et lui-même.
- ✎ Desire (D) : correspondent aux désirs, aux buts et aux préférences de l'agent. Ils font références aux motivations de l'agent.
- ✎ Intention (I) : représentent les intentions, les engagements et les plans de l'agent.

Comme le décrit Jennings (*Jennings, 1993*), l'agent cherche en permanence à évaluer et choisir ses désirs en fonction des croyances associées. Les intentions donnent les plans futurs que l'agent suivra ; toutefois, les intentions ne sont pas irrévocables car le monde dans lequel les agents évoluent peut changer. Selon Jennings, les intentions doivent être cohérentes au sein d'un même agent, ne pas remettre en cause d'autres intentions et doivent aussi être cohérentes avec les intentions des autres agents. De plus, ces différentes composantes sont mises en relation à travers des fonctions qui sont traduites par les règles suivantes (*Le Bars, 2003*) :

- ✎ Revc : $B \times P \rightarrow B$: est la fonction qui permet de mettre à jour les croyances (B) en fonction des nouvelles perceptions (P). Elle est réalisée par le module « Révision des croyances ».
- ✎ Options : $D \times I \rightarrow I$: est la fonction qui représente le processus de décision de l'agent prenant en compte ses désirs (D) et ses intentions (I) courantes. Elle est réalisée par le module « Processus de décision ».
- ✎ Des : $B \times D \times I \rightarrow D$: est la fonction qui met à jour les désirs de l'agent (D) si ses croyances (B) ou intentions (I) changent et ceci pour maintenir la consistance de ses désirs. Elle est aussi réalisée par le module « Processus de décision ».

☞ Filtre : $B \times D \times I \rightarrow I$: est la fonction la plus importante car elle décide des intentions à poursuivre ; elle est réalisée par la composante « Filtre ». La composante « Filtre » est la partie de l'architecture qui a la responsabilité de bâtir des plans partiels pour réaliser les intentions de l'agent, tout en tenant compte des nouvelles opportunités. En conséquence de ce qu'il perçoit de son environnement et de sa révision des croyances, l'agent peut détecter des nouvelles opportunités qui favorisent la réalisation de ses intentions ou qui peuvent même empêcher cette réalisation. Cette analyse est effectuée par la composante « Analyseur opportunités ». Ces nouvelles opportunités sont communiquées au « Filtre ». Le « Filtre » construit des plans partiels pour aboutir aux intentions de l'agent avec l'aide de la composante « Raisonnement modalités »; cette dernière a la responsabilité d'effectuer le raisonnement orienté action et la modalité de réalisation des plans.

☞ Plan : $B \times I \rightarrow PE$: est la fonction qui transforme les plans partiels en plans exécutables, «PE étant l'ensemble de ces plans ; elle peut utiliser, par exemple, une bibliothèque de plans, représentée par le module « LibP ».

Le modèle BDI a inspiré beaucoup de travaux et de projets d'agent cognitif dont : PRS (Procedural Reasoning System) développé par Georgeff et Lansky en 1987 (*Georgeff et Lansky, 1987*), dMARS (the distributed Multi-Agent Reasoning System) est une implémentation plus récente de l'architecture PRS réalisée par Wooldridge et al. en 1997 (*d'Inverno et al., 1997*), IRMA (Intelligent Resource-bounded Machine Architecture) développée par Bratman et al. en 1988, etc.

3.1.1.3 L'agent hybride

Un agent hybride possède un croisement entre le comportement réactif et le comportement cognitif. Il a été proposé par plusieurs auteurs afin de palier aux problèmes liés au temps de décision et au temps d'action. Dans ce type d'architecture, les agents sont conçus de niveaux hiérarchiques qui interagissent entre eux. Chaque niveau gère un aspect du comportement de l'agent (*O'Hare et Jennings, 1994*) :

- ☞ Bas niveau : couche réactive qui est en relation directe avec l'environnement et qui raisonne suivant les informations brutes de ce dernier.
- ☞ Niveau intermédiaire : couche mentale qui fait abstraction des données brutes et qui se préoccupe d'un aspect de l'environnement plus évolué. Elle se tourne vers les connaissances extraites de l'environnement.
- ☞ Niveau supérieur : couche sociale qui tient compte de l'interaction avec les autres agents.

L'architecture InteRRaP (Integration of Reactive Behavior And Rational Planning) (Fischer et al., 1995a) qui s'inspire des concepts BDI est un exemple de ce type d'agent (Figure 3.5). Elle a été utilisée dans des applications telles que le transport routier (Fischer et al., 1995a, b) et la robotique (d'Inverno et al., 1997).

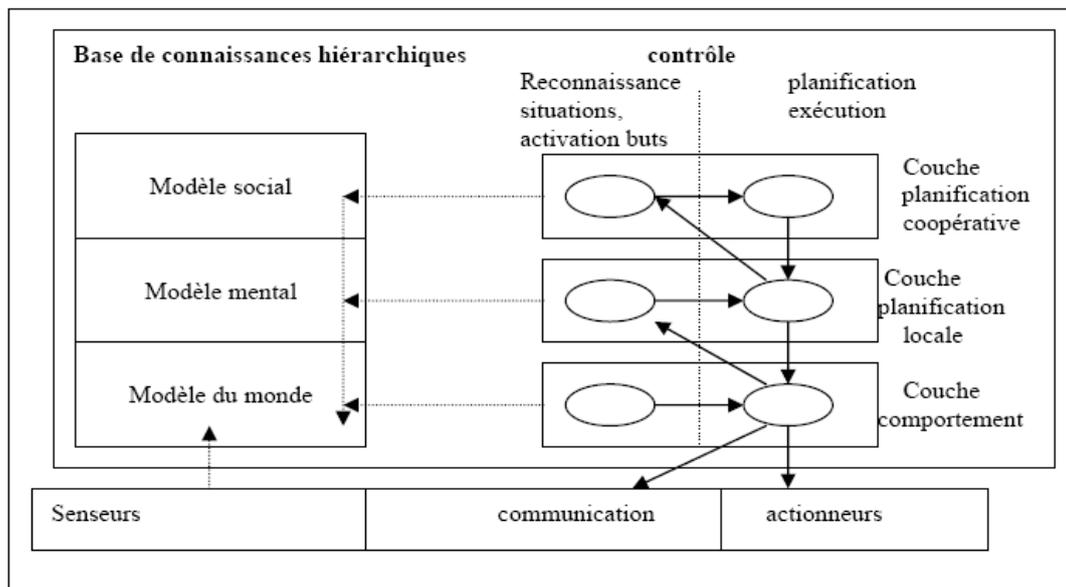


Figure 3. 5 l'architecture InteRRaP (Fischer et al., 1995a)

3.1.2 La vue environnement

Conformément à la norme FIPA 2000, l'environnement est défini comme l'ensemble de tous les éléments ou objets extérieurs à l'agent, y compris les évènements faisant intervenir

un agent ou un groupe d'agents. Ces éléments définissent un espace commun d'action aux agents. Dans la littérature, plusieurs taxonomies de l'environnement diffèrent selon l'angle de vue adopté (Azaiez, 2007). Dans le cadre de nos travaux, nous distinguons deux types d'environnement :

✂ L'environnement social : correspond aux autres agents avec lesquels un agent est en interaction par envoi de messages.

✂ L'environnement physique : correspond aux ressources matérielles que l'agent peut percevoir et sur lesquels il peut agir. Par exemple dans une société de fourmis, l'environnement est composé d'obstacles et de nourritures (Drogoul, 1993).

Dans le domaine des systèmes multi-agents, l'environnement est un domaine très peu étudié. Dans la plupart des cas, il est partie intégrante des connaissances de l'agent.

3.1.3 La vue interaction

Dans un système multi-agent, un agent est en interaction mutuelle avec les autres agents. Ferber (Ferber, 1995) affirme que : « *un agent sans interaction avec d'autres agents n'est plus qu'un corps isolé, qu'un système de traitement d'information, dépourvu de caractéristiques adaptatives* ». En effet, l'interaction se fait par le biais d'une communication structurée ou d'échanges d'information selon différentes manières. Dans la communauté agent, l'intention de communiquer est de produire un effet sur les destinataires : ils exécuteront probablement une action demandée par l'émetteur ou répondront à une question (Huget, 2005). Dans la littérature la communication peut être catégorisée dans deux grandes classes :

✂ La communication indirecte : se fait par le biais de l'environnement (action non intentionnelle) en laissant des traces ou des signaux ; ou par le biais d'un tableau noir (action intentionnelle) en déposant et en lisant des informations déposées dans une zone de données partagée. Dans ce genre de communication, les destinataires ne sont pas définis.

☞ La communication directe : se fait d'une manière intentionnelle par envoi de messages à un ou plusieurs destinataires bien définis. Ce type de communication se base sur les trois éléments suivants :

- Le langage de communication permettant de structurer les messages échangés entre les agents. Jusqu'à maintenant, les protocoles de communication les plus utilisés et les plus connus sont KQML (Knowledge Query and Manipulation Language) et FIPA-ACL qui s'est inspiré de KQML. Ils sont basés sur la théorie des actes de langages (*Austin, 1962 et Searle, 1969*) : les messages sont des actions ou des actes communicatifs.
- L'ontologie : définit les termes de base et les relations comprenant aussi bien le vocabulaire du domaine concerné que les règles pour combiner les termes et les relations afin de définir des extensions au vocabulaire (*Gomez-Perez et al., 2003*).
- Les supports de communication : sont des mécanismes permettant de stocker, de rechercher et d'adresser des messages. Ces mécanismes sont programmés dans les plateformes multi-agents (Jade, Jack, Madkit, etc.).

Dans la plupart des cas, l'interaction se base sur des protocoles d'interaction pour structurer la communication entre les agents. La structure de ces protocoles diffère selon le cadre dans lequel s'inscrit l'échange. Dans la littérature, nous identifions principalement deux grandes classes dans le mode d'échange : le cadre collectif et le cadre conflictuel. Dans ce qui suit, nous détaillons le cadre de travail des agents en mettant l'accent sur la structuration des protocoles d'interaction dans chaque cas.

3.1.3.1 Le cadre collectif

Le cadre collectif se traduit par le fait qu'un groupe d'agents travaillent ensemble pour satisfaire un but commun ou individuel. L'ajout ou la suppression d'un agent influe considérablement sur la performance du groupe. Le besoin de travailler ensemble, vient essentiellement du fait qu'un agent ne peut atteindre son objectif individuellement et a, par conséquence besoin de l'aide des autres agents du système. Ainsi, le travail collectif a comme devise « *l'union fait la force* ».

Cependant, le cadre collectif peut être qualifié d'un cadre de coopération, de coordination ou encore de collaboration. Bien que, ces trois modes sont évoquées dans la littérature sans discernement, ils se différencient par le degré de partage des buts et des tâches (*Tounsi, 2006*).

Dans un cadre collectif, la plupart des protocoles mis en place sont des extensions du modèle CPS (Cooperative Problem Solving) proposé par Wooldridge et Jennings (*Wooldridge et Jennings, 1999*). Le modèle CPS est un pattern abstrait pour structurer un protocole de prise de décision collective. Ce modèle se décline en quatre phases essentielles :

- ✎ Recognition : est le moment pendant lequel un agent identifie un besoin de coopérer.
- ✎ Formation du groupe : est l'étape au niveau de laquelle un agent sollicite l'aide des autres agents.
- ✎ Formation du plan d'action : est la phase pendant laquelle le nouveau groupe formé essaye de mettre en place un plan d'action collectif.
- ✎ Exécution : est la phase finale durant laquelle le groupe d'agents exécute le plan mis en place.

Un des protocoles les plus connus et qui a inspiré ce pattern est le « Contract Net Protocol » (*Smith, 1988*) qui se base sur deux types d'agents : un gestionnaire qui a le but d'accomplir une tâche sans avoir les qualifications requises, et les contractants qui vont réaliser la tâche qui leur est assignée (Figure 3.6).

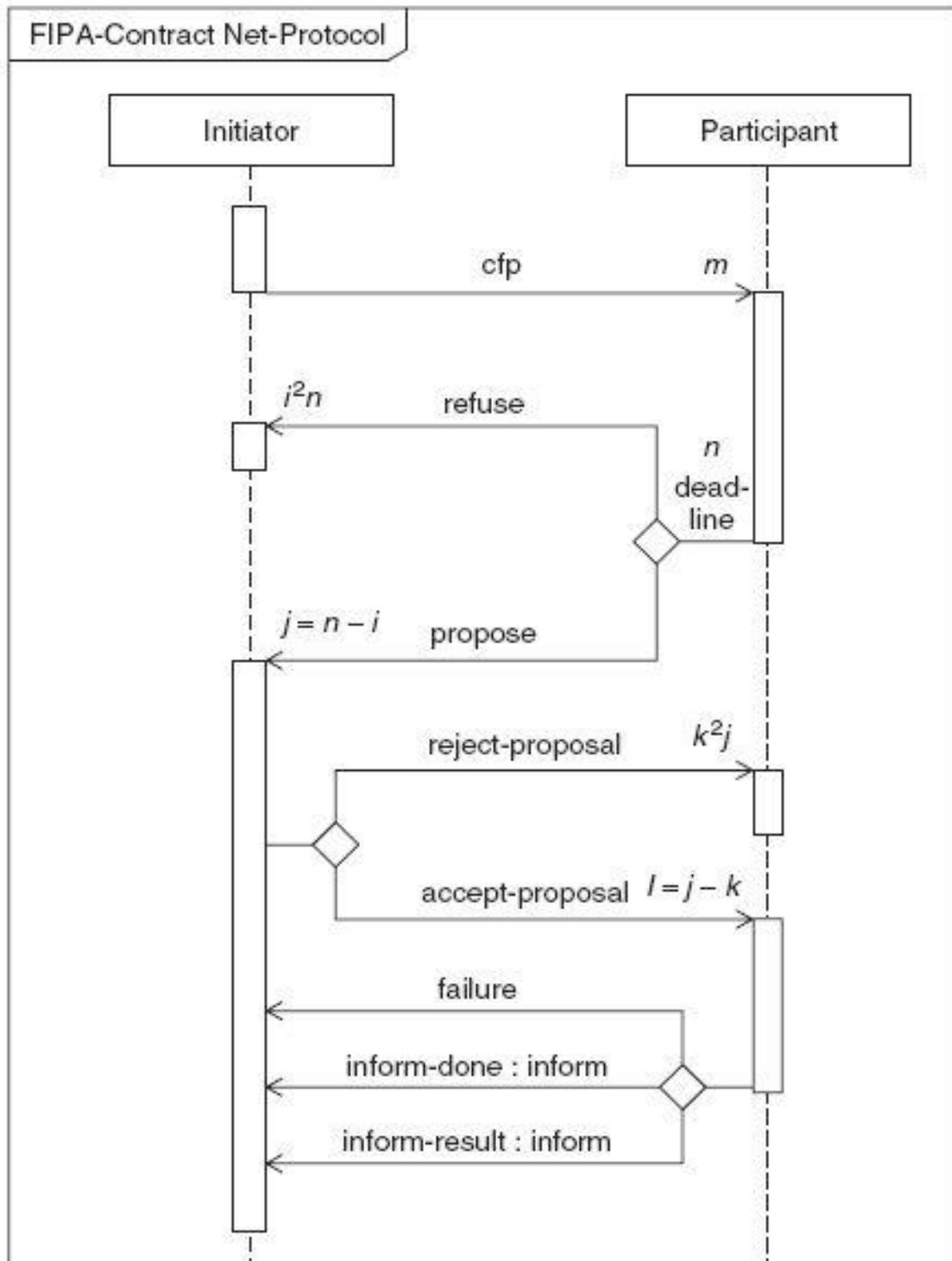


Figure 3. 6 Le Contract Net Protocol²

² <http://www.fipa.org/specs/fipa00029/SC00029H.pdf>

3.1.3.2 Le cadre conflictuel

Le cadre conflictuel représente une situation de conflit entre les objectifs des agents. En effet, un système multi-agents est composé de plusieurs agents. Ces derniers peuvent entrer en conflits pour plusieurs raisons : conflits d'intérêts ou de buts, accès à des ressources ou proposition de plusieurs solutions différentes à un seul problème.

Afin de résoudre ces conflits et de trouver une situation qui satisfasse tout le monde, les agents négocient entre eux en faisant des concessions ou en cherchant des alternatives.

Dans la littérature, Smith (*Smith, 1988*) définit la négociation par : *“By negotiation, we mean a discussion in which the interested parties exchange information and come to an agreement. For our purposes negotiation has three important components (a) there is a two-way exchange of information, (b) each party to the negotiation evaluates the information from its own perspective, (c) final agreement is achieved by mutual selection”*.

A travers cette définition, nous remarquons que les deux grands piliers de la négociation sont la communication (a) et la prise de décision qui se fait à travers l'évaluation de l'information par chaque acteur (b) et la sélection mutuelle d'un plan(c).

Dans la littérature, nous distinguons deux types de négociation :

✂ L'affrontement : il y a soumission totale de l'adversaire.

✂ L'entente : les interlocuteurs oublient leurs intérêts et se retrouvent en situation de résolution de problème.

Afin de résoudre les conflits, les systèmes multi-agents peuvent adopter plusieurs méthodes mais que nous pouvons catégoriser en deux grandes familles :

✂ Les méthodes centralisées : elles reposent sur la négociation via un médiateur ou sur les méthodes hiérarchiques telle que le Contract Net Protocol.

- ✎ Les méthodes décentralisées : elles sont plus utilisées par les agents BDI telles que la recherche négociée (TEAM), la méthode heuristique ou encore la négociation basée sur l'argumentation (ANA).

La négociation peut être ainsi résumée en un processus d'échange entre agents qui résulte de la planification et du raisonnement. Chaque agent a une meilleure connaissance sur ce que veulent faire les autres agents et à partir de ceci peut réajuster ses propres plans ou voir même influencer le comportement des autres agents.

3.1.4 La vue organisation

La vue organisation décrit le système en termes de structure de coordination et de communication (*Malone, 1987*). Chaque structure met l'accent sur les fonctionnalités des composantes ainsi que les interactions et les relations entre elles en imposant certaines contraintes. Dans ses travaux de thèse, Le Strugeon (*Le Strugeon, 1995*) a proposé une taxonomie des différentes topologies existantes dans les organisations des systèmes multi-agents :

- ✎ Structure hiérarchique : ces organisations sont souvent rigides. Le contrôle est centralisé sur un agent qui communique les ordres aux autres agents qui se contentent de les exécuter (Figure 3.7).

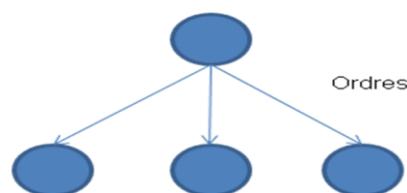


Figure 3. 7 Topologie à structure hiérarchique

- ✎ Structure de type marché : les organisations respectant ce type de topologie sont composées d'agents coordinateurs et d'agents exécutants. Cette structure est un peu plus décentralisée autour de plusieurs objectifs opérationnels (Figure 3.8).



Figure 3. 8 Topologie à structure de marché

☞ Structure de type communauté : le contrôle est fortement distribué et les membres possèdent les mêmes capacités (Figure 3.9).

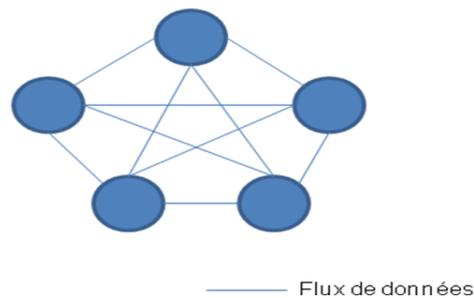


Figure 3. 9 Topologie à structure de communauté

☞ Structure de type société : dans ces organisations, le contrôle est décentralisé. Les agents poursuivent chacun un objectif opérationnel et le comportement global est ajusté par des principes de négociation (Figure 3.10).

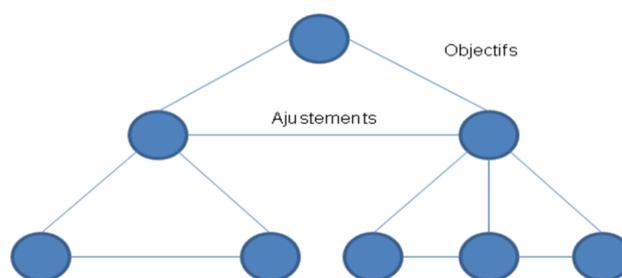


Figure 3. 10 Topologie à structure de société

Cependant, dans la littérature, une deuxième vision de l'organisation existe. L'organisation n'est plus une structure préétablie selon une topologie mais une organisation qui émerge du comportement global des différentes composantes (Drogoul, 1993 ; Rouchier et Bousquet, 1998). En effet, dans l'organisation, le comportement individuel des entités est prédéfini ainsi

que les règles de gestion de conflits ou d'interférences générés suite aux activités de chacun des agents. L'interaction et les décisions des différentes entités donnent lieu à la mise en place d'un modèle organisationnel. Ces cas sont surtout rencontrés dans les applications d'ingénierie sociale qui consistent à étudier la dynamique des structures sociales.

3.2 Intérêt des agents pour la modélisation et la simulation de la chaîne logistique

L'importance grandissante des systèmes multi-agents (SMA) dans le paysage scientifique et technologique a attiré de plus en plus d'adeptes de la communauté travaillant sur la modélisation et la simulation de la chaîne logistique. Selon Monteiro et al. (*Monteiro et al., 2008*), les entreprises doivent faire face à de nombreux problèmes décisionnels liés à l'intégration et à la gestion de leurs organisations dans un environnement fortement stochastique. Dans cette optique, les caractéristiques des SMA semblent être particulièrement adaptées pour la représentation et la simulation des systèmes industriels dynamiques. En effet, il existe une forte analogie entre les caractéristiques architecturales et les pratiques organisationnelles des SMA et de la chaîne logistique. Les deux systèmes sont considérés comme un réseau d'entités et d'acteurs qui interagissent au sein d'une organisation afin d'atteindre un objectif en commun. Yuan et al., (*Yuan et al., 2002*) constatent un ensemble d'analogies entre les systèmes industriels et les SMA classées dans le tableau 3.1 :

Tableau 3. 1 Analogie entre la chaîne logistique et le système multi-agent

Critère de comparaison	Chaîne logistique (SC)	Système multi-agent
<i>La multiplicité des entités agissantes</i>	multiples entités aux rôles et compétences différents pour la réalisation des tâches communes.	
<i>Les propriétés des entités</i>	les acteurs de la chaîne possèdent des objectifs, moyens et compétences nécessaires à l'exécution des tâches, et suivent pour cela un ensemble de règles de gestion.	Les agents possèdent des objectifs, compétences, rôles et capacités de raisonnement, qu'ils mettent en œuvre selon différents modes décisionnels complexes

Critère de comparaison	Chaîne logistique (SC)	Système multi-agent
<i>L'habilité sociale des entités</i>	les prises de décision se font au travers de méthodes de coordination et/ou de négociation entre les acteurs	Les agents sont autonomes, sensibles aux modifications de l'environnement, proactifs (initient les prises de décisions et d'actions) et disposent de capacités sociales
<i>Les capacités décisionnelles</i>	apprentissage et raisonnement sont nécessaires à la prise de décision individuelle et collective pour les acteurs	Capacités de raisonnement, d'acquisition ou de modification de connaissances par interaction avec l'environnement possibles pour les agents
<i>La coordination entre entités</i>	coordination des acteurs de la SC par le partage de flux matériels, informationnels, monétaires ou décisionnels	Coordination des activités des agents par interaction avec les autres agents
<i>La distribution et l'incomplétude de l'information</i>	un acteur de la SC accède à des informations incomplètes, partagées le long des frontières du système	Les agents possèdent des informations incomplètes, les partages d'informations et / ou des connaissances s'effectuent par échanges de messages
<i>La répartition des tâches</i>	Les tâches des acteurs de la SC peuvent être décomposées et données en responsabilités à d'autres acteurs	Les agents peuvent déléguer des tâches ou en partager pour la résolution de problèmes complexes
<i>L'évolutivité des systèmes</i>	Structures dynamiques, les acteurs s'inscrivent ou quittent la chaîne logistique	Les agents peuvent rejoindre le système et d'autres peuvent être détruits

Sur la base de cette analogie et des caractéristiques présentées des SMA selon l'approche voyelle (cf. section 3.1), force est de constater que le système multi-agent est un paradigme naturellement orienté pour modéliser et simuler la structure et le comportement dynamique des systèmes modulaires, décentralisés, complexes et reconfigurables (*Parunack, 1998*). En effet, ces critères poussent les chercheurs à solliciter l'application des systèmes multi-agents

dans la réalisation de leurs projets scientifiques et ceci depuis le début des années 90. Dans la littérature, nous trouvons plusieurs travaux dressant un panorama des travaux de recherche qui s'appuient sur la modélisation multi-agent pour appréhender et représenter les chaînes logistiques. Parmi ces travaux, nous pouvons citer : Parunak, 1999, Shen et Norrie, 1999 et plus récemment Fung et Chen, 2005, Shen et al., 2006, Monostori et al. 2006, Labarthe et al., 2007 et Frayret et al., 2007.

3.3 Agentification du métamodèle du domaine

Dans cette section, nous puisons dans la littérature des systèmes multi-agents (cf. section 3.1) ainsi que dans la solution développée lors du chapitre précédent (cf. section 2.6) afin d'obtenir un métamodèle du domaine agentifié. En se référant au processus de développement ArchMDE, l'agentification est la deuxième étape de la modélisation à entreprendre. Elle se base sur la fusion du métamodèle multi-agent et du métamodèle du domaine. Ainsi, au début de cette section, nous présentons un métamodèle multi-agent qui a été développé lors d'un travail de thèse (*Azaiez, 2007*) et que nous avons raffiné selon nos besoins. Par la suite, nous présentons le processus d'agentification de nos concepts du domaine.

3.3.1 Le métamodèle multi-agent

Dans nos recherches, nous avons adopté et raffiné un métamodèle multi-agent développé dans le cadre d'un travail de thèse au sein de l'Université de Savoie. Ce métamodèle décrit les concepts définissant un système multi-agent ainsi que les interactions et les relations les reliant. Dans ce qui suit, nous présentons les concepts du métamodèle selon l'approche voyelle définie précédemment et formalisés avec la notation UML.

3.3.1.1 Le métamodèle agent

Le métamodèle agent est défini à travers la vue agent qui décrit la structure interne d'un agent. Elle distingue ainsi 3 types d'agent selon leur intelligence et leurs processus décisionnels : (i) l'agent réactif qui réagit au stimulus de l'environnement par des actions prédéfinies ; (ii) l'agent cognitif a une faculté de raisonnement et de choix d'action selon la

situation afin d'atteindre d'une manière optimale son objectif ; (iii) l'agent hybride qui fusionne des caractéristiques de l'agent réactif et de l'agent cognitif.

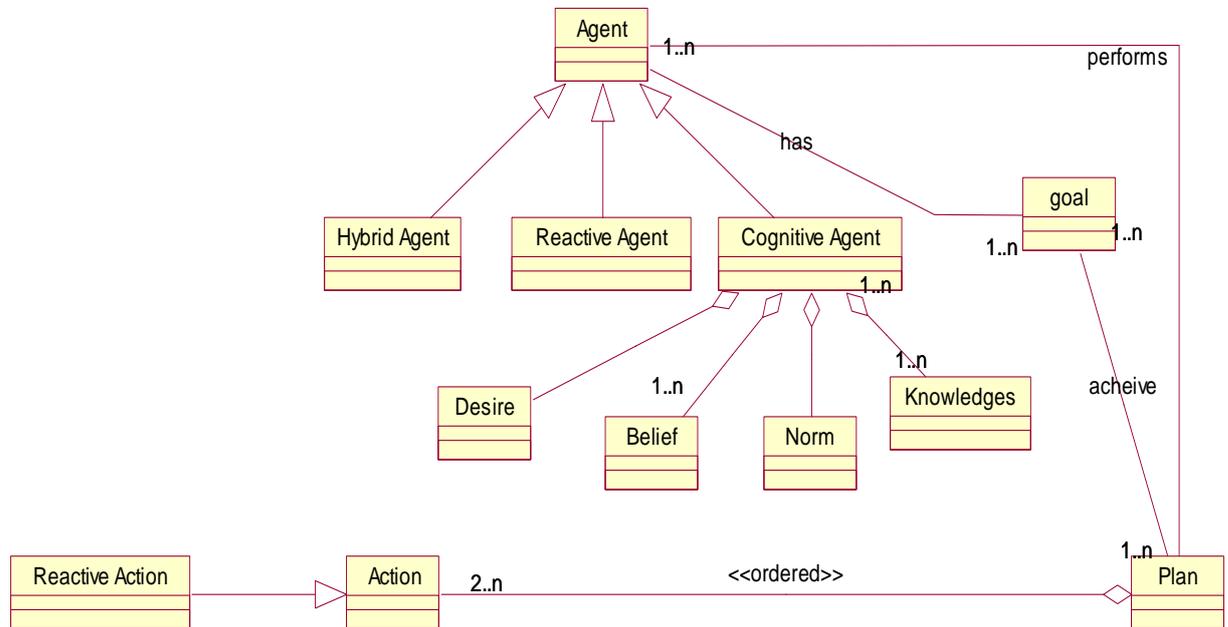


Figure 3. 11 Le métamodèle agent

La figure 3.11 présente le modèle de la vue agent. Cette vue est définie à travers les concepts suivants :

- ☞ le concept agent modélise les agents du système. Les 3 catégories d'agent (agent cognitif, agent réactif et agent hybride) héritent des caractéristiques de l'agent.
- ☞ Le concept « Cognitive Agent » modélise l'agent avec des capacités cognitives. Le métamodèle met en évidence les concepts nécessaires pour modéliser l'agent BDI (Belief, Desire, Intention = Plan).
- ☞ Le concept « Goal » modélise l'objectif que l'agent voudra atteindre.

- ⌘ Le concept « Knowledge » et « Norm » modélisent respectivement les connaissances nécessaires à l'agent cognitif pour atteindre ses objectifs et les normes à respecter.
- ⌘ Le concept « Plan » modélise un plan à mettre en œuvre par l'agent. Il est composé par une ou plusieurs actions élémentaires modélisées par le concept « Action ».
- ⌘ Le concept « Reactive Action » est une action élémentaire appliquée le plus souvent par l'agent réactif ou hybride.
- ⌘ Le concept « Reactive Agent » modélise l'agent avec des capacités réactives.
- ⌘ Le concept « Hybrid Agent » modélise l'agent avec une intelligence hybride.

3.3.1.2 Le métamodèle environnement

La vue environnement met l'accent sur tous les éléments extérieurs à l'agent. Ces éléments leur permettent d'atteindre leurs objectifs ou activent leurs comportements par le biais des évènements.

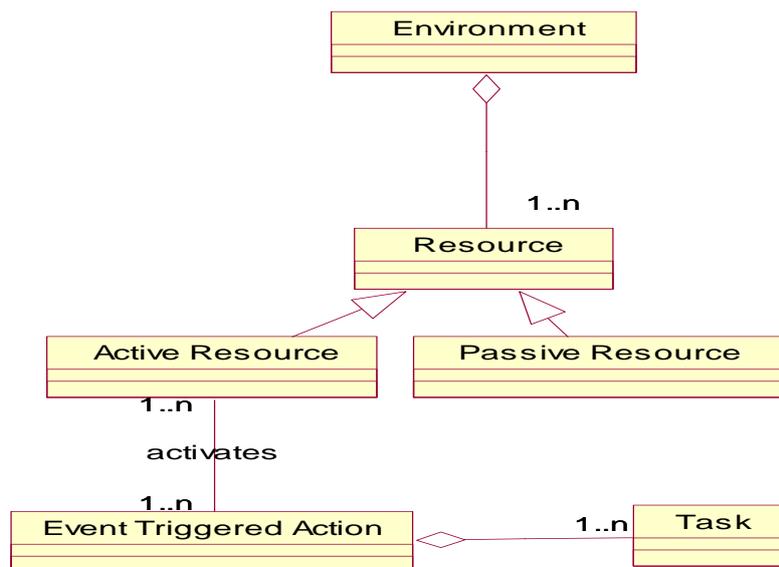


Figure 3. 12 le métamodèle environnement

Le métamodèle environnement est composé des concepts suivants (Figure 3.12) :

- ✎ Le concept « Resource » modélise les ressources composant l'environnement. Ces ressources peuvent être actives ou passives.
- ✎ « Active Resource » modélise les ressources qui activent le comportement de l'agent par des signaux ou la génération d'évènements.
- ✎ Le concept « Passive Resource » modélise les ressources nécessaires à l'agent pour achever sa tâche.
- ✎ « Event Triggered Action » est un concept qui modélise les évènements que les ressources activent. Un évènement est composé d'une ou plusieurs tâches qui seront accomplies par l'agent.

3.3.1.3 Le métamodèle interaction

La vue interaction décrit la relation dynamique entre les agents. Cette dynamique se fait à travers un protocole ou un langage d'interaction. C'est un échange de messages structurés entre les agents selon l'état interne de ce dernier et le cadre d'interaction

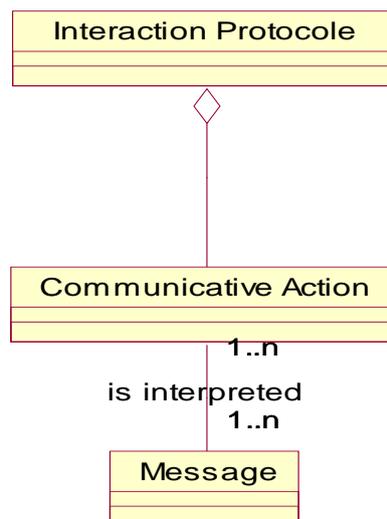


Figure 3. 13 Le métamodèle interaction

La figure 3.13 modélise le métamodèle interaction selon la définition de la vue interaction. Elle met l'accent sur les concepts suivants :

- ✎ « Interaction Protocole » modélise les protocoles d'interaction qui seront adoptés par les agents.
- ✎ « Communicative Action » modélise les actions élémentaires de communication qui composent le protocole d'interaction.
- ✎ « Message » est un message échangé entre les agents suivant le protocole d'interaction. Ce message sera interprété par les agents en se basant sur les actions communicatives.

3.3.1.4 Le métamodèle organisation

La vue organisation décrit la structure de tout le système en termes de groupes d'agents, hiérarchie, relations et de structure de l'environnement.

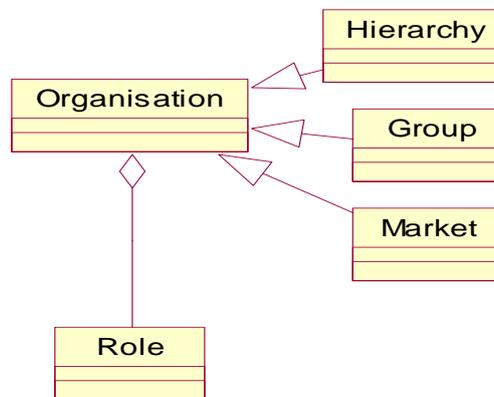


Figure 3. 14 Le métamodèle Organisation

La figure 3.14 décrit le métamodèle organisation qui est composé de deux concepts essentiels :

- ✎ « Organisation » qui définit la topologie du système : hiérarchique, groupe ou marché.

⌘ « Role » définissant les différents rôles que les agents peuvent assurer dans le système.

3.3.1.5 Synthèse

L'approche AEIO a permis de décomposer le système multi-agent en plusieurs modules. Cette modularité facilite l'étude et l'utilisation de chaque aspect du système multi-agent d'une manière séparée. Au niveau de cette section, nous avons présenté les concepts de chaque métamodèle de l'approche comme il a été défini dans les travaux d'Azaiez (*Azaiez, 2007*). En fusionnant ces différents résultats, nous obtenons le métamodèle multi-agent qui servira à la modélisation informatique du métamodèle du domaine. La figure 3.15 récapitule cet assemblage en mettant l'accent sur les concepts identifiés de chaque vue de l'approche AEIO et les relations entre chaque module.

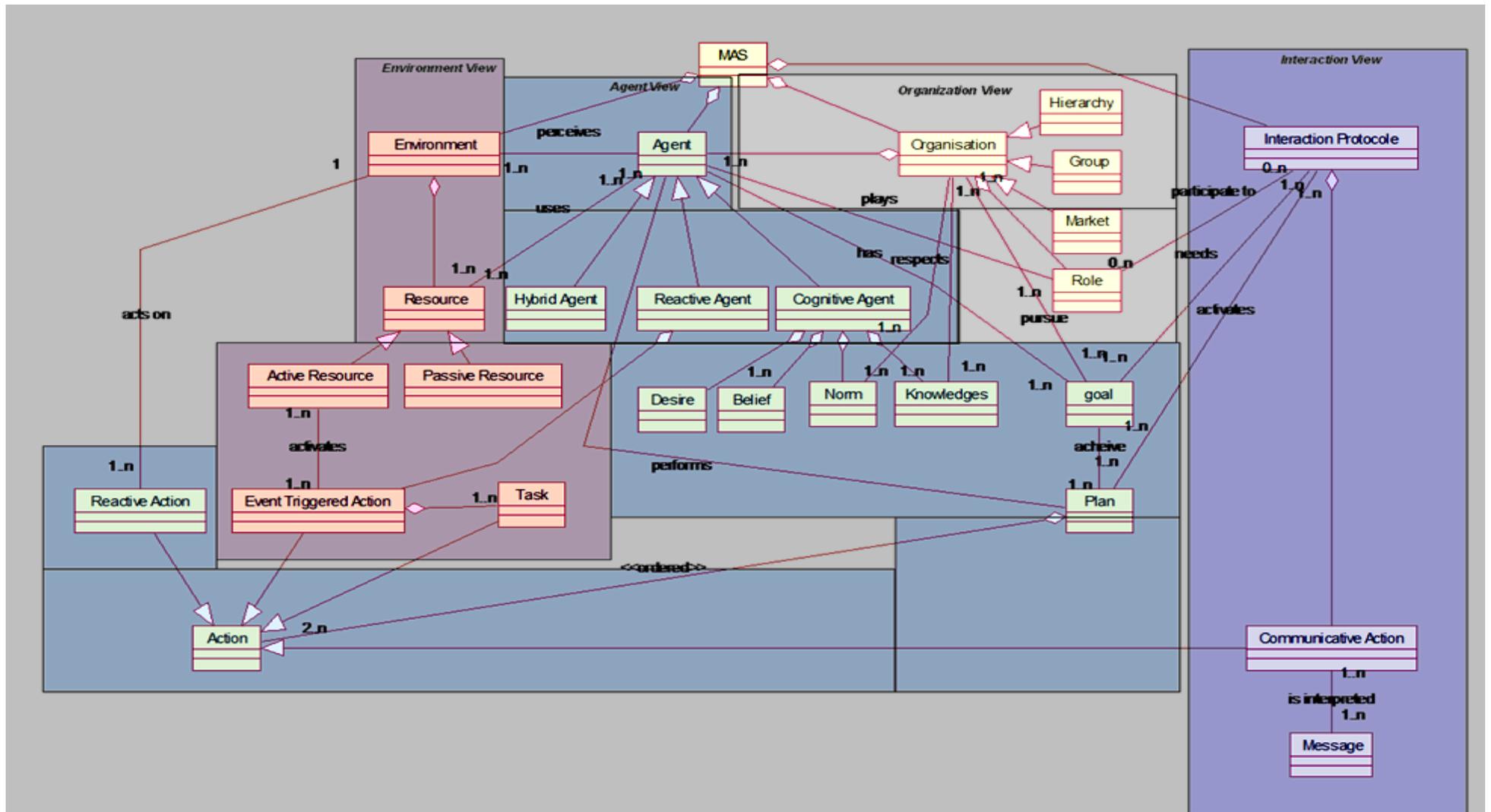


Figure 3. 15 Le métamodèle multi-agent

3.3.2 Génération du métamodèle du domaine agentifié

Après avoir détaillé le métamodèle multi-agent et le métamodèle du domaine dans le chapitre précédent, nous entamons le processus d'agentification. Ce processus se base sur la modélisation d'un concept du domaine par un concept multi-agent ayant les mêmes propriétés structurales et architecturales. Cette fusion permettra d'avoir un équivalent informatique à un concept du domaine afin d'étudier son comportement dynamique.

Ainsi en se basant sur l'étude bibliographique des systèmes multi-agents et de l'étude faite sur les concepts du métamodèle du domaine, nous établissons le tableau de correspondance suivant qui fait l'objet du métamodèle du domaine agentifié (voir annexe A).

Tableau 3. 2 Agentification des concepts du domaine

<i>Vision appliquée de la méthodologie</i>	<i>Concept du domaine</i>	<i>Multiagent Equivalent Concept</i>	<i>Description</i>
<i>Vision Produit</i>	Supply Chain (SC)	Multiagent System (MAS)	Par analogie, la racine du métamodèle du domaine correspond à la racine du système multi-agent.
	Environment	Environment	Dans les deux métamodèles, l'environnement est l'espace physique alloué aux ressources et qui sont nécessaires pour gérer la chaîne logistique (SC).
	Sub Supply Chain (SSC)	Organization	La SSC est modélisée informatiquement comme étant une organisation composée de deux groupes ou plus.
<i>Vision structure</i>	Physical System	Resource	Il représente toutes les ressources nécessaires pour un agent ou à un groupe d'agents pour gérer le groupement de PME (périmètre d'influence de la SSC).

<i>Vision appliquée de la méthodologie</i>	<i>Concept du domaine</i>	<i>Multiagent Equivalent Concept</i>	<i>Description</i>
	Resource	Passive Resource	La ressource physique est modélisée par une ressource passive. Elle sera utilisée par un agent pour achever sa tâche.
	Moving Entity (ME)	Active Resource	ME modélise le produit en circulation. Il active le comportement des acteurs exécutifs. D'où le choix de lui attribuer l'équivalent d'une ressource active dans le SMA.
	Physical Process (PhP)	Task	PhP est une tâche ou une activité physique qui sera prise en charge par les acteurs de la chaîne.
	Monitoring System	Group	C'est une organisation en groupe. Elle est composée d'acteurs de pilotage qui collaborent pour atteindre l'objectif interne de la SSC et qui coordonnent son activité avec les autres organisations.
	Execution System	Group	C'est une organisation en groupe composée d'acteurs d'exécution pour achever les tâches du groupement.
	Actor	Agent	Un acteur de la chaîne est modélisé par le concept agent. Il peut être un agent cognitif ou réactif selon sa granularité décisionnelle.
	Executive Actor (EA)	Reactive Agent	EA perçoit le système physique et agit selon ses observations. Ainsi l'acteur EA est modélisé informatiquement par un agent réactif.
	Monitoring Actor (MA)	Cognitive Agent	Les MA pilotent la SSC en se basant sur les informations collectées du système d'exécution et l'historique des événements, de la variation des indicateurs et des actions passées.

<i>Vision appliquée de la méthodologie</i>	<i>Concept du domaine</i>	<i>Multiagent Equivalent Concept</i>	<i>Description</i>
<i>Vision Processus</i>	Objective	Goal Desire	Une SSC possède un objectif à atteindre qui est l'équivalent d'un but de l'agent. En effet la SSC est une organisation formée de plusieurs agents interagissant dans un cadre collectif. En plus, les MA possèdent des objectifs à atteindre pour chaque indicateur. Ces objectifs sont modélisés par les désirs de l'agent BDI.
	Indicator	Belief Perception	Le concept Indicator représente une notion différente pour les EA et les MA. Pour un agent MA, un indicateur modélise une valeur de l'indicateur sur laquelle l'agent se base pour évaluer l'état actuel du système mais aussi l'historique des valeurs qu'un indicateur peut avoir à un instant donné. Pour cette raison, l'indicateur représente les croyances de l'agent BDI. D'un autre côté, la valeur de l'indicateur perçue par les EA sert aussi de base pour l'agent réactif pour détecter la déviation.
	Action	Plan	C'est une action ou un plan d'action à appliquer par un agent pour rectifier une situation de perturbation.
	Knowledge	Knowledge	Ce concept a la même signification dans les deux métamodèles. Il modélise toutes les connaissances nécessaires à l'agent pour agir d'une manière efficace et appropriée.
	Organizational knowledge	Knowledge	Le concept du domaine « Organizational knowledge » modélise l'environnement social d'un agent ou autrement dit ses accointances. En effet, chaque agent possède une liste qui contient les informations nécessaires sur les autres agents de la SSC ou de la SC globale.

<i>Vision appliquée de la méthodologie</i>	<i>Concept du domaine</i>	<i>Multiagent Equivalent Concept</i>	<i>Description</i>
	Constraint	Knowledge	Les MA prennent leur décision en tenant compte de leurs objectifs, désirs et croyances. Cependant, il y a certaines contraintes (concernant le produit ou les autres organisations de la SC) que les agents doivent considérer dans leur processus décisionnel.

Après cette agentification, nous obtenons un métamodèle du domaine agentifié. Nous avons choisi de garder deux métamodèles séparés pour une meilleure clarté de l'analogie. La figure 3.16 reprend ce métamodèle qui est en grand format dans l'annexe A.

3.4 Intégration des mécanismes de concertation

A ce stade de la solution, nous avons construit un métamodèle du domaine agentifié. Nous avons jusqu'à ce point modélisé informatiquement la partie statique de notre solution. Au niveau de cette dernière section, nous développons les protocoles d'interaction qui traduisent la dynamique des concepts du domaine en se basant sur les outils et les théories qu'offre le paradigme agent.

Selon la vision Processus (cf. section 2.4), nous avons identifié deux grands cas de concertation dans les groupements de PME (SSC) et la chaîne logistique globale :

- ✎ La synchronisation : c'est échanger des informations et des flux physiques selon un schéma déjà conçu et prédéfini des processus par les couches décisionnelles.
- ✎ Le pilotage et le contrôle : il s'agit de s'assurer de la bonne mise en œuvre des décisions dans l'optique d'une amélioration continue de la performance des processus en termes de valeur ajoutée.

Ainsi, cette section présente l'intégration des mécanismes de concertation selon les deux cas de figure cités en tenant compte du cadre d'interaction. En effet, dans le métamodèle du domaine, nous avons identifié deux cadres de concertation différents. Le premier est un cadre de collaboration entre les acteurs appartenant à la même couche et à la même SSC. Le deuxième est un cadre de coordination qui pondère les interactions entre deux SSC formant la même chaîne logistique. Dans la suite, nous décrivons les protocoles nécessaires en prenant en compte le cas de figure (synchronisation ou pilotage) et le cadre d'interaction (coordination ou collaboration).

3.4.1 La synchronisation des processus

La SSC est responsable de la synchronisation des processus au niveau de son système physique afin d'achever sa tâche. Cette activité nécessite la mise en place d'un protocole de communication selon le type du cadre de l'interaction. Dans cette partie, nous décrivons les processus de collaboration et de coordination à implémenter au niveau du système

d'exécution (Execution System) et du système de pilotage (Monitoring System). Ces protocoles sont implémentés sur la base du pattern du modèle abstrait du protocole CPS (cf. section 3.1.3).

Le protocole mis en place pour la synchronisation des processus est implémenté à deux niveaux différents. Le premier niveau concerne le système d'exécution dont la responsabilité de synchroniser le système physique à travers les processus de contrôle opérationnel (OCP) (cf. section 2.4). Le deuxième niveau du processus est pris en charge par le système de pilotage afin d'assister la synchronisation dans des cas de perturbation.

3.4.1.1 Mise en place du protocole au niveau du système d'exécution

Conformément au métamodèle agentifié du domaine, le système d'exécution est responsable de la synchronisation des processus dans des cas habituels. En effet, les acteurs exécutifs (EA) modélisés par des agents réactifs, synchronisent les processus physiques (PhP) en tenant en compte la disponibilité des ressources. Ainsi, sur la base des concepts du domaine agentifié, le processus de synchronisation est interprété par le diagramme suivant ayant pour objet le comportement dynamique de l'acteur exécutif (EA).

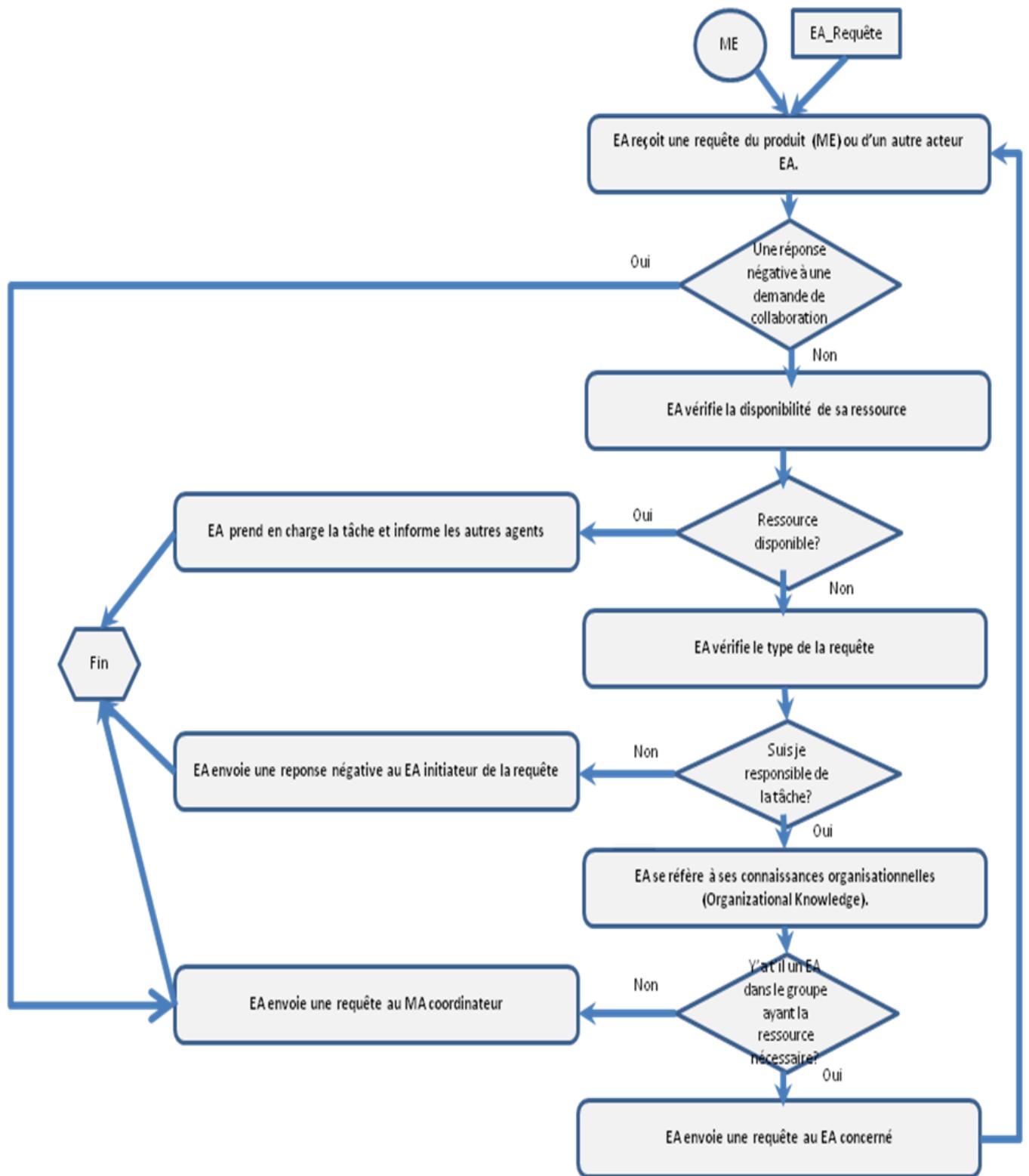


Figure 3. 17 Le comportement dynamique de l'acteur Exécutif (EA)

La figure 3.17 traduit le comportement de synchronisation de l'acteur d'exécution. En effet, l'acteur d'exécution (EA) reçoit une requête et réagit selon le type de cette dernière. Nous pouvons distinguer trois types de requêtes :

- ✎ Une requête provenant du produit en circulation (ME) pour solliciter sa prise en charge par le EA.
- ✎ Une requête de collaboration provenant d'un autre EA du système d'exécution pour demander une assistance sur l'achèvement de la tâche de l'initiateur.
- ✎ Une réponse négative à une demande de collaboration provenant d'un EA sollicité.

Nous éclaircissons le comportement de l'EA par cette séquence d'étapes en langage naturel :

- ✎ Si la requête est une réponse négative à une demande de collaboration que le EA avait initiée auparavant, alors le EA initiateur envoie une requête à l'agent coordinateur du système de pilotage. En effet, au niveau du système de pilotage nous avons un agent MA ayant comme rôle la réception des requêtes et leur distribution.
- ✎ Si la requête reçue est un besoin de synchronisation provenant du ME ou une demande d'assistance provenant d'un autre EA initiateur, alors l'agent vérifie la disponibilité de la ressource en question.
- ✎ Si la ressource est disponible, le EA réalise la tâche, met à jour l'état du produit (ME) et informe les autres agents du système d'exécution et l'agent coordinateur de la fin de l'action.
- ✎ Si la ressource en question n'est pas disponible et que le EA a été sollicité par un autre agent d'exécution afin d'accomplir la tâche, alors le EA envoie un message d'échec au EA initiateur.
- ✎ Si la ressource est indisponible et le EA est le responsable de la tâche, alors il cherche dans ses connaissances organisationnelles les agents ayant la ressource

nécessaire. Cette base d'accointances est un plan d'action déjà mis en place par le système de pilotage et dont il a la charge de la mettre à jour.

✎ Si l'agent retrouve dans ses accointances (Organizational knowledge) un EA ayant les compétences nécessaires, alors il lui délègue l'achèvement de la tâche. Dans ce cas, le processus de synchronisation de l'agent accointance est activé et suit les mêmes séquences.

✎ Dans le cas où l'agent ne trouve pas dans ses accointances un autre agent ayant la compétence requise, alors il envoie une requête à l'agent coordinateur afin que le système de pilotage trouve une solution adéquate.

3.4.1.2 Mise en place du protocole au niveau du système de pilotage

Dans des situations de perturbation inhabituelle, le système d'exécution se réfère au système de pilotage (Monitoring System). Dans ce cas de figure, le groupe des acteurs de pilotage (MA) modélisés par des agents BDI, évalue la situation par rapport à l'objectif défini et établit un plan d'action en conséquence. Si l'objectif est dévié, le groupe des MA a besoin de consulter les autres SSC afin de trouver une solution collective qui satisfait l'ensemble de la chaîne logistique. Dans cette coordination des objectifs, les agents utilisent un protocole se basant sur le pattern du modèle abstrait CPS et plus spécifiquement du modèle du Contract Net Protocol (cf. section 3.1.3).

Dans ce travail de thèse nous considérons le comportement simple d'un agent BDI. Les améliorations telles que l'apprentissage ou la maintenance préventive seront considérées comme des perspectives futures à ce travail.

Ainsi, le protocole de synchronisation au niveau du système de pilotage peut être décrit par les étapes suivantes :

✎ Dans le système de pilotage, le MA coordinateur reçoit toutes les requêtes adressées au groupe et les diffuse au niveau de la couche. Nous distinguons trois types de requêtes :

- Une requête provenant du système d'exécution
- Une requête d'assistance provenant d'une autre SSC et qui nécessite une coordination des activités des SSC de la chaîne globale
- Une réponse à une requête d'assistance initiée par une autre SSC

✎ Si le groupe de pilotage reçoit une requête du système d'exécution, alors il évalue la situation par rapport à son objectif. Deux cas peuvent apparaître :

- Le problème n'a pas d'impact sur la satisfaction de l'objectif de la SSC
- Le problème affecte l'objectif de la SSC

✎ Si le problème n'a pas d'impact sur l'objectif de la SSC, les MA essayent de trouver une solution en interne par rapport à leurs désirs, croyances, intentions mais aussi en tenant compte des contraintes du système. Cette recherche de solution interne adopte l'algorithme proposé par Wooldridge pour le fonctionnement d'un agent BDI (cf. section 3.1). Si le processus aboutit à une solution, le MA coordinateur envoie le plan d'action au système d'exécution.

✎ Si l'objectif est dévié ou une solution en interne ne peut être trouvée, alors le système de pilotage envoie une requête d'assistance aux autres SSC de la chaîne globale par le biais du MA coordinateur et attend les réponses.

✎ Quand toutes les réponses sont reçues, le MA les classe selon la date à laquelle une SSC peut fournir l'aide requise. Par la suite la liste est diffusée aux MA du groupe. En tenant compte des critères internes (désirs et contraintes), le groupe choisit la meilleure offre et sollicite l'aide du contractant et envoie un message d'annulation aux autres SSC. Par la suite le MA coordinateur diffuse le plan d'action au groupe d'exécution.

- ✎ Si la requête est une demande d'assistance d'une autre SSC, alors le MA coordinateur diffuse la requête au niveau du groupe de pilotage. Les MA évaluent la requête selon leurs critères internes (objectifs, contraintes et désirs). Si la SSC peut fournir l'aide, elle envoie une offre à la SSC initiatrice.

Cette deuxième phase du processus est formalisée par un diagramme de séquence en UML (Figure 3.18). Ce diagramme met l'accent sur la séquence des messages échangés entre les SSC. Il représente ainsi les processus de coordination dans la chaîne logistique afin de synchroniser les flux physiques dans le cas d'une situation de perturbation où la SSC ne peut trouver une solution en interne.

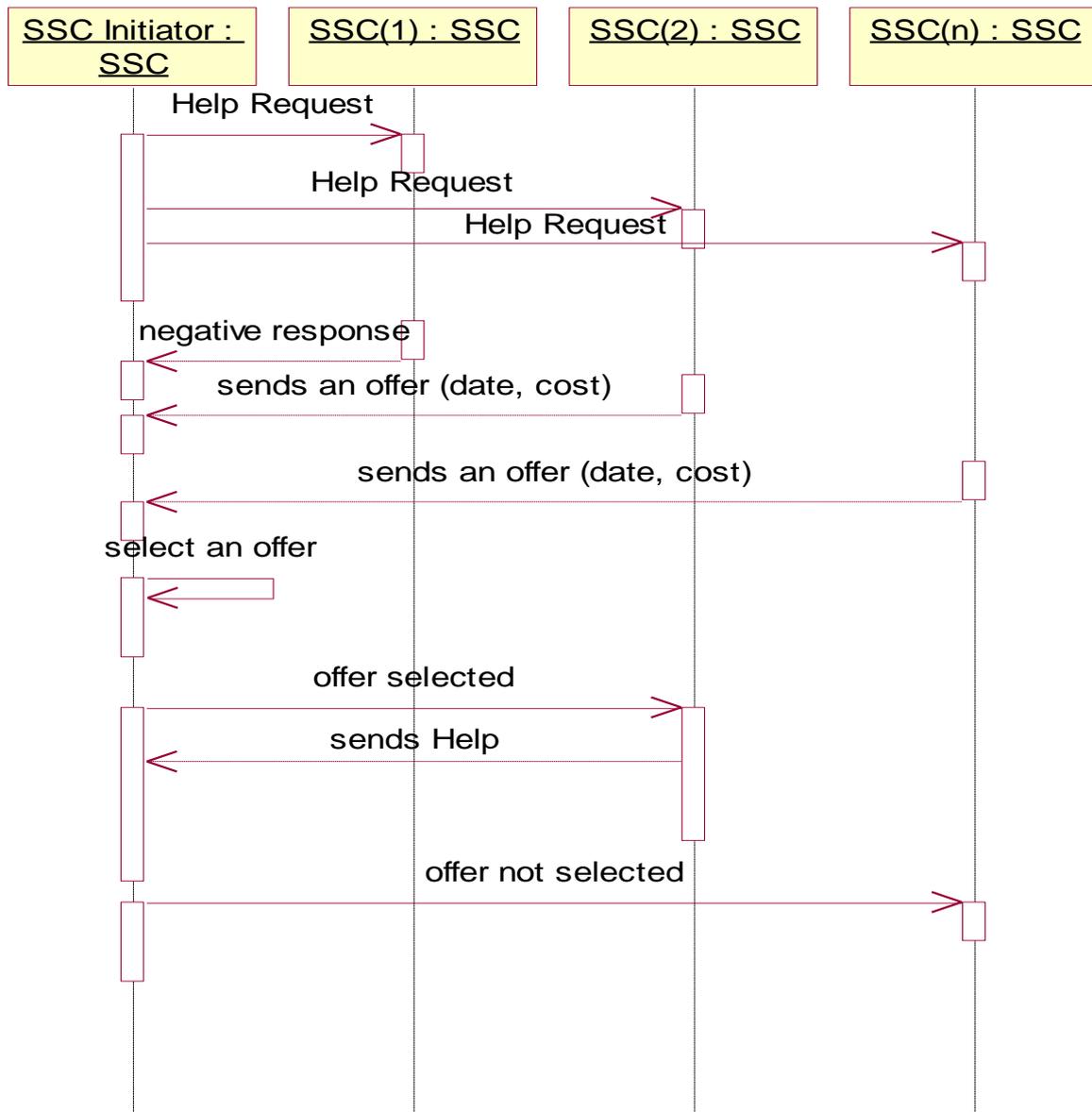


Figure 3. 18 Le diagramme de séquence pour la coordination des flux physiques

3.4.2 Le protocole de contrôle et de pilotage

Ce protocole décrit le contrôle et le pilotage préventif conditionnel (intervention sur la base de mesures) ou correctif (intervention en cas de défaillance) au niveau de la SSC et de la chaîne logistique globale. Le protocole est basé sur l'évaluation des performances qui prend place à deux niveaux différents : le système d'exécution et le système de pilotage. Etant un

protocole préventif conditionnel ou correctif, il est adopté suite à une activité de synchronisation de processus afin d'évaluer l'activité de l'acteur, des ressources utilisées et de l'activité de la SSC.

Ainsi, nous traduisons ce protocole en langage naturel par la séquence suivante qui met en relation les concepts du domaine agentifiés :

- ✎ A la fin d'une activité de synchronisation, chaque EA évalue son activité et les ressources qu'il a utilisées.
- ✎ Selon les mesures obtenues, le EA évalue le processus en fonction de la base d'indicateurs pour détecter un besoin de maintenance.
- ✎ Si la déviation est habituelle, le EA effectue de la maintenance corrective selon les plans d'action préétablis et envoie par la suite les mesures au MA coordinateur pour que les agents du système de pilotage mettent à jour leurs croyances.
- ✎ Si la déviation n'est jamais survenue, le EA transfère les valeurs au système de pilotage par le biais du MA coordinateur qui les diffuse au niveau du système de pilotage.
- ✎ Les MA mettent à jour leurs croyances puis analysent la situation par rapport à leurs critères internes (croyances, désirs, objectifs et contraintes).
- ✎ Si la maintenance est corrective, l'analyse essaye d'aboutir à un plan de maintenance qui sera transféré au système d'exécution. Par la suite, les MA mettront à jour leurs bases d'actions.
- ✎ Si la perturbation n'affecte pas le bon fonctionnement de la SSC, les MA appliquent des plans d'action préventifs pour éviter les dysfonctionnements futurs.

Le processus de contrôle et de pilotage est décrit par le diagramme de séquence dans la figure 3.19.

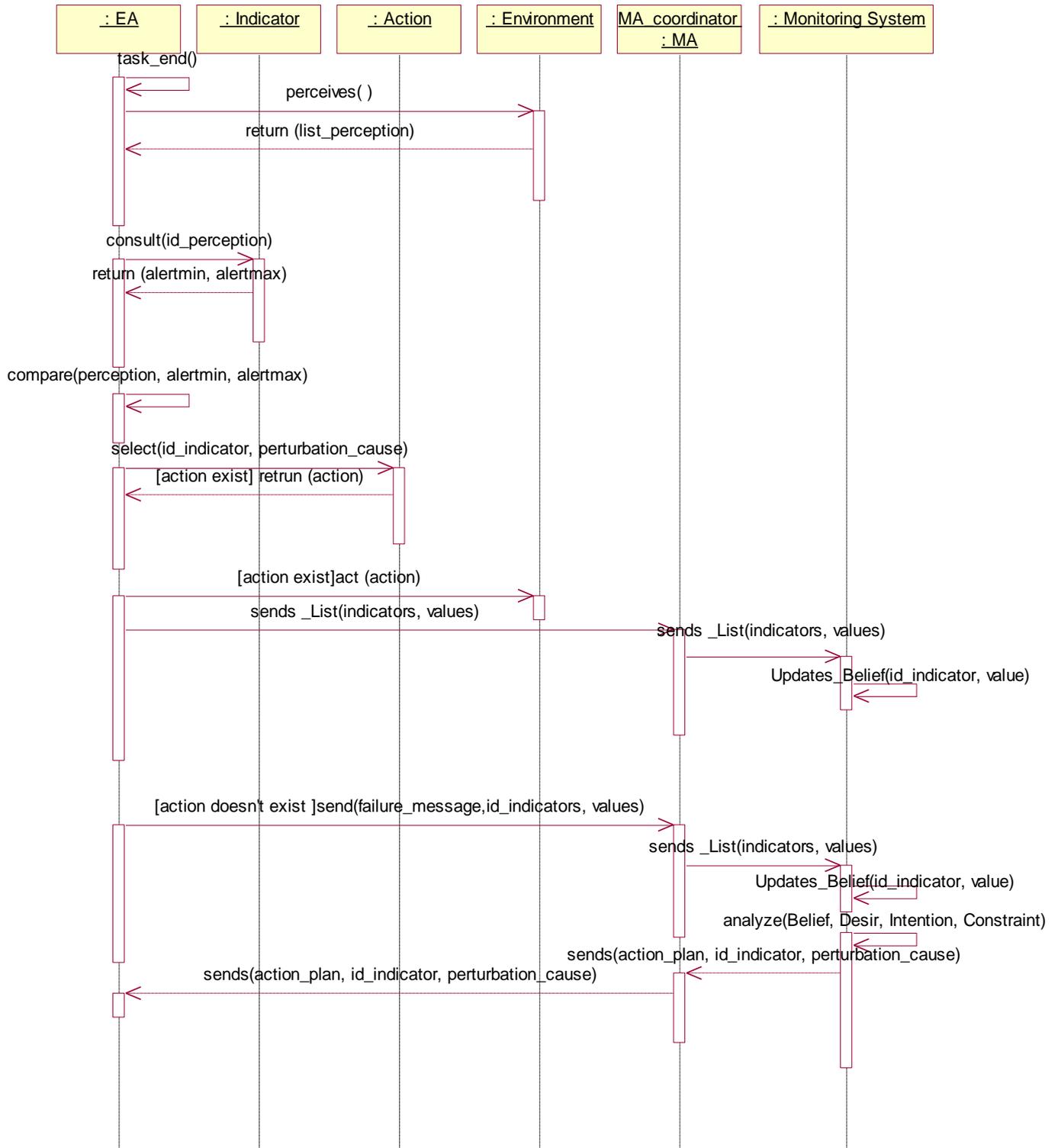


Figure 3. 19 Diagramme de séquence du processus de contrôle et de pilotage

3.5 Passage à l'implémentation

Cette section transcrit la phase finale du processus de développement ArchMDE décrivant ainsi le passage de la phase de modélisation à la phase d'implémentation. Cette phase se subdivise en deux étapes essentielles. La première étant le raffinement du métamodèle du domaine agentifié avec l'intégration des informations nécessaires pour passer au codage. La deuxième étape traduit le choix de la plate-forme d'implémentation pour faire un mapping entre les outils de codage et les concepts agentifiés du métamodèle finale (obtenu à la fin de la première étape de la dernière phase). Ainsi, dans ce qui suit nous mettons l'accent sur les différentes étapes de cette dernière phase du processus ArchMDE (le deuxième Y).

3.5.1 Raffinement du métamodèle du domaine agentifié

A la fin de l'intégration des protocoles, nous avons identifié les patterns ou le schéma abstrait du comportement dynamique des concepts identifiés. Dans ce qui suit, nous raffinons les concepts du métamodèle du domaine agentifié en mettant l'accent sur les principaux attributs et méthodes qui leur permettent d'assurer leurs rôles dans la solution finale. Le résultat du raffinement, nous permet d'avoir un diagramme de classe qui sera instancié par la suite et implémenté. Le raffinement se fera sur le métamodèle du domaine agentifié. Dans cette optique, le nom de nos concepts qui ont un équivalent dans le métamodèle multi-agent, est le même nom attribué dans le métamodèle du domaine. Par contre, nous intégrons les concepts nécessaires à l'agent pour achever sa tâche mais qui n'apparaissent que dans le métamodèle multi-agent. Le tableau 3.3 résume le métamodèle raffiné qui fait l'objet du diagramme de classe (Figure 3.20). Pour alléger le tableau, nous avons choisi de ne pas faire apparaître les méthodes permettant d'accéder aux informations d'un objet ou l'objet lui-même et de le modifier (les méthodes getter et setter).

Tableau 3.3 Raffinement des concepts agentifiés pour l'implémentation

<i>Le concept « SC »</i>	
<i>Attributs</i>	
idSC :String	L'identifiant de la chaîne logistique à étudier
ListSSC :SSC	Les identifiants des SSC formant la SC
idEnvironment :String	L'identifiant de l'environnement global de la SC
<i>Le concept « SSC »</i>	
<i>Attributs</i>	
idSSC :String	L'identifiant de la SSC
idEx_Sys :String	L'identifiant du système d'exécution formant la SSC
idPhys_Sys :String	L'identifiant du système physique formant la SSC
idMoni_Sys : String	L'identifiant du système de pilotage formant la SSC
<i>Le concept « Environment »</i>	
<i>Attributs</i>	
idEnv :String	L'identifiant de l'environnement
idPhys_Sys :String	L'identifiants du système physique formant l'environnement
<i>Le concept « Physical System »</i>	
<i>Attributs</i>	
idPhys_Sys :String	L'identifiant du système physique
idME :String	L'identifiant du ME en circulation à un instant donné
List_R :Resource	Liste des ressources formant le système physique
ListPhp : PhP	Liste des processus physiques
<i>Le concept « ME »</i>	
<i>Attributs</i>	
Id_ME :String	L'identifiant du produit ou la commande
Lib_ME :String	Libellé du ME
Demand_Date :String	Date de besoin du produit
State : Boolean	Etat du produit indiquant s'il est libre ou non
Stage : String	L'Etape du PhP que le produit a atteint
Size : Integer	Taille du lot de produits
<i>Méthodes</i>	
handleMessage	Permet au produit ME d'envoyer un signal au système d'exécution pour activer le comportement des EA.
<i>Le concept « Resource »</i>	
<i>Attributs</i>	
idRes :String	L'identifiant de la ressource
Lib_Res :String	Libellé de la ressource
Capacity :Integer	Capacité de la ressource
Disponibility : Boolean	Disponibilité de la ressource pour savoir si elle prend en charge le ME
Speed_coef :Integer	La rapidité de la ressource à transformer le produit
<i>Méthodes</i>	
Activity(Speed_coef, Capacity)	Cette méthode permet de calculer la durée de la tâche par rapport à la rapidité de la ressource et sa capacité.

<i>Le concept « PhP »</i>	
<i>Attributs</i>	
id_PhP :String	L'identifiant du processus physique
Id_Res :String	L'identifiant de la ressource nécessaire
id_ME :String	L'identifiant du produit à prendre en compte
Delay : float	Délai de fin du processus
<i>Le concept « Execution System »</i>	
<i>Attributs</i>	
idEx_Sys :String	L'identifiant du système d'exécution
List_EA :String	Liste contenant les identifiants des EA formant le système d'exécution
<i>Méthodes</i>	
Add_EA(String EA)	Rajoute un EA au groupe
Run()	Active le comportement du groupe. En effet le Système d'exécution va être un agent composé de plusieurs agents et qui lancera le fonctionnement des EA.
<i>Le concept « Monitoring System »</i>	
<i>Attributs</i>	
idMoni_Sys :String	L'identifiant du système de pilotage
List_mA :String	Liste contenant les identifiants des MA formant le système d'exécution
<i>Méthodes</i>	
Add_MA(String MA)	Rajoute un MA au groupe
Run()	Active le comportement du groupe. En effet le Système de pilotage va être un agent, composé de plusieurs agents, qui lance le fonctionnement des MA.
<i>Le concept « Actor »</i>	
<i>Attributs</i>	
id_Actor :String	L'identifiant de l'acteur
List_Indicator :Indicator	Liste des indicateurs
List_Action :String	Liste des actions à mettre en place
List_Accointances : Organizational Knowledge	Liste contenant les identifiants des accointances de l'agent
MailBox : Message	Liste des messages reçus
SendBox :Message	Liste des Messages à envoyer
<i>Méthodes</i>	
Run()	Méthode qui active le fonctionnement de l'acteur
HandleMessage()	Méthode qui permet d'analyser un message reçu
Send(Message M)	Méthode permettant d'envoyer un message vers un destinataire
<i>Le concept « EA »</i>	
<i>Attributs</i>	
id_EA :String	L'identifiant de la SSC
List_R :String	Liste contenant les ressources de l'acteur EA
<i>Méthodes</i>	
HandleMessage()	Permet aux EA de traiter les messages

Run()	Active le comportement du EA.
Ressource_check()	Vérifie la disponibilité de la ressource
Utilise les méthodes héritées de la classe « Actor »	
Le concept « MA »	
Attributs	
idMA :String	L'identifiant de l'acteur MA
List_Belief :String	Liste contenant les identifiants des croyances (historique des valeurs des identifiants)
List_Desir :Integer	Liste des indicateurs du MA
List_Intention :integer	Liste des actions du MA
List_constraint : Integer	Liste des contraintes du MA
Objective : Objective	Objectif du MA
Méthodes	
HandleMessage()	Traite les messages reçus
Run()	Active le comportement du MA
Update_Belief(...)	Méthode de mise à jour des croyances du MA
Update_Intention(...)	Méthode de mise à jour des intentions du MA
Analyse (...)	Algorithme de raisonnement du MA
Utilise les méthodes héritées de la classe « Actor »	
Le concept « Indicator »	
Attributs	
Id_indicator :Integer	L'identifiant de l'indicateur
Lib_Indicator :String	Libellé indicateur
Valeur : float	La valeur calculée de l'indicateur à un instant T.
Calcul_Methode :String	Méthode de calcul de la valeur de l'indicateur
Le concept « Action »	
Attributs	
idAction :Integer	L'identifiant de la SSC
Lib_act :String	Libellé des actions
Indicator :Integer	L'identifiant de l'indicateur que cette action concerne
Action_trigger : float	Valeur à laquelle s'applique l'action
Le concept « Organizational Knowledge »	
Attributs	
Id_Actor :String	L'identifiant de l'acteur possédant la base d'accointance
List_Actor :String	Liste contenant les identifiants des accointances
Le concept « Constraint »	
Attributs	
Id_C :String	L'identifiant de la contrainte
Lib_C :String	Libellé de la contrainte
Value : float	Valeur de la contrainte
Le concept « Objective »	
Attributs	
idObjective : integer	L'identifiant de l'objectif
Lib_Obj : String	Le libellé de l'objectif
ValueMin :float	La valeur minimum de l'objectif
ValueMax: float	La valeur maximum de l'objectif

<i>Le concept « Message »</i>	
<i>Attributs</i>	
DateMessage : Date	La date à laquelle a été envoyé le message
Object : String	L'objet du message
Sender : String	L'expéditeur du message (le nom de l'acteur)
Receiver : String	Le destinataire du message (le nom de l'acteur)
Subject : String	Les données composant le message

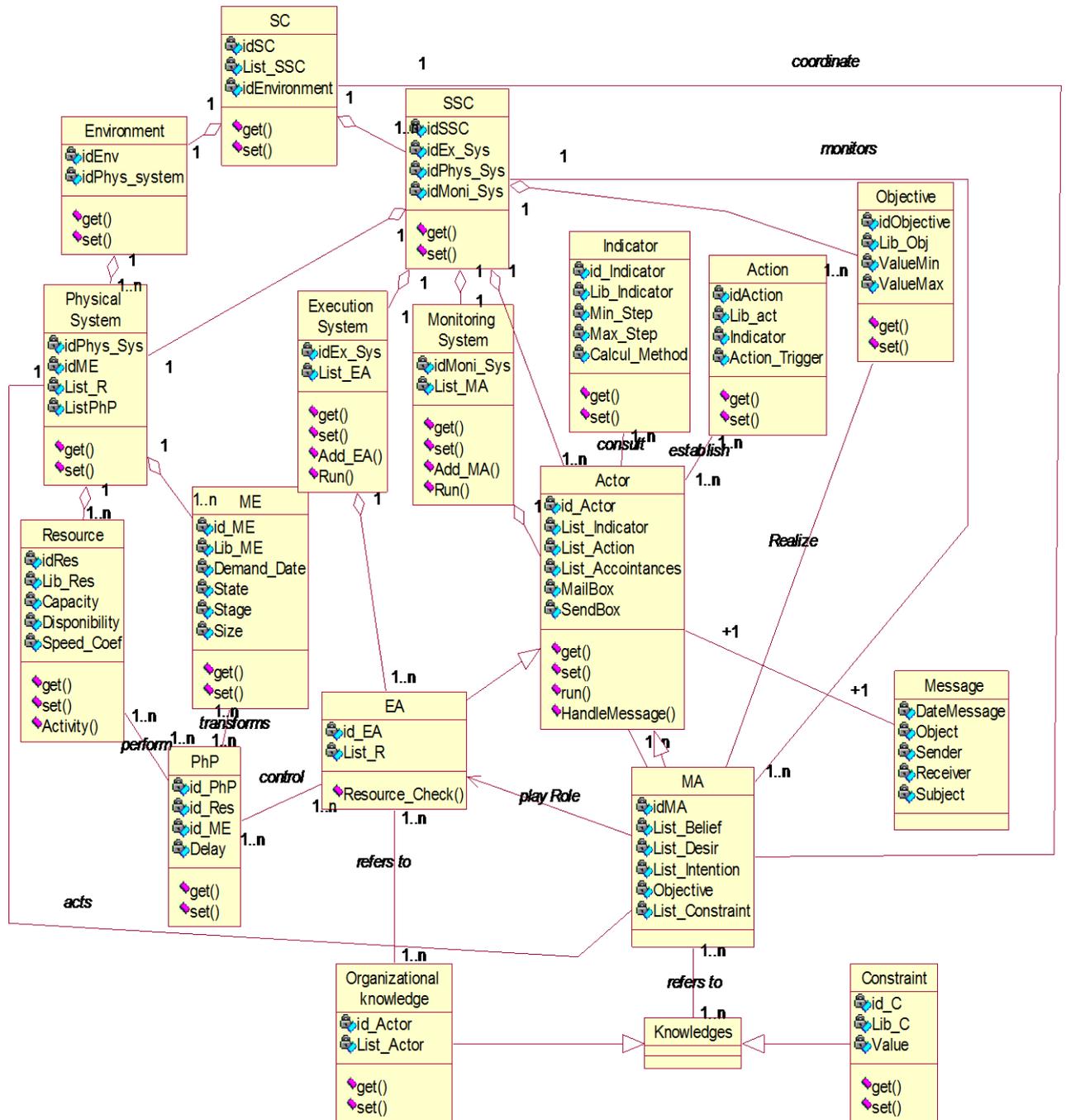


Figure 3. 20 Le métamodèle d'implémentation

3.5.2 Choix de la plate-forme d'implémentation

Après avoir intégré les éléments informationnels (attributs et méthodes), nous décrivons ici le choix d'une plate-forme d'implémentation qui permettra de coder les concepts agentifiés du métamodèle d'implémentation (cf. figure 3.20) tout en conservant leurs caractéristiques structurelles et comportementales. Ainsi, nous avons pondéré notre choix selon les critères les plus pertinents de la modélisation. En effet, la plate-forme d'implémentation doit permettre de :

- ✎ Développer des agents cognitifs (les acteurs de pilotage MA) et des agents réactifs (les acteurs d'exécution EA),
- ✎ Faire communiquer les agents entre eux (envoi de message),
- ✎ Intégrer la notion de groupe d'agents (Monitoring System, Execution System),
- ✎ Représenter l'environnement extérieur (Physical System),
- ✎ Fournir une interface graphique pour faciliter le paramétrage et visualiser l'évolution des résultats de la simulation.

Sur la base de ces critères, nous nous sommes orientés vers les plate-formes multi-agent les plus utilisées par la communauté scientifique. L'étude s'est portée de manière non exhaustive sur la plate-forme Jade (<http://jade.cselt.it>) et la plate-forme Madkit (<http://www.madkit.net>).

Jade est une plate-forme multi-agent entièrement implémentée en JAVA. Elle permet de développer des agents selon des modèles imposés et qui communiquent par envoi de message (fipa-ACL). De même, elle offre une interface graphique utilisateur pour contrôler et superviser les états des agents. Néanmoins, la plate-forme Jade ne permet pas d'implémenter les groupes d'agent, ce qui dans la solution de modélisation, représente un critère essentiel. Par conséquent, le choix de Jade comme plate-forme d'implémentation n'est pas compatible avec nos attentes en termes de codage.

Madkit est une plate-forme modulaire et scalable³ écrite en JAVA. L'intérêt principal de Madkit est d'offrir une API (Application Programming Interface) pour permettre de développer des agents qui communiquent à travers l'envoi de messages, mais aussi de considérer la notion de groupes et de rôles. De plus, la plate-forme permet d'avoir une interface graphique pour chaque agent afin de visualiser les messages gérés par ce dernier (Gutknecht et al., 2000). Cependant, Madkit ne possède pas la notion de gestion de l'environnement extérieur qui est un ensemble d'objets (dans le sens de la programmation orientée objet). Tous les concepts devront être considérés comme des agents afin de pouvoir les faire communiquer. Dans notre métamodèle d'implémentation, les ressources ainsi que le produit en circulation sont des objets et ne peuvent pas être représentés par des agents. Dans ce cas, le choix de Madkit contrevient à nos besoins d'implémentation.

Face aux résultats de cette étude, nous avons opté pour l'implémentation d'une plate-forme agentifiée de simulation en se basant sur le langage JAVA. Le choix de JAVA nous a paru évident étant donné que la plupart des plate-formes multi-agent ont aussi sollicité les outils offerts par ce langage mais aussi parce que nous possédons une expérience d'implémentation en JAVA rendant le codage plus facile et rapide.

Ainsi au niveau de la plate-forme de simulation, nous avons intégré la communication entre les agents sans se baser sur un autre système logiciel. Chaque agent possède deux boîtes aux lettres :

- ✉ Une boîte de réception (*mailbox*) : dans laquelle l'agent réceptionne les messages qui lui sont adressés afin de les traiter.
- ✉ Une boîte d'envoi (*sendbox*) : dans laquelle un agent poste les messages destinés aux autres agents.

Dans la plate-forme de simulation, nous avons intégré un agent spécial pour chaque groupe d'agents. Cet agent appelé « Agent facteur » est chargé d'acheminer les messages vers leurs destinataires.

³ Mot très utilisé (*buzzword*) pour indiquer à quel point un système hardware ou logiciel parvient à répondre à une demande grandissante de la part des utilisateurs (de plus en plus de requêtes). Il s'agit d'une capacité de montée en charge. (<http://dico.developpez.com/html/3001-Systemes-scalable.php>)

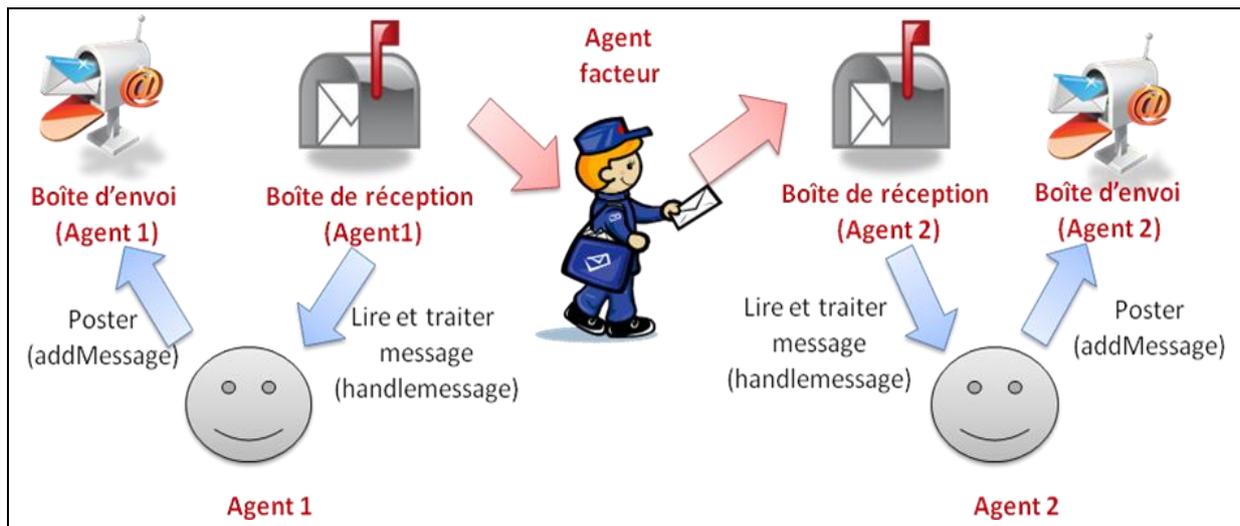


Figure 3. 21 Structuration de la communication entre les agents

La figure 3.21 montre un exemple de communication entre deux agents. L'« Agent 1 » adresse une requête à « Agent 2 » en postant un message dans sa boîte d'envoi. Le facteur récupère le message, vérifie la destination et poste le message dans la boîte de réception du destinataire (dans ce cas « Agent 2 »). L'« Agent 2 » récupère le message dans sa boîte de réception et le traite. Si le message nécessite une réponse, de la même manière « Agent 2 » poste sa réponse dans sa boîte d'envoi et le processus reprend dans le sens inverse.

3.6 Conclusion

Ce troisième chapitre a mis l'accent sur la modélisation informatique et le passage à l'implémentation de notre solution pour l'intégration des groupements de PME dans la chaîne logistique. Dans cette optique, nous avons présenté le paradigme multi-agent qui est l'outil fondamental pour aboutir à la solution de modélisation. Sur la base de ce tour d'horizon, nous avons présenté un métamodèle multi-agent qui exprime les propriétés structurales et comportementales de ce paradigme.

Ainsi, nous avons obtenu le deuxième artefact sur lequel se fondera la finalisation de la solution générée lors du chapitre 2. En effet, nous avons agentifié le métamodèle du domaine (artefact 1) en le fusionnant avec le métamodèle multi-agent (artefact 2) en se basant sur les analogies existantes entre ces deux champs d'application. A la fin de ce chapitre, nous avons étudié le comportement de nos concepts en proposant des protocoles de concertation inspiré

des théories et des outils proposés par la communauté agent. L'instauration de cette dynamique a permis de raffiner le métamodèle agentifié statique et en conséquence d'aboutir à un troisième artefact qui est le métamodèle d'implémentation. A la fin de ce chapitre, nous avons décrit les critères sur lesquels s'est basé le choix de la plate-forme d'implémentation ainsi que le mécanisme de communication entre les agents de la plateforme de simulation dédiée.

Dans la suite de ce manuscrit, nous abordons une partie expérimentale de notre solution. En effet, le chapitre 4 décrit un cas industriel d'un groupement de PME mécatroniques de la région savoyarde. L'analyse du cas donnera lieu à une instanciation d'un modèle de simulation à partir du métamodèle d'implémentation.

Chapitre 4 :

*Modélisation et implémentation d'un
cas industriel*

Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons proposé un cadre méthodologique afin de générer une solution de modélisation répondant aux besoins du tissu industriel savoyard dans le domaine de la mécatronique. Afin de valider l'utilisation et l'implémentation de la solution, nous avons opté pour l'étude d'un cas industriel. Dans ce chapitre, nous introduisons en première section le cas d'un groupement de PME dans la région savoyarde. La deuxième section est une instanciation de notre métamodèle final (le métamodèle d'implémentation). L'aboutissement à un modèle du groupement de PME qui est implémentable (ou programmable) est l'objectif de la phase finale. Ce dernier chapitre correspond à la dernière étape du processus de développement adopté (Figure 4.1).

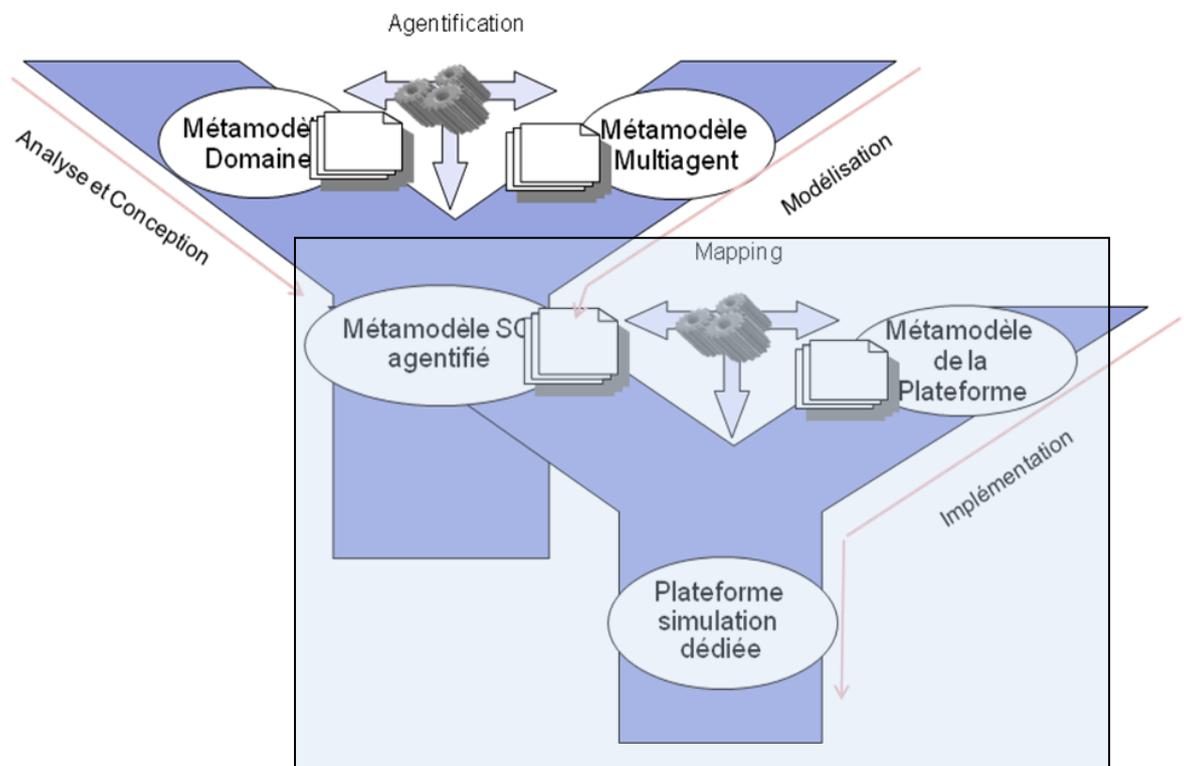


Figure 4. 1 La phase implémentation de ArchMDE

4.1 Description d'un cas industriel

Le cas industriel que nous étudions dans ce chapitre est un groupement de PME. Pour des raisons de confidentialité, nous avons choisi de garder anonyme le nom du groupement et de l'appeler « Grp-France ». Ce groupement joue le rôle de prestataire de produits

mécatroniques sur le territoire français et le Benelux. Il fait partie d'une chaîne logistique mondiale répartie sur plusieurs sites géographiques. Ainsi, les produits sont fabriqués dans les usines en Chine et en Thaïlande, puis distribués dans le monde entier à travers des prestataires tels que « Grp-France », « Grp-UK »... La partie production est invisible aux prestataires. En effet, en prenant l'exemple des filiales en Europe, les besoins sont regroupés annuellement par « Grp-UK » et envoyés aux responsables de planification de la production. D'autre part, les différents groupements de la chaîne logistique globale se coordonnent occasionnellement entre eux à travers des prévisions et des comparaisons d'indicateurs ou de résultats.

Dans ce qui suit, nous décrivons la structure et les processus gérés par le groupement « Grp-France ».

4.1.1 Les acteurs du groupement « Grp-France »

Cette section décrit les différents acteurs qui collaborent dans le groupement « Grp-France » afin d'accomplir l'objectif et la tâche qui leur sont assignés au niveau de la chaîne logistique globale. Nous avons choisi de classer les acteurs selon leur rôle et ceci conformément à la vision structure.

- ✎ *Les gestionnaires* : ce sont des acteurs du groupement qui supervisent la circulation des flux dès l'arrivée des cartons sur le quai de Marseille jusqu'à leur livraison. Ils coordonnent les activités des autres maillons de la chaîne, planifient les besoins pour toute la chaîne et se tiennent au courant de l'évolution des événements dans les processus et le respect des conditions de la livraison. Ils gèrent aussi le SAV en cas de litige.

- ✎ *Les entreposeurs* : ce sont des PME du groupement qui prennent en charge le stockage des produits et la préparation des commandes. Pour les affrètements, une PME prend en charge 99% des expéditions. Un autre entreposeur est parfois sollicité comme base d'expédition dans le cas où la première PME est indisponible. Une troisième PME prend en charge l'expédition des colis.

✎ *Les transporteurs* : plusieurs compagnies de transport sont intégrées au groupement. Nous les différencions selon le mode de transport, la destination et le type de livraison :

- *Transport Maritime* : une PME prend en charge 90% des expéditions qui partent de la Chine pour l'approvisionnement annuel. Une deuxième PME a la responsabilité de l'approvisionnement pour l'ajustement des commandes clients. Ces expéditions exceptionnelles se font à partir de la Thaïlande.
- *Transport terrestre* : une PME s'occupe du transport des commandes de l'entrepouseur vers les clients de « Grp-France » ou vers un autre fournisseur de transport dans le cas de certaines destinations vers le Benelux.

Cependant, nous avons identifié un autre acteur, qui n'est pas une composante intégrante du groupement, mais qui constitue un acteur principal dans la chaîne logistique globale. Cet acteur est le client final du groupement auquel s'adressent les prestations. Ils peuvent être des grandes structures (Hyper ou supermarché, entrepôts) ou bien à des détaillants (spécialistes ou petits magasins). La figure 4.2 représente les différentes organisations impliquées dans le groupement ainsi que les relations existantes entre elles.

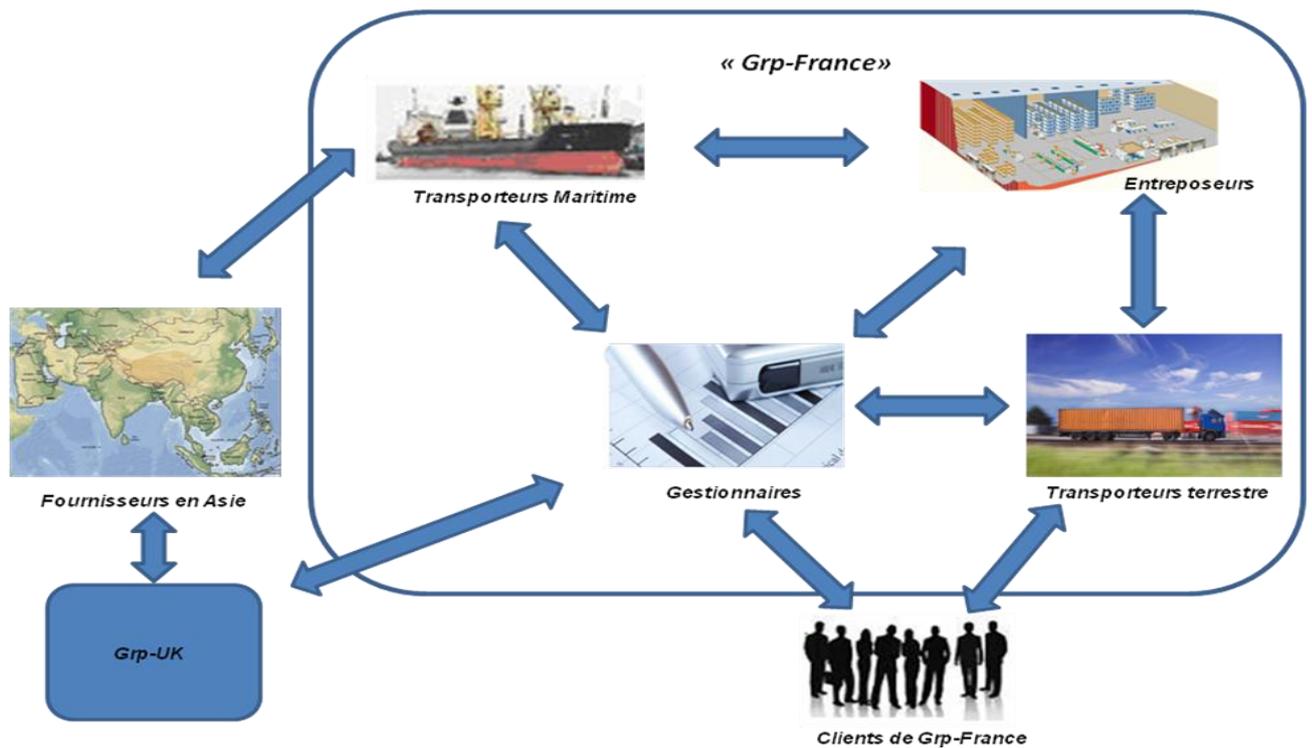


Figure 4. 2 Le réseau de « Grp- France »

4.1.2 Les processus

Au niveau de la chaîne logistique de « Grp-France », nous considérons 4 macros processus issus de la littérature (modèle SCOR) :

☞ La planification : se porte sur la prévision de la demande. Ainsi, la planification des besoins se fait à travers une application MRP développée en interne. Cet outil permet au groupement de prévoir les demandes annuelles par mois et ceci selon les données recueillies sur les ventes réelles de l'année précédente et l'état du stock.

☞ L'Approvisionnement (ou le stockage) : est pris en charge par les entreposeurs du groupement

- Réception et contrôle des conteneurs
- Dédouanement des conteneurs

- Stockage des produits reçus
- Gestion du stock

☞ La Distribution : constitue l'essence même de l'activité du groupement. Elle concerne toutes les activités qui prennent en charge les commandes clients et leur livraison. Selon le cahier des charges de « Grp-France » pour le transport et la distribution en France et au Benelux, les activités qui sont nécessaires à la réalisation de la prestation sont :

- La gestion de la commande :
 - Le gestionnaire annonce les lots à livrer avec les informations nécessaires de la commande aux autres acteurs du groupement.
 - Le gestionnaire contacte le destinataire pour convenir d'un rendez-vous et le communique au transporteur.
 - Le gestionnaire lance la commande la veille du jour d'enlèvement de l'entrepôt.
 - L'entreposeur prépare la commande en tenant compte du jour et de l'heure de l'enlèvement.
- La gestion du transport :
 - Le transporteur se présente à l'entrepôt le jour et à l'heure convenue avec les références du gestionnaire.
 - Un contrôle contradictoire est effectué entre entreposeur et transporteur de prise en charge afin de matérialiser le transfert de responsabilité.

- La distribution : se fait en deux étapes. La première est la livraison du produit en bon état au client à l'heure et à la date prévue. La deuxième est de signaler tout incident relatif à la livraison (retard livraison, refus client, un manquant constaté, etc.) à travers un mail afin de garder une traçabilité.
- ✂ Gestion du retour : tout colis ou expédition qui présente des cas de litiges est retourné à l'entreposeur de « Grp-France ». Ce processus suit le schéma suivant :
- Le client retourne le produit au magasin.
 - Le transporteur du magasin prend rendez-vous avec l'entrepôt.
 - Le transporteur livre les commandes qui présentent des litiges à l'entrepôt.
 - L'entreposeur passe l'information au gestionnaire pour mettre à jour son application MRP.

La figure 4.3 reprend la structure du réseau « Grp-France » en mettant l'accent sur le sens de circulation du flux physique et du flux de données nécessaires à l'accomplissement des processus.

✎ des données informationnelles : ce sont toutes les informations nécessaires à la réalisation d'une prestation, afin de garder une traçabilité de l'acheminement des produits mais aussi de livrer le bon produit à l'endroit et à l'heure prévus. Dans le cas du groupement considéré, « Grp-France » gère, dans la plupart des cas, le passage des flux d'information entre les différents acteurs. Dans ce qui suit, nous intégrons les informations partagées entre les acteurs du groupement et le client final.

- Transporteur - entreposeur : document relatif à la commande spécifiant les références des envois à charger, la quantité, le lieu, la date et la plage horaire.
- Transporteur – client : date et plage horaire pour la livraison.
- Transporteur –Gestionnaire : état de la livraison, date de la livraison (en cas de transport maritime).
- Gestionnaire – entreposeur : le jour de l'enlèvement de la commande, la quantité et les références des produits, ordre de retour (en cas de litige).
- Gestionnaire – client : ordres de commande, demandes de retour de produits (cas de litige).
- Entreposeur – client : en cas de litige, le client communique à l'entreposeur la date et l'heure de la réception des produits retournés.

✎ Des données décisionnelles : ce sont les données caractérisant une décision au niveau de la chaîne. Grp-France réalise un plan de ventes qui sera transmis à « Grp-UK » qui le transmet à son tour au groupement chargé de la production au niveau de la chaîne globale. Au niveau du groupement étudié, la PME

gestionnaire collabore avec l'entreposeur principal afin de réaliser un plan de gestion de stock considéré comme le cœur des autres processus.

✎ Des Métriques : au niveau du groupement, chaque acteur calcule des indicateurs afin de pouvoir piloter au mieux ses ressources. Dans ce qui suit nous allons présenter les indicateurs qui reflètent le fonctionnement du groupement et sur lesquels se basent les décisions stratégiques.

Tableau 4. 1 Indicateurs du groupement « Grp-France »

<i>Indicateur</i>	<i>Calcul</i>
Responsabilité litige	Nbre de litiges / nbre d'expéditions
Taux du coût logistique (préparation commande + chargement + transport)	Coût logistique / budget logistique
Satisfaction client	Nbre de réclamations client / nbre de commandes livrées

4.2 Modèle d'implémentation du cas industriel

Dans cette section, nous étudions le cas industriel en générant les modèles nécessaires à son implémentation. Dans cette optique, nous définissons la correspondance entre les éléments clé identifiés au niveau du cas industriel et les concepts du domaine. Par la suite, nous instancions le métamodèle d'implémentation afin d'aboutir à un modèle représentant le cas industriel prêt à être implémenté dans une plateforme de programmation.

4.2.1 Etude et conceptualisation du cas industriel

Selon la description faite dans la première section de ce chapitre, la chaîne logistique globale est composée de plusieurs sites géographiques ayant chacun une tâche spécifique à réaliser et avec une visibilité réduite au niveau local. Ainsi, la production est basée en Chine et en Thaïlande et la distribution des produits dans les pays européens. Force est de constater qu'au niveau du cas de la chaîne logistique étudiée, la visibilité est définie à travers la localisation géographique et la tâche assignée.

En se basant sur le métamodèle conceptuel du domaine, nous considérons la chaîne logistique globale comme un réseau reliant des groupements qui sont définis selon leur localisation géographique. Ainsi, le groupement étudié « Grp-France » est représenté conceptuellement par *SSC-France*. De même, les autres groupements ont le préfixe *SSC-* associé au nom du pays d'hébergement. La figure 4.2 reflète le modèle conceptuel global du cas étudié.

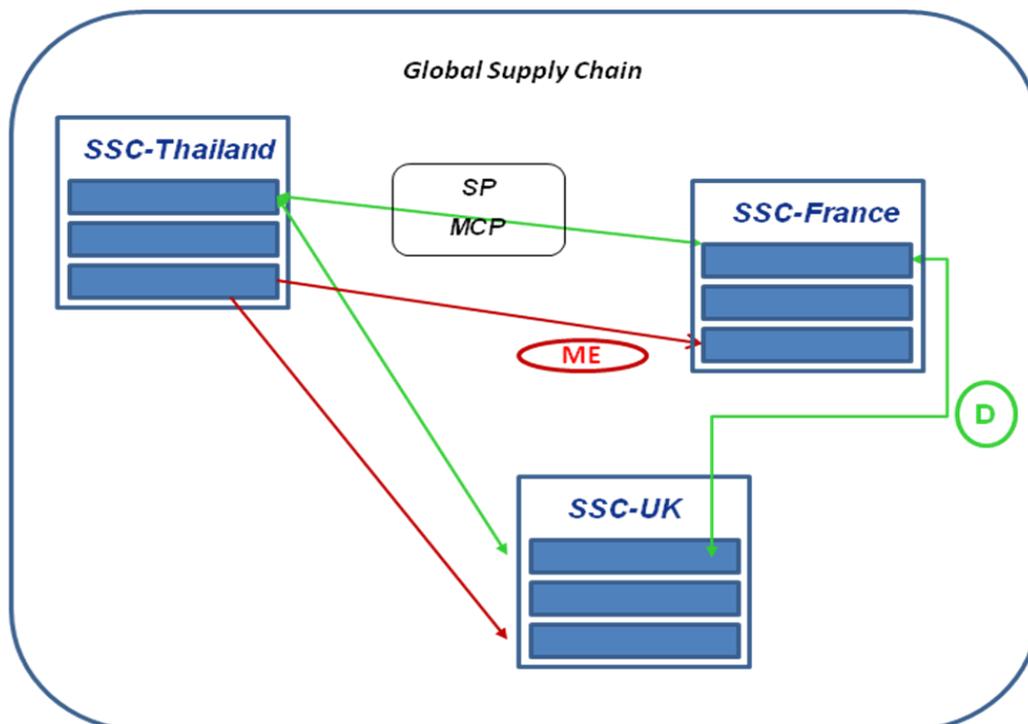


Figure 4. 4 Modèle conceptuel de la chaîne logistique de Grp-France

Ensuite, nous nous intéressons à la construction du modèle conceptuel de la *SSC-France* en nous basant sur la description des acteurs, des processus et des données du cas « Grp-France ».

Analogiquement au métamodèle du domaine, nous avons identifié les éléments clés qui composeront le modèle du cas industriel. Premièrement, nous avons étudié et conceptualisé les acteurs selon leur rôle dans le groupement et leur implication dans la prise de décision. Ensuite, nous avons identifié les ressources nécessaires à la réalisation des tâches affectées aux acteurs. Comme troisième étape, nous avons identifié les processus physiques les plus importants à intégrer dans le modèle de la *SSC-France* ainsi que les indicateurs d'évaluation qui leur sont reliés.

Ainsi, nous avons identifié précédemment 4 fonctions que les acteurs peuvent s'octroyer dans le groupement. Pour garder un fil conducteur entre les publications et le manuscrit, les appellations attribuées aux acteurs sont construites par la combinaison de la première lettre du rôle en anglais avec un numéro attribué aléatoirement :

- ✎ Les gestionnaires : c'est un rôle tenu par 3 PME dans le groupement. Ils supervisent le fonctionnement global de la *SSC-France* et coordonnent ses activités avec l'ensemble des *SSC* de la chaîne globale. Chacun d'entre eux a un rôle de pilotage dans la *SSC*. Ainsi, nous attribuons les appellations suivantes pour chaque PME : L1, L2 et L3 (acteurs « Logistician »). Ces 3 PME sont conceptualisées par des *Monitoring Actors (MA)*.
- ✎ Les entreposeurs : nous avons identifié deux entreposeurs que nous appelons S1 et S2 (acteurs « Storehouse »). S1 représente la PME qui est fortement impliquée dans le stockage, la préparation de la commande mais aussi dans la planification des besoins. Pour cette raison nous avons choisi de le représenter comme un *MA* ayant un double rôle dans la *SSC*. La PME représentée par S2 est rarement sollicitée pour le stockage et n'intervient pas dans la prise de décision. Ainsi, nous la représentons par un acteur exécutif (*EA*).
- ✎ Les transporteurs : deux transporteurs sont intégrés dans la *SSC-France*. Une PME s'occupe du transport maritime et l'autre du transport sur le continent français et le Benelux. Nous dénommons respectivement ces deux PME C1 et C2 (acteurs « Carriers »). Elles seront représentées par le concept *EA* étant

donné qu'elles exécutent les plans mis en place par les gestionnaires et l'entreposeur S1.

D'autre part, l'identification des ressources est faite intuitivement en tenant compte des rôles attribués aux acteurs exécutifs. Le tableau suivant met en évidence les acteurs, les ressources ainsi que les correspondances avec le métamodèle conceptuel.

Tableau 4. 2 Instanciation des acteurs et des ressources de « SSC-France »

<i>Acteurs</i>			<i>Ressources</i>		
<i>Fonction</i>	<i>Nom dans le modèle</i>	<i>« Instance de »</i>	<i>Fonction</i>	<i>Nom dans le modèle</i>	<i>« Instance de »</i>
Entreposeur	S1	MA	Entrepôt	Ent_1	RESSOURCE
			Réceptionniste	Rec_1	
			Préparateur	Pre_1	
Entreposeur secondaire	S2	EA	Entrepôt	Ent_2	
			Réceptionniste	Rec_2	
			Préparateur	Pre_2	
Transporteur maritime	C1	EA	Bateau	B_1	
Routier	C2	EA	Camion	B_2	

Par la suite, nous avons identifié les processus physiques. La description faite auparavant a décelé les macros processus ainsi que les tâches spécifiques dont chaque acteur est responsable. Etant donné l'abondance des processus présents, nous allons faire apparaître les principales opérations qui définissent les macros-processus physiques : le stockage ou l'approvisionnement), la distribution et la gestion du retour. Ces trois macros-processus sont appelés respectivement : PhP_stock, PhP_dis et PhP_ret. Le processus de planification est un

macro-processus de management qui sera traduit par les processus de pilotage et de contrôle (MCP). Le tableau 4.3 énumère les différents macros-processus ainsi que les opérations élémentaires qui les composent.

Tableau 4. 3 Identification et instanciation des processus physiques

<i>Macros processus physiques</i>			<i>Processus physiques élémentaires</i>		
<i>Nom</i>	<i>Nom dans le modèle</i>	<i>« Instance de »</i>	<i>Nom</i>	<i>Nom dans le modèle</i>	<i>« Instance de »</i>
Distribution	PhP_dis	PhP	Préparation commande	Op_dis_1	PhP
			Expédition	Op_dis_2	PhP
Stockage	PhP_stock	PhP	Transport Asie/Marseille	Op_stock_1	PhP
			Transport Marseille/entrepôt	Op_stock_2	PhP
			Réception et stockage	Op_stock_3	PhP
Gestion de retour	PhP_ret	PhP	Retour magasin	Op_ret_1	PhP
			Livraison échange	Op_ret_2	PhP

Après avoir identifié les processus physiques à intégrer dans notre modèle *SSC-France*, nous mettons l'accent sur les principaux indicateurs et les actions à mettre en place dans le cas d'une déviation. Nous avons proposé ces indicateurs comme une base d'évaluation du fonctionnement du groupement en addition avec les indicateurs déjà mis en place avant notre étude de cas. Les indicateurs et les actions associées font l'objet du tableau 4.4.

Tableau 4. 4 Définition des indicateurs et des actions

<i>Processus</i>	<i>Indicateurs</i>		<i>Actions</i>	
<i>Nom</i>	<i>Intitulé (Nom dans le modèle)</i>	<i>Méthode de calcul</i>	<i>Intitulé (nom dans le modèle)</i>	<i>Evaluation / objectif</i>
Op_dis_1	Temps de préparation commande (Tps_prep_comm)	Temps de préparation de la commande / temps de préparation moyen	Réorganisation (act_prep_comm)	$V_{(I)}.calculé > Ind_seuil_max$
	Taux de commande juste (Tx_comm_juste)	Nbre de commandes justes / nbre de commandes	Formation (act_comm_juste)	$V_{(I)}.calculé < Ind_seuil_min$
Op_dis_2	Taux respect des dates (tx_resp_date)	Nbre de commandes à l'heure / nbre de commandes	Formation	$V_{(I)}.calculé < Ind_seuil_min$
	Taux de remplissage entrepôt (Tx_remplissage)	Volume de stockage utilisé / Volume de stockage	Référer au système de pilotage	Dans tous les cas de déviation
Op_Stock_1 Op_Stock_2	Taux de dégradation (Tx_degrad)	Valeur produits dégradés / valeur du stock	Référer au MA	Dans tous les cas de déviation
Op_stock_3	Délai de réception (delai)	Délai	Personnel à disposition (act_aug_personnel)	$V_{(I)}.calculé < Ind_seuil_min$
	Taux remplissage entrepôt (tx_remplissage)	Volume de stockage utilisé / Volume de stockage	Référer au MA	Dans tous les cas de déviation
	Taux de rotation du stock (tx_rot_stock)	Taux de sortie / stock moyen annuel	Référer au MA	Dans tous les cas de déviation

4.2.2 Génération du modèle d'implémentation du cas industriel

Dans le paragraphe précédent, nous avons étudié et mis en place les éléments clés du cas industriel ainsi que leur description structurale et comportementale et les relations existantes entre eux. Ces éléments constituent des instances des concepts définis dans le métamodèle d'implémentation (le métamodèle du domaine raffiné et agentifié). Ainsi l'instanciation du métamodèle d'implémentation donne lieu à un modèle implémentable du cas industriel étudié (voir annexe B). La figure 4.5 met en évidence le modèle de la SSC-France à la fin de cette instanciation.

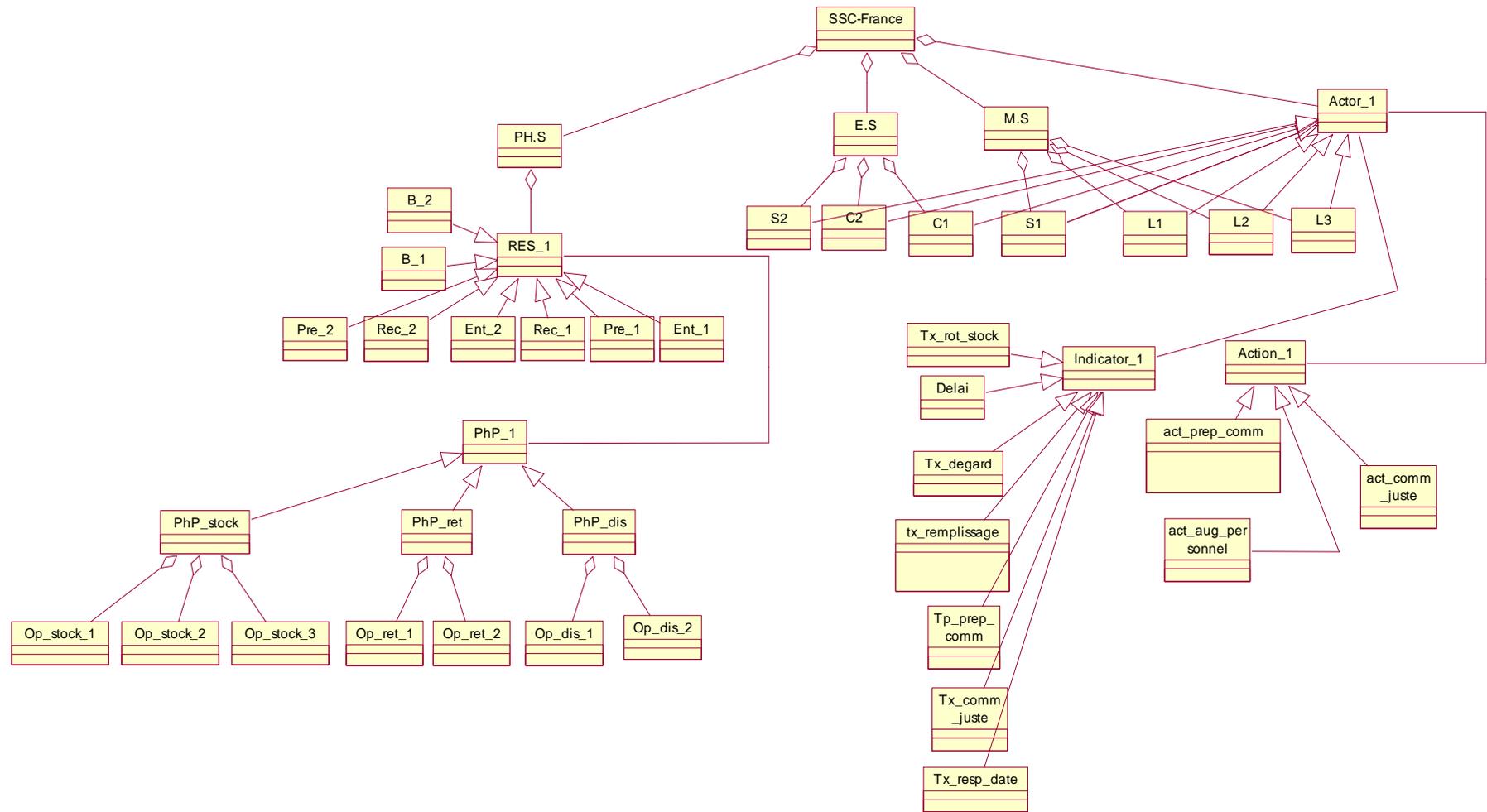


Figure 4. 5 Modèle de la SSC-France

4.3 Conclusion

Ce chapitre est une vérification de la compatibilité de notre métamodèle avec la réalité du terrain. Ainsi nous avons étudié et analysé un cas industriel d'un groupement de PME mécatronique dans la région savoyarde (précisément en Haute Savoie). Cette analyse nous a permis d'identifier les éléments clés de l'exemple, de les conceptualiser et les modéliser avec la solution de modélisation proposée. Le modèle obtenu fait l'objet d'une implémentation en langage JAVA afin de tester la structure et le comportement des différents concepts agentifiés avant d'entamer une implémentation de la plateforme.

Conclusion Générale

Et

Perspectives

5.1 Bilan des travaux

Face aux exigences de l'environnement et aux mutations non contrôlées de ce dernier, la chaîne logistique et son intégration à travers les différents acteurs est devenue un atout concurrentiel quel que soit le domaine de production, qu'il soit de biens ou de services. Le domaine de la mécatronique se situe parmi les plus sensibles à ces exigences. Nos travaux de recherche sur la chaîne logistique s'inscrivent dans ce domaine puisqu'ils s'orientent vers la recherche d'une solution pour un tissu industriel composé particulièrement de PME situées dans la vallée de l'Arve en Haute-Savoie mais aussi en Savoie. Chaque PME est spécialisée dans un domaine spécifique mais avec des ressources très limitées. Afin de combler leurs limites et être plus actives dans le réseau global, les PME se sont groupées et collaborent afin de réaliser une ou plusieurs tâches communes au niveau de la chaîne logistique globale. Ces PME constituent un atout concurrentiel pour la pérennité et la prospérité de l'économie de la région. Le manque de travaux pour ce type d'entreprises et le besoin de ces dernières d'avoir un outil d'aide à la décision répondant à leurs besoins, nous a motivé à entreprendre des recherches dans ce contexte. L'objectif est d'aboutir à un outil d'aide à la décision basé sur la modélisation et la simulation. Le choix de la simulation se justifie, d'une part, par l'absence actuellement de modèles analytiques capables de modéliser la chaîne avec toute sa complexité, et d'autre part, par la puissance de la simulation à gérer le comportement dynamique des chaînes logistiques dans un environnement stochastique. La modélisation est un mécanisme reflétant le système réel qui, quand il est couplé à la simulation, fournit un outil d'aide à la décision qui tient compte de la dynamique du système et du comportement des différents acteurs. L'adoption des multi-agents pour construire notre solution de modélisation, nous a paru une approche pertinente et évidente tant par son analogie avec le domaine de la chaîne logistique, que par la prise en compte du comportement individuel et en groupe des différents acteurs dans la chaîne logistique. Ainsi, ce travail de thèse est basé sur la définition d'un cadre méthodologique et de modélisation adoptant l'approche multi-agent pour l'étude de la chaîne logistique dans un cadre de PME mécatroniques.

Dans cette optique, nous avons choisi d'adopter un processus de développement permettant de séparer le domaine de recherche (le contexte) et la modélisation informatique de notre solution. Ce choix a été alimenté par l'idée d'avoir une solution décrivant le domaine qui soit

indépendante du choix de l'outil de modélisation ; et ceci afin d'avoir une approche plus intégrée du terrain pouvant être réutilisée facilement pour d'autres travaux adoptant une technique de modélisation différente.

La première phase de nos travaux s'est intéressée à l'étude du domaine en puisant dans l'analyse du terrain et dans les travaux réalisés dans la communauté scientifique. Notre contribution s'est concrétisée d'une part au niveau de la méthodologie adoptée pour générer le modèle conceptuel et d'autre part par la construction du métamodèle du domaine. En effet, un tour d'horizon des différentes visions adoptées pour la conception de la chaîne logistique, nous a permis de proposer une méthodologie combinant plusieurs théories pour générer un modèle conceptuel regroupant l'aspect produit, structure et processus d'une chaîne logistique. Dans la suite du développement, nous avons appliqué la méthodologie proposée afin de conceptualiser les éléments du terrain d'étude. La conceptualisation a permis d'avoir un premier artefact de la solution de modélisation. Cet artefact modélise les caractéristiques structurales et architecturales des concepts du domaine.

La deuxième phase de ce travail met l'accent sur le paradigme multi-agent sur lequel se base la modélisation informatique du métamodèle identifié dans la phase précédente. Dans cette optique, nous avons étudié un métamodèle définissant les propriétés des systèmes multi-agents. Lors de cette phase, notre contribution se manifeste dans la définition et l'étude du comportement dynamique du métamodèle agentifié du domaine. Ainsi, nous avons étudié les propriétés des systèmes multi-agents afin d'agentifier par analogie les concepts du domaine. Le deuxième artefact de la solution de modélisation obtenue suite à l'agentification, a donné lieu à un métamodèle statique et agentifié du domaine. Par la suite, nous avons étudié le comportement dynamique de ces concepts en puisant dans les outils et techniques agents. Nous avons mis en place les protocoles permettant aux différentes entités de synchroniser et de piloter la chaîne logistique globale. A la fin de cette phase, nous avons extrapolé les résultats de l'agentification et de la mise en place des protocoles afin de générer un métamodèle implémentable de la plateforme. Ce dernier métamodèle représente le dernier artefact de la solution de modélisation répondant à notre objectif. Arrivés à ce stade dans le processus de modélisation, nous avons abouti à un métamodèle de la plateforme de modélisation dont le mapping avec une plateforme de programmation donne lieu à l'outil escompté.

La dernière phase de ce manuscrit est une validation des artefacts mis en place dans les phases précédentes. Nous avons décrit un cas industriel d'un groupement de PME situé en Haute-Savoie. L'analyse du cas nous a permis de dégager les éléments clés et de les extrapoler avec les concepts identifiés. Cette extrapolation a donné lieu à un modèle réel qui est l'objet d'une instanciation du métamodèle d'implémentation. Dans l'état actuel de la plateforme qui est en cours de réalisation, les objets du modèle ont été mappés avec les bibliothèques proposées par l'environnement JAVA. Ce cas nous permet d'avoir une vision minimale de l'implémentation des concepts et d'apporter, si le cas l'exige, des améliorations au métamodèle de la plateforme.

Nos travaux présentent la première approche et étude dans ce contexte de recherche. L'objectif était de cerner le domaine de recherche et de proposer un cadre méthodologique et une solution de modélisation prenant en compte tous les aspects fonctionnels et managériaux d'un groupement de PME mécatroniques intégré dans une chaîne logistique mondiale. Ainsi, nous avons abouti à une solution de modélisation, d'une part, évolutive du fait que les artefacts sont séparés et font objet chacun d'une analogie avec les éléments des autres artefacts ; et d'autre part, réutilisable grâce à la séparation de la modélisation du domaine de l'outil scientifique utilisé pour l'étude de son comportement. Ainsi la solution proposée peut être qualifiée d'ouverte et modifiable selon les besoins.

Les travaux présentés dans ce manuscrit de thèse ont fait l'objet de cinq communications avec actes et comité de lecture dans des conférences internationales (*Tounsi et al., 2009a ; Tounsi et al., 2009b ; Tounsi et al., 2009c ; Tounsi et al., 2009d*) et d'un article dans une revue scientifique (*Tounsi et al., 2010*).

5.2 Perspectives des travaux

Les perspectives de ce travail peuvent être formulées dans plusieurs axes. A court terme, une des perspectives les plus importantes est d'achever l'implémentation de la plateforme de simulation pour pouvoir tester la solution mise en place et son déploiement sur d'autres exemples de chaînes logistiques.

Un travail approfondi sur un nouveau type d'indicateurs lié à la chaîne logistique « durable » et leur intégration dans l'analyse de la performance des mécanismes de concertation au niveau de la solution seraient également une perspective intéressante. En effet, dans la région Rhône-Alpes et dans le cadre du cluster GOSPI, des travaux sont déjà menés par le projet COPILOTES et son successeur COPILOTES II sur l'analyse de la performance des pratiques collaboratives dans les PME/PMI.

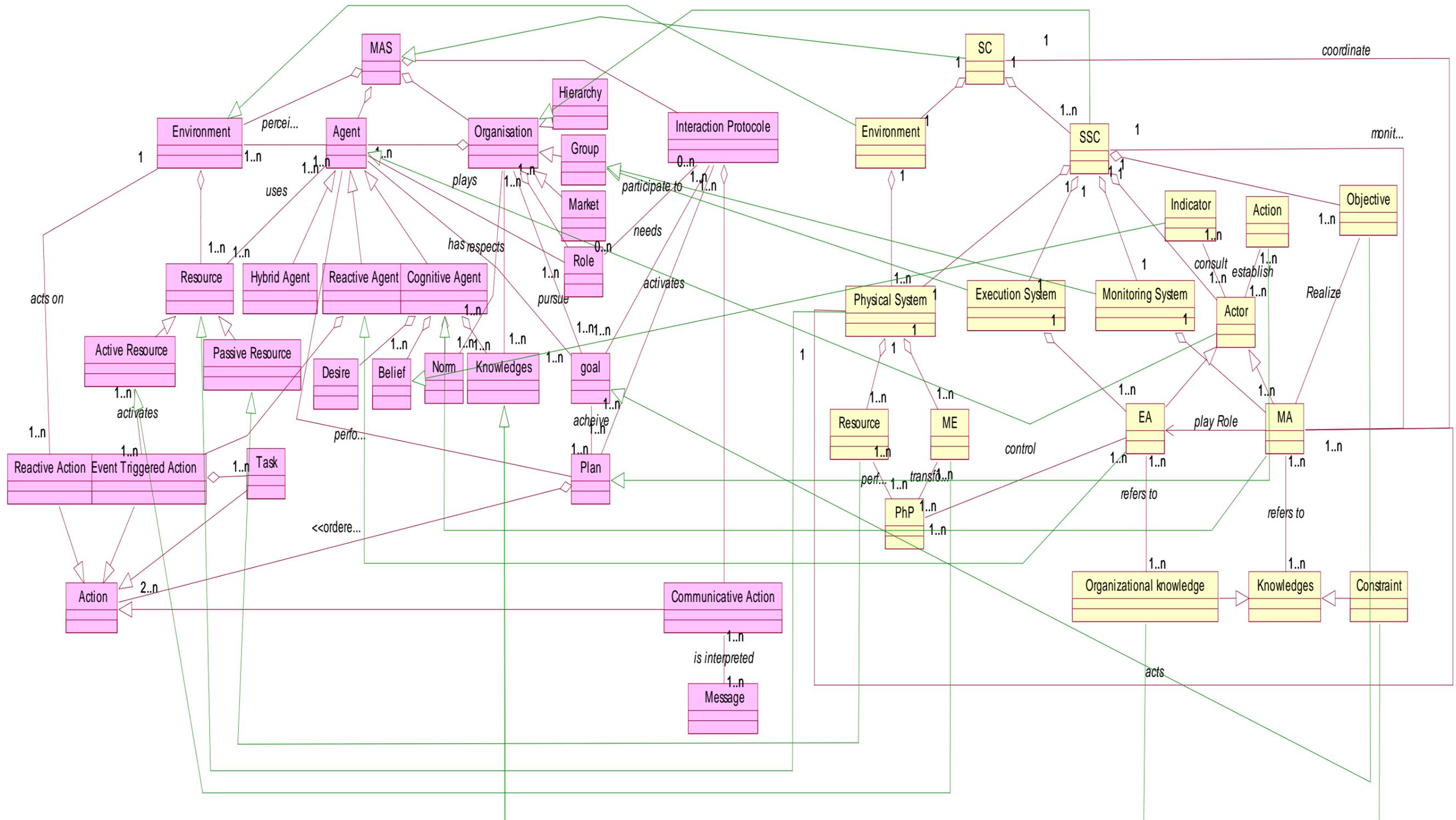
D'autre part, du fait que la solution aboutie est modulaire, ouverte et conforme aux attentes de futurs utilisateurs et chercheurs, des modules d'approfondissement ou d'amélioration des entités et des protocoles peuvent être intégrés. La structure et le comportement des acteurs intelligents peuvent intégrer des modules de raisonnement et d'apprentissage afin d'améliorer leurs comportements décisionnels. Une amélioration des protocoles prenant en compte d'autres paramètres peut aussi être une perspective du travail réalisé.

Cependant, d'autres travaux peuvent s'intéresser au métamodèle du domaine et non à l'outil de modélisation informatique. La proposition d'une autre forme de modélisation (analytique) peut mener à une confrontation intéressante des résultats. Cette confrontation donnera lieu à une analyse pouvant aboutir au choix de la meilleure méthode ou même à la fusion des deux et d'enrichir ainsi la solution proposée ou même les pratiques évoquées dans la littérature.

Ce travail de recherche tant par son ouverture que par sa réutilisation, peut déboucher sur d'autres projets de recherche selon les besoins des futurs successeurs.

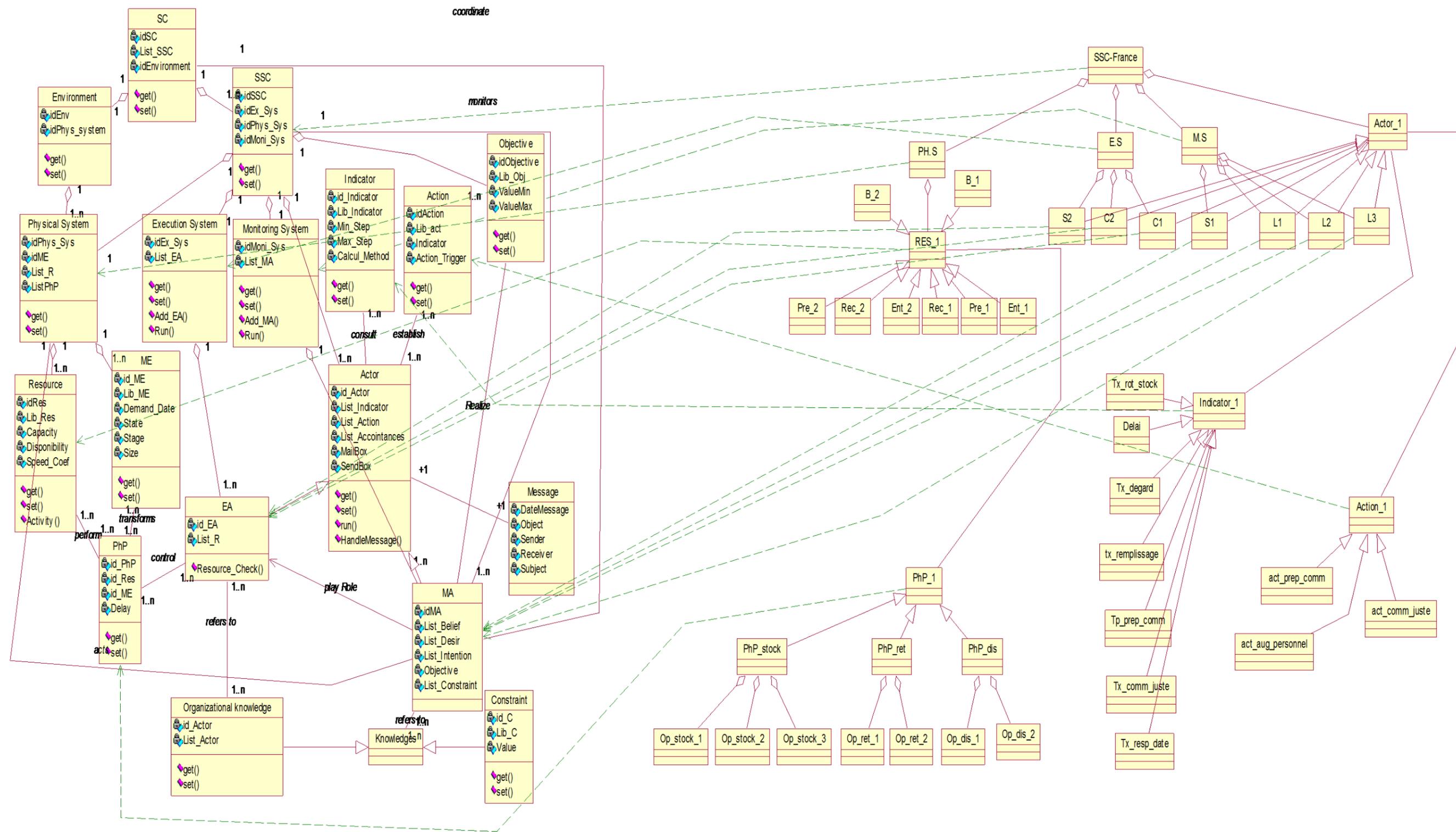
Annexe A

Métamodèle du domaine agentifié

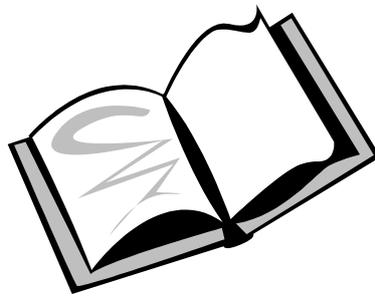


Annexe B

Instanciación du métamodèle d'implémentation



Glossaire et Abréviations



Agent : Entité informatique autonome et proactive, ayant la capacité de faire émerger une intelligence quand elle est en communauté.

BDI (Belief, Desir, Intention) : C'est une architecture cognitive d'un agent.

CSP (Cooperative Solving Problem) : Est un schéma abstrait proposé par Wooldridge et Jennings afin de structurer un protocole de prise de décision collective.

EA (Executive Actor) : Un concept modélisant l'acteur exécutif du groupement de PME (SSCs) ayant le rôle de synchroniser le flux de produits et de contrôler la couche physique. Le EA ne participe pas à la prise de décision mais son fonctionnement est fédéré par les plans d'action préétablis par la couche de pilotage (Monitoring System).

Execution System : Représente la couche réactive du groupement de PME (SSCs). Il regroupe les acteurs d'exécutions (EA) du groupement.

MA (Monitoring Actor) : Est un concept modélisant l'acteur décideur du groupement de PME (SSCs). Le MA pilote la SSC en interne mais aussi son fonctionnement dans la chaîne logistique globale.

MCP (Monitoring and Control Process) : Est un concept représentant une famille de processus apparaissant dans la chaîne logistique. Un MCP est un processus de pilotage et de contrôle du fonctionnement de la SSC en interne et avec les autres nœuds de la chaîne logistique globale. Il prend place dans la couche intelligente de la SSC (Monitoring System).

ME (Moving Entity) : Est un concept représentant le produit en circulation au niveau du système physique (Physical System).

Monitoring System : Représente la couche intelligente de la SSC. Il regroupe les acteurs décisionnels (MA) du groupement de PME.

OCP (Operationnel Control Protocol) : Est une famille de processus apparaissant au niveau de la couche d'exécution (Execution System) de la SSC. Un processus OCP permet aux EAs de synchroniser et de contrôler le système physique (Physical System).

PhP (Physical Process) : Est un concept modélisant un processus physique apparaissant dans le Physical System. C'est un ensemble de tâches qui vont être prises en charge par les acteurs d'exécution (EA).

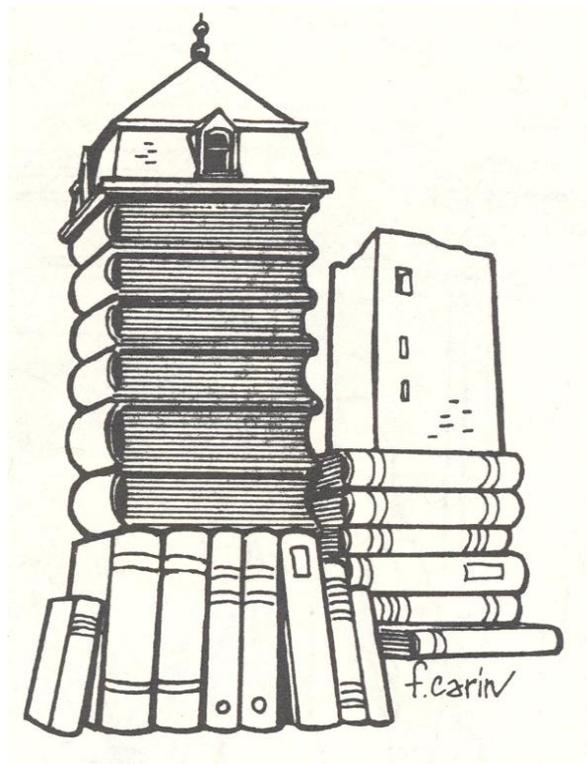
Physical System : Est la couche physique qui représente le périmètre d'influence des acteurs de la SSC.

R (Resource) : Est un concept représentant une ressource de la couche physique qui peut être matérielle ou humaine non décisionnelle (opérateur).

SP (Strategical Process) : Est une famille de processus représentant les décisions à long terme. Les SPs mettent en relation les différentes SSCs de la chaîne globale.

SSC (Sub Supply Chain) : Est un concept représentant un groupement de PME dans la chaîne logistique globale.

Références Bibliographiques



A

- [**Akbari-Jokar, 2001**] Akbari Jokar M.R., 2001. *Sur la conception d'une chaîne logistique (une approche globale d'aide à la décision)*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France.
- [**Andel,1997**] Andel T., 1997. *Information supply chain : set and get your goals*. Transportation and Distribution, vol.38, n°2, pp. 33.
- [**Anderson, 1990**] Anderson E.J et Narus J.A, 1990. *A model of distributor firm and manufacturer firm working relationships*. Journal of marketing, vol. 54, January, pp. 42-58.
- [**Assens, 1994**] Assens C., 1994. *Du modèle bureaucratique au modèle organique*, Research Notebook n°232, DMSP.
- [**Austin, 1962**] Austin J.L, 1962. *How To Do Things with Words*. Clarendon Press.
- [**Azaiez, 2007**] Azaiez S., 2007. *Approche Dirigée par les modèles pour le développement de systèmes multi-agents*. Thèse de l'Université de Savoie, Spécialité Informatique. Décembre 11, Annecy le vieux, France.
- [**Azaiez et al., 2007**] Azaiez S., Habchi G., Huget M.P, Pralus M., and Tounsi J., 2007. *Multiagent oriented modelling and simulation for manufacturing systems control*. In Proceedings of the 5th IEEE International conference in Industrial Informatics, July 23-27, Vienna, Austria.

B

- [**Bagchi et Skjoett-Larsen, 2005**] Bagchi P.K. and Skjoett-Larsen T., 2005. *Supply chain integration: an European survey*, International Journal of Logistics Management, vol 16, n° 2, pp.275-294.
- [**Bagchi et al., 1998**] Bagchi S., Buckley S., Ettl M., Lin G., 1998. *Experience using the IBM supply chain simulator*. In Proceedings of the winter Simulation Conference.
- [**Batra et al., 1990**] Batra D., Hoffer J. A., Bostrom R. P., 1990. *Comparing representations with relational and EER models*. Comm. ACM 33 126–139.
- [**Batra et Marakas, 1995**] Batra D., et Marakas G.M, 1995. *Conceptual data modeling in theory and practice*. European Journal of Information Systems 4 185–193.
- [**Beamon, 1998**] Beamon B.M, 1998. *Supply chain design and analysis: models and methods*. International Journal of Production Economics, vol. 55, pp. 281-294.
- [**Bonabeau et al., 1999**] Bonabeau E., Dorigo M., et Theraulaz G., 1999. *Swarm Intelligence: from natural to artificial intelligence*. Oxford University Press, Inc.
- [**Botta-Genoulaz et al., 2008**] Botta-Genoulaz V., Lamothe J., Pirard F., Riane F. et Valla A., 2008. *Simulation à évènements discrets pour la gestion de chaînes logistiques*. Chapitre 3 de : La simulation pour la gestion des chaînes logistiques, Lavoisier, Hermes Science Publications.
- [**Bowersox et Closs, 1996**] Bowersox D.J, Closs D.C, 1996. *Logistical Management: the integrated supply chain process*. McGraw-Hill Series in Marketing, New York: the MacGraw-Hill Companies.
- [**Bratman et al., 1988**] Bratman M. E., Israel D. J., et Pollack M., 1988. *Plans and resource-bounded practical reasoning*. Computational Intelligence, Vol. 4, pp. 349-355.
- [**Brooks, 1986**] Brooks R., 1986. *A Robust Layered Control System for a Mobile Robot*", IEEE Journal of Robotics and Automation, 2, 1, pp.14-23.
- [**Burlat et Boucher, 2001**] Burlat P. et Boucher X., 2001. *Pilotage distribué des groupements d'entreprises : Modélisation et perspectives*. Journal Européen des systèmes automatisés, Novembre, vol.35, n° :7-8, pp.991- 1018.

C

- [**Christopher, 1992**] Christopher, 1992. *Logistics and Supply chain managements*. Pitman Publishing, London.
- [**Chopra et Meindl, 2001**] Chopra, S. et Meindl, P., 2001. *Supply Chain Management: strategy planning and operation*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-hall.
- [**Cooper et al., 1997**] Cooper M., Ellram L.M, Gardner J.T, et Hanks A.M, 1997. *Meshing multiple alliances*. Journal of Business Logistics, vol. 18, n°1, pp. 67-89.
- [**Cooper et al., 1997**] Cooper M., Lambert D.M. and Pagh J.D., 1997. *Supply chain management: more than a new name for logistics*. International Journal of Logistics Management, vol 18, n° 2, pp. 1-13.

D

- [**Davenport, 1993**] Davenport, T.H, 1993. *Process Innovation*. Boston: Harvard Business School Press.
- [**Demazeau et Müller, 1990**] Demazeau Y., et Müller J.P, 1990. *Decentralized Artificial Intelligence*. Ed. North-Holland.
- [**Demazeau, 1996**] Demazeau Y., 1996. “Vowels”, Invited lecture, IWDAIMAS96.
- [**D’Inverno et al., 1997**] D’Inverno M., Kinny D., Luck M. et Wooldridge M., 1997. *A Formal Specification of dMARS*. In Proceedings of the Fourth International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages, ATAL’97, Novembre.
- [**Drogoul, 1993**] Drogoul A., 1993. *De la simulation multi-agent à la résolution collective de problèmes. Une étude de l’émergence de structures d’organisation dans les systèmes multi-agents*. Thèse de doctorat, Université Paris 6.
- [**Drucker, 1998**] Drucker P.F, 1998. *Management’s new paradigms*. Forbes, October, pp. 152-177.

E

- [**Ellram et Cooper, 1990**] Ellram L.M et Cooper M.C, 1990. *Supply chain management, partnerships, and the shipper-third-party- relationship*. The International Journal of Logistics Management, vol. 37, n° 2, pp. 1-10.

F

- [**Ferber, 1995**] Ferber J., 1995. *Les systèmes multi-agents – vers une intelligence collective*. InterEditions.
- [**Ferber, 2005**] Ferber J., 2005. *Introduction aux systèmes multi-agents : un point de vue intégral*. Cours à l’université Montpellier II (www.lirmm.fr/~ferber/DEA/COURS_SMA_2005.part1.pdf)
- [**Fischer et al., 1995a**] Fischer K., Müller J.P et Pischel M., 1995a. *Unifying control in a layered agent architecture”* IJCAI95, Agent Theory, Architecture and Language Workshop 95, pp. 240-252.
- [**Fischer et al., 1995b**] Fischer K., Müller J.P et Pischel M., 1995b. *Cooperative transportation scheduling: an application domain for DAI*. Journal of Applied Artificial Intelligence (Special Issue on Intelligent Agents – Eds. M. J. Wooldridge & N. R. Jennings).
- [**Ford et al., 2002**] Ford J., Hakasson H., and Johnsen J., 2002. *How should companies interact in business networks?* Journal of Business Research, 55(2), pp. 133-139.

- [**Fowler, 2004**] Fowler M., 2004. *UML distilled a third edition: a brief guide to the standard object modeling language*. Addison-Wesley.
- [**Frayret et al., 2008**] Frayret J.M, D'amours S., Rousseau A., Harvey S., et Gaudreault J., 2008. *Agent-based supply chain planning in the forest products industry*. International Journal of Flexible Manufacturing Systems, vol. 19, n°4, pp. 358-391.
- [**Fung et Chen, 2005**] Fung R.Y.K et Chen T., 2005. *A multiagent supply chain planning and coordination architecture*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 25, n° 7-8, pp. 811-819.

G

- [**Ganeshan et Harrison, 1995**] Ganeshan, R., and Harrison, T.P., 1995. *An introduction to supply chain management*. Technical report, department of Management Science and Information Systems, The Pennsylvania State University: University Park, PA.
- [**Georgeff et Lansky, 1987**] Georgeff M.P et Lansky A.L, 1987. *Reactive Reasoning and planning*. In Proceedings of the sixth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-87), pp. 677-682, Seattle, WA.
- [**Goldstein et Storey, 1990**] Goldstein, R. C. et Storey V., 1990. *Some findings on the intuitiveness of entity-relationship constructs*. F. H. Lochovsky, ed., Entity-Relationship Approach to Database Design. Elsevier Science Publishers, B. V., North Holland, Amsterdam, 9–23.
- [**Gomez-Perez et al., 2003**] Gomez-Perez A., Corcho O., et Fernandez-Lopez M., 2003. *Ontological Engineering : with examples from the areas of knowledge management, e-commerce and semantic web*. Springer Verlag.
- [**Greene, 1991**] Greene A.H, 1991. *Supply chain of customer satisfaction*. Production and Inventory Management Review and APICS News, vol. 59, n°4, pp. 24-25.
- [**Guizzi, 2005**] Guizzi L., 2005. *Configuration stratégique des PME de sous-traitance traditionnelle: proposition d'une méthode d'aide à la configuration stratégique appliquée aux entreprises de sous-traitance de la vallée de l'Arve*. Thèse pour l'obtention du doctorat en Sciences de Gestion, Université de Savoie, 7 Juillet.
- [**Gutknecht et al., 2000**] GUTKNECHT O., FERBER J. et MICHEL F., 2000. *MadKit: Une expérience d'architecture de plate-forme multi-agents générique*. 8^{ème} Journées Francophones Intelligence Artificielle Distribuée Systèmes Multi-Agents JFIADSMA 2000. Saint-Jean Le Vêtre Octobre 2000.

H

- [**Hitchman, 1995**] Hitchman, S. 1995. *Practitioner perceptions of the use of some semantic concepts in the entity-relationship model*. European Journal of Information Systems 4 31–40.
- [**Houlihan, 1988**] Houlihan, J.B, 1988. *International supply chains: a new approach*. Management Decision, Vol. 26, n° 3, pp. 13-19.
- [**Hogos, 2003**] Hogos M., 2003. *Essentials of supply chain Management*. John Wiley & Sons Inc, Hoboken, New Jersey.
- [**Huget, 2005**] Huget M.P, 2005. *Agent Communication*. In Intelligent Decision support systems in Agent-Mediated Environments, vol (115), frontiers in Artificial Intelligence and Applications. Gloria Phillips-wren and Lakhmi Jain (eds), IOS Press.
- [**Huhns, 1987**] Huhns M.N, 1987. *Distributed Artificial Intelligence*. Ed. Pitman.

I

[Ingalls, 1998] Ingalls R.G, 1998. *The value of simulation in modeling supply chain*. In Proceedings of the 1998 winter simulation conference, Washington DC, pp. 1371-1375.

J

[Jennings, 1993] Jennings N.R, 1993. *Commitments and conventions: the foundation of coordination in multiagent systems*. Knowledge Engineering Review, vol 8, n°3, pp. 223-250.

[Jennings et al., 1998] Jennings N., Sycara K. et Wooldridge M., 1998. *Autonomous Agents and Multi-Agents Systems*. A roadmap of agent research and development, 1(1), pp. 275-306

[Jones et Riley, 1985] Jones T., et Riley D.W, 1985. *Using inventory for competitive advantage through supply chain management*. International Journal of Physical Distribution and Materials Management, vol. 15, n° 5, pp. 16-26.

[Julien, 1997] Julien P.A., 1997. *Les PME bilan et perspectives*. 2^e édition, Economica, Paris, France.

K

[Kearney, 1994] Kearney A.T, 1994. *Management approach to Supply chain Integration*. Research Notebook, Chicago.

[Kent, 2002] Kent S., 2002. *Model-driven Engineering*, IFM 2002, vol. 2335 of LNCS, Springer-Verlag, pp. 286-298.

[Kung et Solvberg, 1986] Kung C.H et Solvberg A., 1986. *Activity modeling and behavior modeling*. In T.W Olle, H.G Sol, A.A. Verrijn-Stuart (Eds.). *Information Systems Design Methodologies: Improving the practice*, IFIP, Amsterdam, North-Holland, pp. 145-171.

L

[Labarthe, 2006] Labarthe O. , 2006. *Modélisation et simulation orientées agents de chaînes logistiques dans un contexte de personnalisation de masse : modèles et cadre méthodologique*. Thèse de doctorat en cotutelle (Université Paul Cézanne et Université Laval), 30 Octobre.

[Labarthe et al., 2007] Labarthe O., Espinasse B., Ferrarini A., Montreuil B., 2007. *Toward a methodological framework for agent-based modeling and simulation of supply chains in a mass customization context*. Simulation Modeling Practice and Theory. 15, pp.113-136

[La Londe et Masters, 1994] La Londe B.J et Masters J.M, 1994. *Emerging logistics strategies: Blueprint for the next century*. International Journal of Physical distribution and Logistics Management. vol 24, n°7, pp. 35-47.

[La Londe, 1997] La Londe, B.J, 1997. *Supply chain management: myth or reality*. Supply Chain Management Review, vol.1, Spring, pp. 6-7.

[Lambert et Cooper, 2000] Lambert D.M. and Cooper M.C., 2000. *Issues in supply chain management*. Industrial Marketing Management, 29, n° 1, pp. 65-83.

[Lambert, 2006] Lambert D.M, 2006. *Supply chain management: processes, partnerships, performance*. 2nd ed., Supply Chain Management Institute, Sarasota, FL.

[Langley et Holcomb, 1992] Langley D.M, et Holcomb M.C., 1992. *Creating logistics customer value*. Journal of Business Logistics, vol. 13, n°2, pp 1-27.

[Lassar et Zinn, 1995] Lassar, W. et Zinn, W., 1995. *In formal channel relationships in logistics*. Journal of Business Logistics, vol. 16, n°1, pp. 81-106.

- [**Law et Kelton, 1982**] Law A.M, et Kelton W.D, 1982. *Simulation modeling and analysis*. McGraw-Hill, New York.
- [**Le Bars, 2003**] Le Bars M., 2003. *Un simulateur Multi-agent pour l'aide à la décision d'un collectif : application à la gestion d'une ressource limitée Agro-environnementale*. Thèse de Doctorat en sciences spécialité Informatique, université Paris Dauphine IX UFR Sciences des Organisations.
- [**Lee et Bilington, 1993**] Lee H.L. et Billington C, 1993. *Material management in decentralized supply chain*. Operations Research, vol 41, n°5, p. 835-847.
- [**Lee et al., 2002**] Lee Y.H, Cho M.K., Kim S.J. and Kim Y.B, 2002. *Supply chain simulation with discrete continuous combined modelling*. Computer and Industrial Engineering, vol. 43, pp. 375-392.
- [**Le Strugeon, 1995**] Le Strugeon E., 1995. *Une méthodologie d'auto-adaptation d'un système multi-agents cognitifs*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes.
- [**Lewis et Talalayesky, 1997**] Lewis I., et Talalayesky A., 1997. *Logistics and information technology : a coordination perspective*. Journal of Business Logistics, vol. 18, n°1, pp. 41-57
- [**Li et Wang, 2007**] Li X. et Wang Q., 2007. *Coordination mechanisms of supply chain systems*. European Journal of operational Research, vol 179, n° 1, pp. 1-16.
- [**Longo et Mirabelli, 2008**] Longo F., et Mirabelli G., 2008. *An advanced supply chain management tool based on modelling and simulation*. Computers & Industrial Engineering, vol 54, pp. 570-588
- [**Lush et Brown, 1996**] Lush R.F, et Brown J., 1996. *Interdependency, contracting, and relational behavior in marketing channels*. Journal of Marketing, vol. 60, October, pp. 19-38.

M

- [**Maier, 1996**] Maier, R. 1996. *Benefits and quality of data modeling—Results of an empirical analysis*. Proceedings 15th International Conference Entity-Relationship Approach, Cottbus, Germany, 245–260.
- [**Mallidi et al., 1999**] Mallidi K., Paraskevopoulos A.T. et Pagnelli P., 1999. *Process Modelling in small-medium enterprise networks*. Computers In Industry, vol 38, n° 2, pp. 149-158.
- [**Malone, 1987**] Malone T., 1987. *Modeling coordination in organizations and markets*. In Management science, 33, 1987.
- [**Mattessich et al., 2001**] Mattessich, P.W, Muray-Close M., et Monsey B.R, 2001. *Collaboration: what makes it Works*. 2 ed., Amherst H. Wilder Foundation.
- [**Maznevski et Chudoba, 2000**] Maznevski M.L, et Chudoba K.M, 2000. *Bridging space over time: global virtual team dynamics and effectiveness*. Organization Science, 11, 5, pp. 473-492.
- [**Mentzer et al., 2001**] Mentzer J.T, Dewitt W., Keebler J.S, Min S., Nix N.W, Smith C.D, and Zacharia Z.G, 2001. *Defining the supply chain management*. Journal of Business logistics, vol 22, n°2, pp : 1-20.
- [**Merriam-webmaster, 2003**] Merriam-webster, 2003. Merriam-webster Collegiate Dictionary. 11th ed., Merriam-webster.
- [**Millet et Botta-Genoulaz, 2006**] Millet P.A, et Botta-Genoulaz V ., 2006. *Un référentiel pour l'alignement des systèmes d'information aux processus logistiques*. 6^{ème} conférence francophone de MODélisation et SIMulation (MOSIM'06), 3-5 Avril, Rabat, Maroc.
- [**Min et Zhou, 2002**] Min H. et Zhou G., 2002. *Supply chain modelling: past, present and future*. Computers & Industrial engineering, vol 43, n° 1--2, pp. 231-249.
- [**Monostori et al., 2006**] Monostori T., Vancza J. et Kumara S.R.T, 2006. *Agent-based systems for manufacturing*. Annals of the CIRP, vol. 55, n°2, pp. 697-720.

- [**Monteiro et al., 2008**] Monteiro T., Anciaux D., D'amours S., Espinasse B., Ferrarini A., Labarthe O., Montreuil B. et Roy D., 2008. *Simulation à base d'agents des systèmes de coordination et de planification des réseaux d'entreprises*. Chapitre 7 de : La simulation pour la gestion des chaînes logistiques, Lavoisier, Hermes Science Publications.
- [**Müller, 2000**] Müller J.P, 2000. *Modélisation organisationnelle en systèmes multi-agents*. Septième école d'été de l'ARCo, Bonas, 10-21 Juillet.
- [**Mylopoulos, 1992**] Mylopoulos J., 1992. *Conceptual modeling and telos*, in: P. Loucopoulos, R. Zicari (Eds.), *Conceptual Modeling, Databases, and CASE: An Integrated View of Information Systems Development*. John Wiley and Sons Inc., New York.

N

- [**New et Payne, 1994**] New S.J. et P. Payne, 1994. *Research framework in logistics : three models, seven dinners and a survey*. International Journal of Physical Distribution and logistics management, 25 (10).
- [**Novack et al., 1995**] Novack R.A, Langley C.J, Jr. and L.M Rinehart, 1995. *Creating Logistics value*. Oak Brook, IL: Council of Logistics Management.

O

- [**O'Hare et Jennings, 1994**] O'Hare G.M.P et Jennings N.R., 1994. *Foundation of distributed Artificial Intelligence*. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.

P

- [**Parunak et al., 1998**] Parunak, H.V.D, Savit, R., et Riolo, R.L, 1998. *Agent-based modelling VS equation-based modelling: a case study and user's guide*. Proceedings of Multi-agent systems and agent-based simulation (MABS'98), Springer, LNAI 1534.
- [**Parunak, 1998**] Parunak, H.V.D, 1998. *Wat can agents do in industry, and why? An overview of industrially-oriented R&D at CEC*. Second international workshop on cooperative information agents, CIA '98, M.Klusck.
- [**Parunak, 1999**] Parunak H.V.D, 1999. *Industrial and practical applications of DAI*. In G. Weiss (ed), *Multi-agents systems*, MIT Press.
- [**Parunak et al., 1999**] Parunak, H.V.D, Savit, R., Riolo, R.L, Steven, J.C, 1999. *DASCh: Dynamic analysis of supply chains*. Center of Electronic Commerce Final Report.
- [**Prietula et March, 1991**] Prietula, M. J., et March S.T, 1991. *Form and substance in physical database design: An empirical study*. Inform. Systems Res. 2, 287–314.

R

- [**Ross, 1998**] Ross D.F, 1998. *Competing through supply chain management*. New York, NY: Chapman & Hall.
- [**Rota, 1998**] Rota K., 1998. *Coordination temporelle de centres gerant de façon autonome des resources. Application aux chaînes logistiques*. Thèse de doctorat ENSAE.
- [**Rota et al., 2002**] Rota K., Thierry C., et BEL G., 2002. *Supply chain management: a supplier perspective*, Production Planning and Control, 13(4), 370-380.
- [**Rouchier et Bousquet, 1998**] Rouchier J., et Bousquet F., 1998. *Non-merchant economy and multi-agent system : an analysis of structuring exchanges*. Number 111–12. Springer Verlag.

S

- [**Salcedo et Grackin, 2000**] Salcedo S., et Grackin A., 2000. *The e-value chain*. Supply chain Management Review, vol. 3, n° 4, pp. 63-70.
- [**Searle, 1969**] Searle J., 1969. *Speech Acts: An Essay in the Philosophy of Language*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [**Shannon, 1998**] Shannon R.E, 1998. *Introduction to the art and science of simulation*. Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference. Washington, D.C., United States, IEEE Computer Society Press, vol.1, pp. 7-14.
- [**Shen et Norrie, 1999**] Shen W., et Norrie D.H., 1999. *Agent-Based Systems for Intelligent Manufacturing : A State-of-the-Art Survey*. Knowledge and Information Systems, an International Journal, vol.1, n°2, pp.129-156.
- [**Shen et al., 2006**] Shen W., Hao Q., Yoon H.J, et Norrie D.H., 2006. *Applications of agent-based systems in intelligent ;manufacturing : an updated review*. Advanced Engineering Informatics, vol. 20, pp. 415-431
- [**Smith, 1988**] Smith R.G, 1988. *The Contract net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver*. Readings in Distributed Artificial Intelligence, A.H Bond and L. Gasser, (Eds.), pp. 357-366.
- [**Stevens, 1989**] Stevens, G.C. 1989. *Integrating the supply chain*. International Journal of Physical Distribution and Materials Management, 19, 3-8.

T

- [**Tayur et Ganeshan, 1999**] Tayur S., Ganeshan R., Magazine M., 1999. *Quantitative models for supply chain management*. Kluwer Academic Publishers.
- [**Telle, 2003**] Telle O., 2003. *Gestion de chaînes logistiques dans le domaine aéronautique : aide à la coopération au sein d'une relation donneur d'ordre / fournisseur*. Thèse de doctorat en Systèmes Industriels, École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace.
- [**Thierry, 2003**] Thierry C., 2003. *Gestion des chaînes logistiques : Modèle et mise en œuvre pour l'aide à la décision à moyen terme*. Accreditation to supervise research. University of Toulouse II.
- [**Tounsi, 2006**] Tounsi J., 2006. *Modélisation et simulation SMA du système de pilotage appliqué aux systèmes de production*. Rapport de Master 2, Université de Savoie.
- [**Tounsi et al., 2009a**] Tounsi J., Azaiez S., Habchi G., Boissière J., 2009a. *A multiagent approach for modelling SMEs mechatronic supply chains*. In Proceedings of the 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing.
- [**Tounsi et al., 2009b**] Tounsi J., Boissière J, Habchi G., 2009b. *Multiagent decision making for SME supply chain simulation*. In Proceedings of 23rd European Conference on Modeling and Simulation (ECMS), pp. 203-211, Madrid, Espagne.
- [**Tounsi et al., 2009c**] Tounsi J, Boissière J., Habchi G., 2009c. *Une approche agent pour modéliser la chaîne logistique dans un contexte de PME mécatroniques*. Le 8^{ème} Congrès International de Génie Industriel (CIGI), Tarbes, France.
- [**Tounsi et al., 2009d**] Tounsi J., Habchi G., Boissière J., 2009d. *A multiagent system for production synchronization in SME mechatronic supply chain*. In Proceedings of The 10th Middle Eastern Simulation and Modelling Conference (MESM), pp. 91- 97, Beirut, Liban.
- [**Tounsi et al., 2010**] Tounsi J., Boissière J., Habchi G., 2010. *A conceptual model for SME Mechatronics supply chain*. International Journal of Computer Aided Engineering and Technology (IJCAET), vol. 2, n°4.

[Treuil et al., 2008] Treuil J.P, Drogoul A., Zucker J.D, 2008. *Modélisation et simulation à base d'agents: exemples commentés, outils informatiques et questions théoriques*. Dunod.

[Tyndall et al., 1998] Tyndall G., Gopal C., Partsch W., et Kamauff J., 1998. *Super-changing supply chains: new ways to increase value through global operational excellence*. New York, NY: John Wiley & Sons.

U

[Ulrich, 1998] Ulrich H., 1998. *A simulation platform for multiagent systems in logistics*. Operations Research Proceedings, pp 261-268.

V

[Villareal-Lizarraga, 2005] Villarreal Lizarraga, C.L., 2005. *Contribution au pilotage des projets partagés par des PME en groupement basée sur la gestion des risques*. Thèse de doctorat en Systèmes industriels au centre de Génie Industriel de l'école des Mines d'Albi-Carmaux.

[Villareal-Lizarraga et al., 2005] Villarreal Lizarraga, C.L., Dupont L., Gourg D., Pingaud H., 2005. *Contributing to management of shared projects in SMEs manufacturing clusters*. 18th International Conference on Production Research (ICPR-18), Salerno, Italie.

W

[Wand et Weber, 2002] Wand Y., et Weber R., 2002. *Research commentary: information systems and conceptual modelling – a research agenda*. Information Systems Research, vol. 13, No. 4.

[Wong et al., 2004] Wong C.Y., Johansen J. and Hvolby H.H., 2004. *Supply chain coordination Problems: Literature Review from organization, economic and operations perspectives*. Working Paper no. 08-04, Center for Industrial Production, Aalborg University, pp. 1-23.

[Wooldridge et Jennings, 1995] Wooldridge M.J et Jennings N.R, 1995. *Intelligent Agents: theory and practice*. Knowledge Engineering Review, 10 (2), pp 115-152.

[Wooldridge et Jennings, 1999] Wooldridge M., et Jennings N.R, 1999. *The cooperative problem-solving process*. Journal of Logic Computation, vol. 9, n° 4, pp. 563-592.

[Wooldridge, 1999] Wooldridge M.J, 1999. *Intelligent Agents*. Chapitre 1 dans Multiagent Systems: a modern approach to distributed artificial intelligence, Gerhard Weiss edition, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, Angleterre.

Y

[Yuan et al., 2002] Yuan Y., Liang T.P et Zhang J.J, 2002. *Using agent technology to support supply chain management : potentials and challenges*. Mc Master University.

Modélisation pour la simulation de la chaîne logistique globale dans un contexte de production PME mécatroniques

Jihène Tounsi

Résumé :

Ce travail de thèse adresse une problématique industrielle qui s'articule autour de la modélisation de la chaîne logistique, composée essentiellement de groupements de PME mécatroniques, afin d'analyser les caractéristiques organisationnelles et comportementales et d'en évaluer la performance. Le développement de la solution de modélisation s'inscrit dans une démarche de raffinement itératif et d'intégration progressive de modèles. Le cadre de cette démarche constitue le fondement du processus de développement adopté « ArchMDE » basé sur l'Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM). Par conséquent, les travaux de cette recherche sont caractérisés par une contribution double. Dans la première contribution, il s'agit de la proposition d'un métamodèle générique de la chaîne logistique. En puisant dans la littérature nous avons proposé une méthodologie de conceptualisation incrémentale et générique qui permet la génération d'un modèle conceptuel de la structure d'une chaîne logistique ainsi que les relations entre ses différentes entités. L'application de cette démarche a donné lieu à la construction d'un métamodèle décrivant le champ d'application étudié (PME mécatroniques). La seconde contribution permet de formaliser le comportement dynamique des concepts générés lors de la première étape en adoptant le paradigme multi-agent. Ainsi, nous avons proposé une agentification du métamodèle du domaine en se basant sur l'analogie naturelle entre la chaîne logistique et le système multi-agent. Cette agentification a donné lieu à un métamodèle du domaine agentifié avec une mise en place des protocoles d'interaction visant à synchroniser et piloter la chaîne logistique. L'étude des relations et du comportement dynamique des différents concepts a permis d'aboutir à un métamodèle d'implémentation qui exprime à la fois les deux vues statique et dynamique du domaine d'application. Ce dernier artefact a fait l'objet d'une instanciation et d'une implémentation d'un cas industriel réel dans un environnement JAVA.

Mots-clés : Chaîne logistique, groupement PME, mécatronique, modélisation, simulation, système multi-agent, ArchMDE, modèle de connaissance (métamodèle)

Abstract :

The main concern of this PhD is to study (analyse) and model supply chains (SCs) in a particular context which is small and medium enterprises (SME) in the field of mechatronic. The study (research) is based on analyzing the organisational features, actors' behaviours, and performance considerations. The development of the model relies on an iterative framework that progressively integrates different aspects into the model. This framework is the ArchMDE process, which is based on MDE (Model Driven Engineering). A major feature of this work lies its contribution to two different areas of research. The first contribution of the work is to propose a generic metamodel for SCs. From a literature review, an incremental framework is proposed for the modelling of SC in terms of concepts, structure and relationships. The application of the framework to the studied context is described and its result is a domain-metamodel for SCs. The second contribution of this work lies in the formalisation of the dynamic behaviour of the concepts in the metamodel. This formalisation is based on the multi-agent approach. An agentification of the metamodel is thus drawn, thanks to the natural links between agents theory and SC reality. This step leads to an agentified-domain-metamodel which also includes the SC's monitoring and synchronisation protocols. By adding relationships and dynamic behaviours aspects we obtain a metamodel of the domain that can be implemented, with its static and dynamic aspects. To validate this model, an industrial case is detailed and has been instantiated and encoded in JAVA.

Keywords: Supply chain, SME cluster, mechatronic, modelling, simulation, multiagent system, ArchMDE, knowledge model (metamodel)
