

Modélisation et évaluation des performances de la chaine de transport intermodal de porte à porte : le cas du corridor de la Vallée de Seine

Fairouz Gouiza

▶ **To cite this version:**

Fairouz Gouiza. Modélisation et évaluation des performances de la chaine de transport intermodal de porte à porte : le cas du corridor de la Vallée de Seine. Modélisation et simulation. Université du Havre, 2016. Français. NNT : 2016LEHA0002 . tel-01409904

HAL Id: tel-01409904
https://theses.hal.science/tel-01409904

Submitted on 6 Dec 2016

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.

Normandie Université

THESE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité : Génie informatique, automatique et traitement de signal

Préparée au sein de l'université du Havre

Modélisation et évaluation des performances de la chaine de transport intermodal de porte à porte, le cas du corridor de la Vallée de Seine

Présentée et soutenue par
Fairouz GOUIZA

Thèse soutenue publiquement le 8 mars 2016 devant le jury composé de		
M. Cyrille BERTELLE	P.U., Université du Havre	Président
Mme. Nadia HAMANI	MCF-INSSET, Université de Picardie J.V.	Examinateur
M. Adnan YASSINE	P.U., Université du Havre	Co-directeur de thèse
M. Jérôme FORTIN	P.U., Université de Picardie Jules Verne	Rapporteur
M. Mourad ABED	P.U., Université de Valenciennes (UVHC)	Rapporteur
M. Abdellatif BENABDELHAFID	HDR, Université du Havre	Directeur de thèse

Thèse dirigée par Abdellatif BENABDELHAFID et codirigée par Adnan YASSINE, laboratoire LMAH

UNIVERSITÉ LE HAVRE

SPMI ECOLE DOCTORALE

LMAH


A mon fils Yanis
Pour m'avoir poussé à donner le meilleur de moi-même
Pour son amour et sa gentillesse inépuisable
Pour m'avoir rendu ma vie agréable et enjouée
Je te dédie ce travail de thèse

REMERCIEMENT

La présente thèse s'inscrit dans le projet ***APLOG*** (**A**mélioration et **P**erformance de la **LO**gistique **G**lobale) structurant le Grand Réseau de Recherche ***TL-TI*** (**T**ransport, **L**ogistique, **T**echnologies de l'**I**nformation). Mes remerciements vont en premier lieu pour la région ***Haute Normandie***, qui a financé ce projet doctoral ainsi que l'***Université du Havre*** de m'avoir accueilli au sein du laboratoire ***LMAH*** (**L**aboratoire des **M**athématiques **A**ppliquées du **H**avre) (*FR CNRS 3335*).

Je tiens à remercier mon directeur de thèse Monsieur ***BENABDELHAFID Abdellatif***, Professeur des universités à l'Université du Havre pour l'aide précieuse et la confiance qu'il m'a accordé durant ces années de thèse. Qu'il reçoit le témoignage de ma profonde reconnaissance pour les encouragements qu'il a su me prodiguer. Je veux également exprimer toute ma gratitude à Monsieur ***YASSINE Adnan***, Professeur des universités à l'Université du Havre pour avoir codirigé mes travaux, ses conseils m'ont été très bénéfiques.

Je remercie les membres du jury pour l'attention qu'ils ont bien voulu prêter à mon travail, je remercie Monsieur ***BERTELLE Cyrille***, Professeur des universités à l'Université du Havre, qui m'a fait l'honneur de présider le jury. Mes remerciements vont également à Monsieur ***FORTIN Jérôme***, Professeur des universités à l'Université de Picardie Jules Verne ainsi que Monsieur ***ABED Mourad***, Professeur des universités à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis (*UVHC*). Ils m'ont fait l'honneur d'être les rapporteurs de ma thèse. Je tiens à remercier Madame ***HAMANI Nadia***, *MCF-INSSET* à l'université de Picardie Jules Verne, pour avoir accepté de lire et de commenter ce mémoire en qualité d'examinateur. Toutefois, il n'y a pas que l'équipe d'encadrement qui a été déterminante pour l'aboutissement de cette thèse, à ce titre, je remercie tous les autres membres du laboratoire ***LMAH*** sans oublier le directeur Monsieur ***ALAOUI Aziz***.

A la fin je tiens à remercier, ma mère Madame ***LAZRAQ KHLASS Aicha***, Professeur de l'enseignement supérieur à l'Ecole Normale Supérieure de Rabat, *MAROC*. D'autant qu'elle était là pour moi et qu'elle m'a toujours encouragé dans mes projets, je ne trouve pas de mot dans le dictionnaire pour te dire combien je suis reconnaissante ma chère. J'insiste à remercier mon fils ***MOUHOUB Yanis***, né le *17* novembre *2012*, tout ça, c'est grâce à lui, tu es vraiment formidable mon bébé. Je remercie mon ami Monsieur ***RADI Sohaib*** pour ses encouragements et pour son sourire qui m'ont boosté.

LISTE DES FIGURES

Fig.2.1 : Les structures topographiques de la chaine logistique [*Beamon et Chen, 2001*] 31

Fig.2.2 : Structures élémentaires d'une chaine logistique [*Galasso, 2007*] 31

Fig.2.3 : L'organisation linéaire des flux dans la chaine logistique [*Greis et Kasarda, 1997*] 34

Fig.2.4 : L'organisation simultanée des flux dans la chaine logistique [*Greis et Kasarda, 1997*] .. 34

Fig.2.5 : La maison du *SCM* [*Stadtler et Kilger, 2000*] 36

Fig.2.6 : La caractérisation des composantes élémentaires de l'entente industrielle [*Lauras, 2004*].38

Fig.2.7 : La caractérisation des ententes industrielles selon *Lauras* [*Lauras, 2004*] 39

Fig.2.8 : Relations entre les centres de décision [*Despontin-Monsarrat et al., 2005*] 40

Fig.2.9 : Architecture de pilotage distribué [*François, 2007*] 40

Fig.2.10 : Architecture de pilotage centralisé [*François, 2007*] 41

Fig.2.11 : Architecture de pilotage mixte [*François, 2007*] 41

Fig.2.12 : L'offre logicielle du *SCM*, d'après *Botta-Genoulaz* [*Botta-Genoulaz, 2003*] 42

Fig.2.13 : Illustration des logiques « *top-down* » et « *bottom-up* » 46

Fig.2.14: Le formalisme *SADT* 49

Fig.2.15: Le formalisme *SA-RT* [*Cottet et al., 2005*] 50

Fig.2.16: Représentation d'un système selon l'approche systémique [*Le Moigne, 1973*] 50

Fig.2.17: Le modèle *SCOR* [*Supply Chain Council, 2005*] 51

Fig.2.18: Classification des modèles pour la simulation [*Cassandras et Lafortune, 1999*] 53

Fig.2.19: Evaluation de performance à priori [*Tahon et Frein, 1999*] 56

Fig.2.20: Evaluation de performance à posteriori [*Tahon et Frein, 1999*] 57

Fig.2.21: Les buts du *BSC* : de la stratégie aux objectifs [*Kaplan et Norton, 1996*] 58

Fig.2.22: Les niveaux du modèle *SCOR* [*Supply Chain Council, 2005*] 59

Fig.2.23: Synthèse de la démarche *ECOGRAI* [*Ducq et al., 2003*] 60

Fig.2.24: Articulation entre centres de décision et processus opérationnels [*Lauras, 2004*] 61

Fig.2.25: Le triptyque « *pertinence*, *efficacité* et *efficience* » selon *Lauras* [*Lauras, 2004*]..... 62

Fig.3.1: Illustration des composants de la chaine de transport intermodal 72

Fig.3.2: Partenariats entre la Normandie et l'Ile-De-France [*Nov@log, 2013*] 74

Fig.3.3: Succession des opérations dans un terminal portuaire 77
Fig.3.4: Les principales zones d'opérations dans un terminal portuaire 78
Fig.3.5: Le mécanisme de la zone des opérations portuaires 79
Fig.3.6: Les principaux processus décisionnels du système du transport intermodal 86
Fig.3.7: Le scénario abrégé d'échange entre les acteurs principaux du premier processus 87
Fig.3.8: Illustration des interactions entre les acteurs principaux du premier processus 88
Fig.3.9: Les principaux documents préparés par le commissionnaire du transport 90
Fig.3.10: Les principaux échanges entre les principaux acteurs de niveau de décision *1* et *2* 91
Fig.3.11: Les principaux échanges entre les principaux acteurs de niveau de décision *3* 93
Fig.3.12: L'organisation simultanée des flux dans le contexte du transport intermodal 93
Fig.3.13: Les principaux flux import avant l'arrivée du navire 94
Fig.3.14: Les principaux flux import après l'arrivée du navire 95
Fig.3.15: Les principaux flux export avant mise à quai 96
Fig.3.16: Les principaux flux export après mise à quai 97
Fig.3.17: L'*AP+* et la chaine logistique [*CCS, 2014*] 102
Fig.3.18: *AP+* et interopérabilité avec systèmes informatiques privés des entreprises [*CCS, 2014*] 102
Fig.3.19: Structure générique du système intermodal composée de trois niveaux d'abstraction .. 106
Fig.3.20: Le modèle abstrait de l'architecture du contrôle de la chaine de transport intermodal .. 107
Fig.4.1: Le processus de développement *ArchMDE* [*Jihene, 2011*]..... 122
Fig.4.2: Le méta-modèle abstrait du domaine 124
Fig.4.3: Le méta-modèle raffiné du domaine 127
Fig.4.4: La version détaillée du méta-modèle du domaine 129
Fig.4.5: Le méta-modèle multi-agent : la vue agent 130
Fig.4.6: Le méta-modèle multi-agent : intégration de la vue environnement 131
Fig.4.7: Le méta-modèle multi-agent : intégration de la vue organisation 133
Fig.4.8: La version finale du méta-modèle multi-agent 134
Fig.4.9: Le méta-modèle du domaine agentifié 139
Fig.4.10: Le protocole d'interaction du comportement nominal des acteurs 142
Fig.4.11: Le protocole d'interaction du comportement correctif des acteurs réactifs 143
Fig.4.12: Le protocole d'interaction du comportement correctif des acteurs cognitifs 144
Fig.4.13: Le méta-modèle d'implémentation 152
Fig.5.1: Instanciation du méta-modèle d'implémentation 159

Fig.5.2: Exemple d'appel de la méthode « *setup()* » pour démarrer un comportement nominal … 166

Fig.5.3: Utilisation du « *CyclicBehaviour* » afin d'exécuter en boucle un comportement…… 167

Fig.5.4: Exemple d'utilisation du « *ACLMessage* » afin de traiter un message reçu. …… 167

Fig.5.5: Utilisation du « *ACLMessage* » pour concevoir la méthode « *Send_Reply_Signal* » ….. 168

Fig.5.6: L'outil graphique fournit par Jade – « *RMA* : *Remote Monitoring Agent* »……... 168

Fig.5.7: L'interface *RMA* contenant les conteneurs créés dans le cadre de nos travaux…… 169

Fig.5.8: Exemple d'envoi de messages entre agents à l'aide de l'outil « *Dummy Agent* »…… 169

Fig.5.9: Analyse des messages échangés entre agents à l'aide de l'outil « *Sniffer Agent* »…… 170

Fig.5.10: Affichage de l'état des agents à l'aide de l'outil « *Inspector Agent* » ……..…… 170

Fig.5.11: Les flux d'interaction décrivant le comportement nominal des agents d'*IFTC*.…… 172

Fig.5.12: Les flux d'interaction décrivant le comportement correctif des agents d'*IFTC* …… 174

LISTE DES TABLEAUX

Tab.1.1 : Les éléments qui constituent l'idée et le contexte du besoin de notre thèse 17

Tab.2.1 : Définitions de la chaine logistique issues de la littérature scientifique 28

Tab.2.2 : Définitions de la gestion de la chaine logistique issues de la littérature scientifique 36

Tab.2.3 : Objectifs finaux de la simulation [*Treuil et al., 2008*] 54

Tab.2.4: Définitions et interprétations des processus et des centres de décision [*Lauras, 2004*] 61

Tab.3.1: Les principaux modes de transport de marchandises [*Venturelli et al., 2010*] 70

Tab.3.2: Les périodes de développement de la notion du corridor [*Comtois, 2012*] 73

Tab.3.3: Les principales opérations du transport intermodal 76

Tab.3.4: Les principales opérations du « *trans-loading* » 76

Tab.3.5: Les équipements les plus répondus dans la zone des opérations portuaires 79

Tab.3.6: Problèmes de planification de la zone des opérations portuaires 81

Tab.3.7: Les équipements les plus répondus dans la zone de stockage 82

Tab.3.8: Problèmes de planification de la zone de stockage 84

Tab.3.9: Analyse de la chaine intermodale selon la vue statique et la vue dynamique 106

Tab.4.1 : Analogie entre la chaine logistique et les *SMA* [*Yuan et al., 2002*] 120

Tab.4.2 : Le tableau de correspondance du processus d'agentification 138

Tab.4.3 : Raffinement du concept « *IFTC* » pour l'implémentation 146

Tab.4.4 : Raffinement du concept « *Actor* » pour l'implémentation 146

Tab.4.5 : Raffinement du concept « *Group of actors* » pour l'implémentation 146

Tab.4.6 : Raffinement du concept « *Environment* » pour l'implémentation 147

Tab.4.7 : Raffinement du concept « *Atomic actor* » pour l'implémentation 147

Tab.4.8 : Raffinement du concept « *Physical environmen t* » pour l'implémentation 147

Tab.4.9 : Raffinement du concept « *Informational environment* » pour l'implémentation 147

Tab.4.10 : Raffinement du concept « *P_Resource* » pour l'implémentation 148

Tab.4.11 : Raffinement du concept « *P_ME* » pour l'implémentation 148

Tab.4.12 : Raffinement du concept « *I_Resource* » pour l'implémentation 148

Tab.4.13 : Raffinement du concept « *I_ME* » pour l'implémentation 148

Tab.4.14 : Raffinement du concept « *Physical process* » pour l'implémentation 149

Tab.4.15 : Raffinement du concept « *Execution system* » pour l'implémentation 149

Tab.4.16 : Raffinement du concept « *Planning and control system* » pour l'implémentation 149

Tab.4.17 : Raffinement du concept « *Border management system* » pour l'implémentation 149

Tab.4.18 : Raffinement du concept « *EA* » pour l'implémentation 150

Tab.4.19 : Raffinement du concept « *PCA* » pour l'implémentation 150

Tab.4.20 : Raffinement du concept « *BMA* » pour l'implémentation 150

Tab.4.21 : Raffinement du concept « *Knowledge s* » pour l'implémentation 150

Tab.4.22 : Raffinement du concept « *Organizational knowledge* » pour l'implémentation 151

Tab.4.23 : Raffinement du concept « *Constraint* » pour l'implémentation 151

Tab.4.24 : Raffinement du concept « *Instruction* » pour l'implémentation 151

Tab.4.25 : Raffinement du concept « *Objective* » pour l'implémentation 151

Tab.4.26 : Raffinement du concept « *Indicator* » pour l'implémentation 151

Tab.5.1 : La correspondance entre les concepts du domaine et les concepts du cas industriel 156

Tab.5.2 : Extrait de la grille des résultats pour les critères appropriés [*Garneau et Delisle, 2002*]... 164

ABREVIATIONS

ABC	**A**ctivity **B**ased **C**osting.
ABM	**A**ctivity **B**ased **M**anagement.
ACC	**A**gent **C**ommunication **C**hanel.
AGR	**A**gent-**G**roupe-**R**ôle.
AGV	**A**utomatic **G**uided **V**ehicles.
AMS	**A**gent **M**anagement **S**ystem.
AOM	**A**dvanced **O**rder **M**anagement.
APLOG	**A**mélioration de **P**erformance de la **LO**gistique **G**lobale.
APS	**A**dvanced **P**lanning **S**ystem.
Av. J.C.	**Av**ant **J**ésus-**C**hrist.
BAP	**B**erth **A**llocation **P**roblem.
BDI	**B**elief **D**esire **I**ntention.
BMA	**B**order **M**anagement **A**ctor.
BSC	**B**alanced **S**core**C**ard.
CD	**C**entre de **D**écision.
CL	**C**haine **L**ogistique.
CPFR	**C**ollaborative **P**lanning **F**orecasting and **R**eplenishment.
CRM	**C**ostumer **R**elationship **M**anagement.
DF	**D**irector **F**acilitor.
EA	**E**xecution **A**ctor.
EDI	**E**change de **D**onnées **I**nformatisées.
ERP	**E**nterprise **R**esource **P**lanning.
EVP	**E**quivalent **V**ingt **P**ieds.
FCL	**F**ull **C**ontainer **L**oad.
Fig.	**Fig**ure.
FIPA - ACL	**F**oundation for **I**ntelligent **P**hysical **A**gents - **A**gent **C**ommunication **L**anguage.
GPS	**G**lobal **P**ositioning **S**ystem.
GRAI	**G**raphe à **R**ésultats et **A**ctivités **I**nter-reliés.
GSM	**G**lobal **S**ystem for **M**obile Communications.
HMS	**H**olonic **M**anufacturing **S**ystems.
I_ME	**I**nformational **M**oving **E**ntity.
I_Resource	**I**nformational **Resource.**
IA	**I**ntelligence **A**rtificielle.
id	**id**entifiant.
IDM	**I**ngénierie **D**irigée par les **M**odèles.
IFTC	**I**ntermodal **F**reight **T**ransportation **C**hain.
ITE	**I**nstallation **T**erminale **E**mbranchée.
Jade	**J**ava **A**gent **DE**veloppement framework.
KQML	**K**nowledge **Q**uery and **M**anipulation **L**anguage.
MadKit	**M**ulti-**A**gent **D**eveloppement **Kit**.
MAS	**M**ulti-**A**gent **S**ystem.
MCD	**M**odèle **C**onceptuel des **D**onnées.
MCT	**M**odèle **C**onceptuel des **T**raitements.
MES	**M**anufacturing **E**xecution **S**ystem.
MOT	**M**odèle **O**rganisationnel des **T**raitements.
MRP	**M**aterials **R**equirement **P**lanning.
MRP II	**M**anufacturing **R**essource **P**lanning.
NCPDM	**N**ational **C**ouncil of **P**hysical **D**istribution **M**anagement.
P_ME	**P**hysical **M**oving **E**ntity.
P_Resource	**P**hysical **Resource.**
PCA	**P**lanning and **C**ontrol **A**ctor.
PIPAME	**P**ôle **I**nterministériel de **P**rospective et d'**A**nticipation des **M**utations **E**conomiques.
PME	**P**etites et **M**oyennes **E**ntreprises.
QCAP	**Q**uay **C**rane **A**ssignment **P**roblem.
QCSP	**Q**uay **C**rane **S**cheduling **P**roblem.
RFID	**R**adio **F**requency **Id**entification.
RMA	**R**emote **M**onitoring **A**gent.
Ro-Ro	**R**oll-**O**n **R**oll-**O**ff.
SADT	**S**tructured **A**nalysis **D**esign **T**echnique.
SA-RT	**S**tructured **A**nalysis **– R**eal **T**ime.
SC	**S**upply **C**hain.
SCE	**S**upply **C**hain **E**xecution.
SCEM	**S**upply **C**hain **E**vent **M**anagement.
SCM	**S**upply **C**hain **M**anagement.
SMA	**S**ystèmes **M**ulti-**A**gents.

SCOR	**S**upply **C**hain **O**peration **R**eference.
SOAP	**S**imple **O**bject **A**ccess **P**rotocol**.**
SOGET	**SO**ciété de **GE**stion des **T**erminaux informatiques.
SRM	**S**upplier **R**elationship **M**anagement.
Tab.	**T**ableau.
TIC	**T**echnologies de l'**I**nformation et de la **C**ommunication.
TMS	**T**ransport **M**anagement **S**ystems.
UDDI	**U**niversal **D**escription, **D**iscovery and **I**ntegration.
UE	**U**nion **E**uropéenne.
UML	**U**nified **M**odeling **L**anguage.
UTI	**U**nité de **T**ransport **I**ntermodal.
WDSL	**W**eb **S**ervices **D**escription **L**anguage.
WiFi	**Wi**reless **Fi**delity.
WMS	**W**arehouse **M**anagement **S**ystem.
XML	e**X**tensible **M**arkup **L**anguage.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS III
LISTE DES FIGURES IV
LISTE DES TABLEAUX VII
ABREVIATIONS IX
SOMMAIRE XI

Chapitre 1 – INTRODUCTION GÉNÉRALE : CONTEXTE, PROBLÉMATIQUE ET POSITIONNEMENT DU TRAVAIL DE RECHERCHE 16

Chapitre 2 – ÉTAT DE L'ART SUR LA MODÉLISATION ET L'ÉVALUATION DES PERFORMANCES POUR LA GESTION DE LA CHAINE LOGISTIQUE 21

2.1. Introduction 23
2.2. De la chaine logistique à la gestion de la chaine logistique 24
2.2.1. Étymologie de la logistique 24
2.2.2. Définitions de la chaine logistique 26
2.2.2.1. Définitions de la chaine logistique issues de la littérature scientifique 27
2.2.2.2. Acteurs et structure de la chaine logistique 29
2.2.2.3. Flux dans la chaine logistique 33
2.2.3. Définitions de la gestion de la chaine logistique 35
2.2.3.1. Définitions de la gestion de la chaine logistique issues de la littérature scientifique 35
2.2.3.2. Les ententes industrielles entre centres de décision 37
2.2.3.3. Système décisionnel relatif à la gestion d'une chaine logistique 39
2.2.3.4. Système informationnel de la chaine logistique – Infologistique 42
2.2.4. Bilan – Conclusion 46
2.3. Modélisation de la chaine logistique 48
2.3.1. Modèles organisationnels 48
2.3.1.1. Approche hiérarchique 48
2.3.1.2. Approche hétérarchique 51
2.3.2. Modèles analytiques 52
2.3.3. Modèles pour la simulation 53

2.3.4. Bilan – Conclusion …… 55

2.4. Évaluation de performance de la chaine logistique …… 55

2.4.1. Définitions et concepts : mesure, indicateur et évaluation de performance …… 55

2.4.2. Méthodes d'évaluation de performance de la chaine logistique …… 57

2.4.2.1. Méthodes d'évaluation de performance orientées processus …….. 57

2.4.2.2. Méthodes d'évaluation de performance orientées centres de décisions …….. 59

2.4.3. Bilan – Conclusion …… 62

2.5. Synthèse du chapitre 2 …… 63

Chapitre 3 – CONTRIBUTION A LA CONCEPTUALISATION D'UNE ARCHITECTURE DU CONTROLE DE LA PERFORMANCE DU SERVICE PORTE A PORTE POUR LA MODELISATION DE LA CHAINE DE TRANSPORT INTERMODAL DE MARCHANDISES …… 65

3.1. Introduction …… 67

3.2. Description du transport intermodal de marchandises de porte à porte, le cas du corridor de la vallée de Seine …… 68

3.2.1. Introduction …… 68

3.2.2. Transport intermodal de marchandises : définitions et concepts …… 69

3.2.2.1. La conteneurisation …… 71

3.2.2.2. Les caractéristiques de la chaine de transport intermodal …… 71

3.2.2.3. Le corridor …… 72

3.2.2.4. Brève présentation du corridor de la vallée de Seine …… 74

3.2.2.5. Bilan – Conclusion …… 75

3.2.3. Système opérationnel de la chaine de transport intermodal …… 75

3.2.3.1. Introduction …… 75

3.2.3.2. Les opérations du changement des modes de transport …… 76

3.2.3.3. Les procédures d'empotage et de dépotage …… 84

3.2.3.4. Bilan – Conclusion …… 85

3.2.4. Système décisionnel de la chaine de transport intermodal …… 86

3.2.4.1. Introduction …… 86

3.2.4.2. Processus n°1 : Déclenchement et clôture de système intermodal …… 87

3.2.4.3. Processus n°2 : Organisation de système de transport intermodal …… 89

3.2.4.4. Processus n°3 : Acheminement des conteneurs …… 92

3.2.4.5. Bilan – Conclusion …… 98

3.2.5. Système informationnel de la chaine de transport intermodal …… 98

3.2.5.1. Introduction …… 98

3.2.5.2. Principaux échanges d'informations relatifs au transport intermodal …… 99

3.2.5.3. EDI portuaire 101
3.2.5.4. AP + ... 101
3.2.5.5. Bilan – Conclusion 102
3.2.6. Synthèse de la sous-section 3.2 du chapitre 3 103
3.3. Contribution à la conception d'une architecture du contrôle dans un environnement de transport intermodal de marchandises 104
3.3.1. Introduction 104
3.3.2. Méthodologie de la conceptualisation de l'architecture de contrôle proposée 104
3.3.3. Architecture de contrôle de la chaine de transport intermodal de marchandises 107
3.3.4. Bilan – Conclusion 108
3.4. Synthèse du chapitre 3 108
Chapitre 4 – CONTRIBUTION A LA MODELISATION POUR LA SIMULATION DE LA CHAINE LOGISTIQUE GLOBALE DANS UN ENVIRONNEMENT DE TRANSPORT INTERMODAL DE MARCHANDISES 110
4.1. Introduction 111
4.2. État de l'art sur les Systèmes Multi-Agents (*SMA*) 112
4.2.1. Introduction 112
4.2.2. Systèmes multi-agents : définitions et concepts 113
4.2.2.1. La vue « agent » 114
4.2.2.2. La vue « environnement » 116
4.2.2.3. La vue « interaction » 117
4.2.2.4. La vue « organisation » 119
4.2.3. Analogie entre la chaine logistique et le *SMA* 119
4.3. Méthodologie de la modélisation de la chaine du transport intermodal 121
4.4. Application de la méthodologie 123
4.4.1. Le méta-modèle du domaine 123
4.4.1.1. Vision 1 : aspect structurel 123
4.4.1.2. Vision 2 : aspect orienté processus 125
4.4.1.3. Vision 3 : aspect orienté « pertinence, efficacité et efficience » 128
4.4.2. Le méta-modèle multi-agent 130
4.4.2.1. Le méta-modèle agent 130
4.4.2.2. Le méta-modèle environnement 131
4.4.2.3. Le méta-modèle organisation 132
4.4.2.4. Le méta-modèle interaction 134
4.4.3. Le méta-modèle du domaine agentifié 135
4.4.4. Intégration du protocole d'interaction 140

4.4.4.1. Le comportement nominal des acteurs impliqués 140
4.4.4.2. Le comportement correctif des acteurs impliqués 141
4.4.4.3. Le comportement préventif des acteurs impliqués 145
4.4.5. Le méta-modèle d'implémentation 145
4.5. Synthèse du chapitre 4 152
Chapitre 5 – CONTRIBUTION A LA SIMULATION POUR LA VALIDATION DES META-MODELES STATIQUES ET DYNAMIQUES DE LA CHAINE DE TRANSPORT INTERMODAL DE MARCHANDISES 153
5.1. Introduction 154
5.2. La génération d'un modèle à l'implémentation 155
5.3. Le choix de la plateforme d'implémentation 160
5.3.1. Les plateformes orientées agent 160
5.3.1.1. La plateforme Zeus 160
5.3.1.2. La plateforme MadKit 161
5.3.1.3. La plateforme AgentBuilder 161
5.3.1.4. La plateforme Jade 161
5.3.2. Etude comparative des plateformes agents 162
5.4. Simulation pour la validation des approches proposées 165
5.4.1. Création d'un agent de la plateforme 165
5.4.2. Création et envoi d'un message 167
5.4.3. La communication inter-agents 168
5.4.4. La validation des comportements dynamiques des agents 171
5.4.4.1. Le comportement nominal 171
5.4.4.2. Le comportement correctif 173
5.5. Synthèse du chapitre 5 175
Chapitre 6 – BILAN, CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES 176
GLOSSAIRE 180
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 182
ANNEXE 193

- *Annexe 1* – Les éditeurs des logiciels logistiques mondiaux et français [*PIPAME, 2009*].
- *Annexe 2* – Les atouts du corridor de la vallée de Seine [*CCI Normandie, 2014*].
- *Annexe 3* – Le méta-modèle du domaine agentifié en grand format.
- *Annexe 4* – Le méta-modèle d'implémentation en grand format.

« LE PEU QUE JE SAIS, C'EST À MON IGNORANCE QUE JE LE DOIS. »

(*Sacha Guitry, Toutes réflexions faites*)

Chapitre 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE : CONTEXTE, PROBLÉMATIQUE ET POSITIONNEMENT DU TRAVAIL DE RECHERCHE

CONTEXTE GENERAL

De nos jours, en raison de la globalisation des économies, le transport de marchandises devra être de plus en plus attentif aux besoins de clients plus soucieux de la nature des services qui leur sont fournis. Cette évolution se trouvera renforcée par l'arrivée sur le marché de systèmes et technologies de l'information qui mettent les utilisateurs en mesure de préciser la nature des services dont ils ont besoins et d'intégrer leurs activités avec celles du système de transport de marchandises. Les utilisateurs de ce dernier système seront par conséquent de plus en plus étroitement imbriqués dans des chaines logistiques gérées avec rigueur, des chaines dans lesquelles les décisions prises en matière de quantités, de lieux et de délais de livraison seront dictées par les consommateurs. Les fournisseurs sont déjà tenus informés en permanence du déroulement des programmes de production de telle sorte que les intrants puissent être introduits dans le processus de production en temps voulu et les biens livrés au consommateur dans les délais promis. Les défis, déjà sérieux à l'échelle nationale, ainsi lancés aux systèmes de transport sont encore considérablement amplifiés sur un marché mondialisé.

Plusieurs tentatives ont été menées de la part des industriels et des chercheurs afin d'émerger la chaine de transport intermodal comme une seule entité autonome. En effet, Les différentes entités impliquées dans le processus décisionnel partagent leurs connaissances et unissent leurs compétences afin de mettre en place des chaines continues et intégrées avec feuille de route unique et de faire face aux exigences d'un environnement économique instable et concurrent. Nos travaux de recherche exposés dans ce mémoire, se situent dans ce contexte.

OBJECTIF DE LA THESE

C'est dans ce contexte turbulent de changements importants que nous intervenons. Nous traitons, dans ce mémoire, une problématique sur l'harmonisation et la maitrise complète de la chaine logistique. Nous avons comme ambition d'apporter une contribution au développement de moyens optimisés de la structuration de l'information, d'aide à la décision et de renseignement d'expertise dans différents domaines métiers en nous focalisant plus particulièrement sur les systèmes de transport intermodal. La promotion de l'intermodalité est

un outil stratégique permettant d'envisager les transports suivant une logique de systèmes. Les systèmes de transport proposés sont alors des liaisons porte-à-porte indépendantes des modes, fondés sur diverses possibilités de transport modal viables, représentant une utilisation plus rationnelle et plus équilibrée de la capacité de transport disponible (infrastructure, matériel roulant, équipement de manutention, etc.), qui réduit les coûts et génère de la valeur ajoutée.

Dans une chaine de transport intermodal de marchandises, on constate souvent que les acteurs de ces chaines interviennent pour de multiples tâches. Plusieurs métiers sont des spécialisations diverses. Il y a donc un vrai besoin des méthodes et des outils permettant de monter les interfaces potentielles qui pourraient exister entre acteurs aux métiers semblables ou différents susceptibles de collaborer, de se coordonner et d'inter-opérer. Vu sa complexité, la concrétisation de ce concept d'intermodalité n'est possible qu'à travers un modèle approprié.

Afin de mettre en évidence toutes les contraintes qui nous sont posées, nous proposons l'utilisation conjointe d'une approche sémantique (*AS*) et du paradigme distribué multi-agent (*SMA*) pour la modélisation, l'analyse et l'évaluation des performances de ces réseaux de transport. En effet, aspirant à l'élaboration d'un système global cohérent et capable de gérer les interactions entre les divers modes de transport. Il doit permettre aussi de tenir compte des caractéristiques et des intérêts de l'ensemble des activités tout au long de la chaine. Il convient donc de nuancer les objectifs de nos travaux de recherche en exposant les éléments qui constituent l'idée et le contexte du besoin de notre thèse (*Tab.1.1*).

Titre du sujet proposé	***Modélisation et évaluation des performances de la chaine du transport intermodal de porte à porte.***
Acteurs du projet	• ***Mme. Fairouz GOUIZA*** : La doctorante – Ingénieur en administration réseau titulaire d'un master *2* recherche en informatique industrielle de l'université de *Haute Alsace*; • ***M. Abdellatif BENABDELHAFID*** : Le directeur de la thèse – Professeur des universités, directeur de l'équipe de recherche *SILI* (**S**ystème d'**I**nformation de **L**ogistique **I**ntégrée) à l'université du *Havre* et secrétaire général du réseau *CEMUR* (**C**oopération **E**urope **M**aghreb des **U**niversités en **R**éseau) ; • ***M. Adnan YASSINE*** : Le co-encadrant de la thèse – Professeur des universités en optimisation et recherche opérationnelle, directeur de recherche à l'école d'ingénieur *ISEL* (**I**nstitut **S**upérieur d'**E**tudes **L**ogistiques).

Equipe de recherche	Les travaux de recherche de cette thèse sont menés au sein de l'équipe *SILI*. Cette équipe est principalement orientée vers les problèmes de l'intégration de la chaîne logistique globale. La réalisation d'un système de la logistique intégrée requiert des compétences variées. Il est nécessaire de résoudre des problèmes de modélisation, d'optimisation et d'élaboration des systèmes d'information.
Demandeur de la thèse	• ***Etablissement***: Université du *Havre* ; • ***Laboratoire*** : *LMAH* (**L**aboratoire de **M**athématiques **A**ppliquées du **H**avre); • ***Grand Réseau de Recherche (GRR)***: *TL-TI* (**T**ransport, **L**ogistique, **T**echnologies de l'**I**nformation) ; • ***Intitulé du projet structurant du GRR***: *APLOG* (**A**mélioration et **P**erformance de la **LO**gistique **G**lobale).
But à atteindre du projet APLOG	L'harmonisation et la maitrise complète de la chaine logistique.
Contexte de la demande	Le projet *APLOG* s'intéresse à la configuration actuelle des structures logistiques en *Haute Normandie* (équipements, acteurs, métiers, …). Le projet s'intéresse particulièrement au management des chaines logistiques globales : organisation, processus de décision des acteurs au regard des nouvelles tendances, rôle des différents acteurs, offres / besoins et évolutions des structures (ports, opérateurs économiques agréés, …).
Résultat attendu	La contribution au développement de moyens optimisés d'analyse et de la structuration de l'information, d'aide à la décision, de renseignement et d'expertise dans différents domaines métiers, et en premier lieu les systèmes de logistique et les systèmes de transport.
Articulation avec d'autres projets	Le passage portuaire, *RISC* (**R**éseaux d'**I**nteraction et **S**ystèmes **C**omplexes), *PlaIR* (**Pla**teforme d'**I**ndexation **R**égionale), etc.

Tab.1.1 : Les éléments qui constituent l'idée et le contexte du besoin de notre thèse.

Un des challenges consiste à passer d'une organisation compartimentée et discontinue à une organisation fluide favorisant la circulation des flux, les relations, les complémentarités et les synergies entre les différentes entités de la chaîne de transport intermodal. Dans ce cadre, les enjeux de nos travaux de recherche se présentent comme les deux faces d'une même problématique :

- ***Face 1 (flux informationnel)*** : Les acteurs de la chaine de transport intermodal interviennent pour de multiples tâches. Plusieurs métiers sont des spécialisations très diverses. Il y a un vrai besoin de montrer les interfaces potentielles qui pourraient exister entre acteurs aux métiers semblables ou différents susceptibles de collaborer, de se coordonner et d'inter-opérer ;
- ***Face 2 (flux physique)*** : La principale conséquence d'un transport intermodal est la génération des ruptures de charge. La rupture de charge est l'ensemble des opérations permettant le transfert du conteneur d'un mode de transport à un autre ou au sein d'un même, immédiatement ou après une période de stockage. Ces opérations se déroulent généralement dans un terminal intermodal, leur avantage est la massification des flux mais elles sont coûteuses, pénalisantes et elles génèrent de conflits entre les opérateurs. Il y a un vrai besoin de limiter les contraintes liées à ces ruptures.

Afin de répondre à ces besoins, nos travaux de recherche que nous présentons dans ce manuscrit ont pour objectif de proposer les solutions suivantes :

- Modéliser la chaine logistique dans un environnement du transport intermodal de marchandises (service porte à porte) en se focalisant sur les activités liées aux ruptures de charge. Une modélisation cohérente permettant de voir la chaine de transport intermodal dans sa globalité afin d'apporter une aide précieuse en matière d'intégration et d'évaluation de performance des systèmes logistiques et des systèmes de transport;
- Développer des méta-modèles capables de distinguer les différentes opérations de transport intermodal (ruptures de charge) et de les synchroniser avec l'ensemble des chaines productives et des processus logistiques en utilisant les *SMA* ;
- Représenter l'écoulement des marchandises et la répartition des compétences et des connaissances entre les différents acteurs. Il s'agit d'un outil qui fournit les interactions et les règles de l'organisation permettant d'identifier les bons interlocuteurs sur le réseau du transport intermodal ;
- Valider les résultats obtenus à l'aide de simulation avec des études de cas d'un réseau de transport de la région *Haute Normandie*.

PLAN SYNTHETIQUE DE LA THESE

Ce mémoire de thèse est composé de six chapitres. Les paragraphes suivants résument l'ensemble des chapitres:

Le ***premier chapitre*** est une introduction générale qui positionne nos travaux de recherche dans leur contexte en identifiant les objectifs, la problématique et les questions de recherche qui en découlent.

Le ***deuxième chapitre*** présente un état de l'art permettant de fournir un tour d'horizon sur les différentes visions adoptées par la communauté scientifique dans la conceptualisation de la chaine logistique, présenter les différentes définitions issues de la littérature scientifique de la gestion de la chaîne logistique, discuter les différentes approches de la modélisation dans la chaîne logistique et enfin, définir les différents concepts liés à l'évaluation de performance de la chaine logistique en proposant un tour d'horizon sur l'ensemble des méthodes et des modèles proposés dans la littérature scientifique.

Le ***troisième chapitre*** se focalise d'une part sur une analyse détaillée des concepts fondamentaux de notre domaine spécifique afin de pouvoir réaliser une conceptualisation fidèle à l'environnement de transport intermodal de marchandises (porte à porte). D'autre part, il propose une structure générique et une architecture de contrôle de performance mixte à plusieurs superviseurs ayant des liens communs afin de pouvoir respecter la spécificité structurelle, organisationnelle et décisionnelle du système étudié.

Le ***quatrième chapitre*** décrit la construction d'une modélisation reflétant de façon plus fidèle, en partant de la conceptualisation, la propre image de la chaine logistique globale dans un environnement du transport intermodal porte à porte. Dans un premier lieu, ce chapitre recueille les principaux concepts liés au processus de développement « *ArchMDE* » adopté afin de mener à terme cette étape de modélisation. Par la suite, il spécifie les méta-modèles proposés et les relations de fusion entre eux.

Le ***cinquième chapitre*** se focalise sur la validation de notre solution mise en place. Il s'agit d'une vérification de la compatibilité de notre méta-modèle avec la réalité du terrain. Dans un premier lieu, ce chapitre exploite l'étude sur le terrain de cas de la *région de la Haute Normandie* afin de générer un modèle nécessaire à l'implémentation. Ensuite, il présente une étude qui justifie notre choix de l'outil d'implémentation Jade. Enfin, il traite le couplage de notre modélisation à la simulation permettant ainsi la description du mécanisme obtenu qui reflète le comportement du système réel.

Le ***sixième chapitre*** conclut et résume les travaux réalisés en proposant quelques pistes pour les travaux futurs.

Chapitre 2

ÉTAT DE L'ART SUR LA MODÉLISATION ET L'ÉVALUATION DES PERFORMANCES POUR LA GESTION DE LA CHAINE LOGISTIQUE

Table des matières

2.1. Introduction

2.2. De la chaine logistique à la gestion de la chaine logistique

2.2.1. Étymologie de la logistique

2.2.2. Définitions de la chaine logistique

2.2.2.1. Définitions de la chaine logistique issues de la littérature scientifique

2.2.2.2. Acteurs et structure de la chaine logistique

a. La dimension horizontale (orientation structure / acteur)

b. La dimension verticale (orientation produit / processus)

c. Le positionnement de l'acteur dans la chaine logistique

2.2.2.3. Flux dans la chaine logistique

2.2.3. Définitions de la gestion de la chaine logistique

2.2.3.1. Définitions de la gestion de la chaine logistique issues de la littérature scientifique

2.2.3.2. Les ententes industrielles entre centres de décision

2.2.3.3. Système décisionnel relatif à la gestion d'une chaine logistique

2.2.3.4. Système informationnel de la chaine logistique – Infologistique

a. Les logiciels de la gestion interne de la chaine logistique

b. Les outils de communications inter-entreprises

c. Les outils et services de mobilité

d. Les outils d'identification et de traçabilité

2.2.4. Bilan – Conclusion

2.3. Modélisation de la chaine logistique

2.3.1. Modèles organisationnels

2.3.1.1. Approche hiérarchique

2.3.1.2. Approche hétérarchique

2.3.2. Modèles analytiques

2.3.3. Modèles pour la simulation

2.3.4. Bilan - Conclusion

2.4. Évaluation de performance de la chaine logistique
2.4.1. Définitions et concepts : mesure, indicateur et évaluation de performance
2.4.2. Méthodes d'évaluation de performance de la chaine logistique
2.4.2.1. Méthodes d'évaluation de performance orientées processus
a. La méthode ABC - ABM
b. La méthode BSC
c. Le modèle SCOR
2.4.2.2. Méthodes d'évaluation de performance orientées centres de décisions
a. La méthode ECOGRAI
b. Le triplet efficacité / efficience / pertinence
2.4.3. Bilan - Conclusion
2.5. Synthèse du chapitre 2

2.1. Introduction

Après avoir mis l'accent sur le contexte, la problématique et le positionnement des travaux de recherche. Ce ***deuxième chapitre de ce manuscrit*** se focalise sur l'acquisition d'un état de l'art d'une part sur la ***chaine logistique*** et la ***gestion de la chaine logistique***, et d'autre part sur la ***modélisation*** et l'***évaluation de performance*** de la chaine logistique:

La ***deuxième section*** (*cf. section 2.2*) présente d'une part, une ***étude chronologique*** permettant de distinguer plusieurs périodes dans la logistique militaire en mettant en évidence les principaux concepts qui sont à la base de la démarche logistique actuelle en fournissant un tour d'horizon sur les différentes visions adoptées par la communauté scientifique dans la ***conceptualisation de la chaine logistique***. In fine, l'émergence de la chaîne logistique a fait naître des besoins en matière d'***intégration d'entreprises*** et de coordination des flux de matière et des flux d'information. C'est la gestion de la chaîne logistique qui englobe les approches, les méthodes et les outils permettant de répondre à ces besoins. D'une part, nous présentons les différentes définitions issues de la littérature scientifique de la ***gestion de la chaîne logistique*** et nous définissions l'ensemble des ***ententes industrielles*** nouées inter et intra-entreprises, en prolongeant l'étude par ces différentes architectures de pilotage qui forment l'articulation entre le ***système décisionnel*** et le ***système d'information*** des chaines logistiques. Par la suite, nous proposons les définitions des différentes familles des systèmes informationnels existants.

Tout au long de la ***troisième section*** (*cf. section 2.3*), nous présentons les différentes approches de la ***modélisation dans la chaîne logistique***. Ceci permet de constater l'importance des ***modèles à base des agents*** (*SMA*) qui sont adaptés aux caractéristiques dynamiques de tels systèmes complexes.

Pour sa part, la ***quatrième section*** (*cf. section 2.4*) définit les différents concepts liés à l'***évaluation de performance*** de la chaine logistique et propose un tour d'horizon sur l'ensemble des méthodes et des modèles proposés dans la littérature scientifique afin de mener des bonnes pratiques d'évaluation de performance. Ceci permet de constater l'importance des travaux menés par *Lauras* dans [*Lauras, 2004*] concernant l'établissement d'un lien entre la vue décisionnelle, la vue fonctionnelle et la performance. Enfin, une ***synthèse*** qui positionne nos travaux de recherche sera proposée dans la ***cinquième section*** (*cf. section 2.5*).

2.2. De la chaine logistique à la gestion de la chaine logistique

2.2.1. Étymologie de la logistique

La définition de la logistique prend un sens plus précis suivant le contexte dans lequel elle a été déployée durant son évolution au fil des temps. En effet, le terme « *logistique* » a une source mathématique. Il est apparenté au mot grec « *logistikos* » qui signifie « *relatif au calcul* » [*Roquefort, 1829*], « *qui concerne le raisonnement* » [*Le Petit Robert, 2015*]. C'est le philosophe grec *Platon* (*428-348 av. J.C.*) qui, le premier, s'est servi du mot « *logistikos* » pour désigner la logistique comme le calcul pratique et la distinguer de l'arithmétique théorique [*Caveing, 1997*]. Le mot « *logistique* » est employé la première fois dans la langue française en *1590*, comme un adjectif qui signifie « *qui pense logiquement* » [*Lièvre, 2007*]. En *1611*, la logistique est étudiée comme une partie de l'algèbre qui traite les quatre opérations élémentaires [*Famuel, 1690*]. En *1765*, nous trouvons une association entre le terme « *logistique* » et celui de logarithme, on parle de logarithme logistique (la loi log-logistique connue aussi comme la distribution de *Fisk* en économie) [*Montferrier, 1835*]. Au début du *XX*^{e} siècle, la logistique devient une discipline qui s'intéresse à la dimension logique des mathématiques [*Russel et Whitehead, 1910-1913*]. En effet, *Bertrand Russell* considère que les mathématiques est l'étape de maturité de la logique et donc il participe à la naissance de la logique moderne.

Les chefs de guerre du *IV*^{e} millénaire *av. J.C.* se préoccupaient du soutien en denrées alimentaires de leurs troupes. Le premier théoricien militaire de l'histoire, le général chinois *Sun Tzu* (*544-496 av. J.C.*) a placé la problématique de l'***approvisionnement*** au cœur de ses préoccupations [*Griffith, 2006*]. Alors qu'*Alexandre Le Grand* (*356-323 av. J.C.*) est le premier à expliquer que la guerre nécessite avant tout une préparation importante pour pouvoir mener campagne dans les meilleures conditions envisageables. En effet, il fut certainement le premier chef de guerre à fournir une réponse novatrice à l'arbitrage ***mobilité-approvisionnements*** en vivre [*stratégie logistique, 2003*]. Ainsi les Romains entretenaient des stocks de denrées alimentaires dans les villes occupées. En effet, *Jules César* (*100-40 av. J.C.*), en créant la fonction « *logista* » chargeait un officier de s'occuper des mouvements des légions romaines pour organiser les campements de nuit et prévoir les dépôts d'approvisionnement en territoire soumis [*Médan et Gratacap, 2008*]. Du *X*^{e} siècle au *XVIII*^{e} siècle, à Byzance, la logistique de guerre était étudiée avec un grand soin non seulement pour des questions stratégiques mais aussi tactiques. En effet, selon l'Empereur byzantin *Léon VI* (*886-912*), la logistique est considérée tout aussi importante que la stratégie (conduite des troupes) et la tactique

(organisation du combat), elle devait s'occuper non seulement de la préparation de l'armée, mais encore de toutes les tâches en lien avec ***les déplacements***. Cette interprétation de la logistique influença durablement les auteurs militaires subséquents [*Leo, 2010*]. On remarque dès le *XVI^e^* siècle que la France contribua aux améliorations dans le domaine logistique. Un service dit de « *subsistance* » était responsable de bien ravitailler les soldats avant les combats. Pour assurer le ***transport alimentaire***, les premières unités de transport militaire appelées « *équipages de vivres* » furent mises en place en *1643* [*Lung, 1983*]. A travers l'histoire de l'humanité, des guerres furent gagnées ou perdues grâce aux atouts et capacités de la logistique, ou au contraire, à cause de ses faiblesses. La défaite des Britanniques dans la guerre d'Indépendance des Etats-Unis (*1775-1783*) serait due à des erreurs logistiques.

Au *XIX^e^* siècle et dans tous les pays, les milieux militaires négligeaient systématiquement les problèmes de soutien. En effet, face à la taille croissante de l'armée du premier Empereur des français *Napoléon 1^er^* (*1769-1821*), les compagnies civiles privées ne furent plus jugées assez efficaces. Ainsi, toutes les opérations de transport militaire sont maintenant effectuées par des militaires. C'est dans cet état d'esprit que *Napoléon Bonaparte* créé le train d'artillerie en *1800*, le train du génie et le train des équipages en *1807*. On pourrait dire que l'***activité de soutien*** non stratégique assurée par des prestataires extérieurs devient stratégique et ***intégrée***. *Antoine-Henri de Jomini* (*1779-1869*), suite à sa mission de maréchal général des « *logis*[1]» de la cavalerie française au service de *Napoléon 1^er^*, ce théoricien fût le premier à expliciter le rôle de la logistique dans ***la conduite d'opérations*** militaires dans son « *Précis de l'Art de la Guerre* », publié en *1837*. La vision qu'a *Jomini* de la logistique ou « *l'application pratique de l'art de mouvoir les armées* » peut-être transposée sur le terrain des entreprises. En effet, il traite la question que se posent encore aujourd'hui de très nombreux chercheurs et professionnels qui s'intéressent à la logistique, civile ou militaire : la logistique est-elle une " ***science de détail*** " ou est-elle une " ***science générale*** " ? [*Colin, 1996*]. Plus tard, dans son ouvrage révolutionnaire intitulé « *Pure Logistics. The Science of War Preparation* », l'amiral américain *George Cyrus Thorpe* (*1875-1936*) considère la logistique comme une science et un volet complet de la conduite de la guerre, qui regroupe un nombre important d'activités (tels que le ravitaillement, les transports, l'ingénierie, l'entretien, le service sanitaire, l'administration ainsi que d'autres activités logistiques) qui doivent ***être coordonnées*** avec les intentions stratégiques et tactiques [*Thorpe, 1986*].

[1] Responsable pour la discipline et le soutien des troupes.

Au *XX^e^* siècle, naturellement la « *logistique militaire* » a pris une place croissante dans la pensée militaire au cours de l'histoire. En effet, c'est pendant la *Seconde Guerre mondiale* (*1939-1945*) que la logistique militaire a trouvé toute son envergure en Europe : la bataille de Normandie reste la plus grande opération logistique de débarquement [*Colin, 1996*]. Le débarquement des Alliés en Normandie, réussi de justesse en juin *1944*, s'explique par l'intense effort de préparation logistique, engagé sous l'impulsion de Chef d'état-major américain, le général *George Marshall* (*1880-1959*). Depuis, la logistique et le transport militaires se sont développés progressivement, en s'adaptant aux besoins de l'armée et à l'évolution des combats et des opérations de la France partout dans le monde. La pensée de la logistique civile s'est construite en parallèle à la pensée de la logistique militaire du fait de finalités différentes comme le développement des travaux structurant la recherche opérationnelle, permettant ainsi aux entreprises, dès la période de l'après-guerre, d'adopter un premier traitement de la logistique.

2.2.2. Définitions de la chaine logistique

La période de *1950* à *1975* marque la phase de développement de la logistique d'entreprise. En *1972*, le *NCPDM* (*National Council of Physical Distribution Management*) livre une analyse approfondie sur ce qu'est la logistique: « *Terme décrivant l'intégration de deux (ou plusieurs) activités dans le but de planifier, mettre en œuvre et contrôler un flux efficient de matières premières, produits semi-finis et produits finis, de leur point d'origine au point de consommateur. Ces activités peuvent inclurent, sans que la liste ne soit limitative, le type service offert aux clients, la prévision de la demande , les communications liées à la distribution, le contrôle des stocks, la manutention des matières, le traitement des commandes, le service après-vente et des pièces détachées, le choix des emplacements d'usines et d'entrepôts, les achats, l'emballage, le traitement des marchandises retournées, la négociation ou la réutilisation des éléments récupérables ou mis à la ferraille, l'organisation du transport et le transport effectif des marchandises ainsi que l'entreposage et le stockage.»* Cette définition prend en compte des phases d'approvisionnement, de recyclage et de certains aspects de management (planification et contrôle). Durant la période allant de *1975* à *1995*, la logistique qui était opérationnelle, où le client accepte de patienter avec des délais et une qualité moyens, se transforme à une logistique intégrée [*Médan et Gratacap, 2008*]. Et donc, tous les services (conception, production, distribution, etc.) doivent collaborer et échanger des informations. A partir de l'année *1995*, le client devient roi à un large choix. Ce qui a nécessité la prise en compte des contraintes de plusieurs acteurs de la chaine logistique pour d'une part assurer un compromis équitable entre les objectifs de chacun (gagnant-gagnant). D'autre part, avec de la

coopération et de la collaboration, pour assurer un flux de matière sans rupture, fiabiliser et fluidifier le flux d'informations correspondant.

2.2.2.1. Définitions de la chaine logistique issues de la littérature scientifique

Le terme « *chaîne logistique* » vient de l'anglais « ***Supply Chain*** » qui signifie littéralement « *chaîne d'approvisionnement* ». 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 : il n'y a pas une définition universelle de ce terme. Dans nos travaux de thèse nous proposons un tour d'horizon de quelques-unes des définitions existantes. Ces définitions sont recensées dans le tableau suivant (*Tab.2.1*) :

Auteurs	**Définitions**
[Christopher, 1992]	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.
[Lee et Billington, 1993]	La chaîne logistique est 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.
[La Londe et Masters, 1994]	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.
[Greis et Kasarda, 1997]	Un groupe d'entreprises qui sont légalement séparées mais stratégiquement alignées et opérationnellement interdépendantes. Elles s'intéressent aux opportunités spécifiques du marché.
[Tayur et al, 1999] – [Stadlter et Kilger, 2000]	Une chaine logistique est un ensemble de relations clients/fournisseurs successives intégrant, pour chaque entité, les activités d'approvisionnement, de production et de distribution.
[Tsay, 1999]	Une chaine logistique est un ensemble de deux ou plusieurs entreprises liées par des flux de marchandises, flux d'informations et flux financiers.
[Stadlter et Kilger, 2000]	Une chaîne logistique est constituée de deux ou plusieurs organisations indépendantes, liées par des flux physiques, informationnels et financiers. Ces organisations peuvent être des

	entreprises produisant des composants, des produits intermédiaires et des produits finis, des prestataires de service logistique et même le client final lui-même.
[Mentzer et al, 2001]	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.
[Rota-Franz et al, 2001] - [Monteiro, 2001]	Un groupe d'entreprises qui sont reliées par des flux de produits (flux bidirectionnel ou flux de sous-traitance) et des flux d'information (flux de données, flux de décision ou les métriques).
[Govil et Proth, 2002]	Une chaine logistique est un réseau global d'organisations qui coopèrent pour réduire les coûts et augmenter la vitesse des flux de matières et d'informations entre les fournisseurs et les clients.
[Génin, 2003]	Un réseau d'organisations ou de fonctions géographiquement dispersées sur plusieurs sites qui coopèrent, pour réduire les coûts et augmenter la vitesse des processus et activités entre les fournisseurs et les clients.
[Lummus et Vokurka, 2004]	Une chaine logistique est toutes les activités impliquées dans la livraison d'un produit depuis le stade de matière première jusqu'au client en incluant l'approvisionnement en matière première et produits semi-finis, la fabrication et l'assemblage, l'entreposage et le suivi des stocks, la saisie et la gestion des ordres de fabrication, la distribution sur tous les canaux, la livraison au client et le système d'information permettant le suivi de toutes ces activités.

Tab.2.1 : Définitions de la chaine logistique issues de la littérature scientifique.

Dans le tableau *2.1* (*Tab.2.1*), les définitions proposées sont très variées mais reprennent cependant un certain nombre d'idées communes et évoquent toutes les mêmes éléments clés de la chaîne logistique suivant des visions différentes. Pour notre part, nous considérerons que la chaîne logistique peut ainsi se définir en tant que :

- ***Un ensemble des acteurs assemblés au sein d'une structure de fonctionnement régulée*** – Plusieurs définitions identifient l'ensemble des éléments (acteurs) existant au sein d'une chaine logistique. Une chaîne logistique est ainsi vue comme un réseau d'entreprises, d'installations, de sites, … et de client final. Ces acteurs sont, suivant des visions différentes, caractérisés par trois attributs: organisation, géographie et granularité décisionnelle. La structure topographique qui assemble tous ces acteurs peut être orientée selon deux visions : vision centrée « *structure / entreprise* » et vision centrée « *produit / processus* » (*cf. section 2.2.2.2*);

- ***Ayant un système de communication pour faciliter la circulation de produits et de l'information*** – De nombreuses définitions mettent l'accent sur le terme « *flux* ». Les flux sont ainsi vus comme les entités qui mettent en relation tous les acteurs impliqués dans la chaine logistique (*cf. section 2.2.2.3*) ;
- ***Dont le but de répondre à des besoins et d'atteindre des objectifs déterminés*** – Certaines définitions insistent d'avantage sur la finalité d'une chaîne logistique en introduisant la notion de « *performance* ». Cette performance étant principalement caractérisée par la satisfaction du client final. *Fenies et Gourgand* [*Fenies et Gourgand, 2004*] complètent cette vision de la chaîne logistique en distinguant la performance collective (optimisation globale du fonctionnement de la *supply chain*) et la performance individuelle (maximisation du profit d'une entité) (*cf. section 2.4*).

2.2.2.2. Acteurs et structure de la chaine logistique

Pour caractériser la structure organisationnelle d'une chaîne logistique, le modèle le plus connu est celui de *Lambert* et *Cooper* [*Lambert et Cooper, 2000*] qui proposent une structuration tridimensionnelle d'un réseau logistique qui seraient « *La dimension horizontale, la dimension verticale* et *la position de l'acteur* dans la chaine logistique » :

a. La dimension horizontale (orientation structure / acteur)

Cette dimension structure la chaine logistique autour de l'entreprise (vue inter-organisation) qui peut à son tour, selon une vision intra-organisationnelle, prendre diverses formes organisationnelles [*Stadlter et Kilger, 2000*] :

- ***Structure organisationnelle d'acteur*** – Cette structure cible l'identité même de chacune des organisations impliquées dans la chaîne logistique. L'entreprise peut être représentée sous plusieurs formes d'organisation qui seraient: *1)* ***L'entreprise traditionnelle*** est une organisation disposant d'une autonomie (processus d'élaboration complet d'un produit) et ses activités peuvent être décomposées en deux phases distinctes : l'activité productive (création de biens ou services) et l'activité de redistribution des richesses (en contrepartie des biens ou services) [*Lexique, 2006*]. Lorsque les différentes activités d'une même entreprise sont implantées sur des sites géographiquement distribuées, on parlera ainsi de l'***entreprise multi-sites*** ; *2)* ***L'entreprise réseau*** est un ensemble d'entreprises juridiquement indépendantes liées

par le cycle de production pour répondre à un besoin précis, chaque entreprise membre participe au processus d'élaboration partiel d'un produit ou un service, en créant alors une dépendance mutuelle avec les partenaires sélectionnés et évoluant autour d'une *entreprise pivot* [*Julien, 1994*]. La relation « *donneur d'ordre* » passe désormais de la hiérarchie traditionnelle à la collaboration en concluant un ensemble des ententes (*cf. section 2.2.3.2*). ***La chaine logistique se distingue du concept de l'entreprise réseau car cette dernière n'est pas obligatoirement orientée sur le processus d'élaboration complet d'un produit fini***. ***L'entreprise virtuelle*** est considérée comme une entreprise réseau ayant une existence temporaire. Elle cherche à exploiter des opportunités volatiles sans superstructure organisationnelle importante ; *3)* ***L'entreprise étendue*** est un groupe d'entreprises qui sont légalement séparées mais stratégiquement alignées et opérationnellement interdépendantes (en termes de ressources leur permettant d'atteindre les objectifs). Elles s'intéressent aux opportunités spécifiques du marché [*Greis et Kasarda, 1997*]. L'entreprise étendue correspond à ***un très haut niveau de collaboration***, il s'agit du stade ultime de l'entreprise réseau. ***Les entreprises impliquées partagent un système de gestion (standard commun) permettant l'interopérabilité des différents systèmes de gestion associés à chaque entreprise***.

- ***Structure organisationnelle de la chaine logistique*** – Selon *Mentzer et al.* [*Mentzer et al., 2001*], une chaîne logistique peut prendre trois formes possibles qui seraient: *1)* ***Une chaîne directe***, c'est la forme minimale de la chaine logistique, le réseau se limite à l'entreprise productrice, son fournisseur direct et son client final ; *2)* ***Une chaîne étendue***, c'est une chaine logistique directe qui inclut trois autres catégories d'acteurs: le fournisseur du fournisseur en amont ainsi que le client du client en aval ; *3)* ***Une chaîne 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 au nombre de maillons présents et à la variété des relations existantes***. Cette structure est aussi dénommé « *l'étendue de l'intégration* », *Paché* et *Spalanzani* [*Paché et Spalanzani, 2013*] proposent cinq niveaux de cette intégration qui seraient « *inter-organisationnelle, inter-organisationnelle limitée, inter-organisationnelle étendue, multi-chaines* et *sociétale* ».

- ***Structure topographique de la chaine logistique*** – *Beamon* et *Chen* [*Beamon et Chen, 2001*] classent les structures topographiques de la chaîne logistique en quatre familles qui seraient « *convergents, divergents, conjoints* et *généraux* » (*Fig.2.1*). Pour définir

ces structures *Cheyroux* suit le trajet de matières dans la chaîne [*Cheyroux, 2003*] : dans une ***chaine convergente***, la matière qui circule entre les sites converge vers un seul et même site qui est logiquement le lieu d'assemblage final. L'industrie navale ou encore aéronautique sont des bons exemples de ce type de chaîne. Une structure totalement convergente signifie l'absence de réseaux de distribution pour la vente des produits. A l'opposé du cas précédent, dans une ***chaine divergente***, la matière part d'un point unique et se distribue à travers la chaîne. Cela concerne par exemple l'industrie minière. Une structure purement divergente est incertaine, car cela signifierait que le produit fini ne découle que d'un fournisseur amont. La juxtaposition de ces deux structures (convergente et divergente) forme une ***chaine conjointe***. Une ***chaîne générale / mixte*** n'est ni totalement convergente ni totalement divergente. Généralement, la topologie d'une chaîne logistique est donc de type « ***réseau*** » (*Fig.2.2*), avec des ramifications plus ou moins grandes [*Galasso, 2007*].

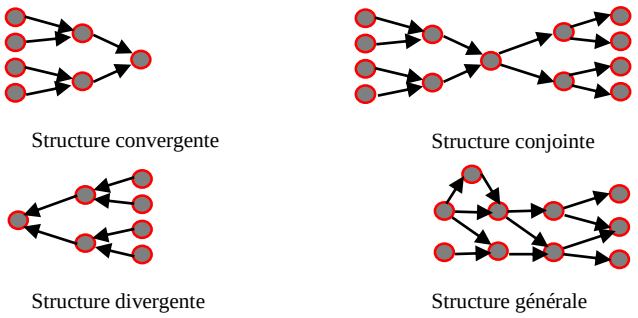


Fig.2.1 : Les structures topographiques de la chaine logistique [*Beamon et Chen, 2001*].

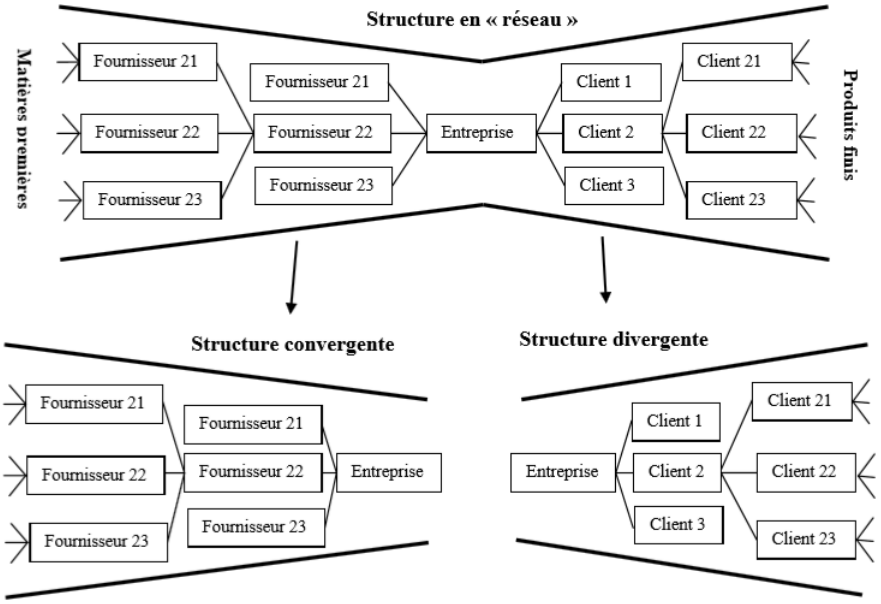


Fig.2.2 : Structures élémentaires d'une chaine logistique [*Galasso, 2007*].

b. La dimension verticale (orientation produit / processus)

La dimension verticale structure la chaîne logistique autour d'un produit fini et de ses composants en se focalisant sur les fonctions nécessaires à sa production et à sa distribution vers le client. Ainsi, la chaîne logistique est considérée comme un ensemble des processus clés. *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*, l'*approvisionnement*, la *production*, la *distribution* et la *gestion de retour* » :

- ***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 ;
- ***L'approvisionnement*** - est défini à travers les activités nécessaires pour récupérer de la matière première afin de fabriquer le produit. Le processus d'approvisionnement regroupe toutes les relations avec les fournisseurs pour assurer les niveaux de stocks en composants nécessaires et suffisants pour la fabrication ;
- ***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. Les méthodes utilisées pour la gestion de la production cherchent à améliorer le flux des produits dans les ateliers de fabrication à travers la planification et l'ordonnancement, etc… ;
- ***La distribution*** - englobe toutes les activités prenant en charge les commandes clients et leur livraison. Ce processus reprend les questions d'optimisation des réseaux de distribution : l'organisation et le choix des moyens de transport, le choix du nombre d'étages (ou d'intermédiaires) dans le réseau de distribution ainsi que le positionnement des entrepôts et leur mode de gestion ;
- ***La vente*** - mis en œuvre par le service commercial, elle développe les relations envers le client (négociation des prix et des délais, enregistrement des commandes, …) et par extension, recherche une meilleure connaissance du marché. Ce processus est également chargé de définir la demande prévisionnelle pour anticiper l'évolution de ses ventes;
- ***La gestion des retours (après-vente)*** - est un processus prenant en compte toutes les activités nécessaires pour gérer le retour du produit défectueux par le client ou par un autre maillon du réseau, leur réparation, voire leur destruction et/ou leur recyclage.

c. Le positionnement de l'acteur dans la chaine logistique globale

Cette dimension fait référence à la position qu'occupe une entreprise dans la chaîne. Chacun des acteurs peut être assimilé à un centre de décision. Chaque centre de décision a la capacité de prendre ses propres décisions, en réponse ou non à des événements extérieurs qui influent sur l'environnement ou ils évoluent (*cf. section 2.2.3.3*). Pour les grands réseaux, *Lambert* et *Cooper* [*Lambert et Cooper, 2000*] et *Min* et *Zhou* [*Min et Zhou, 2002*] proposent de classer les acteurs de la chaîne en deux catégories : *1)* ***Les membres essentiels*** (acteurs industriels majeurs contribuant à l'élaboration du produit) ; *2)* ***Les membres secondaires*** (consultants, banques, partenaires de recherche, …). La granularité décisionnelle d'un acteur dépend aussi de l'organisation décisionnelle des entités qui le composent : *1)* ***L'organisation fragmentée*** est archaïque et n'a pas pour vocation une quelconque coordination entre les entités qui la composent ; *2)* ***L'organisation centralisée*** est caractérisée par le contrôle d'une entité de l'ensemble de l'organisation, la coordination entre les entités se fait par l'intervention de l'entité de contrôle ; *3)* ***L'organisation hiérarchisée*** est caractérisée par une structure dans laquelle les niveaux supérieurs définissent les contraintes et les objectifs à atteindre ; *4)* ***L'organisation centralisée / hiérarchisée*** se caractérise par le fait que toute entité possède un centre de décision qui soit autonome dans ses prises de décisions à condition de respecter des contraintes globales fournies par le système de décision coordinateur. Dans ces organisations, l'inconvénient réside dans le fait que ce type d'organisation est mal adapte à l'environnement actuel des entreprises. Cela est dû à la difficulté ou à l'impossibilité de réunir l'ensemble des acteurs dans de telles structures en raison de leur appartenance à des organismes partenaires voire concurrents ; *5)* ***L'organisation distribuée*** (***organisation en réseau***) se caractérise par le fait que chacun des centres de décision, qui représente un partenaire, est totalement autonome dans ses prises de décisions. Il n'existe pas de structure dirigeante de l'ensemble de l'organisation. ***Dans ce type d'organisation, il est difficile de mesurer la cohérence et l'influence que peuvent avoir les décisions prises localement sur le reste du système***.

2.2.2.3. Flux dans la chaine logistique

Selon *Rota-Frantz et al.* [*Rota-Frantz et al., 2001*] et *Monteiro* [*Monteiro, 2001*], les entreprises appartenant à une même chaîne logistique sont reliées par des flux de produits et des flux d'informations :

- ***Le flux de produits*** correspond au flux de matières (produit final, matière première, des composants d'assemblage, etc…) qui circulent au niveau de la chaine logistique de l'amont vers l'aval afin de fournir de la valeur ajoutée au client final. L'écoulement du flux physique résulte de la mise en œuvre des diverses activités de manutention et de transformation des produits quel que soit leur état. Le flux physique est généralement considéré comme étant ***le plus lent des deux flux*** ;
- ***Le flux d'information*** représente l'ensemble des transferts ou échanges de données entre les différents acteurs de la chaîne logistique. Il peut être partitionné en un flux de *données*, un flux de *décisions* et les *métriques* [*Jihene, 2011*] : *1)* ***Les données informationnelles*** sont les données de gestion et les données informatiques; *2)* ***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; *3)* ***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. Traditionnellement, les flux de la chaine logistique étaient agencés séquentiellement, suivant un tracé linéaire de ses fonctions (*Fig.2.3*). Mais grâce aux progrès des *TIC* (Technologies de l'Information et de la Communication), elle est devenue rapide, ce qui a produit un changement au niveau de l'organisation des flux de la chaîne logistique [*Monteiro, 2001*] (*Fig.2.4*).

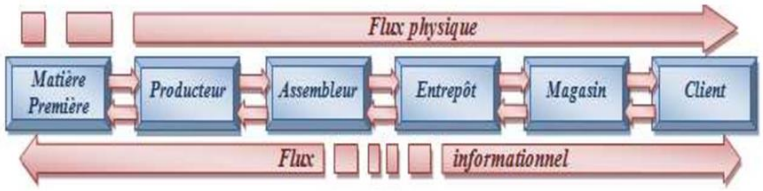


Fig.2.3 : L'organisation linéaire des flux dans la chaine logistique [*Greis et Kasarda, 1997*].

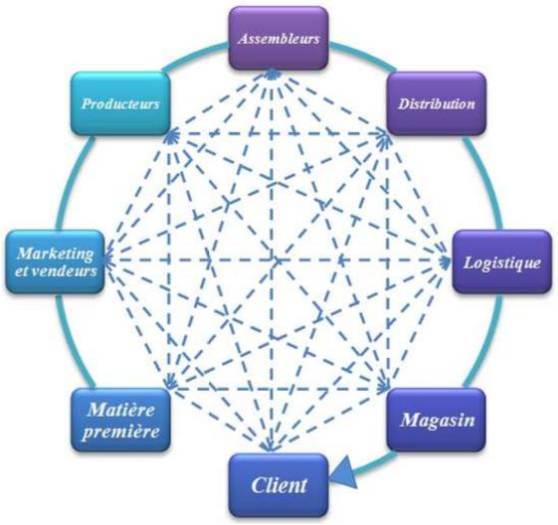


Fig.2.4 : L'organisation simultanée des flux dans la chaine logistique [*Greis et Kasarda, 1997*].

2.2.3. Définitions de la gestion de la chaine logistique

2.2.3.1. Définitions de la gestion de la chaine logistique issues de la littérature scientifique

Le concept de « ***gestion de la chaîne logistique*** » plus connu sous l'appellation anglophone « ***Supply Chain Management*** » (***SCM***) regroupe l'ensemble des activités visant à conduire et améliorer cette chaîne logistique. L'origine du « ***SCM*** » provient du « ***materials management*** » (*gestion des produits*) et du « ***physical distribution*** » (*distribution physique*) après la seconde guerre mondiale, ainsi que du domaine du « ***functional logistics*** » (*logistiques fonctionnelles* – différents managers pour toutes les fonctions) et de « ***integrated logistics*** » (*logistiques intégrées* – un seul manager pour toutes les fonctions) [*Ganeshan et al., 1998*]. Dans nos travaux de thèse nous proposons un panorama sur les théories et les pratiques existantes dans ce domaine. Ces théories sont recensées dans le tableau suivant (*Tab.2.2*) :

Auteurs	**Définitions**
[Thomas et Griffin, 1996]	La gestion de la chaîne logistique est la gestion des flux de marchandises et d'informations à la fois dans et entre les sites tels que les points de vente, les centres de distribution et les usines de production et d'assemblage.
[Tan et al, 1998]	Le « *Supply Chain Management* » est une « *philosophie de gestion* » qui étend les activités intra-entreprises traditionnelles aux partenaires de la chaine, pour atteindre une meilleure performance globale.
[Croom et al, 2000]	Le « *Supply Chain Management* » est une façon de gérer les flux de matières et informationnels entre les entreprises de la chaine.
[Stadtler et Kilger, 2000]	Ils distinguent deux composantes principales dans le *SCM* : *1)* L'intégration du réseau d'organisations ; *2)* La coordination des différents flux.
[Mentzer et al., 2001]	La gestion des chaines logistiques se définit par la coordination systémique et stratégique entre fonctions internes ou externes d'une ou plusieurs entreprises. Le but de cette démarche réside donc dans l'amélioration de la performance à long terme de chaque membre de la chaine logistique et de ce fait, de l'ensemble de celle-ci.
[Rota-Franz et al, 2001]	Le « *Supply Chain Management* » signifie qu'on cherche à intégrer les moyens internes et externes pour répondre à la demande des clients. L'objectif est d'optimiser de manière simultanée et non plus séquentielle l'ensemble des processus logistiques.
[Carbone et Meunier, 2006]	S'il est difficile d'identifier une définition unique et partagée du *SCM*, la démarche peut néanmoins être envisagée comme une philosophie, une orientation de gestion incitant à adopter une vision systémique de la chaine de l'aval vers l'amont, où la coordination

	parmi les acteurs garantit l'atteinte des résultats de baisse des coûts et d'augmentation du niveau de service au consommateur final.
[La Forme-Chrétien, 2007]	La définition du « *Supply Chain Management* » nous mène invariablement vers la notion de processus puisque la gestion des chaines logistiques implique une organisation par processus et non plus par fonction.

Tab.2.2 : Définitions de la gestion de la chaine logistique issues de la littérature scientifique.

Les définitions du paradigme *SCM* sont différentes selon les visions adoptées par les auteurs. *Mentzer et al.* [*Mentzer et al., 2001*] ont classifié ces définitions selon trois catégories : « *une* ***philosophie de gestion***, *une* ***mise en œuvre*** *de la philosophie* et *un ensemble de* ***processus à gérer*** ». La gestion de la chaîne logistique se place alors comme les outils structurants et compétitifs qui permettent d'améliorer la performance à long terme de chaque membre de la chaîne logistique et de ce fait, de l'ensemble de celle-ci [*Mentzer et al., 2001*]. Selon *Stadtler* et *Kilger* [*Stadtler et Kilger, 2000*], la gestion d'une chaîne logistique comprend finalement deux composantes principales : *1)* L'intégration du réseau d'organisation ; *2)* La coordination des différents flux. Ils proposent aussi une illustration graphique des facettes du *SCM* au travers de sa « *maison du SCM* » (*Fig.2.5*).

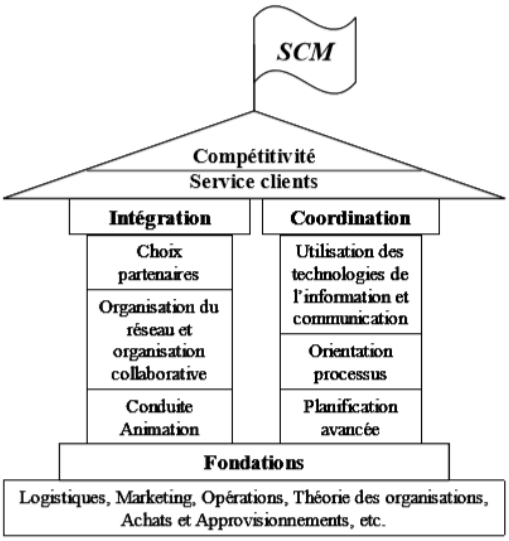


Fig.2.5: La maison du *SCM* [*Stadtler et Kilger, 2000*].

Lauras dans [*Lauras, 2004*] définit les composantes de la gestion des chaines logistiques proposées par *Stadtler* et *Kilger* [*Stadtler et Kilger, 2000*] comme suit : *1)* ***La coordination du SCM***, se définit comme étant le pilotage des variables de décision de planification ***au niveau de chaque entité*** de la chaîne logistique en s'appuyant sur les technologies de l'information et les processus établis. Il s'agit finalement de définir les modalités de la réalisation effective des objectifs ; *2)* ***L'intégration du SCM***, se définit comme étant le pilotage, par des variables de

décision, de l'architecture coopérative des relations entre entités qui composent une chaîne logistique. Il s'agit finalement de définir ***les capacités à faire ensemble***. Ces objectifs logistiques ne seront concrétisés que si des mécanismes de concertation existent entre les acteurs impliqués (*cf. section 2.2.3.2*). Ces ententes forment les principaux supports de l'axe de pilotage (*cf. section 2.2.3.3*) des relations entre entités de la chaine logistique.

2.2.3.2. Les ententes industrielles entre centres de décision

Par ententes, on entend « *un ensemble de liaisons et d'accords, plus ou moins formel, plus ou moins durable et plus ou moins intense, que des acteurs d'une chaîne logistique nouent entre eux* » [*Lauras et al., 2003*] :

- ***Coordination*** – La ***coordination*** est l'ensemble des règles et procédures qui assurent le fonctionnement d'un groupe [*Rose et al., 2002*]. 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*] ;
- ***Coopération*** – La ***coordination*** d'activités dans une organisation en réseau s'appelle ***coopération*** [*Burlat et Boucher, 2000*]. Ainsi, la ***coopération*** est entendue comme la ***coordination*** et la synchronisation d'opérations effectuées par différents acteurs qui ne possèdent un pouvoir de décision que sur une partie seulement du système constitué [*Monteiro et Ladet, 2001*]. *Erschler et al.* [*Erschler et al., 1993*] définit ce concept comme étant une (re)***négociation*** de contraintes entre différents centres de décision. Cette entente industrielle cherche à améliorer la performance globale [*Campagne et Sénéchal, 2002*] tout en minimisant les risques [*Sardas et al., 2002*] ;
- ***Négociation*** – La ***négociation*** est un processus d'échange qui résulte de la planification et du raisonnement, cette entente industrielle permet de résoudre les conflits et de trouver une situation qui satisfasse tout le monde [*Ferber, 1995*]. *Smith* [*Smith, 1988*] définit les deux grands piliers de la ***négociation***: *1)* La ***communication*** ; *2)* La prise de décision qui se fait à travers l'évaluation de l'information par chaque acteur et la sélection mutuelle d'un plan ;
- ***Communication*** – La ***communication*** est vue classiquement comme un simple échange d'information [*Rose et al., 2002*]. *Roche* [*Roche, 2000*] précise que la

communication ne se réduit pas à l'***échange d'information***. On doit y inclure les ***échanges de connaissances*** ;

- ***Collaboration*** – La ***collaboration*** est un cadre permettant d'ordonner différentes formes coopératives entre des organismes indépendants [*Menachof et Son, 2003*]. Il s'agit bien de la manière de répartir le travail coopératif. La différenciation entre la ***coopération*** et la ***collaboration*** n'est donc pas évidente et l'usage montre que bien souvent ils sont utilisés comme synonymes [*Lauras, 2004*] ;

- ***Partenariat*** – Le ***partenariat*** est une association de parties agissant dans leur intérêt mutuel [*Poirier et Reiter, 2001*]. Cette association s'apparente au contrat de travail [*Neuville, 1998*]. Il faut dissocier la notion de « ***partenaire*** » de celle de « ***partenariat***». Un ***partenaire*** peut prendre les traits d'une filiale, d'un sous-traitant, d'un fournisseur que d'un prestataire [*Lauras, 2004*].

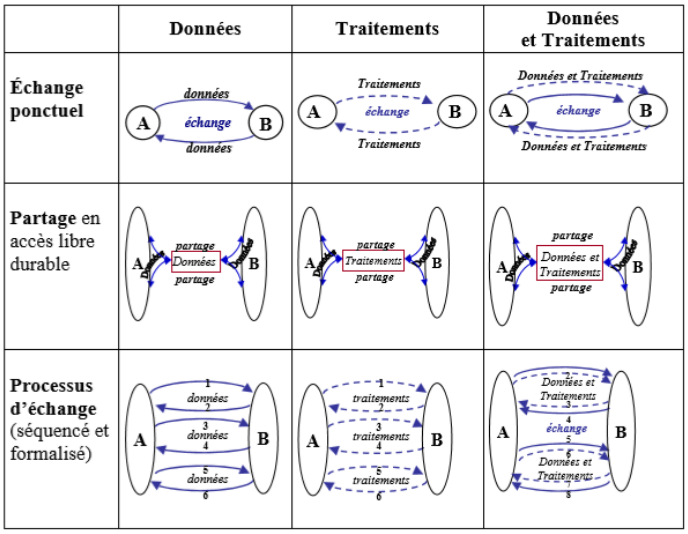


Fig.2.6 : La caractérisation des composantes élémentaires de l'entente industrielle [*Lauras, 2004*].

Lauras dans [*Lauras, 2004*] propose une caractérisation des différents états de l'entente industrielle (*Fig.2.6*) entre deux centres de décision *A* et *B*, selon plusieurs composantes élémentaires : *1)* La ***nature des informations*** transmises (données ou traitements) ; *2)* Leur ***mode de transmission*** (échange ponctuel, processus d'échange ou partage). L'association de ces composantes élémentaires permet de caractériser les mécanismes rencontrés (*Fig.2.7*): ***communication***, ***coordination***, ***collaboration*** et ***coopération***. Le ***partenariat*** est vu comme une contractualisation plus ou moins formelle d'un des états d'ententes (état élémentaire ou associations d'états élémentaires).

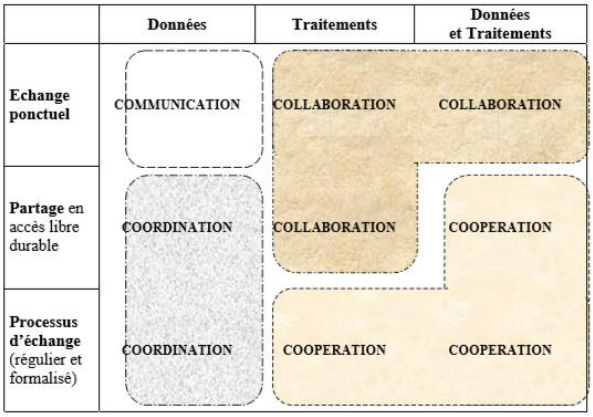


Fig.2.7 : La caractérisation des ententes industrielles selon *Lauras* [*Lauras, 2004*].

La gestion de la chaine logistique se base sur une idée principale, il s'agit de la ***séparation du système opérant et du système de conduite*** [*Giard, 2003*]. En effet, un système de conduite dénommé aussi « *un système de décision ou un système de pilotage* », en recevant les informations nécessaires au pilotage, ***réfléchit et décide*** (*cf. section 2.2.3.3*). Un système opérant (opérationnel) traite les activités productives en réalisant les objectifs définis par le système de décision. L'***interface*** entre les deux sous-systèmes précités est le ***système d'information*** (*cf. section 2.2.3.4*), qui assure le traitement, la mémorisation et l'acheminement des informations au sein de la chaine logistique.

2.2.3.3. Système décisionnel relatif à la gestion d'une chaine logistique

Le ***système décisionnel*** est l'organisation par laquelle la chaîne logistique est pilotée, les entreprises impliquées dans une ou plusieurs chaînes logistiques sont amenées à prendre des décisions continuellement dans le but de gérer globalement leurs flux tout au long de chaque chaîne. La bonne mise en œuvre des décisions améliore continuellement la ***performance*** (*cf. section 2.4*) des processus en termes de valeur ajoutée. Une performance logistique est conditionnée par la performance « ***info-logistique*** » (*cf. section 2.2.3.4*), celle des systèmes d'information qui représentent le ***système nerveux*** des chaines logistiques. Le ***système décisionnel*** représente l'ensemble des ***ressources intelligentes*** (acteurs humains et outils d'aide à la décision) intervenant dans la gestion de la chaine logistique. L'***architecture du pilotage*** est la façon dont s'articule le système décisionnel avec le système d'information. Cette architecture permet d'identifier d'une part les décideurs eux-mêmes, dénommés aussi « ***centres de décision*** ». D'autre part, les flux d'information entre ces décideurs [*François, 2007*]. *Despontin-Monsarrat et al.* [*Despontin-Monsarrat et al., 2005*] considèrent cette architecture

comme étant trois centres de décision génériques par entreprise qui seraient « *Gestion de production*, *Service vente* et *Service achat* » (*Fig.2.8*).

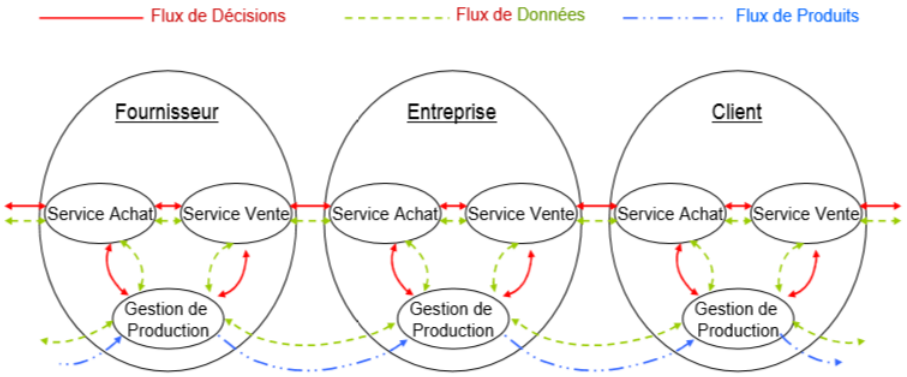


Fig.2.8 : Relations entre les centres de décision [*Despontin-Monsarrat et al., 2005*].

De sa part, *François* [*François, 2007*] identifie un centre de décision au sein de l'architecture du système de pilotage par ***son niveau de pilotage***, noté ***n***, auquel il appartient et ***son rang dans le système***, noté ***s***. Le centre de décision ainsi défini est noté $\boldsymbol{CD^{n,s}}$. Le niveau $n = 1$ est attribué au niveau décisionnel le plus bas, c'est-à-dire le plus proche des activités physiques. Ainsi *François* étudie et compare, pour une même chaine logistique, trois architectures de pilotage qui seraient [*François, 2007*]:

- ***Architecture de pilotage distribuée*** (*Fig.2.9*): il s'agit d'une architecture de pilotage basée sur des relations clients / fournisseurs entre entités successives. Les acteurs échangent des informations et des produits pour satisfaire la commande du client final. ;

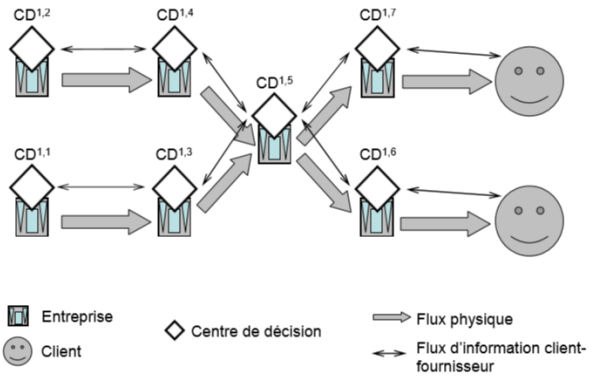


Fig.2.9 : Architecture de pilotage distribué [*François, 2007*].

- ***Architecture de pilotage centralisée*** (*Fig.2.10*): il s'agit d'une architecture de pilotage comportant un deuxième niveau décisionnel avec un seul centre de décision supervisant l'ensemble des centres de décision de premier niveau. L'objectif de cette architecture est de rendre accessibles à l'ensemble du réseau les informations connues de chaque partenaire, et à en centraliser leur traitement ;

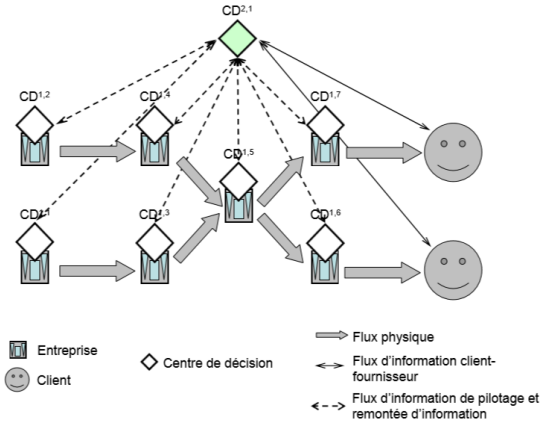
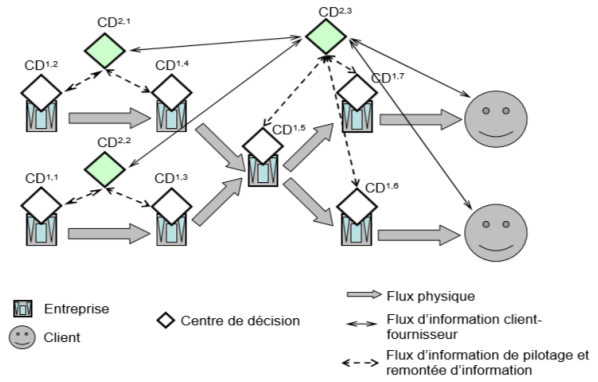
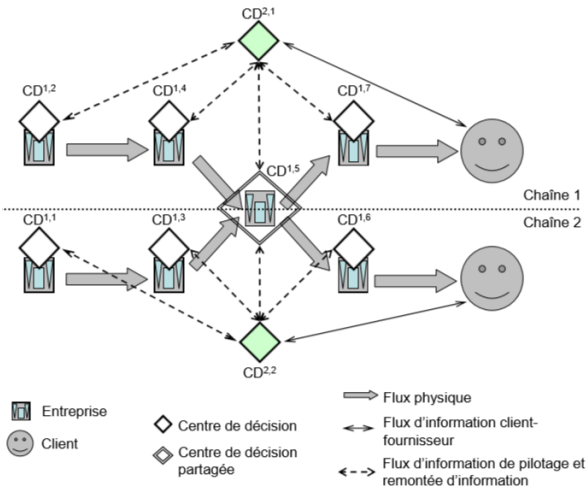


Fig.2.10 : Architecture de pilotage centralisé [*François, 2007*].

- ***Architecture de pilotage mixte*** (*Fig.2.11*): il s'agit d'une architecture de pilotage qui s'appuie sur plusieurs centres de décision au niveau supérieur, dont chacun ne regroupe qu'une partie des informations de la chaîne logistique. A ce niveau, on peut trouver deux cas d'exemple : architecture à plusieurs superviseurs (*Fig.2.11 (a)*) et architecture de pilotage de deux chaînes avec maillon commun (*Fig.2.11 (b)*).



(a) : Architecture à plusieurs superviseurs.



(b) : Architecture de pilotage de deux chaînes avec maillon commun.

Fig.2.11 : Architecture de pilotage mixte [*François, 2007*].

2.2.3.4. Système informationnel de la chaine logistique - Infologistique

L'« ***infologistique*** » est cette sphère où les différentes ***technologies hétérogènes*** se combinent et s'assemblent permettant ainsi le pilotage informationnel des marchandises tout au long de la chaîne logistique. Selon *PIPAME* (Pôle Interministériel de Prospective et d'Anticipation des Mutations Economiques), parmi les domaines d'application des outils et services infologistiques nous trouvons ***le Suivi et le développement des flux intermodaux***. C'est dans cette optique que se situe la problématique de nos travaux de recherche. En effet, ce suivi vise à assurer la gestion des échanges assurant l'***interconnexion*** des équipements distants (fixes ou mobiles) au ***Système d'Information*** d'une entreprise. In fine, l'objectif principal de ces systèmes est d'améliorer, qualitativement et quantitativement, le traitement des informations pour parvenir à un meilleur pilotage logistique donc à ***une amélioration de la performance de la chaîne***. Parmi les technologies couramment utilisées, on trouve quatre familles [*PIPAME, 2009*]: *1)* ***Famille n°1*** - Les logiciels de la gestion interne de la chaine logistique (*cf. section 2.2.3.4.a*) ; *2)* ***Famille n°2*** - Les outils de communications inter-entreprises (*cf. section 2.2.3.4.b*) ; *3)* ***Famille n°3*** - Les outils et services de mobilité (*cf. section 2.2.3.4.c*) ; *4)* ***Famille n°4*** - Les outils d'identification et de traçabilité (*cf. section 2.2.3.4.d*).

a. Les logiciels de la gestion interne de la chaine logistique

Dans les années *70*, les logiciels ***MRP*** (*Materials Requirement Planning*) permettaient de prendre en compte des besoins d'approvisionnement dépendants à la demande de produits finis. Durant les années *80*, ce concept a vu une amélioration avec le ***MRP II*** (*Manufacturing Ressource Planning*) qui prenait en compte les ressources sous forme de contraintes capacitaires. Il s'est alors étendu à la gestion des ressources clés dans l'entreprise pour prendre la dénomination d'***ERP*** (*Enterprise Ressource Planning*) [*PIPAME, 2009*] (*Fig.2.12*).

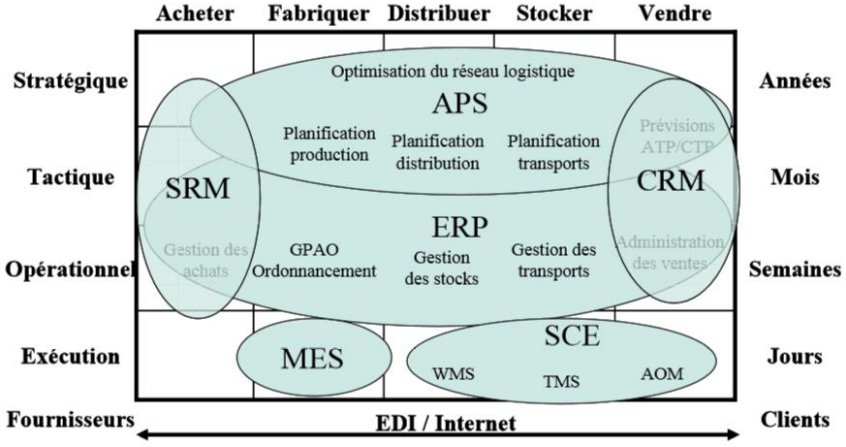


Fig.2.12 : L'offre logicielle du *SCM*, d'après *Botta-Genoulaz* [*Botta-Genoulaz, 2003*].

L'***ERP*** est un logiciel qui s'est imposé dans les années *90* pour la gestion opérationnelle quotidienne de l'activité logistique et aussi pour le partage des données entre les différentes applications (*logistiques*, *commerciales* et *comptables*) de l'entreprise. ***ERP*** couvre plusieurs fonctions de base dans le monde de gestion [*Said, 2006*] : il permet de planifier les réapprovisionnements à partir des capacités maximales de stockage, de calculer le nombre d'entrepôts nécessaires par région, de sélectionner le mode de transport le plus économique, de planifier les tournées, de gérer les ressources humaines et de partager les informations entre les modules par le biais d'une base de donnée unique, etc. [*Roos, 2003*]. Les années *90* voient aussi l'émergence de progiciels spécifiquement dédiés à la gestion de la chaîne logistique qui seraient « ***APS*** (*Advanced Planning System*) et ***SCE*** (*Supply Chain execution*) » :

- ***APS*** – Il s'agit d'un ***progiciel décisionnel*** qui permet de simuler et d'optimiser la planification et de synchroniser les flux de la chaîne logistique en tenant compte simultanément d'un grand nombre de contraintes (ressources, capacités, délais et coûts). L'***APS*** participe donc à l'un des fondements du *Supply Chain Management* qui est d'anticiper les flux à travers une visibilité globale sur les *supply chains* [*Said, 2006*]. Les progiciels ***APS***, en amont de l'activité logistique, permettent une automatisation du processus de planification des achats, de la production, de la distribution et des transports en effectuant des arbitrages entre les demandes prévues des clients et les capacités des fournisseurs à y répondre [*Roos, 2003*] ;
- ***SCE*** – Il s'agit d'un ***ensemble des logiciels*** qui permettent : la gestion des entrepôts – Les logiciels de ***WMS*** (*Warehouse Management Systems*), la gestion des tournées de transport – Les logiciels de ***TMS*** (*Transport Management Systems*), la gestion de la production – Les logiciels ***MES*** (*Manufacturing Execution System*), la gestion avancée des commandes – Les logiciels ***AOM*** (*Advanced Order Management*), etc. Ces logiciels sont orientés vers l'optimisation de l'activité logistique ***en temps réel*** [*PIPAME, 2009*].

Ces solutions informatiques se complètent et doivent pouvoir communiquer et interagir afin de synchroniser et d'intégrer les données relatives à la chaîne logistique. En effet, les ***APS*** sont donc couplés avec l'***ERP***, eux-mêmes couplés avec les ***SCE***. La ***SCEM*** (*Supply Chain Event Management*) est le lien opérationnel entre les ***SCE*** et l'***APS***. Elle permet à chaque intervenant de la chaîne logistique de consulter ou alimenter le système en cas d'évènements imprévus ou non planifiés. Ce qui favorise la remontée d'informations en temps réel et une meilleure réactivité (*cf. Annexe 1 – Les éditeurs des logiciels logistiques mondiaux et français*).

La ***création d'un environnement collaboratif*** avec des fournisseurs stratégiques (***SRM*** - *Supplier Relationship Management*) et avec des clients (***CRM*** – *Costumer Relationship Management*) était nécessaire pour le travail en commun afin que la gestion de la demande, la planification de l'activité ainsi que le réapprovisionnement seront réalisés conjointement entre fournisseur et client. Ceci a fondé les démarches dites ***CPFR*** (*Collaborative Planning Forecasting and Replenishment*) permettant un degré d'intégration très poussé.

b. Les outils de communications inter-entreprises

Le problème d'intégration entre les divers systèmes informatiques est traité à travers l'***EDI*** (*Échange de Données Informatisées*). L'***EDI*** permet l'échange de données informatisées et le transfert des données structurées sur des bases de messages normalisés approuvés entre systèmes informatisés par voie électronique, il couvre les transactions usuelles : commande, avis de réception de commande, avis de réception, avis d'expédition, ordre de payement, appel d'offres, ordre d'enlèvement (transport), compte rendu d'exécution (transport), documents douanières, déclarations fiscales, etc. [*Isaac, 2003*]. Actuellement il existe environ *300* messages ***EDI*** créés et plus de *100.000* entreprises utilisatrices en France. Il s'agit donc d'***établir des ponts entre les systèmes d'information de l'entreprise avec ceux de ses clients et de ses fournisseurs***. Les systèmes ***EDI*** évoluent désormais vers ***XML***, standard du portage de l'***EDI*** dans le monde ***Internet*** [*IREPP, 2001*]. Les systèmes de communication inter-entreprises tels que l'***EDI*** sont à ce titre indispensables pour assurer la coordination des flux tout au long de la chaîne logistique. L'***EDI*** est une solution fiable et sécurisée mais couteuse, ***Internet*** a été une révolution dans les communications professionnelles par son faible coût d'exploitation. Suivant la diversité de la configuration des collaborations inter-entreprises, les moyens techniques vont de l'***EDI*** au ***Web-EDI***. La mise en œuvre de plates-formes d'échanges électroniques (*portail* ***Web***) sur ***Internet*** permet d'ajuster l'offre et la demande (*Marketplace*).

Pour réussir à créer un ***réseau logistique coopératif***, il faut encore régler deux problèmes : *1)* l'accès aux données hétérogènes en vue de les consolider, de les agréger et de les restituer de manière homogène ; *2)* l'uniformisation de l'accès à des systèmes d'information multiples et en personnalisant leur accès selon le rôle de chacun au travers de portails d'entreprise [*IREPP, 2001*]. Or l'intégration de systèmes hétérogènes reste un centre de coût majeur. Conçus dans l'espoir de réduire drastiquement les coûts d'intégration, les ***services Web*** laissent augurer la solution pour l'avenir [*Said, 2006*]. Ces futurs outils sont désignés sous le nom générique de ***Web Services***, dont les principaux composants sont : ***SOAP*** (*Simple Object*

Access Protocol), ***WDSL*** (*Web Services Description Language*) et ***UDDI*** (*Universal Description, Discovery and Integration*) [*IREPP, 2001*].

c. Les outils et services de mobilité

La ***mobilité*** est devenue un axe stratégique. Elle prend une nouvelle dimension grâce aux évolutions technologiques les plus récentes : la multiplication des ***terminaux embarqués***, le développement des ***services de transmission de données mobiles*** et les techniques de ***géolocalisation*** [*PIPAME, 2009*]. Couplée avec la communication et avec les mobiles, ***l'électronique embarquée*** ouvre des perspectives dans de nombreuses professions [*IREPP, 2001*]: livraisons, maintenance, etc. Mais à ce jour les technologies de communications de données avec les mobiles sont très peu diffusées dans le milieu des transports.

Deux nouvelles ***technologies radio*** devraient encore accélérer le mouvement: ***Bluetooth*** et surtout le ***WiFi***. Il est encore difficile de prévoir des applications du transport de ces technologies. En revanche la couverture actuelle du ***téléphone cellulaire*** et la précision du ***GPS*** (*Global Positioning System*) offre des alternatives beaucoup plus économiques. Pour résumer, la situation antérieure était marquée par une ***liaison satellite*** trop chère et peu fiable en zone urbaine et par le ***GSM*** (*Global System for Mobile Communications*) qui n'était pas vraiment ouvert aux services professionnels. Quant aux systèmes spécialisés comme les ***Trunk Systems***, ils n'ont trouvé de débouchés qu'auprès de flottes spécialisées comme les services d'urgence ou de sécurité, probablement parce que trop coûteux et complexes à mettre en œuvre. La ***géolocalisation*** peut faire gagner un temps considérable pour les transporteurs, car elle permet également d'organiser de façon beaucoup plus précise la tournée des camions et de réagir en temps réel aux conditions de trafic [*PIPAME, 2009*].

d. Les outils d'identification et de traçabilité

La mise en œuvre des outils d'identification et de traçabilité associe [*PIPAME, 2009*]: *1)* L'***identification*** des lots, des pièces, des produits finis et des ***UTI*** (*Unité de Transport Intermodal*); *2)* Le ***marquage*** de ces mêmes unités physiques avec : des codes-barres, des tags, des étiquettes électroniques, etc. et des acteurs avec : des badges, des cartes à puce, etc. ; *3)* La ***lecture électronique*** de ces « *marques* » avec : lecteur optique, scanne, etc.; *4)* La pose de balises pour les conteneurs et la ***localisation automatique*** permanente par satellite; *5)* Le ***traitement*** des informations ainsi «*capturées*» pour reconstruire l'histoire et l'analyser. Dont l'objectif est l'affectation aux objets une autonomie d'action et de décision, l'hypothèse de

l'émergence de stratégies combinant logiques « ***top down*** » et comportements « ***bottom up*** » mérite d'être étudiée (*Fig.2.13*).

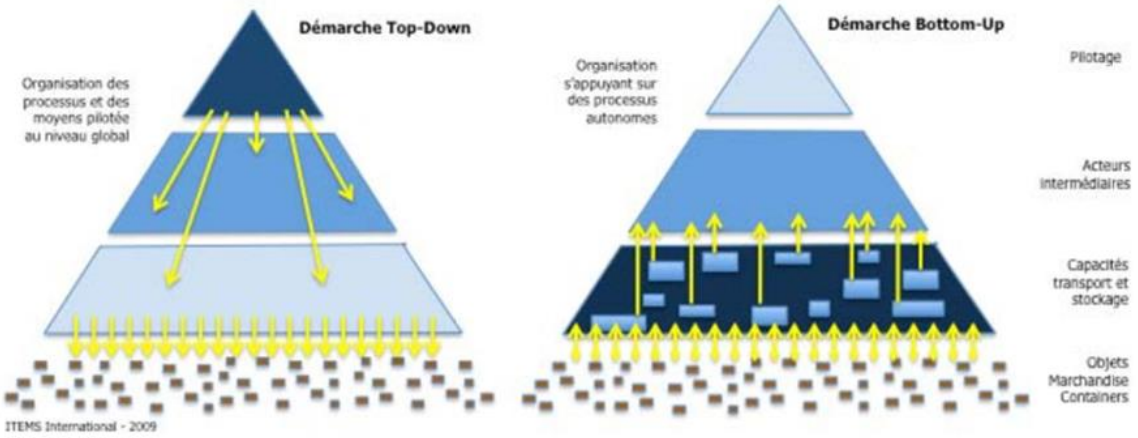


Fig.2.13 : Illustration des logiques « *top-down* » et « *bottom-up* ».

Les étiquettes ***RFID*** (*Radio Frequency IDentification*) sont des étiquettes intelligentes et à faible coût. Fixées ou intégrées aux produits, elles constituent un environnement sans fil et sans intervention humaine, où les articles sont suivis tout au long de leur déplacement, d'un bout à l'autre de la chaîne logistique. Ce sont les obligations de traçabilité dans l'agroalimentaire, l'industrie, des transports et de la distribution qui tirent les premières générations d'applications ***RFID***. En effet, dès qu'une étiquette passe devant un « *lecteur* » du réseau, son identifiant unique est automatiquement retransmis à une base de données centrale. De cette façon, les gestionnaires disposent en temps réel de la visibilité globale pour prendre instantanément les bonnes décisions [*Isaac, 2003*].

2.2.4. Bilan – Conclusion

Tout au long de cette section (*cf. section 2.2*), nous avons présenté d'une part, une étude chronologique permettant de distinguer plusieurs périodes dans la logistique militaire en mettant en évidence les principaux concepts qui sont à la base de la démarche logistique actuelle. D'autre part, nous avons fourni les caractéristiques principales du développement du terme « *logistique* » de la période après-guerre, en prolongeant l'étude de ce terme par celle du concept de la chaîne logistique.

Dans cette perspective, la sous-section (*cf. section 2.2.2*) nous a permis de faire un tour d'horizon sur les différentes visions adoptées par la communauté scientifique dans la conceptualisation de la chaine logistique. Ainsi, nous pouvons dire que le terme « *chaîne logistique* » reflète ***l'image statique*** d'un ensemble d'entreprises assemblés au sein d'une

structure de fonctionnement régulée, ayant un système de communication pour faciliter la circulation de produits et de l'information dont le but est de répondre à des besoins et d'atteindre des objectifs déterminés ceci étant principalement caractérisé par la satisfaction du client. En conclusion, l'émergence de la chaîne logistique a fait naître des besoins en matière d'intégration d'entreprises et de coordination des flux de matière et des flux d'information. C'est la ***gestion de la chaîne logistique*** qui englobe les approches, les méthodes et les outils permettant de répondre à ces besoins.

Tout au long de la troisième sous-section (*cf. section 2.2.3*), nous avons abordé la ***conceptualisation dynamique*** de la chaine logistique reflétée par le terme « *gestion de la chaine logistique* ». En effet, nous avons présenté d'une part les différentes définitions issues de la littérature scientifique de la ***gestion de la chaîne logistique***. D'autre part, nous avons fait un tour d'horizon sur l'ensemble des ***ententes industrielles*** qui peuvent être nouées inter et intra-entreprises, en prolongeant l'étude par ces différentes ***architectures de pilotage*** qui forment cette articulation entre le système décisionnel et le système d'information des chaines logistiques. Ceci a dégagé le rôle important que le ***système informationnel*** joue dans la bonne gestion des chaines logistiques. Dans cette perspective, à la fin de cette partie (*cf. section 2.2.3.4*), nous avons fait un tour d'horizon sur les différentes familles des systèmes informationnels existants. Ces systèmes visent à améliorer, qualitativement et quantitativement, le traitement des informations pour parvenir à un meilleur pilotage logistique donc à une amélioration de la performance de la chaîne. Ainsi, nous pouvons dire que le terme *« gestion de la chaîne logistique* » reflète l'image dynamique d'un ensemble d'entreprises formant une structure ayant une ou plusieurs ententes industrielles dans une logique « *win – win* » , cette structure est composée d'un système opérationnel, un système décisionnel et une interface entre les deux sous-systèmes précités appelée le système d'information de la chaine logistique ou « l'***info-logistique*** ». L'objectif primordial de l'info-logistique est la ***numérisation de « bout en bout » de la chaine logistique***.

En conclusion, nous avons introduit les domaines d'études où s'articulent les contributions de nos travaux de thèse à savoir : la *virtualisation* de la chaine logistique en la modélisant (*cf. Chapitre 4*) pour la simulation du comportement entre les différents systèmes et acteurs dans un environnement de transport intermodal de marchandises (*cf. Chapitre 5*). Dans la section suivante de ce chapitre (*cf. section 2.3*), nous allons aborder le concept de la « ***modélisation de la chaine logistique*** », il s'agit de l'une des étapes essentielles à la virtualisation et l'évaluation des performances de la chaine logistique.

2.3. Modélisation de la chaine logistique

La modélisation d'entreprises a suscité l'intérêt de la communauté scientifique. Plusieurs travaux ont permis de développer de nombreuses *méthodes*[2], *méthodologies*[3] et *architectures de références*[4]. Avant d'aller plus loin, il nous paraît important de définir tout d'abord la notion de modélisation. 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* ». En fait, la modélisation d'un système est une traduction d'une abstraction d'une partie du monde réel perçu en général au travers d'états complexes et variables, en une représentation plus au moins abstraite destinée à fournir un support pratique d'analyse [*Ounnar, 1999*]. Les principales approches abordant la problématique de la modélisation de chaines logistiques peuvent être classées en différentes catégories qui seraient les modèles « *organisationnels* (*cf. section 2.3.1*), *analytiques* (*cf. section 2.3.2*) et *pour la simulation* (*cf. section 2.3.3*)».

2.3.1. Modèles organisationnels

Les approches de modélisation, qui découlent de la *théorie de l'organisation de l'entreprise*, représentent l'organisation à partir de ses entités, ses activités, ses processus, ses fonctions, sa structure et son comportement. Dans ce qui suit, nous allons présenter de nombreux modèles dits « ***organisationnels*** », qui sont décrits par [*Monteiro, 2001*] et [*Frayret, 2002*] selon des approches *hiérarchiques* (*cf. section 2.3.1.1*) (*cartésienne* et *systémique*) ou *hétérarchiques* (*cf. section 2.3.1.2*) et dans ce cas nous parlons d'entités autonomes reliées par des canaux de communication (*approche par processus*, *approche holonique* et *approche par émergence*) [*Labarthe, 2006*].

2.3.1.1. Approche hiérarchique

Les ***approches cartésiennes***, dénommées aussi « *structurées* », sont basées sur les techniques de la décomposition descendante d'une fonction en sous-fonctions, jusqu'à l'atteinte

[2] Une méthode est une technique caractérisée par un ensemble de règles bien définies qui conduisent à une résolution correcte [*Calvez, 1990*].

[3] Elle est composée d'une méthode de modélisation et de modèles qui s'appuient sur des outils de représentation [*Lutherer, 1996*].

[4] Il s'agit de fournir un cadre général et des points de repère indiquant les aspects à prendre en compte, les relations existant entre ces aspects et terminologie admise dans le domaine [*Vernadat, 1999*].

d'un niveau de granularité suffisamment fine permettant d'appréhender la complexité d'un système [*Tardieu et al., 1989*]. Cependant, ***cette approche prend peu en compte les interactions entre les sous-systèmes***. Parmi Les formalismes les plus connus, nous trouvons « *SADT* et *SA-RT*»:

- ***SADT (Structured Analysis Design Technique)***

Cette méthode a été proposée par *Ross* [*Ross, 1977*] à la fin des années *70*. Elle est très largement utilisée dans l'industrie comme outil de communication entre utilisateurs grâce à sa notation graphique des processus et sa syntaxe simple et naturelle [*Vernadat, 1999*]. Pour ce faire, elle se base sur un ensemble limité de primitives, des «*boîtes*» et des «*flèches*».

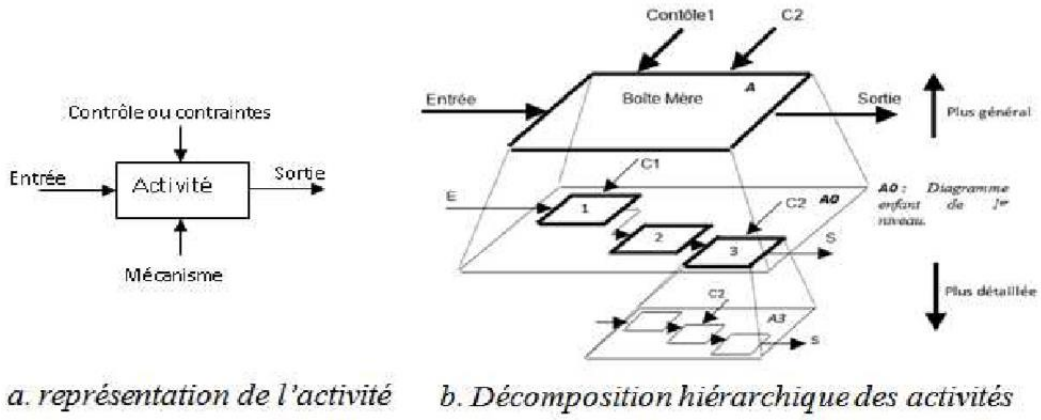


Fig.2.14: Le formalisme *SADT*.

Les boites représentent les activités et les flèches représentent les relations entre activités où une activité peut être vue comme une fonction qui transforme des objets d'entrée (données ou matières) en objets de sortie à partir de directives de contrôle en s'appuyant sur des ressources humaines ou des ressources matérielles (*Fig.2.14*).

- ***SA-RT (Structured Analysis – Real Time)***

Il s'agit d'une méthode complémentaire à *SADT*. Elle a été développée dans le but de décrire l'***aspect dynamique*** du système qui n'est pas décrit par *SADT*. Les différents composants d'un système représenté à l'aide de cette méthode sont [*Ward et al., 1985*] (*Fig.2.15*) : *1)* Les ***flux*** (continus, discrets ou de contrôle) ; *2)* Les ***processus de transformation*** (de données ou de contrôle) ; *3)* Les ***unités de stockage*** de données ; *4)* Les ***terminaisons*** (éléments externes interagissant avec le système étudié et modélisant l'environnement).

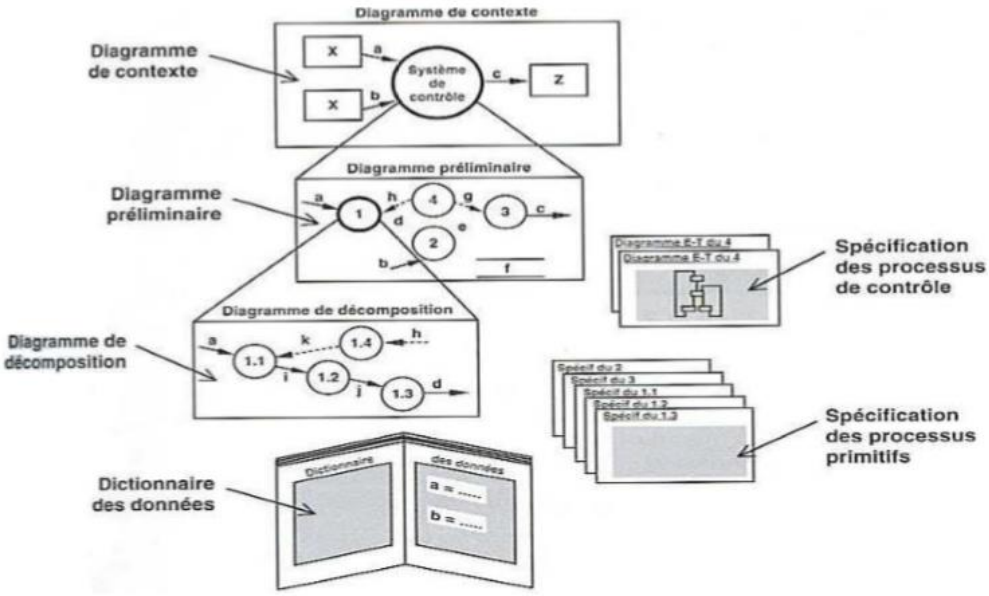


Fig.2.15: Le formalisme *SA-RT* [*Cottet et al., 2005*].

Les ***approches systémiques***, sont apparues dans les années *80* face à la complexification croissante des organisations et de leurs environnements, [*Le Moigne, 1977*]. A l'inverse de l'approche cartésienne qui dissocie et décompose, l'approche systémique associe et rassemble dans le but de prendre en compte la vision globale d'une problématique. ***Cependant, les entreprises ont évolué vers de nouvelles formes d'organisations***. Selon cette approche [*Le Moigne, 1973*], la représentation dynamique d'un système est composée de trois sous-systèmes qui seraient « *système opérant*, *système d'information* et *système de décision* » (*Fig.2.16*). Cette approche est utilisée par la mise en œuvre de la méthode « ***Merise*** » qui concerne la conception des systèmes d'information [*Nanci et al, 2001*].

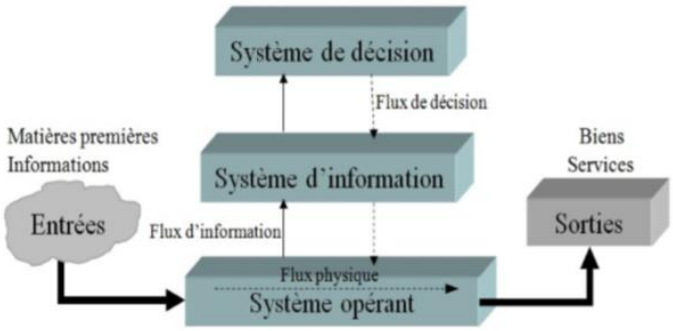


Fig.2.16: Représentation d'un système selon l'approche systémique [*Le Moigne, 1973*].

Crée en *1978*, ***Merise*** s'inspire des méthodes existantes sur la conception des bases de données [*Tardieu et al., 2000*]. La représentation d'un système d'information par cette méthode est abordée par trois types de modèles [*Tardieu et al. 1991*] : *1)* Un modèle conceptuel des données « ***MCD*** ». Ce modèle permet, à travers un schéma, de représenter la structure d'un

système d'information du point de vue des données, de manière à mettre l'accent sur les dépendances ou les relations entre les différentes données du système d'information ; *2)* Un modèle conceptuel des traitements « ***MCT*** », qui est un schéma représentant les traitements, en réponse aux événements à traiter ; *3)* Un modèle organisationnel des traitements « ***MOT*** » représentant les contraintes de l'environnement (spatio-temporel et organisationnel).

2.3.1.2. Approche hétérarchique

La vision ***hétérarchique*** représente l'évolution des architectures dans les systèmes manufacturiers caractérisée par l'autonomie et l'interaction entre les composants [*Dilts et al, 1991*]. Cependant, les approches *hétérarchiques* proposent une ***représentation statique*** de l'organisation du système d'où la nécessité des outils d'analyse dynamiques. *Trentesaux* propose quatre approches *hétérarchique*s qui seraient « *l'approche par processus*, *l'approche holonique*, *les approches en émergences*, et *l'approche multi-agents* » [*Trentesaux, 2002*].

L'***approche par processus*** considère l'entreprise comme un processus en soi. Elle représente l'organisation comme un ensemble d'entités, en interactions, pour la réalisation de processus et/ou d'activités [*Duffie, 1990*]. Parmi ces approches nous trouvons le modèle « ***SCOR*** » (*Supply Chain Opération Référence*), il s'agit du premier modèle de référence de la chaîne logistique globale conçu par le *Supply Chain Council*. En effet, ce modèle s'intéresse au diagnostic, à la conception, la mise en œuvre, l'évaluation et le contrôle de la gestion des chaînes logistiques en s'appuyant sur cinq processus principaux constituant des briques de base pour la modélisation de la chaîne logistique globale, à savoir, « *PLAN* » pour le processus de planification, « *SOURCE* » pour l'approvisionnement, « *MAKE* » pour la fabrication, « *DELIVER* » pour la livraison et enfin « *RETURN* » pour le processus de la gestion de retour [*Supply Chain Council, 2005*] (*Fig.2.17*).

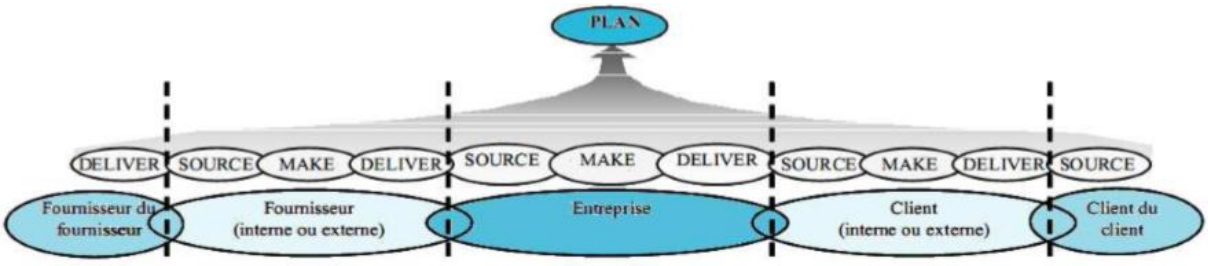


Fig.2.17: Le modèle SCOR [*Supply Chain Council, 2005*].

L'***approche holonique*** repose sur la représentation des entités de l'organisation à partir de « ***holons*** » [*Koestler, 1990*]. La notion de holon a été introduite par le philosophe *Koestler* en *1967*. Elle s'est particulièrement diffusée dans les *HMS* (*Holonic Manufacturing Systems*). Le terme *holon* naît de la combinaison des mots grec « *holos* », qui signifie « *le tout* », et du suffixe « *-on* » qui désigne la notion de « *partie* » comme dans neutron, proton ou électron. Selon *Koestler*, un *holon* est une structure auto-similaire ou fractale qui est comme une partie d'un tout ou d'une organisation plus large, répondant strictement à trois conditions : être stable, avoir une capacité d'autonomie et être capable de coopérer [*Koestler, 1990*]. Les *holons* sont généralement constitués de deux parties, l'une traitant des flux d'informations et la seconde des flux physiques. Cette dualité est parfois appelée l'*effet Janus*, en référence à ces deux faces du *holon* [*Van brussel et al., 1998*].

Les ***approches en émergences*** englobent des « ***approches bioniques*** » issues de la science du vivant et des « ***approches fractales*** » issues des propriétés des structures fractales pour représenter l'organisation [*Tharumarajah, 2003*][5].

L'***approche multi-agents***, la description de cette approche fait l'objet d'une section entière au sein du quatrième chapitre (*cf. Chapitre 4, section 4.2*).

2.3.2. Modèles analytiques

Issus de l'***école mathématique***, les ***modèles analytiques*** représentent la chaîne logistique selon une ***perspective quantitative***. Deux approches principales sont adoptées par la communauté scientifique pour la résolution de ces problèmes qui seraient « *la Théorie du Contrôle* et de *la Recherche Opérationnelle* » [*Parunak et al., 1999*].

D'un côté, « ***la théorie du contrôle*** » modélise la chaîne logistique à partir d'équations différentielles et utilise l'analyse de transformation afin d'appréhender sa dynamique dans le temps. Cette méthode est dynamique mais s'appuie sur des hypothèses de linéarisation du comportement d'où la nécessité d'une adaptation des conditions du modèle réel. Cependant, elle est incapable de représenter l'ensemble des chaînes logistiques dans toute leur complexité. Une revue de travaux relatifs à cette approche est présentée dans [*Ortega et Lin, 2004*].

D'un autre côté, la « ***recherche opérationnelle*** » repose sur les théories d'optimisation, la théorie des jeux, les statistiques, l'algorithmique et s'applique aux systèmes linéaires et non

[5] Une comparaison entre les approches holoniques, bioniques et fractales est présentée dans [*Tharumarajah, 2003*].

linéaires. Cette méthode ne tient pas compte du temps ce qui rend la modélisation du comportement dynamique des entités difficiles à exprimer. Une revue de travaux relatifs à cette approche est présentée dans [*Geunes et Pardalos, 2003*].

2.3.3. Modèles pour la simulation

La simulation permet d'exploiter un modèle, ce dernier devant agir et réagir de manière similaire au système réel, [*Queau, 1986*], afin de connaître le comportement dynamique du modèle et de prédire son comportement futur [*Claver et al., 1996*]. D'un point de vue plus informatique, *Treuil et al.* 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 méta-modèle associé au simulateur et comportant au moins un paramètre d'entrée peut se prêter à ce processus de simulation* » [*Treuil et al., 2008*]. *Cassandras* et *Lafortune* proposent une classification des modèles pour la simulation suivant l'axe du temps (continu ou discret) et la nature des variables et des paramètres (déterministes ou stochastiques) [*Cassandras et Lafortune, 1999*] (*Fig.2.18*).

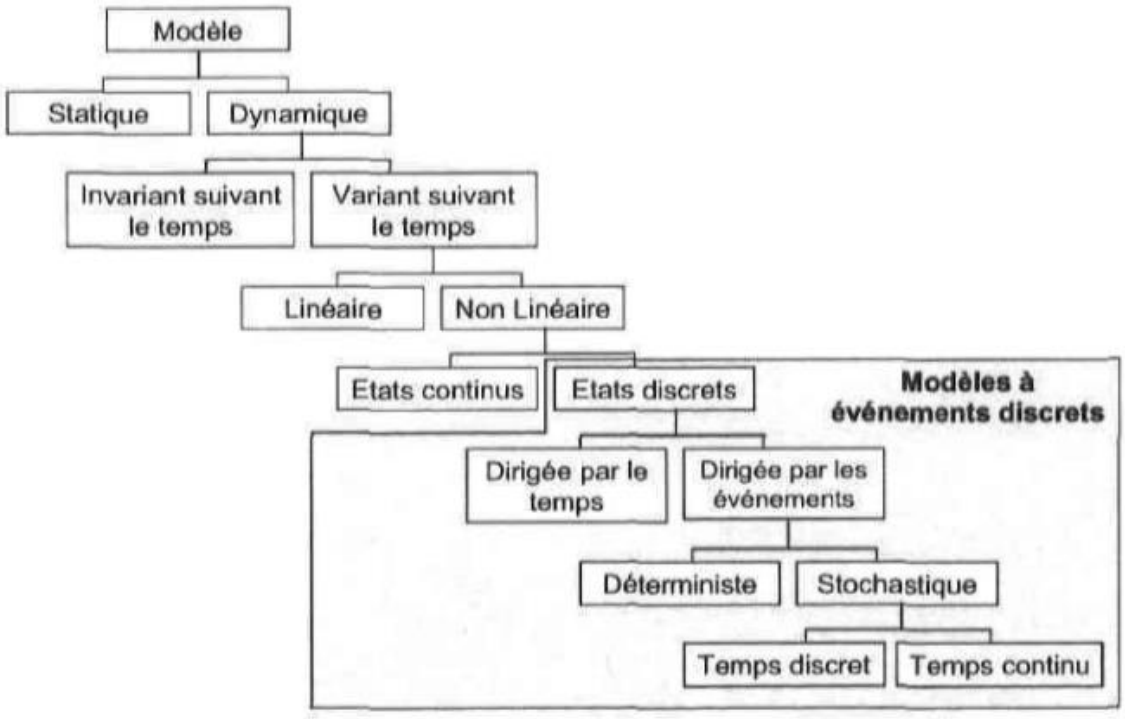


Fig.2.18: Classification des modèles pour la simulation [*Cassandras et Lafortune, 1999*].

Selon *Labarthe*, ***La majorité des travaux de simulation de chaînes logistiques reposent sur des modèles à événements discrets***. Ces modèles sont adaptés aux caractéristiques

dynamiques et le non linéarités des comportements de tels systèmes complexes. Le recours à la simulation, comme outil d'analyse, favorise la compréhension du comportement du système face à la composante temporelle [*Labarthe, 2006*]. Selon *Treuil et al.*, [*Treuil et al., 2008*], la simulation peut avoir plusieurs objectifs finaux influençant le choix de la technique de modélisation et de simulation qui seront utilisées. Ces objectifs sont recensés dans le tableau suivant (*Tab.2.3*) :

Objectifs	**Explication**
Validation, Evaluation (cf. section 2.4), 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.

Tab.2.3 : Objectifs finaux de la simulation [*Treuil et al., 2008*].

Dans la littérature, les travaux de recherche dans le domaine de la modélisation et de la simulation à évènements discrets utilisent le plus souvent deux approches informatiques [*Coquillard et Hill, 1997*] qui seraient: *1)* Les ***objets*** – sont dynamiques et interagissent entre eux. Cependant ils manquent d'autonomie. En effet, un objet ne peut pas refuser de répondre à un appel d'un autre objet ce qui rend l'émulsion et l'émergence des phénomènes difficiles à atteindre. Une revue de travaux relatifs à cette approche est présentée dans [*Labarthe, 2006*] ; *2)* Les ***agents*** – 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. La description de cette approche fait l'objet d'une section entière au sein de quatrième chapitre (*cf. Chapitre 4, section 4.2*).

2.3.4. Bilan – Conclusion

Tout au long de cette section (*cf. section 2.3*), nous avons présenté d'une part les différentes approches de la ***modélisation dans la chaîne logistique***, ce concept représente les outils fournissant un support pratique d'analyse des systèmes complexes. D'autre part, nous avons illustré les avantages et les limites de chaque approche. Dans la suite (*cf. Chapitre 4, section 4.2*), nous proposons une étude d'état de l'art sur les *SMA*, ceci va nous permettre de constater l'importance des modèles à base des agents qui sont adaptés aux caractéristiques dynamiques et le non linéarités des comportements de tels systèmes complexes, en dégageant une forte similarité entre les concepts et les pratiques des chaines logistiques et celles des systèmes multi-agents. Dans la section suivante de ce chapitre (*cf. section 2.4*), nous allons aborder le concept de « ***l'évaluation de performance de la chaine logistique*** », il s'agit des bonnes pratiques favorisant l'évaluation et l'analyse des performances du système étudié.

2.4. Évaluation de performance de la chaine logistique

2.4.1. Définitions et concepts : mesure, indicateur et évaluation de performance

Selon *Mentzer et al.* « *Le concept de gestion des chaines logistiques, se traduit par la coordination systémique et stratégique entre les fonctions internes ou externes d'une ou plusieurs entreprises. Le but de cette démarche est* ***l'amélioration de la performance à long terme de chaque membre de la chaine logistique, et de ce fait, de l'ensemble de celle-ci****.* » [*Mentzer et al., 2001*]. Nous trouvons dans la littérature que « ***l'amélioration de la performance*** » est un terme qui fait intervenir deux notions distinctes qui seraient « la ***mesure de la performance*** et ***l'évaluation de la performance*** ». Avant d'aller plus loin, nous proposons tout d'abord une définition de la « ***performance logistique*** ». Selon *Biteau*, la performance logistique est généralement représentée par le ***taux de service au client*** : nombre de fois où on livre le bon produit ; dans la quantité souhaitée ; dans le délai demandé ; au moment prévu ; à l'endroit prévu ; dans le conditionnement demandé ; en bon état et avec les bons documents ; précédé, accompagné et suivi des bonnes informations ; tout cela, dans les meilleures conditions économiques [*Biteau, 1998*]. *Fenies* et *Gourgand* complètent cette vision en distinguant la ***performance collective*** (optimisation globale du fonctionnement de la *supply chain*) et la ***performance individuelle*** (maximisation du profit d'une entité) [*Fenies et Gourgand, 2004*]. La problématique du *SCM* rejoint le concept émergent de l'interopérabilité des entreprises [*Chen, 2005*]. Ainsi, ***l'interopérabilité peut être considérée comme une performance d'une***

organisation. Mais la difficulté est liée à la mise en place de la caractérisation et la mesure de l'interopérabilité en tant que performance [*Blanc, 2006*]. Selon *Jacot*, « *La* ***mesure*** *conserve un rôle important mais s'en* ***tient aux effets****. L'****évaluation*** *est de portée plus générale : on tente de* ***remonter aux causes*** *et on se prononce également sur les objectifs et leur mise en œuvre* » [*Jacot, 1990*]. En d'autres termes, la mesure de performance est un moyen indispensable à l'évaluation de performance.

Les ***mesures de performance*** doivent refléter la complexité de la chaine logistique et englober les opérations de tous les acteurs, depuis les premiers fournisseurs jusqu'aux clients finaux [*Francella et Doherty, 1998*]. *Beamon* classe les mesures de performance en deux catégories : les mesures de performance ***qualitatives*** (satisfaction du client, flexibilité, intégration du flux physique et d'information, gestion du risque financier, etc.) et ***quantitatives*** (retards de livraison, temps de réponse client, etc.) [*Beamon, 1998*]. L'***évaluation de performance*** est utilisée pour atteindre deux finalité qui seraient « démarches ***à priori*** et démarches ***à posteriori*** » [*Frein, 1998*], [*Tahon et Frein, 1999*] :

- ***L'évaluation de la performance à priori*** – L'objectif est la conception d'un nouveau système (ou modifier un système existant). Cette démarche s'appuie sur ***les indicateurs de performance ex ante*** [*Giard, 2003*]. Selon *Lorino* un indicateur ex ante est une « *information devant aider un acteur, individuel ou collectif, à conduire le cours d'une action vers l'atteinte d'un objectif ou devant lui permettre d'évaluer un résultat* » [*Lorino, 1995*]. Cet indicateur n'est pas nécessairement un chiffre, c'est un élément de connaissance contribuant à l'aide à la prise de décision (*Fig.2.19*);

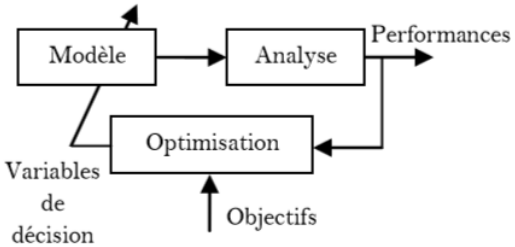


Fig.2.19: Evaluation de performance à priori [*Tahon et Frein, 1999*].

- ***L'évaluation de la performance à posteriori*** – L'objectif est le pilotage d'un système existant. Cette démarche s'appuie sur ***les indicateurs de performance ex post*** [*Giard, 2003*]. Cet indicateur peut être défini comme étant une « *donnée quantifiée qui mesure l'efficacité de tout ou partie d'un processus ou d'un système par rapport à une norme, un plan ou un objectif déterminé dans le cadre d'une stratégie d'entreprise* » [*AFNOR,*

2000]. Donc l'indicateur y est vu comme un chiffre qui informe sur un état relatif à un contexte connu. Il s'agit de l'évaluation de la quantité des décisions passées (*Fig.2.20*).

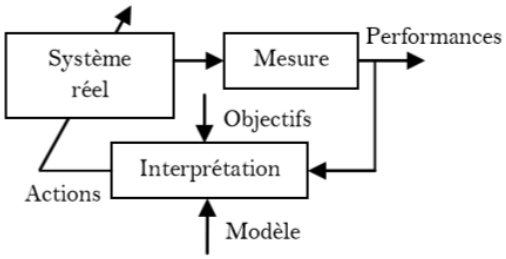


Fig.2.20: Evaluation de performance à posteriori [*Tahon et Frein, 1999*].

Les indicateurs de performance sont impactés par les pratiques collaboratives. En effet, La bonne mise en place de démarches coopératives peut contribuer à la performance d'une entreprise ou d'une organisation [*Lauras, 2004*].

2.4.2. Méthodes d'évaluation de performance de la chaine logistique

L'évaluation de la performance d'une chaine logistique est une des priorités majeures des entreprises, vue la complexité de cette tâche, cette évaluation passe par une sélection des indicateurs de mesure de la performance appropriés à la gestion de cette chaine. Il est alors nécessaire d'avoir ***une démarche structurée et des outils méthodologiques adéquats***. Dans ce contexte, *Lauras* met en évidence l'absolue nécessité de piloter la performance en fonction de deux éléments qui seraient « *processus* et *centre de décision* » [*Lauras, 2004*]: *1)* Les ***indicateurs*** sont scindés par activités principales ou ***processus*** (*la méthode ABC-ABM*, *la méthode BSC* et *le modèle SCOR*) (*cf. section 2.4.2.1*); *2)* Les ***indicateurs*** sont associés à chacun des ***centres de décisions*** et sont positionnés par ***niveau de décision***, à savoir stratégique, tactique ou opérationnel (*la méthode ECOGRAI*) (*cf. section 2.4.2.2*).

2.4.2.1. Méthodes d'évaluation de performance orientées processus

Dans cette section, nous présentons les méthodes de définition de systèmes d'indicateurs de performance suivant l'axe *processus* qui seraient « la *méthode* ***ABC-ABM***, la *méthode* ***BSC*** et le *modèle* ***SCOR*** ».

a. La méthode ABC – ABM

Apparues dans les années *1980*, l'***Activity Based Costing*** (*ABC*) et l'***Activity Based Management*** (*ABM*) sont des démarches destinées à comprendre la formation des coûts et les causes de leurs variations (*ABC*), et simultanément (*ABM*), à construire un modèle de mesure

et de gestion de la performance (***les coûts et les marges***), en se basant sur ***le principe de la gestion par activités***. Ce principe s'articule autour trois tableaux de bord [*Lauras, 2004*]: le tableau de bord d'activité (mensuel – suivi des objectifs de réalisation), le tableau de bord financier (mensuel / trimestriel - suivi des objectifs financiers) et le tableau de bord structurel (trimestriel / semestriel - suivi des structures de coûts). Donc, *ABC* et *ABM* soulignent la nécessité de mettre en œuvre un pilotage en fonction des activités qui composent les processus qui définissent le système étudié.

b. La méthode BSC

Dans un article publié dans le *Harvard Business Review* en *1992* [*Kaplan et Norton, 1996*], *Norton* et *Kaplan* développent le principe du ***Balanced ScoreCard*** (*BSC*) traduisible littéralement par « *tableau de bord équilibré* ». Cette méthode propose le regroupement des ***objectifs stratégiques*** autour quatre perspectives : finance, satisfaction client, processus internes et apprentissage [*Benmoussa et laachir, 2007*]. Avec cette méthodologie, toutes les mesures sont définies en fonction des objectifs stratégiques (*Fig.2.21*). En effet, *BSC* vise à compléter les indicateurs de performance purement financiers par des indicateurs fonctionnels. La finalité de cette approche est de considérer l'évaluation de la performance comme une résultante de la mise en œuvre des processus [*Kaplan et Norton, 2001*].

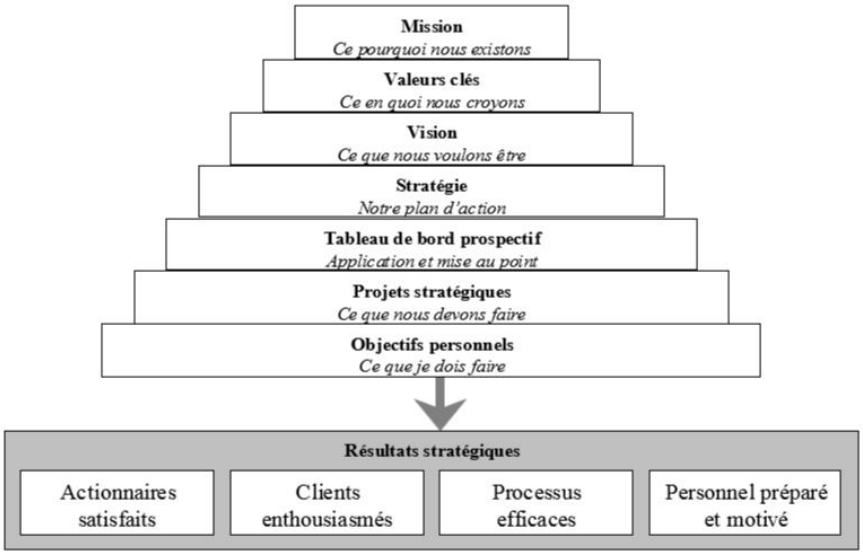


Fig.2.21: Les buts du *BSC* : de la stratégie aux objectifs [*Kaplan et Norton, 1996*].

c. Le modèle SCOR

Le modèle ***SCOR*** (*Supply Chain Operation Reference*) permet d'avoir une vision sur l'ensemble de la chaîne logistique en facilitant la représentation des flux physiques,

informationnels et financiers allant du fournisseur du fournisseur au client du client d'une entreprise [*Lauras, 2004*]. Il associe à chaque sous-processus des niveaux *2* et *3* un ensemble d'indicateurs selon cinq critères de performance: fiabilité, réactivité, flexibilité, coût et niveau des stocks (*Fig.2.22*) [*Supply Chain Council, 2005*]. Le *SCOR-model* introduit environ *200* indicateurs pour les processus *Supply Chain* [*Benmoussa et laachir, 2007*]. Cependant, cette outil manque de souplesse et ne garantit pas la pertinence des indicateurs choisis.

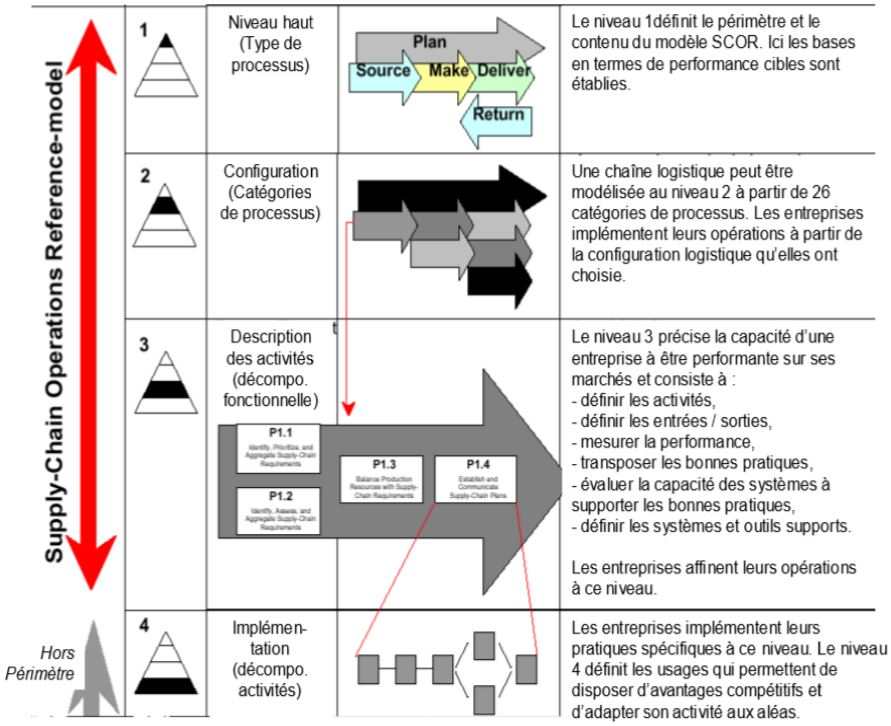


Fig.2.22: Les niveaux du modèle *SCOR* [*Supply Chain Council, 2005*].

2.4.2.2. Méthodes d'évaluation de performance orientées centres de décisions

a. La méthode ECOGRAI

En France, *Bitton* [*Bitton, 1990*] propose une méthode permettant de développer des systèmes d'indicateurs de performance à partir de ***l'analyse des objectifs et des variables de décision*** (*ECOGRAI*). La méthode *ECOGRAI* s'appuie sur l'établissement d'un modèle de la structure de pilotage du système étudié en se basant sur la *grille GRAI* et l'identification des centres de décision dans lesquels on souhaite implanter des indicateurs. Ensuite, la démarche identifie pour chacun de ces centres de décision les objectifs qui lui sont rattachés (exemple : coûts, qualité, délai). A partir de là, il faut extraire les leviers sur lesquels les décideurs peuvent agir pour atteindre leurs objectifs (variables de décision). Des indicateurs de performance peuvent dès lors être proposés. Une analyse de cohérence sur ces indicateurs est conduite. Il

s'agit, au moyen d'une table de correspondance, d'indiquer l'adéquation de chaque indicateur avec les variables de décision et les objectifs assignés. La dernière étape consiste à développer, implanter et maintenir le système d'information des indicateurs de performance [*Lauras, 2004*] (*Fig.2.23*). Au total, cette application permet de définir « *un système cohérent d'indicateurs de performance, intégré à la gestion de production, couvrant l'ensemble de ses fonctions et des niveaux décisionnels, et défini en fonction de la stratégie industrielle* » [*Ducq et al., 2003*].

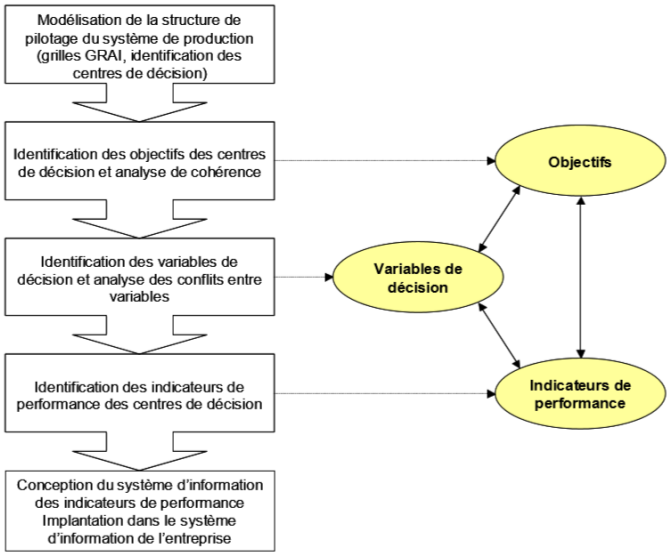


Fig.2.23: Synthèse de la démarche *ECOGRAI* [*Ducq et al., 2003*].

b. Le triplet efficacité / efficience / pertinence

Dans cette section de ce chapitre, nous allons analyser les points de vue proposés par *Lauras* dans [*Lauras, 2004*] concernant les déterminants de l'évaluation de performance. En effet, *Lauras* dégage trois éléments essentiels en fonction desquels la performance peut être pilotée en se basant sur les connaissances précitées (*ABC-ABM*, *BSC*, *ECOGRAI* et *SCOR*) qui seraient : « les ***processus***, les ***centres de décision*** et les ***déterminants de la performance*** ». Le tableau *2.4* (*Tab.2.4*) résume les définitions et les interprétations de chacun de ces éléments proposées. L'idée générale est d'***apparaître ce lien entre la vue décisionnelle (les centres de décision), la vue fonctionnelle (les processus opérationnels) et la performance***.

Elément	**Définition**	**Interprétation**
Centres de décision (processus de pilotage)	Il s'agit d'un ensemble d'activités, d'une même fonction, ayant même horizon de planification et période de remise	Le centre de décision utilise des leviers de commande lui permettant de transformer des ***informations externes « I »*** en ***consignes « C »*** et

	en cause de celle-ci, devant être exécutées suivant des objectifs donnés par un seul cadre de décision (***contraintes « Ct »***). Donc un centre de décision est un élément constitutif du processus de pilotage qui fixe les finalités (***consignes « C »***) et les moyens (***ressource**s **« M »***) de tous les autres processus.	***moyens « M »***, en fonction d'***objectifs « O »*** et ***contraintes « Ct »*** potentiellement issus d'autres centres de décision, hiérarchiquement supérieurs. Ces leviers sont appelés des ***déterminants de la performance « D »*** [*Kaplan et Norton, 2001*], des variables d'action [*Supply Chain Council, 2005*] ou encore des variables de décision [*Bitton, 1990*].
Processus opérationnels	Ils sont vus comme des enchaînements d'activités qui utilisent des ***ressources « M »***, transforment des ***entrées « E »*** en ***sorties « S »*** en fonction de ***consignes « C »*** préétablies (par les processus de pilotage). Ces enchaînements (***fonctions réalisées « F »***) doivent être structurés de façon à produire un résultat constituant de la valeur pour le client.	les ***consignes « C »*** et ***moyens « M »*** vont cadrer la ou les activités qui composent le processus opérationnel correspondant. Une activité va alors, sous ces ***conditions « Ct »***, transformer les ***entrées « E »*** en ***sorties « S »***, et produire ainsi la valeur ajoutée. Plus les ***sorties « S »*** seront conformes aux ***consignes « C »***, plus la ***performance « P »*** sera bonne. Mais, la performance se juge aussi en fonction des ***moyens « M »*** alloués pour réaliser l'activité et de l'utilisation qui en est faite.

Tab.2.4: Définitions et interprétations des processus et des centres de décision [*Lauras, 2004*].

La figure suivante (*Fig.2.24*) illustre cette interprétation. Finalement, les relations de causalités mises en évidence par *Lauras* montre que la *performance* « *P* » dépend directement (pour « *M* » et « *C* ») ou indirectement (pour « *S* ») des déterminants de la performance « *D* ».

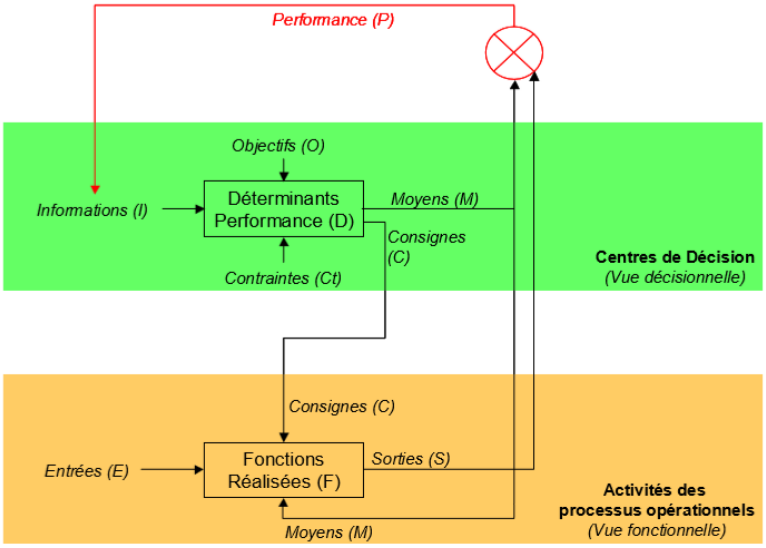


Fig.2.24: Articulation entre centres de décision et processus opérationnels [*Lauras, 2004*].

Dans cette optique, *Lauras* propose une redéfinition du triptyque « *pertinence, efficacité* et *efficience* », à partir, non plus des résultats obtenus, mais de l'origine de la performance que constituent les déterminants (*Fig.2.25*) [*Lauras, 2004*]:

- ***Point de vue pertinence*** : « *évalue l'adéquation des moyens avec les déterminants de la performance. Il s'agit ici d'indiquer dans quelle mesure les moyens et ressources disponibles supportent l'exécution des déterminants de l'activité. Cette donnée doit permettre de détecter des moyens insuffisants ou des ressources surdimensionnées* » ;
- ***Point de vue efficacité*** : « *évalue l'adéquation des consignes avec les déterminants de la performance. Il s'agit de juger de la faisabilité des consignes assignées à l'activité. Les objectifs peuvent être en décalage par rapport aux types d'actions conduites au sein de cette activité. Cette information doit permettre de détecter des consignes farfelues ou des déterminants de la performance inadaptés à la mission confiée* » ;
- ***Point de vue efficience*** : « *évalue l'adéquation des résultats de l'activité avec les déterminants. Il s'agit de préciser dans quelle mesure la mise en œuvre des déterminants de la performance de l'activité produit les résultats attendus. Il doit permettre de valider ou mettre en question les choix établis en termes de leviers d'action ou de décision* ».

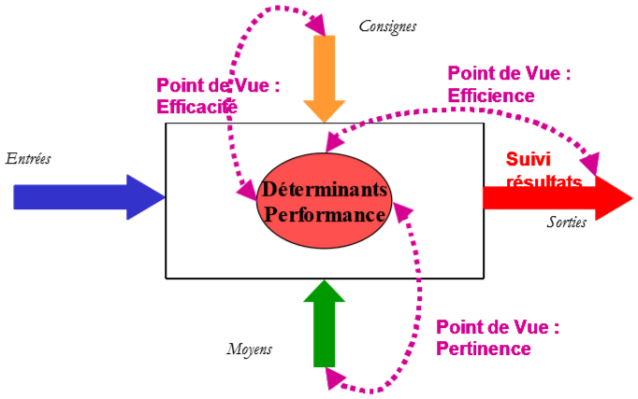


Fig.2.25: Le triptyque « *pertinence, efficacité* et *efficience* » selon *Lauras* [*Lauras, 2004*].

Ces points de vue nous paraissent très prometteurs pour intégrer ce triptyque d'évaluation de la performance dans la conceptualisation de notre système d'étude : « *la chaine du transport intermodal de marchandises*» (*cf. Chapitre 3*).

2.4.3. Bilan – Conclusion

Tout au long de cette partie (*cf. section 2.4*), nous avons d'une part défini les différents concepts liés à l'évaluation de performance de la chaine logistique (*cf. section 2.4.1*), ce concept est utilisée pour atteindre deux finalité qui seraient « *démarches à priori* et *démarches à*

posteriori ». Nos travaux de recherche se situent dans l'optique des « ***démarche à posteriori*** » puisque notre objectif est d'évaluer l'efficacité de notre système par rapport à un plan ou un objectif déterminé dans le cadre d'une stratégie d'entreprise étendue. Cette démarche exige une bonne maitrise et une analyse détaillée du système à étudier (*cf. Chapitre 3, section 3.2*). D'autre part, nous avons fait un tour d'horizon sur l'ensemble des méthodes et des modèles proposés dans la littérature scientifique afin de mener des bonnes pratiques d'évaluation de performance (*cf. section 2.4.2*), deux grandes familles de ces outils ont été dégagées à savoir, les méthodes basées sur la notion des processus et celles basées sur les centres de décision. Ceci qui nous a permis de constater l'importance des travaux menés par *Lauras* dans [*Lauras, 2004*]. En effet, cette redéfinition du triptyque « *pertinence*, *efficacité* et *efficience* » qui fait apparaître ce lien entre la vue décisionnelle (les centres de décision), la vue fonctionnelle (les processus opérationnels) et la performance, nous parait très prometteuse pour intégrer cette pratique d'évaluation de la performance dans la conceptualisation de notre système d'étude : « *la chaine du transport intermodal de marchandises*» (*cf. Chapitre 3*).

En conclusion, nous avons introduit le domaine de l'évaluation de performance où s'articulent une partie des premières contributions de nos travaux de recherche à savoir ***la conceptualisation d'une architecture de contrôle du système du transport intermodal de marchandises*** (*cf. Chapitre 3, section 3.3*). Dans la section suivante de ce chapitre (*cf. section 2.5*), nous allons conclure et synthétiser ce deuxième chapitre de ce manuscrit.

2.5. Synthèse du chapitre 2

La ***logistique*** est une notion qui a connu une évolution au fil des temps. Partant d'une source mathématique, les démarches de la logistique actuelle ont construit leurs concepts de base en s'inspirant des pensées de la logistique militaire. La période après-guerre est marquée par la naissance de deux notions plus étendues : la ***chaine logistique*** (*Supply Chain*) et la ***gestion des chaines logistiques*** (*Supply Chain Management*). Les concepts de *SC* et de *SCM*, en raison de la mondialisation et de la globalisation des économies, deviennent aujourd'hui indispensables pour des systèmes de production et de distribution. Cette notion de « *Supply Chain* » reflète l'***image statique*** d'un ensemble d'entreprises assemblés au sein d'une structure de fonctionnement régulée, ayant un système de communication pour faciliter la circulation de produits et de l'information dont le but est de répondre à des besoins et d'atteindre des objectifs déterminés ceci étant principalement caractérisé par la satisfaction du client. Le « *Supply Chain Management* », pour sa part, englobe les approches, les méthodes et les outils permettant de

répondre aux besoins en matière d'intégration d'entreprises et de coordination des flux de matière et des flux d'information (***image dynamique***).

C'est sur l'axe d'***intégration d'entreprises dans la chaine logistique globale*** que nous positionnons nos travaux. Cet axe suppose la maîtrise des différents états « ***d'ententes industrielles*** » qui peuvent être nouées inter et intra-entreprises. Ces ententes s'appuient sur un rapprochement des centres de décision et gèrent les aléas rencontrés suivant une architecture de pilotage. L'architecture de pilotage forme une articulation entre le système décisionnel et le système d'information des chaines logistiques. C'est sur ce dernier volet que nous positionnons nos travaux de recherche : ***Système d'Information de la Logistique Intégrée***.

Le ***système d'information*** est l'interface entre le système de décision et le système opérationnel qui réalise les objectifs définis par le système de décision. Il s'agit du ***système nerveux de la chaine logistique*** où les différentes ***technologies hétérogènes*** sont rassemblées et combinées permettant ainsi le pilotage informationnel des marchandises tout au long de la chaîne logistique. L'un des domaines d'application des outils et services info-logistiques nous trouvons : « *le suivi et le développement des flux intermodaux* ». C'est sur ce domaine nous positionnons le contexte de nos travaux : ***Système d'Information de la Logistique Intégrée dans le contexte du transport intermodal de marchandises (porte à porte)***.

Le suivi et le développement des flux intermodaux visent à assurer l'***interopérabilité*** des modes de transports et des systèmes d'informations. Ceci repose sur des ***architectures*** permettant à des applications hétérogènes de gérer leurs échanges assurant ainsi l'interconnexion des équipements distants (fixes ou mobiles) au Système d'Information d'une organisation. De ces différents éléments, nous déduisons, dans un premier temps, plusieurs besoins à satisfaire pour atteindre notre objectif d'aide à l'évaluation de la performance des systèmes du transport intermodal : d'abord, il convient de proposer ***une conceptualisation*** et ***une modélisation du système à étudier***. Ensuite, il est nécessaire de ***situer la performance*** des acteurs intervenants et de leurs ententes mutuelles. Un tour d'horizon des travaux de recherche et ***des outils de modélisation et d'évaluation de performance*** montre : d'une part, l'importance des ***modèles à base des agents*** (*SMA*). D'autre part, l'importance des travaux menés par *Lauras* dans [*Lauras, 2004*] concernant la redéfinition du ***triptyque « pertinence, efficacité et efficience »*** en faisant apparaître ce lien entre la vue décisionnelle, la vue fonctionnelle et la performance. Ceci nous parait très prometteur pour bien mener l'analyse de la performance du système étudié.

Chapitre 3

CONTRIBUTION A LA CONCEPTUALISATION D'UNE ARCHITECTURE DU CONTROLE DE LA PERFORMANCE DE SERVICE PORTE A PORTE POUR LA MODÉLISATION DE LA CHAINE DE TRANSPORT INTERMODAL DE MARCHANDIES

Table des matières

3.1. Introduction

3.2. Description du transport intermodal de marchandises de porte à porte, le cas du corridor de la vallée de Seine

- 3.2.1. Introduction
- 3.2.2. Transport intermodal de marchandises : définitions et concepts
  - 3.2.2.1. La conteneurisation
  - 3.2.2.2. Les caractéristiques de la chaine de transport intermodal
  - 3.2.2.3. Le corridor
  - 3.2.2.4. Brève présentation du corridor de la vallée de Seine
  - 3.2.2.5. Bilan – Conclusion
- 3.2.3. Système opérationnel de la chaine de transport intermodal
  - 3.2.3.1. Introduction
  - 3.2.3.2. Les opérations du changement des modes de transport
    - *a. Zone des opérations portuaires*
      - ✓ *Mécanisme et équipements*
      - ✓ *Problèmes de planification de la zone des opérations portuaires*
    - *b. Zone de stockage*
      - ✓ *Mécanisme et équipements*
      - ✓ *Problèmes de planification de la zone de stockage*
    - *c. Zone des opérations terrestres*
  - 3.2.3.3. Les procédures d'empotage et de dépotage
  - 3.2.3.4. Bilan – Conclusion
- 3.2.4. Système décisionnel de la chaine de transport intermodal
  - 3.2.4.1. Introduction
  - 3.2.4.2. Processus n°1 : Déclenchement et clôture de système intermodal
  - 3.2.4.3. Processus n°2 : Organisation de système de transport intermodal

3.2.4.4. Processus n°3 : Acheminement des conteneurs
3.2.4.5. Bilan - Conclusion
3.2.5. Système informationnel de la chaine de transport intermodal
3.2.5.1. Introduction
3.2.5.2. Principaux échanges d'informations relatifs au transport intermodal
a. Les échanges d'informations relatifs au pré et post acheminement
b. Les échanges relatifs au « booking »
c. La transmission du connaissement et du manifeste
d. Les échanges avec les douanes
e. Le suivi logistique des conteneurs
3.2.5.3. EDI portuaire
3.2.5.4. AP +
3.2.5.5. Bilan – Conclusion
3.2.6. Synthèse de la sous-section 3.2 du chapitre 3
3.3. Contribution à la conception d'une architecture du contrôle dans un environnement de transport intermodal de marchandises
3.3.1. Introduction
3.3.2. Méthodologie de la conceptualisation de l'architecture de contrôle proposée
3.3.3. Architecture de contrôle de la chaine de transport intermodal de marchandises
3.3.4. Bilan – Conclusion
3.4. Synthèse du chapitre 3

3.1. Introduction

Après avoir acquis un état de l'art d'une part sur la chaine logistique et la gestion de la chaine logistique, et d'autre part sur la modélisation et l'évaluation de performance de la chaine logistique. Ce ***troisième chapitre*** de ce manuscrit se focalise d'une part sur une analyse détaillée et une bonne maitrise des concepts fondamentaux de notre domaine spécifique afin de pouvoir réaliser une ***conceptualisation fidèle à l'environnement de transport intermodal de marchandises (porte à porte)***. D'autre part, il propose une ***structure générique*** et une ***architecture de contrôle de performance mixte à plusieurs superviseurs ayant des liens communs*** afin de pouvoir intégrer les déterminants de la performance et de respecter la spécificité structurelle, organisationnelle et décisionnelle du système étudié :

La ***deuxième section*** (*cf. section 3.2*) recueille les principaux termes utilisés dans la logistique du transport, particulièrement ceux liés à la notion de l'***intermodalité*** et elle propose une brève présentation du ***corridor de la vallée de Seine***. Ensuite, elle traite ***les activités et les fonctions opérationnelles*** de la chaine du transport intermodal en faisant un tour d'horizon sur les mécanismes adoptés, les équipements les plus répondus utilisés et aussi les différents problèmes de planification rencontrés dans les terminaux portuaires. Dont l'objectif est de pouvoir sélectionner les ***centres de décision*** de ce système, cette section représente une formulation du ***processus de décision*** de la chaine du transport intermodal et le type d'action sur lequel il intervient. Enfin, elle aborde le ***système informationnel*** pour pouvoir comprendre l'architecture de pilotage existante dans l'environnement de notre système d'étude.

Dans la ***troisième section*** (*cf. section 3.3*), nous nous focalisons sur les ***premières contributions*** de nos travaux de recherche en matière de la ***conception d'une structure de contrôle de la performance*** dans un environnement de transport intermodal de marchandises (porte à porte). En effet, cette section recueille tout d'abord une ***analyse descriptive de notre méthodologie de la conceptualisation***, fondée sur les principaux travaux préalablement réalisés en matière d'état de l'art afin de dégager une ***structure générique*** capable de représenter une chaine de transport intermodal de marchandises. Par la suite, elle représente notre ***architecture de contrôle*** afin de pouvoir ***modéliser*** notre système d'étude. Enfin, une ***synthèse*** qui positionne nos travaux de recherche sera proposée dans la ***quatrième section*** (*cf. section 3.4*).

3.2. Description du transport intermodal de marchandises de porte à porte, le cas du corridor de la vallée de Seine

3.2.1. Introduction

Cette partie du troisième chapitre se focalise sur l'acquisition d'une description portée d'une part sur le ***système opérationnel*** de la chaine de transport intermodal, et d'autre part sur le ***système décisionnel*** et le ***système informationnel*** pilotant cette chaine :

La ***deuxième sous-section*** (*cf. section 3.2.2*) recueille d'une part les principaux termes utilisés dans la logistique du transport, particulièrement ceux liés à la notion de l'***intermodalité***. D'autre part, propose une brève présentation du ***corridor de la vallée de Seine***. In fine, nous avons limité nos travaux de recherche au transport international de porte à porte qui se repose sur la ***conteneurisation***. Dans ce cadre, il nous parait essentiel de configurer les structures logistiques en *Haute Normandie* en proposant une description de sa ***partie opérationnelle***.

Dans la ***troisième sous-section*** (*cf. section 3.2.3*), nous traitons d'une part les activités et les fonctions opérationnelles de la chaine du transport intermodal. Ces opérations peuvent être classées en trois catégories qui seraient : « les ***procédures d'empotage***, les ***procédures de dépotage*** et les ***opérations de changement du mode du transport dans les terminaux intermodaux***». D'autre part, nous faisons un tour d'horizon sur les mécanismes adoptés, les équipements les plus répondus utilisés et aussi les différents problèmes de planification rencontrés dans les terminaux portuaires. L'objectif est de comprendre les consignes définies par le ***système de décision*** et ainsi pouvoir sélectionner les centres de décision de ce système.

Tout au long de la ***quatrième sous-section*** (*cf. section 3.2.4*) nous représentons le ***processus de décision*** de la chaine du transport intermodal d'une part, le type d'action sur lequel il intervient d'autre part. Ceci permet la formulation des processus de décision. Pour compléter cette étude, il nous parait essentiel d'aborder le ***système informationnel*** pour pouvoir comprendre l'architecture de pilotage existante.

Pour sa part, la ***cinquième sous-section*** (*cf. section 3.2.5*) propose d'une part une synthèse des fonctions assurées par les principaux systèmes informatiques liées aux opérations du transport intermodal. D'autre part, une présentation de l'***EDI portuaire*** mis en œuvre par le port du *Havre* et une description du système ***AP+*** de suivi de toute la chaine logistique sur tout

le corridor de la *vallée Seine*. Enfin, une ***conclusion*** qui positionne nos travaux de recherche sera proposée dans la ***sixième sous-section*** (*cf. section 3.2.6*).

3.2.2. Transport intermodal de marchandises : définitions et concepts

Cette sous-section recueille les principaux termes utilisés dans la *logistique du transport*, particulièrement ceux du ***transport intermodal de porte à porte***. L'objectif est de convenir à la signification des termes et des concepts de base en usage courant et de faciliter ainsi leurs compréhensions techniques.

Selon *Le Petit Robert*, le ***transport*** est le « *fait de déplacer des êtres ou des choses. Fait de porter pour faire parvenir en un autre lieu ; manière de déplacer […] déplacement sur une assez longue distance et par des moyens spéciaux, […] Transport par terre, par voie de terre ; par chemin de fer, par route. […] Ensemble des moyens employés pour transporter les marchandises et les personnes...* » [*Le Petit Robert, 2011*].

Le ***transport de marchandises*** sur ***longue distance*** est segmenté par le recours à plusieurs ***modes de transport successifs*** dans un souci de complémentarité et de compétitivité. Pour introduire le transport « ***intermodal*** », nous définissons dans le tableau suivant (*Tab.3.1*) le transport de marchandises selon ses modes de transport en mettant la lumière sur les caractéristiques de chaque mode.

Caractéristiques	**Modes**				
	Terrestres			**« Oversea »**	
	Routier	**Ferroviaire**	**Fluvial**	**Maritime**	**Aérien**
Petits colis (-de 50 kg)	OUI (messagerie)	OUI (messagerie)	NON	NON	OUI (messagerie)
Colis volumineux	NON (sauf transports exceptionnels)	OUI	OUI	OUI	OUI
Produit pondéreux	NON	OUI	OUI	OUI	NON
Types de flux	Domestique + Europe	Domestique + Europe continentale	Europe du Nord	Intercontinental	Intercontinental

	continentale + Moyen-Orient	+ Moyen-Orient			
Possibilités de transport combiné autre que conteneurs	+ fer (ferroutage) ou mer (Ro-Ro)	+ route (ferroutage) ou mer (Ro-Ro)	+ mer (barges)	+ route ou mer (Ro-Ro) ou fluvial (barges)	-
Possibilités de porte à porte	OUI	NON (sauf ITE)	NON	NON	NON
Rapidité	Rapide mais encombrement des grands axes et des frontières	Peu rapide (priorité aux voyageurs, disparité du réseau de l'UE)	Peu rapide	Peu rapide (encombrement des grands ports internationaux)	Très rapide
Coûts	Moyens	Faibles	Faibles	Faibles	Importants
Contraintes d'emballage	-	-	-	Fortes (coûts importants)	Chasse au poids

Tab.3.1: Les principaux modes de transport de marchandises [*Venturelli et al., 2010*].

De ces éléments, le transport dit « ***multimodal*** » est le transport d'une marchandise donnée pour lequel on segmente la chaine de transport, en utilisant successivement des modes de transports différents (routier, ferroviaire, fluvial, …). On choisit, pour chaque segment, le mode le plus performant en fonction de la nature de la marchandise, des contraintes de l'offre de service et de la demande logistique. La mise en œuvre de cette chaine peut entrainer un ***changement de contenant***. Tandis que, le transport dit « ***intermodal*** » représente l'acheminement de marchandises placées dans une ***unité de chargement*** (conteneur, swap-body, etc.) recourant successivement à plusieurs modes de transport, ***sans empotage ni dépotage*** (sans changement de contenant) à chaque changement de mode, du point d'origine au point de destination finale avec une ou plusieurs interfaces [*MEDDTL, 2008*].

En conclusion, Le transport de marchandises reste général et inclut plusieurs natures de produits transportés et différentes chaines de transport. Notre étude se limite au transport intermodal international qui se repose sur la ***conteneurisation***. La raison pour laquelle nous retenons la définition du transport intermodal, adoptée par *CRAINIC* et *KIM* en *2007*, soit : « *Le transport intermodal de marchandise est une chaine multimodale de services de transport de conteneurs. Cette chaine liant l'expéditeur au destinataire dans un service « porte à porte », se déroulant sur de grandes distances* » [*Crainic et Kim, 2007*]. Dans la suite, nous traitons la

notion de la conteneurisation (*cf. section 3.2.2.1*), les principales caractéristiques da la chaine du transport intermodal (*cf. section 3.2.2.2*) et la notion du corridor (*cf. section 3.2.2.3*).

3.2.2.1. La conteneurisation

Dans cette section, on étudie les concepts liés à la conteneurisation, ses composants, ses avantages et ses inconvénients. La notion de la « ***conteneurisation*** » s'est développée durant les trente dernières années. Le ***conteneur*** est un moyen de transport qui a permis de réduire les coûts et les délais grâce à la ***standardisation***. Le transport de marchandises en conteneurs a une multitude d'avantages par rapport au transport de marchandises non regroupées. En effet, La marchandise, une fois empotée en conteneur, ne subit plus d'autres manutentions jusqu'à son destinataire final. Ce qui est manutentionné est ainsi ***le contenant et non le contenu***.

Le conteneur est une « *boite* » rectangulaire de dimension universelle. Le conteneur standard de vingt pieds sert d'unité de référence pour estimer les capacités d'un navire et évaluer les flux. On parle alors en *EVP* (*Equivalent Vingt Pieds*) ce qui correspond à un volume utile de *33* mètres cube. Mais d'autres conteneurs plus spécifiques existent comme les conteneurs frigorifiques, les conteneurs-citernes (*tank container*) et les plein-ciel (*open top*) [*UIRR, 2008*].

C'est grâce aux conteneurs que le transfert de marchandises d'un mode de transport à un autre est devenu plus rapide suite à la favorisation de l'automatisation d'un grand nombre des opérations de manutention, et l'accélération des opérations de chargement et de déchargement. Néanmoins, les conteneurs ont quelques inconvénients car les températures élevées et la ventilation réduite dans ces derniers entrainent de lourds dommages [*Savy, 2007*].

3.2.2.2. Les caractéristiques de la chaine du transport intermodal

Selon *Crainic* et *Kim*, Les principales caractéristiques de la chaine du transport intermodal forment trois principes [*Crainic et Kim, 2007*] (*Fig.3.1*):

- ***Seuls les conteneurs sont manipulés et non pas les marchandises qu'ils contiennent*** : l'expéditeur livre un *FCL*[6] (*Full Container Load*) où les marchandises sont regroupées. Le *FCL* est chargé et déchargé sous la responsabilité de l'expéditeur, et seul le destinataire a le droit de vider le conteneur. Ceci assure l'écoulement direct des

[6] Le conteneur est plein en volume.

marchandises depuis l'usine de l'expéditeur jusqu'au lieu de livraison avec un minimum de rupture, de retard et de risque;

- ***De l'expéditeur vers le port initial*** : les conteneurs quittent le lieu de l'expédition par un camion directement vers le port initial (premier port) ou bien en passant par une gare ferroviaire / port fluvial, pour que par la suite un train / une barge livre ces conteneurs au premier port (***Exportation***);
- ***Du port final vers la destination finale*** : un navire va déplacer les conteneurs du port initial jusqu'à un port sur l'autre continent (port final). Les conteneurs quittent ce dernier et seront livrés au destinataire final par un seul ou une combinaison des modes de transport « camion, rail ou la navigation fluviale » (***Importation***).

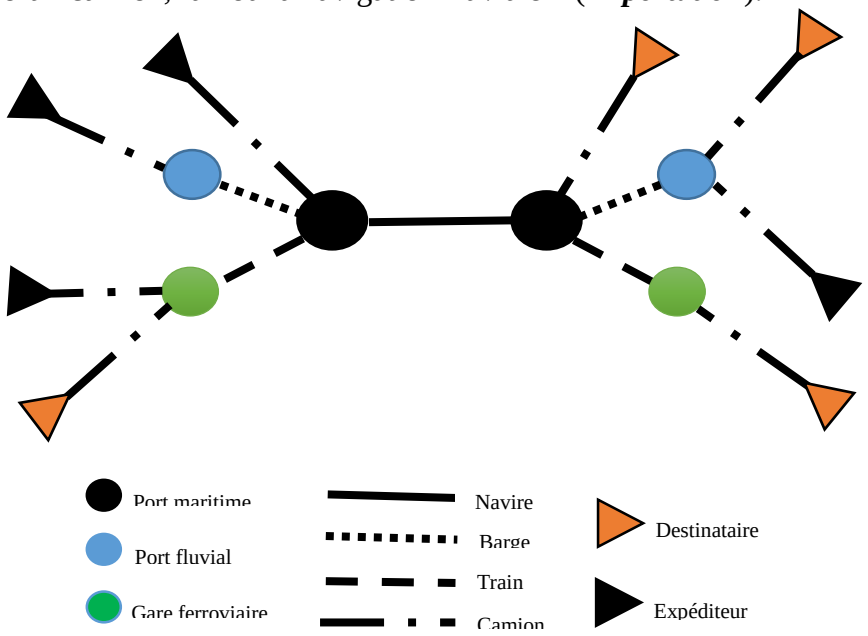


Fig.3.1: Illustration des composants de la chaine de transport intermodal.

3.2.2.3. Le corridor

Un corridor est un concept géographique. Au fil du temps cet espace est devenu un outil de développement économique [*Comtois, 2012*] (*Tab.3.2*):

Période	Description
Durant la décennie 1950	Un ***corridor de transport*** rassemblant des infrastructures de transport.
Durant la décennie 1960	Le terme a évolué pour inclure un ***axe de développement urbain construit le long d'infrastructures et composé de centres urbains***.
Durant la décennie 1970	L'adhésion aux principes de l'économie de marché et l'intégration des modes de transport mènent à la formation de ***corridors de***

	développement. Un corridor de développement est une ***région limitrophe à une dorsale d'infrastructures de transport***. Ces corridors sont des milieux innovants qui disposent de centres financiers, de sièges de corporations internationales et de plateformes continentales. Ils sont étroitement associés à de hauts niveaux d'accessibilité, de connaissance, de culture et sont synonymes de prospérité mais ***leur exploitation dépend de la présence d'infrastructures de transport efficaces***.
Dès la décennie 1980	Un corridor de développement fut remplacé par celui de ***corridor de commerce***. Le concept de corridor de commerce traduit ***le besoin d'intégration économique***. L'intégration du commerce et des transports est concomitante au développement d'un système de transactions et de transport avancé. Seul un tel système facilite la négociation d'accord. Les corridors de commerce regroupent: *1)* les flux de produits, services, personnes et informations résultant d'une concentration des fonctions de production, de transformation et de distribution ; *2)* les systèmes et les infrastructures de transport qui facilitent ces flux ; *3)* et, les politiques et lois qui règlementent ces éléments.
Depuis la décennie 1990	Les corridors de commerce sont de plus en plus ***le résultat de processus de décision décentralisés***. Ces corridors peuvent être créés, désaxés ou déclinés avec le temps en fonction de l'introduction de nouvelles technologies et de changements commerciaux résultant de changements au sein de la communauté. Dans ce contexte, un ***corridor combine des infrastructures physiques et non physiques*** : *1)* Les ***infrastructures physiques*** couvrent les réseaux et les équipements de transport et de télécommunication ; *2)* Les ***infrastructures non-physiques*** incarnent le capital, les connaissances, la main-d'œuvre et les ressources appliqués aux réseaux physiques, incluant la capacité de contracter une obligation, de transporter et de négocier un accord de transfert dans des contextes politiques, financiers et légaux spécifiques aux différentes parties du monde. Un ***corridor fonctionnel*** est basé sur le type, le volume et la direction des flux [*Rotter, 2004*].

Tab.3.2: Les périodes de développement de la notion du corridor [*Comtois, 2012*].

En résumé, un corridor est une séquence d'activités de distribution supportant un large éventail de fonctions au sein d'une région urbaine, il s'agit bien d'un axe logistique intégré [*Rodrigue, 2004*]. Les corridors sont une composante essentielle du transport global et des systèmes logistiques et l'un des aboutissements des ports en tant que plateformes continentales alors qu'ils ***fournissent des structures intermodales*** et des connexions avec les arrière-pays.

La littérature scientifique souligne l'***importance des ports*** dans le développement des corridors, il existe une littérature émergente ([*Rimmer, 1999*], [*Comtois, 2007*]) portant sur les expéditeurs, les transporteurs et les opérateurs de terminaux, considérés comme les principaux acteurs possédant les connaissances et les compétences pour répondre aux besoins du commerce international. D'autre littérature [*Konings et Ludema, 2000*] démontre comment les problèmes de juridiction affectent le fonctionnement des corridors en termes de ruptures de charge.

Les défis sont bien sûr spécifiques à chaque corridor, ce qui ne permet pas toujours une simple transposition. Des mesures seraient à envisager et à vérifier. En effet, le ***développement de l'axe de la vallée de Seine en tant qu'un corridor logistique international*** (*cf. section 3.2.2.4*), un territoire étendu de *Cherbourg* à *Dieppe* avec un fleuve, un littoral portuaire, un estuaire, une baie ouverte sur la mer et une région toute entière connue dans le monde entier, compte sur plusieurs projets d'***amélioration de la performance du transport intermodal***.

3.2.2.4. Brève présentation du corridor de la vallée de Seine

En *2013*, les trois régions d'« *Ile-De-France* », de « *Basse-Normandie* » et de « *Haute-Normandie* » se sont engagées dans une démarche de développement de la vallée de la Seine, vallée reliant par le fleuve la capitale à une façade maritime ouverte vers l'international [*CCI Normandie, 2014*]. La dynamique engagée, soutenue par l'ensemble des acteurs du territoire (*Fig.3.2*), se décompose en trois axes [*CCI Normandie, 2014*]: *1)* La gestion de l'espace et le développement durable pour aménager le territoire ; *2)* Les flux, déplacements et réseaux ; *3)* Le développement économique et le soutien de l'emploi.

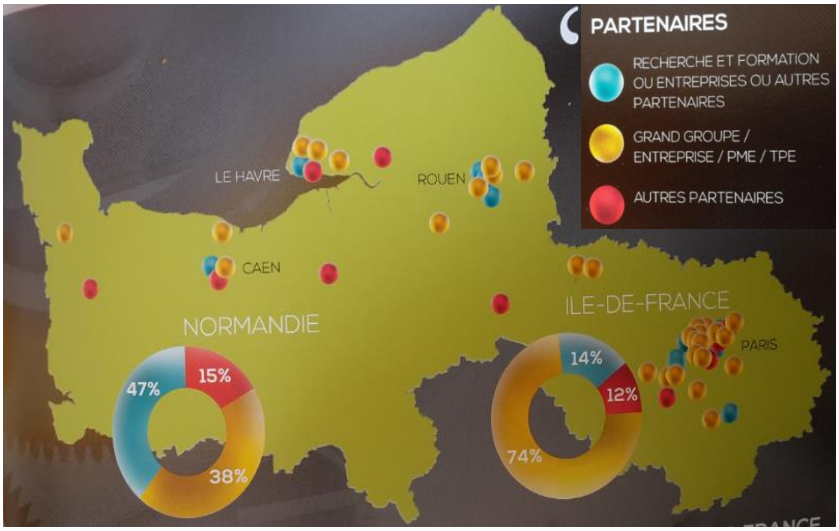


Fig.3.2: Partenariats entre la Normandie et l'Ile-De-France [*Nov@log, 2013*].

Le projet ***HAROPA*** (ports de *Havre-Rouen-PAris*) est reconnu comme un acteur de qualité avec ses contraintes économiques et environnementales qui ne permettent plus aux logisticiens de travailler seuls. En effet, *HAROPA* permet au trois ports d'accéder à une visibilité accrue à l'international [*HAROPA, 2014*]. De par sa localisation, son histoire, la diversité de ses territoires, ses nombreux savoir-faire traditionnels et innovants, et son capital humain, la vallée de Seine regorge d'atouts la positionnant au sommet de palmarès des régions françaises et européennes (*cf. Annexe 2 – Les atouts du corridor de la vallée de Seine*).

3.2.2.5. Bilan – Conclusion

Tout au long de cette partie (*cf. section 3.2.2*), nous avons d'une part défini les différents concepts liés à la chaine du transport intermodal de marchandises, l'objectif est de convenir à la signification des termes de base en usage courant et de faciliter ainsi leurs compréhensions. Puisque le transport de marchandises est général et inclut plusieurs natures de produits transportés et différentes chaines de transport, nous avons limité nos travaux de recherche au transport intermodal international qui se repose sur la ***conteneurisation***. D'autre part, nous avons proposé une brève présentation du ***corridor de la vallée de Seine*** (*cf. section 3.2.2.4*), comme étant un exemple concret d'un corridor qui regorge d'atouts : sa localisation, son histoire, la diversité de ses territoires, ses nombreux savoir-faire traditionnels et innovants et son capital humain. Et qui compte sur plusieurs projets d'amélioration de performance du transport intermodal (*APLOG*).

En conclusion, nous avons introduit et situé ***l'intérêt régional de nos travaux***. En effet, les travaux de recherche de cette thèse sont menés à l'université du ***Havre*** dont le projet d'appartenance est ***APLOG*** (*Amélioration et Performance de la LOgistique Globale*). Ce projet s'intéresse à la configuration actuelle des structures logistiques en ***Haute Normandie*** (équipements, acteurs, métiers, …) et particulièrement au management des chaines logistiques globales (*cf. Chapitre 1*). Dans la section suivante de ce chapitre (*cf. section 3.2.3*), nous allons proposer une description de la ***partie opérationnelle de la chaine du transport intermodal***.

3.2.3. Système opérationnel de la chaine de transport intermodal

3.2.3.1. Introduction

Dans cette sous-section on étudie le ***système opérant*** qui traite les activités opérationnelles de la chaine du transport intermodal. L'objectif est de comprendre les consignes définies par le système de décision et ainsi sélectionner les centres de décision du système.

Les principales opérations du transport intermodal peuvent être classées en trois catégories qui seraient : « les ***procédures d'empotage*** (*Stuffing procedures*), les ***procédures de dépotage*** (*Stripping procedures*) et les ***opérations de changement du mode du transport dans les terminaux intermodaux*** (*Trans-loading operations*)» (*Tab.3.3*). Dans la suite, nous traitons d'une part les opérations de changement des modes du transport (*cf. section 3.2.3.2*) et d'autre part les procédures d'empotage et de dépotage (*cf. section 3.2.3.3*).

Quitter via / ***Arriver via***	***Destinataire***	***Modes de transport***
Expéditeur	Service de porte à porte (*Door-to-Door service*)	Procédures d'empotage (*Stuffing procedures*)
Modes de transport	Procédures de dépotage (*Stripping procedures*)	Changement du mode de transport dans un terminal intermodal (*Trans-loading operations*)

Tab.3.3: Les principales opérations du transport intermodal.

3.2.3.2. Les opérations du changement des modes de transport

Les terminaux intermodaux (portuaire, ferroviaire ou fluvial) servent ***d'interfaces entre modes de transport*** (*Tab.3.4*). Puisque le terminal portuaire est un intervenant important dans la chaine de transport intermodal. En effet, il sert de plateforme de transbordement (transshipment) entre les navires océaniques et les autres modes de transport plus locaux, comparativement aux autres types de terminaux qui se limitent à une interface entre un ou deux modes. Alors notre étude sur le mécanisme d'un terminal portuaire généralise le mécanisme des autres terminaux intermodaux.

Quitter le terminal via / ***Arriver au terminal via***	***Navires océaniques***	***Train, Camion ou Barge***
Navires océaniques	Transbordement (*Transshipment*) -terminal portuaire-	Cycle d'importation (*Import cycle*) -terminal portuaire-
Train, Camion ou Barge	Cycle d'exportation (*Export cycle*) -terminal portuaire-	Terre - Terre (*Land-Land*) -tous les terminaux intermodaux-

Tab.3.4: Les principales opérations du « *trans-loading* ».

Le scénario du cheminement d'un conteneur dans le terminal portuaire se lance une fois le navire se présente au terminal, le reste du scénario est comme suit (*Fig.3.3*):

- Un ***quai*** doit être assigné à ce navire, conjointement à cette assignation, un nombre de ***grues de quai*** est réservé pour travailler sur le navire ;
- Une fois le navire accosté au quai, les conteneurs sont saisis par la grue de quai et déposé sur un ***véhicule de transport interne*** ;
- Celui-ci se dirige ensuite vers la ***pile*** qui a été assignée au conteneur et il est transféré dans celle-ci par un ***pont roulant*** sur pneumatiques ;
- Suite à une ***période d'entreposage***, le conteneur est transféré vers un autre mode de transport et livré au client ;
- La suite d'opérations est inversée dans le cadre ***d'opérations d'exportations***.

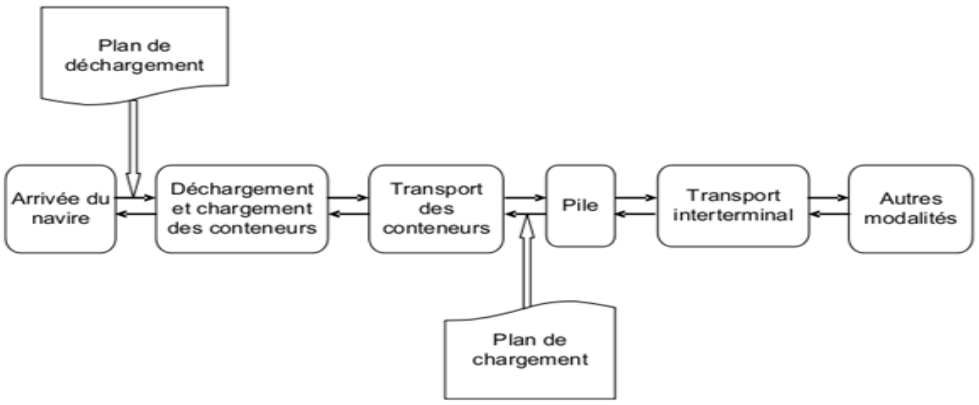


Fig.3.3: Succession des opérations dans un terminal portuaire.

Crainic et *Kim* en *2007* dans [*Crainic et Kim, 2007*] divisent les opérations des terminaux portuaires à conteneurs en trois grandes catégories (*Fig.3.4*):

- Les opérations portuaires qui comprennent l'amarrage, le déchargement et le chargement des porte-conteneurs. Ces opérations sont réalisées dans « ***la zone d'opérations portuaires*** ». Le rôle de cette zone est de servir de point de transfert des conteneurs entre le terminal et les navires (ou barges) (*cf. section 3.2.3.2.a*);
- Les opérations de réception et d'expédition en provenance ou portant vers les autres modes de transport (camions ou trains). Ces opérations sont réalisées dans « ***la zone d'opérations terrestre*** ». Le rôle de cette zone est de servir d'interface entre le terminal et les autres moyens de transport : trains et camions (*cf. section 3.2.3.2.c*);

- Les activités de manutention et d'entreposage des conteneurs dans la cour du terminal. Ces opérations sont réalisées dans « ***la zone de stockage*** ». Le rôle de cette zone est de servir de tampon afin d'absorber temporairement les flux de conteneurs en provenance et à destination des navires et des autres modes de transport (*cf. section 3.2.3.2.b*).

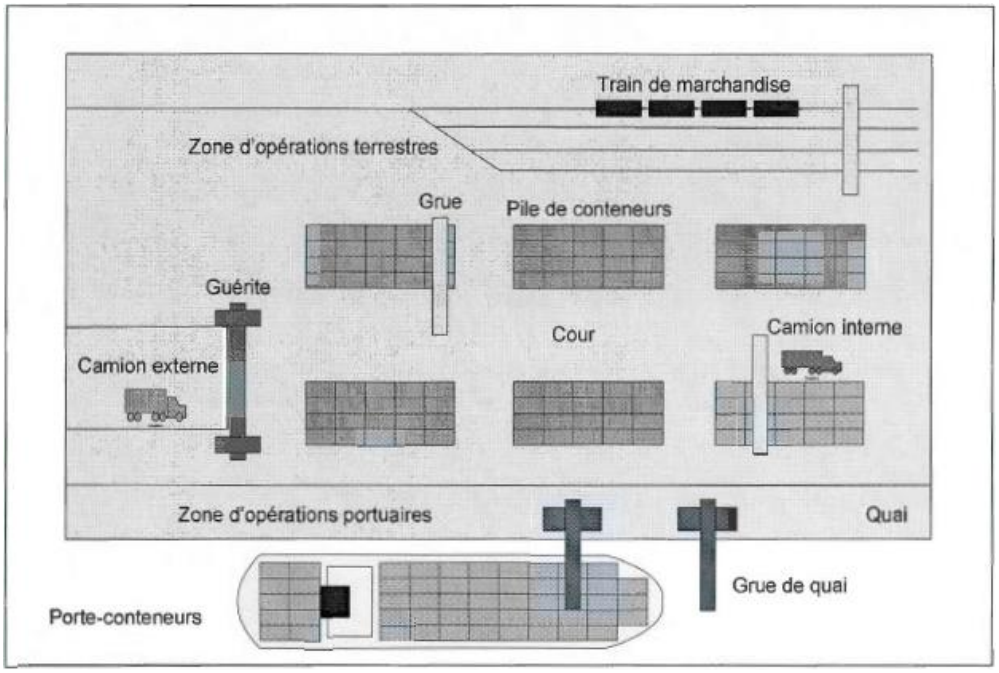


Fig.3.4: Les principales zones d'opérations dans un terminal portuaire.

a. Zone des opérations portuaires

✓ ***Mécanisme et équipements***

Suivant la décomposition du terminal portuaire, cette zone est considérée la première zone où se passent les premières opérations sur les conteneurs reliant le quai (navire ou barge) à la zone de stockage. La figure *3.5* (*Fig.3.5*) résume le mécanisme de ces opérations en dégageant les principaux intervenants et équipements utilisés. On écarte la possibilité de réaliser un ***transbordement direct*** des conteneurs dans les autres modes de transport car l'ordonnancement des horaires entre le navire et les trains / camions est rarement possible.

De ces éléments, nous pouvons dégager les principaux équipements les plus utilisés dans la zone des opérations portuaires qui seraient : « *Grue de quai*, *Grue de barge*, *Chariot cavalier* et *remorque* » (*Tab.3.5*).

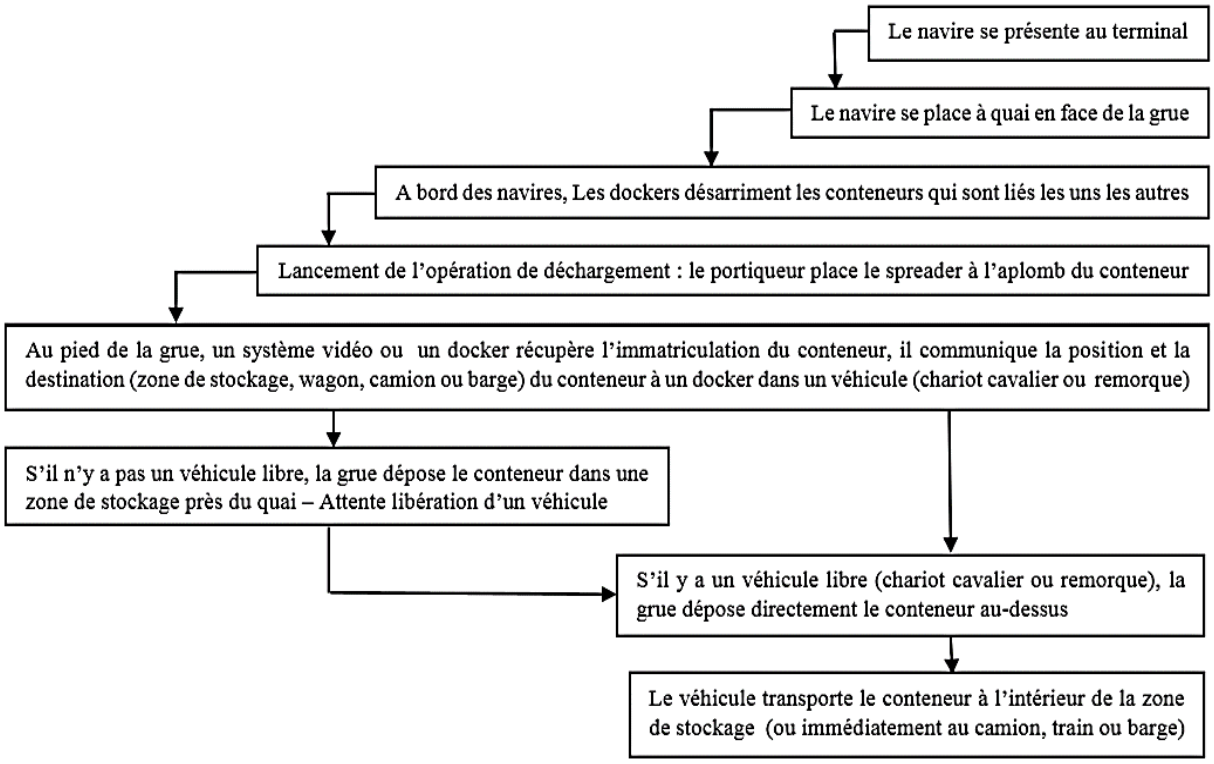
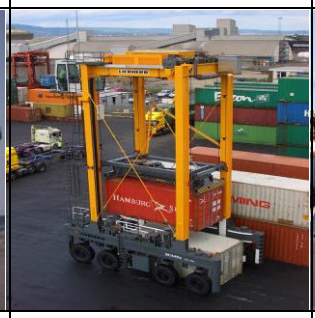


Fig.3.5: Le mécanisme de la zone des opérations portuaires.

Grue de quai	***Grue de barge***	***Chariot cavalier***	***Remorque***
			
Il existe plusieurs types de grues de quai pour le chargement / déchargement avec des capacités, des structures et des mécanismes différents. Conséquence du souci de toujours réduire le temps de séjour à quai des navires.	Les opérations de chargement et de déchargement des barges se passent de la même façon que sur les navires à l'aide des grues de quai. Il existe dans plusieurs terminaux des grues spécifiques pour la manutention des barges.	Plusieurs sortes de véhicules de transport interne qui assurent les déplacements entre le quai et la zone de stockage. L'utilisation la plus répondue est celle des chariots cavaliers connus par leur facilité de déplacement et leur autonomie.	Il assure le transport interne dans le terminal, notamment dans la zone des opérations portuaire, la grue dépose le conteneur sur le remorque et ce dernier le transporte jusqu'à sa position de stockage qui lui est assigné.

Tab.3.5: Les équipements les plus répondus dans la zone des opérations portuaires.

- ✓ ***Problèmes de planification de la zone des opérations portuaires***

Dans cette partie, nous allons citer d'une manière non exhaustive les différents problèmes de planification stratégiques, tactiques et opérationnels liés aux opérations portuaires (*Tab.3.6*).

Niveau de planification	***Description du problème***	***Discussion***
Niveau stratégique	La ***détermination d'un nombre optimal de quais*** en tenant compte du compromis entre la qualité du service aux navires et les coûts associés aux temps d'opération sur les navires, les coûts d'opération sur le quai et les coûts de construction du quai.	Les ***avantages liés à l'augmentation du nombre de quai*** sont: *1)* Un bon service aux navires ; *2)* Diminution des risques de congestion des quais ; *3)* Diminution du taux de l'utilisation de la capacité du terminal. Les ***inconvénients liés à l'augmentation du nombre de quai*** sont : *1)* Risque d'interférence entre les opérations des différents navires ; *2)* Augmentation des investissements ; *3)* Augmentation de la circulation dans le terminal.
	La ***détermination du nombre des grues***, chaque quai doit être équipé d'un nombre suffisant de grues afin d'être fonctionnel et percevoir des navires.	un bon nombre de grues permet d'***augmenter la productivité*** du quai. Mais il demande un ***taux élevé d'investissement*** et risque l'***augmentation des problèmes d'interférence*** entre les grues [*Crainic et Kim, 2005*].
Niveau tactique	L'***allocation d'un navire à un poste à quai*** est une décision qu'il faut planifier largement à l'avance afin d'éviter les files d'attente et donc un temps sans gain pour les armateurs.	Il est préférable que les postes à quai soient ***proches de la zone de stockage*** afin que les risques de délais des opérations n'augmentent. Mais la difficulté réside dans ***l'horaire de l'affectation du navire au poste à quai***.
	La ***détermination d'une séquence d'opération*** de chargement et/ou déchargement.	La ***minimisation du temps de complétion*** est très importante car elle détermine et elle ***précise le temps de départ des navires***.
Niveau opérationnel	L'objectif de ***l'affectation des navires aux postes à quai*** (*Berth Allocation Problem – BAP*) est de ***minimiser la somme du temps d'attente et du temps de manutention des navires***. Chaque poste à quai ne pouvant supporter qu'un seul navire à la fois. Le temps de manipulation du navire dépend du poste à quai associé. Traiter le *BAP* revient à obtenir un ***plan d'accostage*** à partir des données d'entrée suivantes: *1)* La longueur du navire ; *2)* L'heure d'arrivée	Les ***contraintes temporelles*** peuvent limiter le temps d'accostage et le temps de départ des navires. Selon [*Imai et al., 2005*], les deux cas suivants sont distingués: *1)* Le ***BAP statique***, l'heure d'arrivée des navires représente une contrainte douce; *2)* Le ***BAP dynamique***, Les heures d'arrivée sont fixes. Les ***contraintes spatiales*** restreignent les postes d'accostage possibles pour les navires selon un partitionnement prédéfini du quai [*Imai et al. 2005*]: *1)* La ***mise en continue***, les navires accostent à des quais arbitraires sur le quai ; *2)* La ***mise en discret***, un seul navire est servi dans une section du quai à la fois ; *3)* La

	prévue ; *3)* Le temps total de manutention ; *4)* La position d'accostage.	***mise en hybride***, les grands navires peuvent occuper plus d'une section tandis que les petites navires peuvent partager une seule.
	Le problème d'***affectation des grues de quai aux navires*** (*Quay Crane Assignment Problem - QCAP*) consiste à attribuer les grues aux navires.	Le *QCAP* peut avoir des ***conditions spécifiques*** [*Bierwirth et Meisel, 2010*]: *1)* Le nombre de grues affecté aux navires ; *2)* Ce nombre est fixe tout au long du processus de service.
	Le problème ***d'ordonnancement des grues de quai*** (*Quay Crane Scheduling Problem - QCSP*). Il s'agit de l'ordonnancement des tâches décrivant la granularité dans laquelle la charge de travail de navire est considérée. Ceci nécessite les données suivantes: *1)* Le plan de stockage ; *2)* Les attributs de la grue.	Les tâches à ordonnancer peuvent être définies dans la base de zones de baies, ou dans la base des piles de conteneurs, ou de conteneurs individuels [*Bierwirth et Meisel, 2010*]. Suivant les attributes de la tâche, les attributes de la grue apparaissent aussi dans les modèles *QCSP* : *1)* Le temps de préparation ; *2)* La marge de temps, pour chaque grue ; *3)* Les positions initiales et finales prévues pour la grue ; *4)* La vitesse de déplacement.

Tab.3.6: Problèmes de la planification de la zone des opérations portuaires.

b. Zone de stockage

✓ ***Mécanisme et équipements***

La zone de stockage est la zone où s'effectue l'***entreposage des conteneurs***. Afin d'assurer une circulation fluide des marchandises à travers les postes à quai, les autorités portuaires établirent diverses pratiques d'entreposage. Il existe deux principaux types d'entreposage portuaire qui seraient « *l'entreposage en transit* et l'*entreposage à longue terme* » [*Hennessy et al., 2003*]:

- L'***entreposage en transit*** pour des marchandises ne restant qu'un laps de temps dans le port. Il permet d'accomplir les inspections, de percevoir des taxes à l'importation, d'éviter les encombrements du quai, de faciliter la rotation de navires et enfin de se protéger contre les risques de retard de navires ;
- L'***entreposage à long terme*** pour des marchandises qui pour des raisons diverses doivent séjourner plus longtemps dans le port. Cet entreposage s'est développé considérablement dans certains pays au point où il assure des revenus importants pour l'autorité portuaire allant parfois de *30* à *40%* de la totalité des revenus de port.

De ces éléments et pour répondre aux besoins d'entreposages précités. Certains ports divisent cette zone en deux, « *primaire* et *secondaire* » [*Hennessy et al., 2003*]:

- Le ***stockage primaire*** a comme objectif de déstocker les conteneurs en transit et être utilisé dans le cas d'impasse de véhicules afin de minimiser le temps d'attente des grues de quai et donc le temps d'attente de navire ;
- Le ***stockage secondaire***, il s'agit du stockage de conteneurs en attente de la libération ou de l'inspection douanière. La taille de ce type de stockage est toujours extrêmement importante que celle du stockage primaire. Les conteneurs déchargés du navire et qui seront acheminés par train / camion sont stockés dans cette zone se trouvant plus près des voies ferrées / routières.

Le choix des équipements utilisés dans la zone de stockage dépend de l'organisation de la zone, le tableau *3.7* (*Tab.3.7*) décrit les équipements les plus répondus.

Portique de cour	***Chariot cavalier***
	
Ils sont des ponts roulants sur pneumatique ou des ponts roulants sur rails. Ces équipements circulent au-dessus des piles pour les déplacer mais leur taille réduit leur souplesse. [*Cirrelet, 2008*]. Cet équipement sert l'organisation de cour en bloc.	Ils sont à différentes hauteurs qui soulèvent, déposent et transportent les conteneurs. Cet équipement sert l'organisation de cour en rangées, il stocke les conteneurs en rangées en laissant entre elles un espacement suffisant pour leurs déplacements.

Tab.3.7: Les équipements les plus répondus dans la zone de stockage.

✓ ***Problèmes de planification de la zone de stockage***

Dans cette section, nous allons citer d'une manière non exhaustive les différents problèmes de planification stratégiques, tactiques et opérationnels liés aux opérations d'entreposage (*Tab.3.8*).

Niveau de planification	***Problème***	***Description***
Niveau stratégique	La ***détermination du type des équipements à utiliser ainsi que l'organisation de la cour***. Ces deux décisions sont fortement liées car l'une a un grand impact sur l'autre.	L'avantage est d'assurer une grande fluidité des opérations entre la cour et le quai toute en minimisant les coûts d'acquisition. Mais le choix est difficile car minimiser les remaniements revient à diminuer la hauteur des piles, et donc augmenter le taux d'investissement.
Niveau tactique	La ***détermination du nombre de véhicules*** à utiliser pour le transport des conteneurs entre le navire et la zone d'entreposage.	L'augmentation de nombre de véhicules peut assurer un bon niveau de service aux portiques de quai. Mais ça risque d'augmenter les coûts du transport.
	La ***détermination des méthodes de triage et d'empilement des conteneurs*** dans un terminal portuaire.	L'objectif est de minimiser les remaniements des conteneurs et les mouvements non productifs. Mais ceci nécessite un grand espace pour le triage.
Niveau opérationnel	La ***planification opérationnelle du transport interne*** entre le quai et la cour. L'objectif est la ***minimisation du temps de transport à vide*** et elle porte sur le choix d'une des deux méthodes utilisées pour l'affectation des véhicules aux tâches de transport.	Deux méthodes d'affectation sont utilisées : *1)* ***L'affectation d'un groupe de véhicules à un portique de quai***. Les véhicules internes transportent le conteneur et reviennent vides ce qui conduit à un transport à vide lors du retour des véhicules ; *2)* ***L'affectation d'un groupe de véhicules à tous les portiques de quai.*** Les véhicules transportent les conteneurs du quai vers la zone de stockage et de la zone de stockage vers le quai, ce qui diminue les déplacements à vide rien que la coordination entre les véhicules et les grues s'avère très compliquée.
	La Planification et ordonnancement des portiques de la cour.	Les portiques effectuent plusieurs opérations : soulever et déposer les conteneurs sur les véhicules et recevoir ceux à exporter pour leur empilement dans les blocs de la cour du terminal.
	L'ordonnancement de l'entreposage.	Ce problème se pose sur ***l'affectation d'une position aux conteneurs dans la zone d'entreposage***. L'objectif est de minimiser le temps d'occupation des équipements de manutentions dans des

	tâches non productifs comme lors des remaniements des conteneurs.

Tab.3.8: Problèmes de la planification de la zone de stockage.

c. Zone des opérations terrestres

La zone des opérations terrestres appelée aussi « *l'hinterland* » est considéré comme un terminal à terre où se passent toutes les opérations sur les conteneurs en provenance ou à destination des trains et des camions. Afin de mieux utiliser les équipements de transport interne et d'augmenter leur rendement, les terminaux portuaires utilisent dans cette zone les mêmes équipements utilisés dans la zone de stockage [*Cirrelet, 2008*], ce mécanisme dépond du type de l'organisation de la cour qui seraient « *en bloc* ou *en rangées* »:

- L'***organisation de la cour en bloc***, les portiques de cour chargent les camions ou les remorques et ces derniers font les déplacements des conteneurs à l'intérieur de la zone de stockage et jusqu'au l'hinterland ;
- L'***organisation de la cour en rangées***, c'est les chariots cavaliers qui effectuent le transport des conteneurs dans la zone de stockage et jusqu'au l'hinterland pour charger les conteneurs qui quitteront le terminal par voie routier dans les camions ou bien servir les ***portiques ferroviaires*** qui chargent/déchargent les wagons des trains de conteneurs.

Dans un terminal à conteneurs, plusieurs véhicules de transport interne sont utilisés (les camions, les multi-remorques, les *AGV* et les chariots cavaliers). Ainsi nous distinguons le transport d'empilage du transport horizontal: *1)* Le ***transport d'empilage*** effectué par des portiques de cour ; *2)* Le ***transport horizontal*** se divise en transport côté quai (servant les navires et les barges) et le transport coté terre (servant des camions et des trains). Les opérations du côté de la terre sont analogues aux opérations du coté de quai. Un plan de chargement est produit par la société de chemin de fer et envoyé par *EDI* à l'opérateur du terminal contenant par exemple la position du wagon dans la séquence du train. L'objectif de l'opérateur ferroviaire est de ***minimiser les activités de manœuvre*** tandis que le but de l'opérateur du terminal est de ***minimiser le nombre de remaniements et de triage***.

3.2.3.3. Les procédures d'empotage et de dépotage

La sécurité des conteneurs et de leurs contenus constitue la sécurité du navire lui-même, pour cela l'***opération de l'empotage*** (mise de marchandises dans le conteneur) doit être

accomplie de façon adéquate. Cette opération n'est pas seulement l'affaire de la compagnie maritime, ***elle est souvent l'affaire de l'expéditeur*** mais il arrive que ce dernier désigne un intermédiaire (***entrepôt logistique***) qui est dans la plupart du temps une entreprise spécialisée, une société de manutention portuaire, une entreprise de déménagement ou un transporteur.

Les conteneurs sont par la suite dépotés dans des endroits (***centre de distribution***) se trouvant à plusieurs kilomètres des terminaux. En effet, une fois les conteneurs sont reçus par le destinataire, ce dernier les dépotent, stocke la marchandise, la reconditionne et la distribue partout en Europe. Suite à ce raisonnement, ***les opérations d'empotage et de dépotage seront considérées externes aux opérations se déroulant à l'intérieur du terminal portuaire***.

3.2.3.4. Bilan – Conclusion

Tout au long de cette section (*cf. section 3.2.3*), nous avons présenté ***une description non exhaustif du système opérationnel de la chaine du transport intermodal*** permettant ainsi de distinguer plusieurs sous-systèmes à savoir, les sous-systèmes qui s'occupent du remplissage (***opération d'empotage***) et du vidage des conteneurs (***opération de dépotage***) s'effectuant respectivement dans des entrepôts logistiques et des centres de distribution, les sous-systèmes composés des ***trajets effectués*** par les différents modes de transport (maritime, ferroviaire, routier et fluvial) et enfin les sous-systèmes que nous jugeons les plus complexes, il s'agit des ***terminaux intermodaux***, c'est au niveau de ce dernier que se déroule l'ensemble des opérations de changement des modes de transport (***rupture de charge***). L'objectif est de pouvoir donner une idée d'une part sur le degré de la complexité du système et d'autre part sur le rôle pondérant qu'il joue dans l'économie mondiale et aussi dans le secteur d'emploi.

Dans cette perspective, nous avons fait un tour d'horizon sur les mécanismes adoptés, les équipements les plus répondus utilisés et aussi les différents problèmes de planification rencontrés dans les terminaux portuaires. En conclusion, nous pouvons dire que le système opérant du transport intermodal de marchandises fait intervenir plusieurs ressources humaines et physiques afin de réaliser les activités et les fonctions souhaitées, ceci nécessite une bonne gestion des flux physiques et informationnels. Dans la section suivante et dont le but est d'***identifier les décideurs*** qui gèrent ces flux, nous allons aborder le système décisionnel pour pouvoir dégager les centres de décision pilotant notre système et donc ***comprendre l'architecture de pilotage existante*** en se basant sur le cas spécifique de la vallée de la Seine.

3.2.4. Système décisionnel de la chaine de transport intermodal

3.2.4.1. Introduction

Dans cette sous-section on représente le ***processus de décision*** de la chaine du transport intermodal d'une part, le type d'action sur lequel il intervient d'autre part. La formulation des processus de décision a alors permis d'aborder plusieurs niveaux de conceptualisation et de modélisation du système étudié (*cf. Chapitre 4*).

Sur un plan théorique, on se demande ainsi quelles sont les situations où il est nécessaire de prendre une décision et quelles sont les composantes de la décision. La représentation du système opérant conduit à distinguer trois types de processus où prend place une ou plusieurs décisions. Le ***premier processus*** (*cf. section 3.2.4.2*) se rencontre lorsqu'intervient une négociation transactionnelle (exemple: discussion d'un prix entre acteurs). Le processus est ici un échange et la décision (accord) correspond au seuil à partir duquel on démarrera le système du transport intermodal mais aussi la décision (satisfaction / retour) correspond au seuil à partir duquel on clôturera le système. Le ***deuxième processus*** (*cf. section 3.2.4.3*) correspond à un choix d'actions de planification permises par un environnement (exemple: choix d'itinéraires et horaires). La décision correspond ici à la satisfaction d'un critère d'optimisation sur un ensemble d'indicateurs (coûts, bénéfices). Le ***troisième processus*** (*cf. section 3.2.4.4*) se rencontre lorsqu'on lance l'acheminement (exemple : transport et transfert des conteneurs). Le processus est ici un échange et la décision correspond ici à la satisfaction d'un critère de sécurité et du niveau de service (les délais de livraison et leur exactitude, soin de cargaison, etc…). Pour formaliser ces processus (*Fig.3.6*), il est utile de les décomposer.

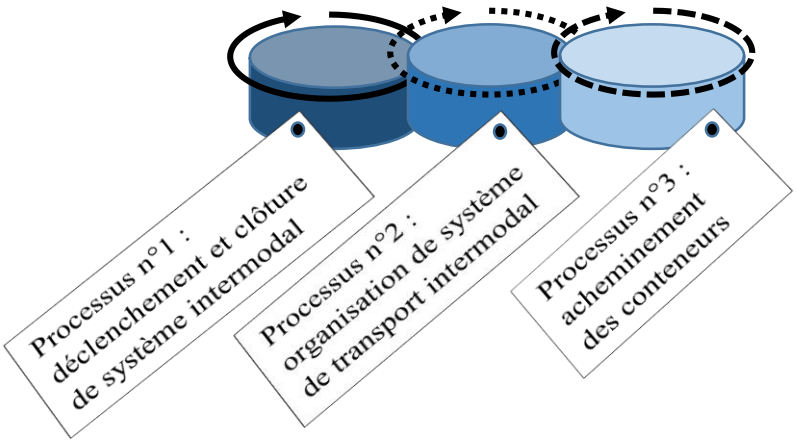


Fig.3.6: Les principaux processus décisionnels du système du transport intermodal.

3.2.4.2. Processus nº 1 : Déclenchement et clôture de système intermodal

A partir de la définition de la chaine du transport intermodal, nous parlons d'un besoin de transporter de la marchandise d'un point d'origine et à un point final. Deux acteurs principaux apparaissent ici qui seraient : d'une part le point d'origine qui est l'expéditeur (usine de fabrication) et d'autre part le point final qui est le destinataire final (centre de distribution). Dans le contexte du transport conteneurisé, l'expéditeur et le destinataire final représentent les frontières de la chaine de transport intermodal en limitant son périmètre de fonctionnement. Ces acteurs sont particulièrement impliqués dans l'échange de flux d'informations et financiers, et ils ne participent pas directement à l'organisation de la chaine de transport intermodal. Le plus souvent, c'est le commissionnaire du transport qui s'occupe de cette tâche. Donc trois acteurs principaux interviennent dans le cadre de ce processus, qui seraient : « le ***destinataire final***, l'***expéditeur*** et le ***commissionnaire du transport*** » (*Fig.3.8*). Chacun des acteurs peut être assimilé à un centre de décision noté ***CD***. Chaque centre de décision a la capacité de prendre ses propres décisions, en réponse ou non à des événements extérieurs qui influent sur l'environnement où ils évoluent.

La construction du scénario de ce processus est décidée par la transmission d'un besoin de destinataire final à l'expéditeur sous la forme d'une facture-devis (*Proforma invoice*). L'expéditeur confirme la commande et transmet au commissionnaire du transport son besoin d'un service de transport. Ce dernier s'occupe de l'organisation du transport intermodal de marchandises (*Fig.3.7*).

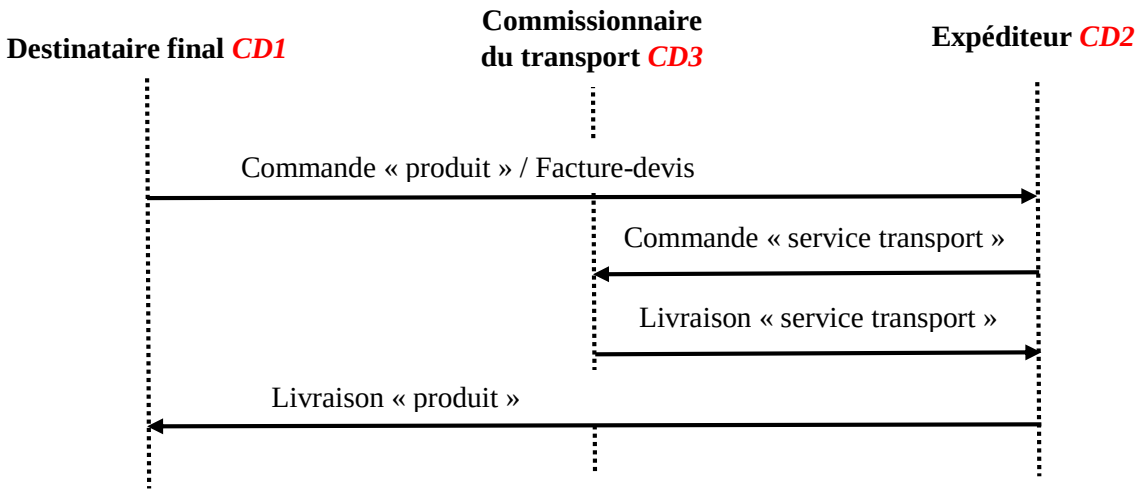


Fig.3.7: Le scénario abrégé d'échange entre les acteurs principaux du premier processus.

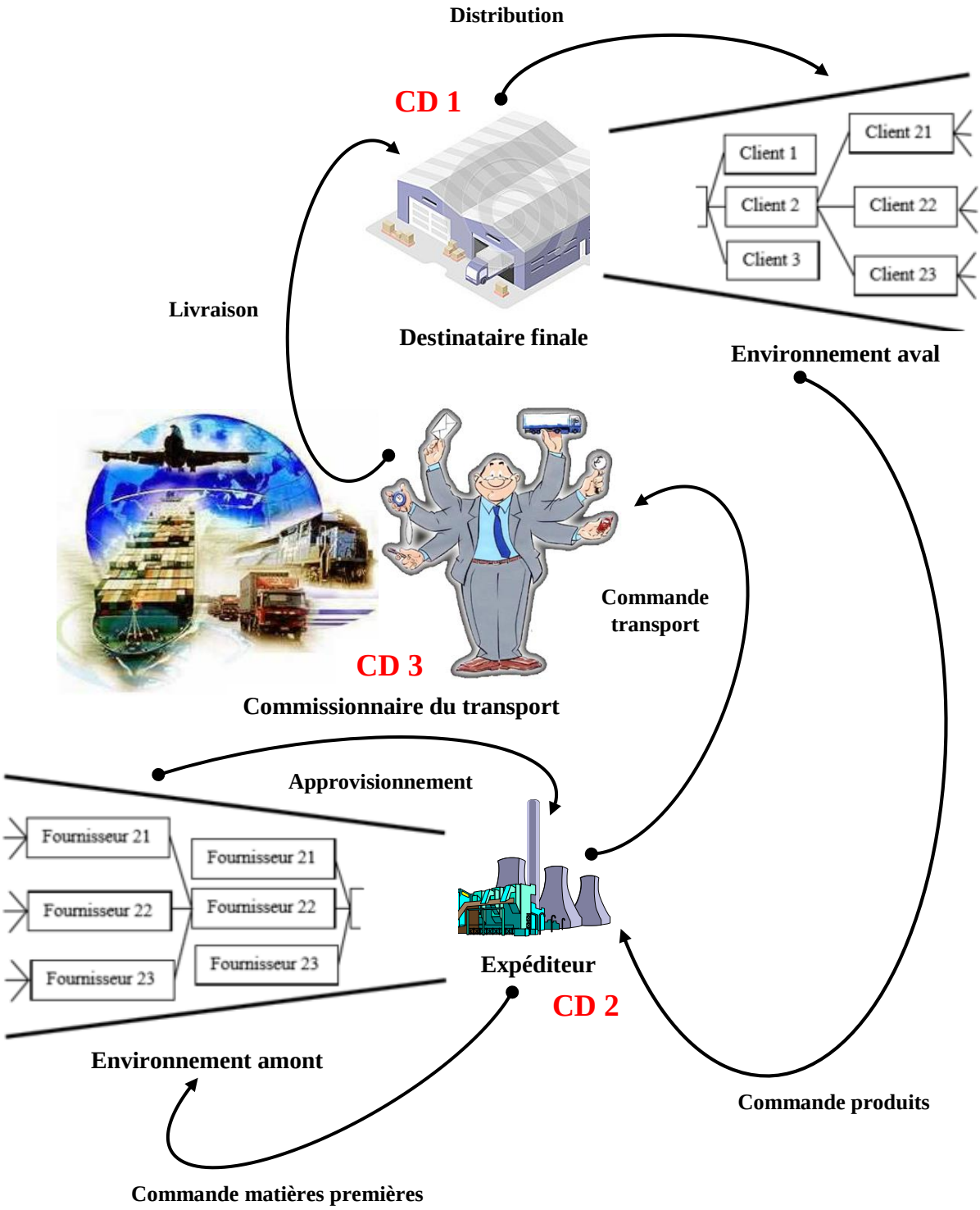


Fig.3.8: Illustration des interactions entre les acteurs principaux du premier processus.

Une fois la marchandise est livrée au destinataire final ou le service de transport est consommé, les transactions fictives (*settlement*) se déclenchent (demande prélèvement, débit paiement et acquittement paiement). L'instrument de paiement peut être une lettre de crédit (*letter of credit*) ou le transfert électronique de fonds (*Electronic Funds Transfer*).

Au niveau de ce processus, deux acteurs secondaires peuvent être dégagés qui seraient : la ***banque*** et la ***compagnie d'assurance*** (*insurance certificate*) grâce auxquels les comptes peuvent être réglés et les risques atténués. Ainsi, le système assure l'accord sur l'indemnisation des biens et des services si les résultats de l'opération est jugé insatisfaisant.

3.2.4.3. Processus nº 2 : Organisation de système de transport intermodal

Les entreprises expéditeurs ou destinataires (***commettant***) font appel à un intermédiaire appelé commissionnaire de transport (dénommé aussi ***affréteur***, ***groupeur*** ou ***dé-groupeur***), dans le but de se libérer des contraintes liées à l'expédition des marchandises. Ces contraintes sont liées d'une part aux opérations de groupage, par lesquelles des envois de marchandises en provenance de plusieurs expéditeurs ou à l'adresse de plusieurs destinataires sont réunis et constitués en un lot, et les opérations administratives comme l'établissement des documents de transport et la réservation des plateformes nécessaires à l'acheminement de la marchandise. D'autre part, l'optimisation et l'organisation de l'acheminement des marchandises. Le commissionnaire de transport est un véritable organisateur, il a une liberté dans les choix des modes de transports, des transporteurs et des itinéraires afin de mener les marchandises à destination. Il est responsable du bon déroulement de l'expédition de porte à porte.

Le commissionnaire de transport est donc un acteur principal qui rentre en communication avec d'autres acteurs (ministère des affaires municipales, autorités gouvernementales, représentant consulaire, douane, etc.) afin d'établir les documents réglementaires, commerciaux et autres divers documents de transport (*Fig.3.9*).

Un corridor rassemble non seulement des infrastructures de transport mais aussi il rassemble un ensemble de changements commerciaux résultant de changements au sein d'une communauté (*Tab.3.2*). Il s'agit bien d'un résultant de processus de décision décentralisés qui rentre en communication avec le commissionnaire de transport afin d'organiser l'acheminement des marchandises. Dans note cas d'étude, nous dégageons trois type de corridor comme étant des acteurs principaux, qui seraient : « ***corridor d'exportation***, ***corridor de transbordement*** et ***corridor d'importation*** » (*Fig.3.10*) :

- ***Corridor d'exportation*** : cet acteur participe à l'organisation du cycle d'exportation des marchandises de chez l'expéditeur jusqu'au premier terminal portuaire ;

- ***Corridor de transbordement*** : cet acteur participe à l'organisation de l'acheminement de marchandises en cas d'un besoin de changement de navires afin d'assurer la bonne redirection des conteneurs vers le corridor d'importation ;
- ***Corridor d'importation*** : cet acteur participe à l'organisation du cycle d'importation des marchandises du dernier terminal portuaire jusqu'au destinataire final.

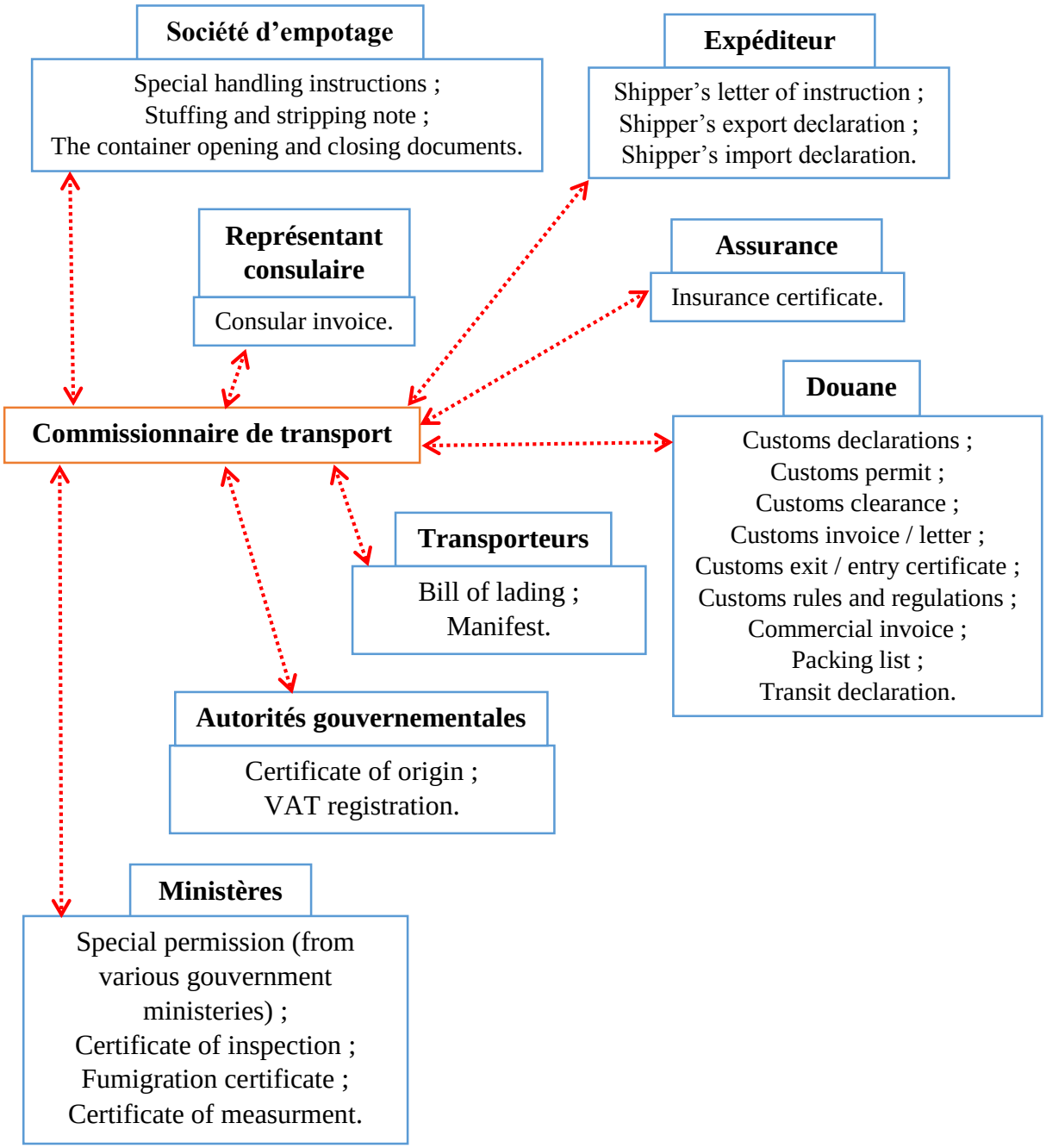
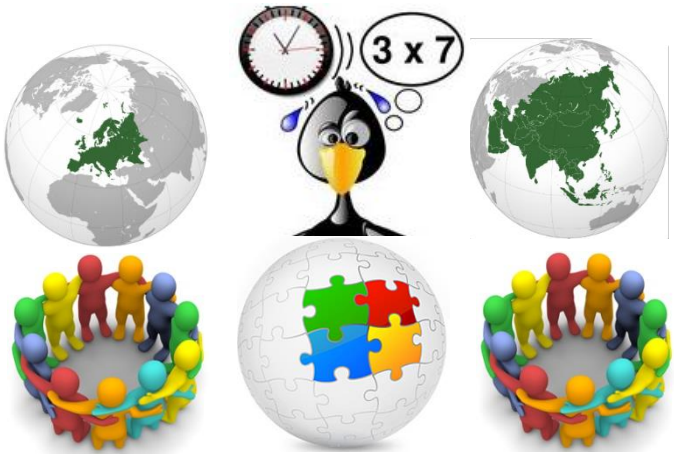
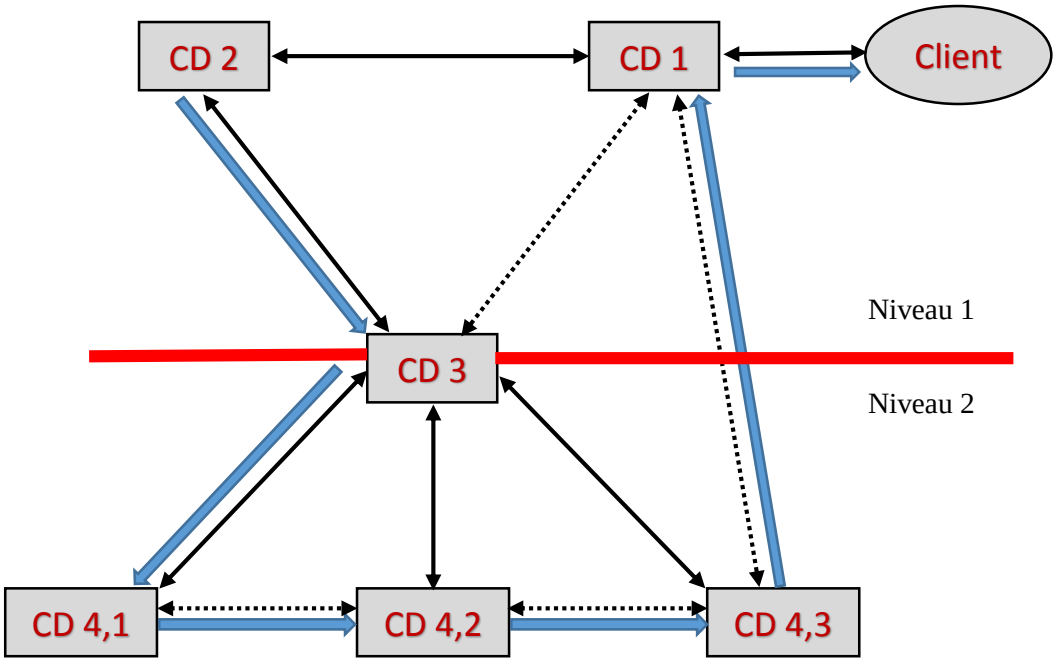


Fig.3.9: Les principaux documents préparés par le commissionnaire du transport.





CD 1 : Destinataire final

CD 2 : Expéditeur

CD 3 : Commissionnaire du transport

CD 4 : Corridor de transport

Flux d'information de la relation client / fournisseur

Flux d'information de pilotage et remontée d'information

Flux physique

CD 4,1: Corridor d'exportation (empotage inclus)

CD 4,2: Corridor de transbordement

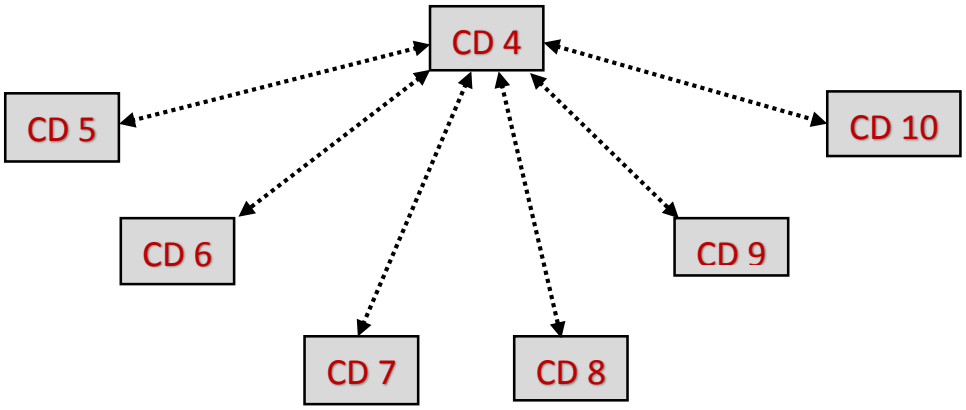
CD 4,3: Corridor d'importation (dépotage inclus)

Fig.3.10: Les principaux échanges entre les principaux acteurs de niveau de décision *1* et *2*.

3.2.4.4. Processus nº 3 : Acheminement des conteneurs

La représentation de l'écoulement des conteneurs se base sur un travail collectif de pilotage et de remontée d'informations entre le corridor et d'autres acteurs principaux qui seraient : « ***transporteur maritime***, ***transitaire***, ***capitainerie*** (autorité portuaire), ***douane***, ***opérateur terminal*** et ***transporteur*** (ferroviaire, routier ou fluvial) » (*Fig.3.11*). Il s'agit d'un troisième niveau décisionnel permettant la passation séquentielle de la prise en charge des conteneurs entre transporteurs et plateformes intermodales (*Fig.3.12*).

L'acheminement des conteneurs est réalisé dans le cadre d'une chaine logistique complexe comprenant plusieurs transports intermédiaires mettant en scène plusieurs intervenants (transporteurs et gestionnaires des plateformes intermodales). L'exploitation des plateformes intermodales est souvent confiée à des gestionnaires de plateformes intermodales qui demandent les informations sur les conteneurs transportés et la date d'arrivée théorique du moyen de transport, renvoient aux organisateurs de transport et aux transporteurs les instructions de mouvements sur les plateformes intermodales, qui concerneront tant l'arrivée que le départ des conteneurs, ainsi que leurs emplacements. Ce qui nécessite la préparation d'un plan de chargement spécifique à la nature des conteneurs transportés. Ceci comprenant une première phase d'accueil du moyen de transport en donnant aux transporteurs les instructions relatives au quai d'arrivée et aux manœuvres à réaliser. A la confirmation d'arrivée du moyen de transport, une deuxième phase commence par le lancement des opérations des terminaux intermodaux avec l'assignement des emplacements de stockage aux nouveaux conteneurs arrivés et l'organisation des diverses opérations de manutention liées au déplacement des conteneurs au sein du terminal intermodal. Ces déplacements tiennent compte des plans de chargement transmis par les transporteurs. Le suivi, pouvant comprendre le suivi du conteneur lui-même, sa localisation et son identification depuis l'arrivée du moyen de transport en passant par l'ensemble des affectations qui pourra avoir au cours des opérations des terminaux. Il s'agit de suivre les conteneurs durant leurs mouvements au sein du terminal intermodal. Le scénario d'interaction entre acteurs proposé, pour le cas du corridor de la vallée Seine (port du Havre) [*CCS, 2014*], représente les principaux flux import (avant l'arrivée d'un navire (*Fig.3.13*) et après l'arrivée de ce dernier (*Fig.3.14*)) et les flux export (avant mise à quai (*Fig.3.15*) et après mise à quai (*Fig.3.16*)). Autres acteurs principaux entre en communication avec la capitainerie afin de déterminer et de mener à terme l'entrée et la sortie des navires du poste à quai, qui seraient : « ***remorqueur*** et ***lamaneur*** ».



Flux d'information de pilotage et remontée d'information

CD 4 : Corridor de transport

CD 5 : Transporteur maritime **CD 8** : Douane

CD 6 : Transitaire **CD 9** : Opérateur terminal

CD 7 : Autorité portuaire **CD 10** : Transporteur (ferroviaire, routier, fluvial)

Fig.3.11: Les principaux échanges entre les principaux acteurs de niveau de décision 3.

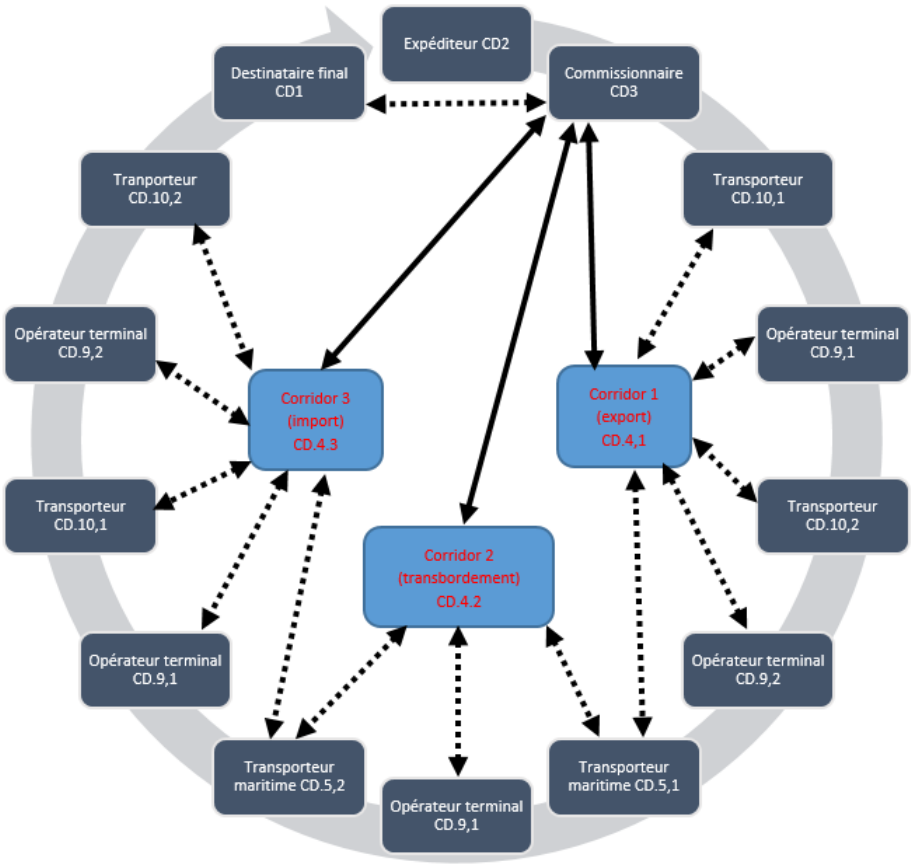


Fig.3.12: L'organisation simultanée des flux dans le contexte du transport intermodal.

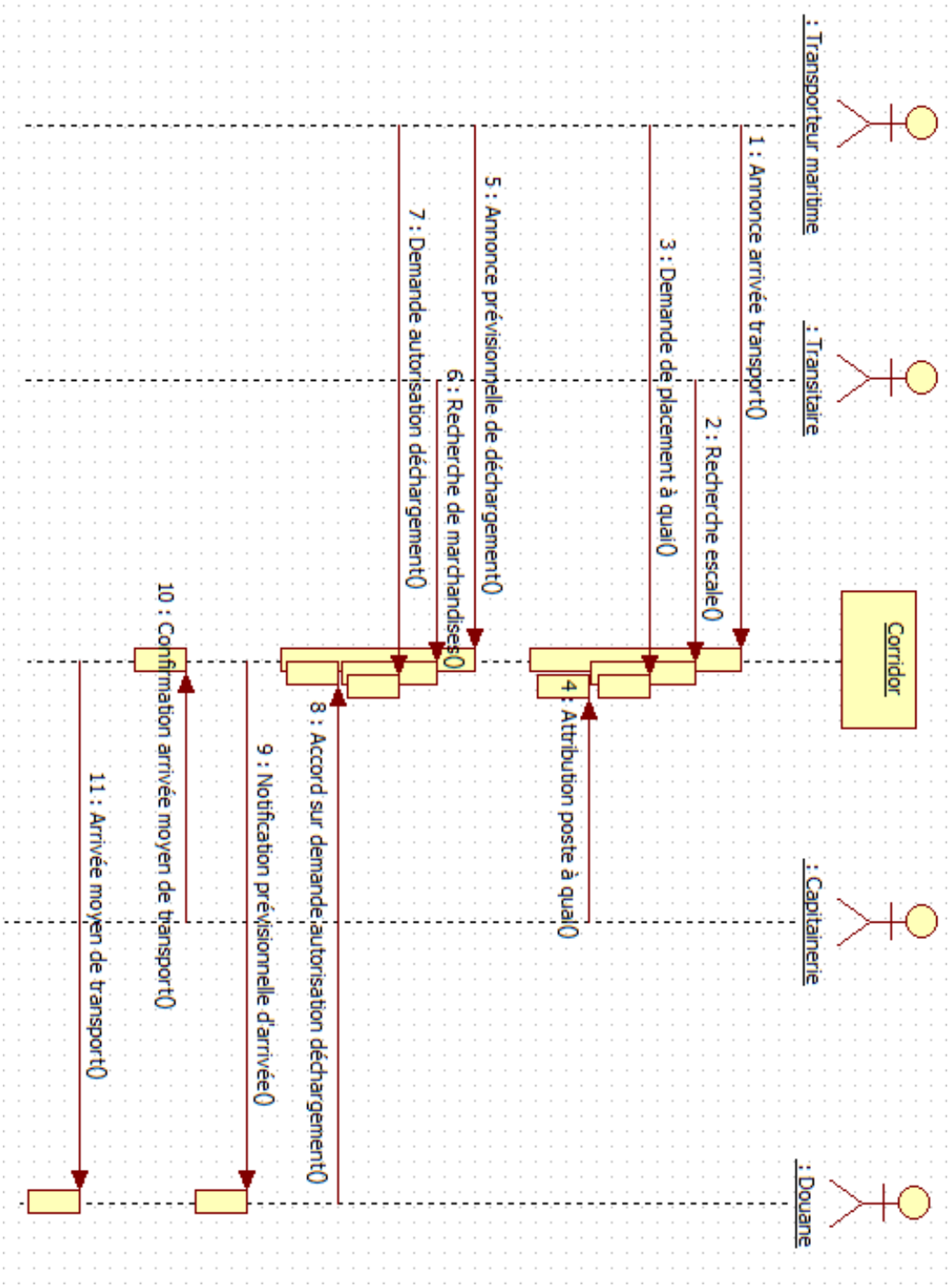


Fig.3.13: Les principaux flux import avant l'arrivée du navire.

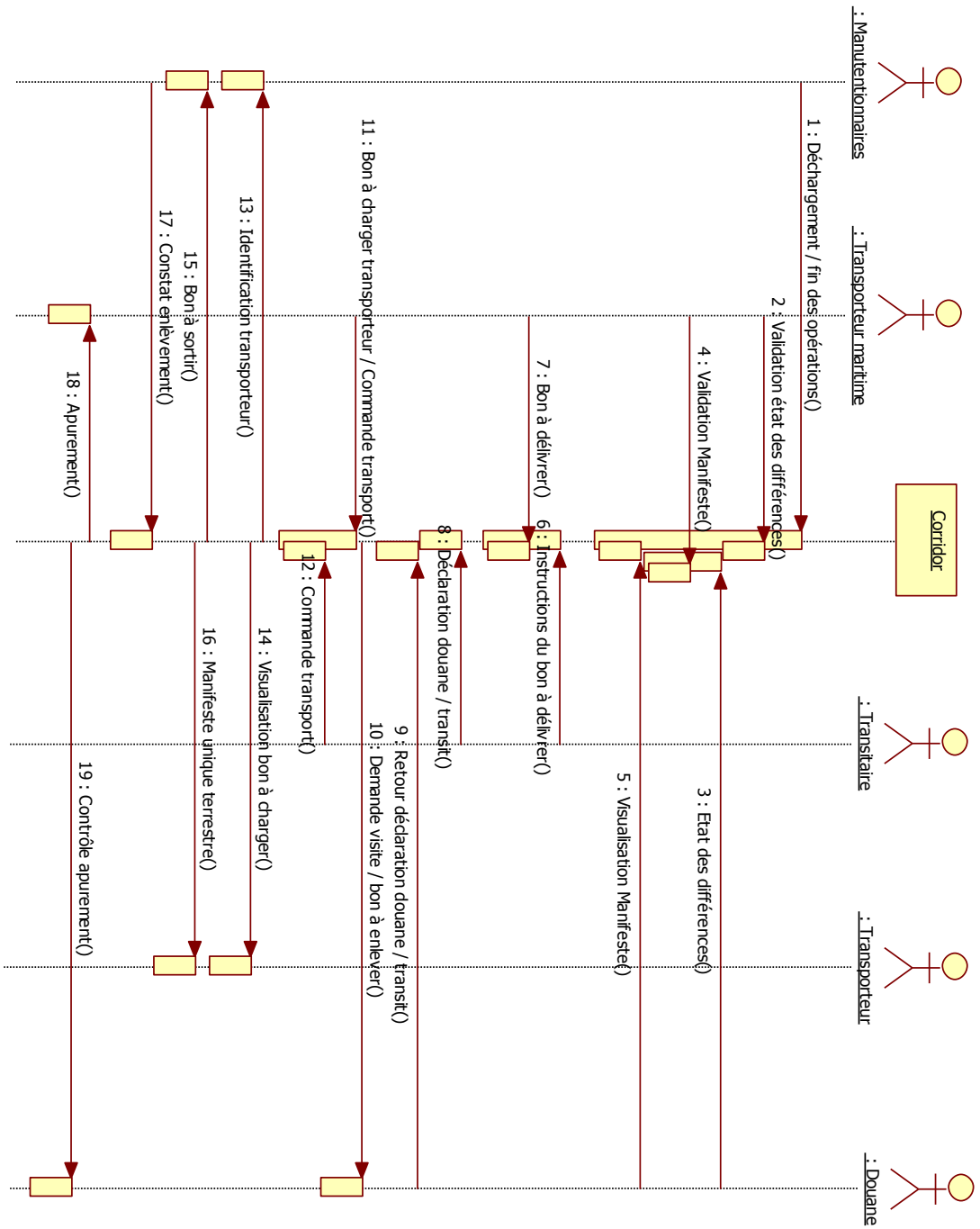


Fig.3.14: Les principaux flux import après l'arrivée du navire.

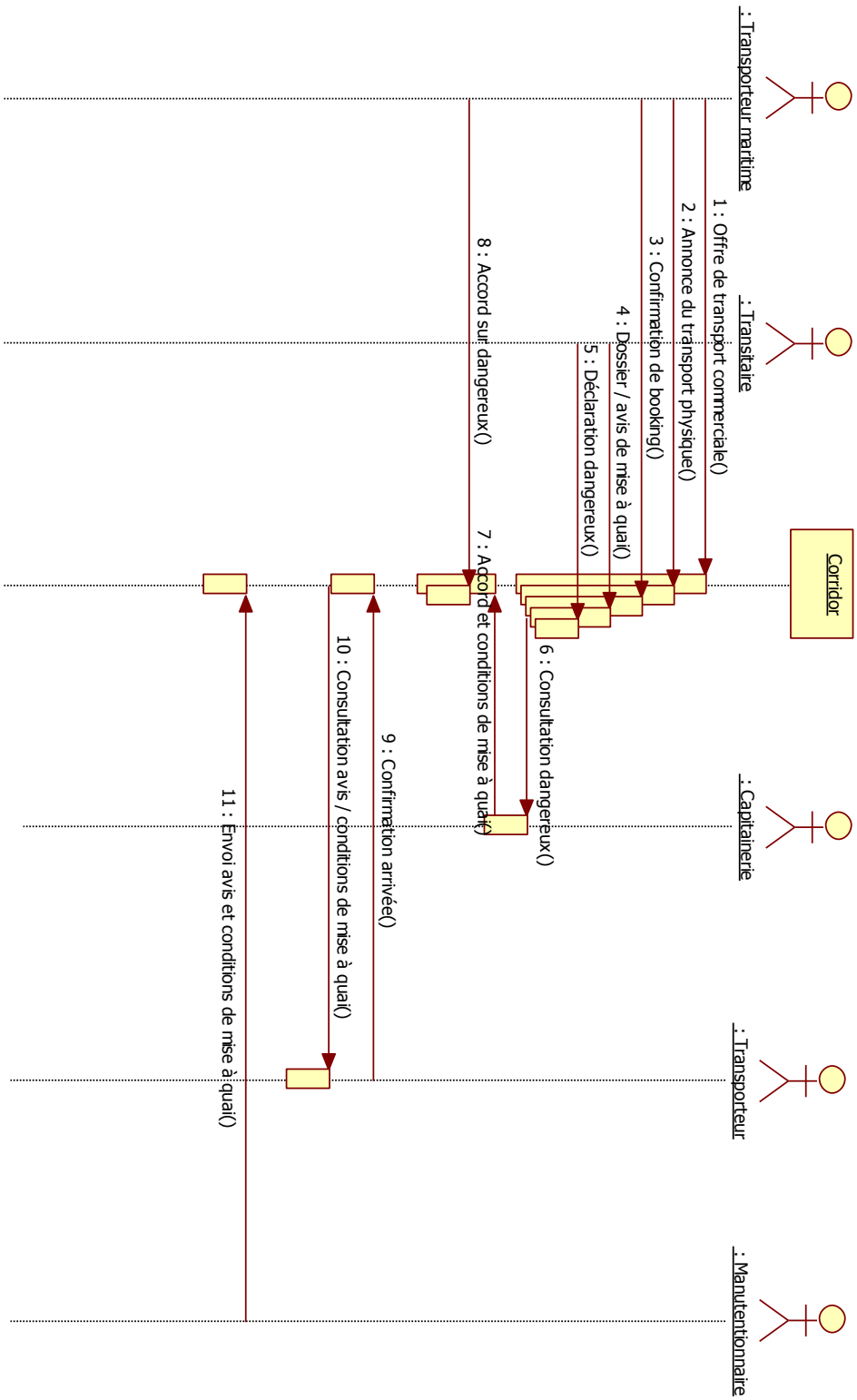


Fig.3.15: Les principaux flux export avant mise à quai.

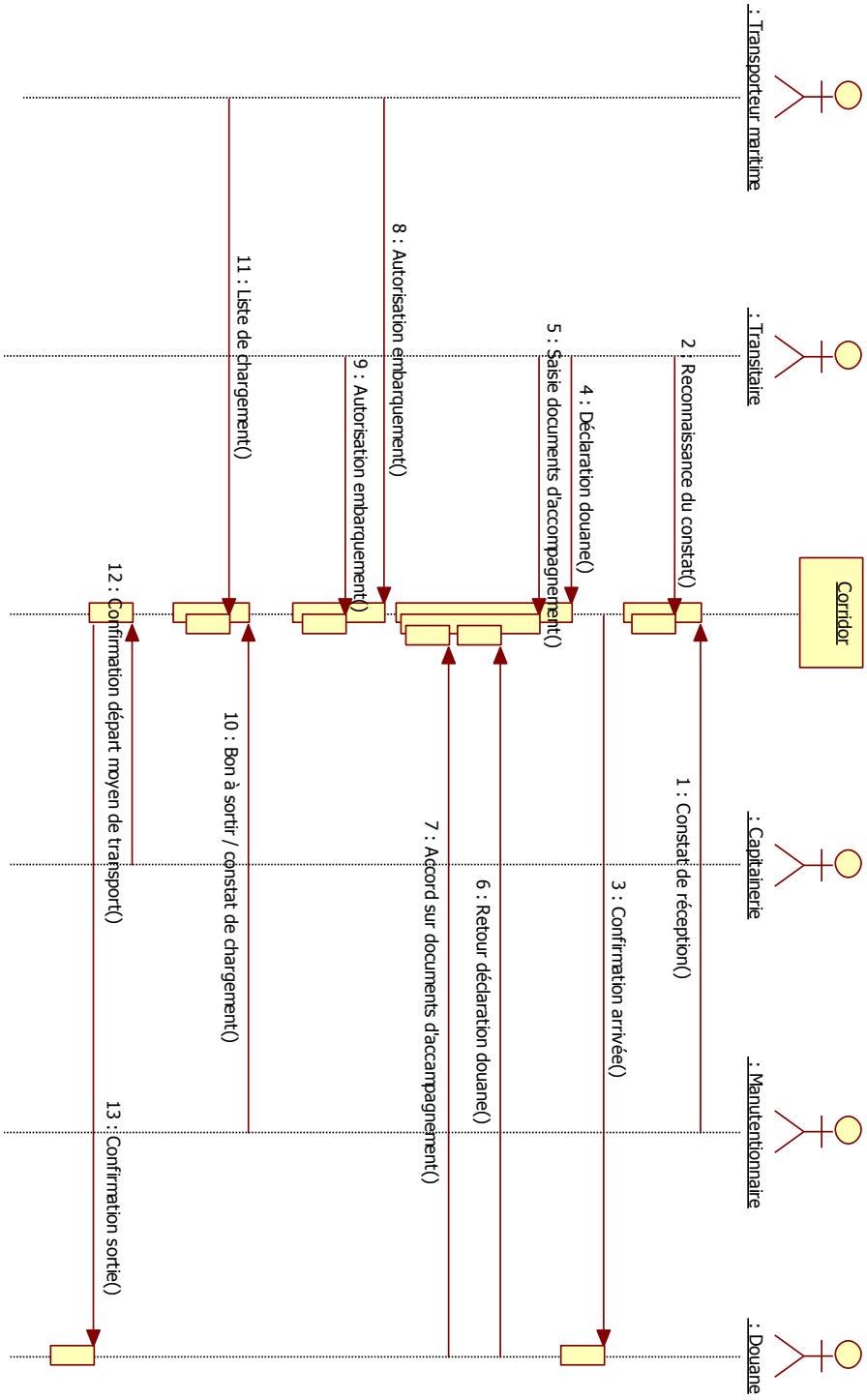


Fig.3.16: Les principaux flux export après mise à quai.

3.2.4.5. Bilan – Conclusion

Tout au long de cette section (*cf. section 3.2.4*), nous avons présenté un état de l'art non exhaustif sur le système décisionnel de la chaine du transport intermodal permettant ainsi de distinguer trois processus (***niveau décisionnel***) où prend place une ou plusieurs décisions à savoir, le processus qui s'occupe du ***déclenchement et la clôture du système intermodal*** où les décisions suivent les critères d'***accord*** et de la ***satisfaction sur le résultat du service fourni***, les processus qui s'occupe de l'***organisation du système*** étudié, les décisions ici tournent autour la satisfaction sur les indicateurs d'***optimisation des coûts et des bénéfices*** et enfin les processus ***d'acheminement des conteneurs*** où la satisfaction se porte sur les indicateurs liés aux critères de ***sécurité*** et de ***niveau de service***. L'objectif est de pouvoir dégager les centres de décision pilotant notre système et donc comprendre l'architecture de pilotage existante en se basant sur le cas spécifique de la vallée de la Seine.

Dans cette perspective, nous avons fait un tour d'horizon sur l'ensemble des acteurs intervenants, leurs rôles et aussi les différentes décisions prises dans l'environnement où ils évoluent. En conclusion, nous pouvons dire que le système décisionnel du transport intermodal de marchandises se caractérise par le fait que tout acteur possède un centre de décision qui est ***totalement autonome*** dans ses prises de décisions à condition de ***respecter les contraintes globales*** fournies par le système de décision supérieur mais ***il n'existe pas de structure dirigeante de l'ensemble de l'organisation***. Il s'agit bien ici d'***une organisation distribuée*** dont l'inconvénient est dû à la difficulté de ***mesurer la cohérence et l'influence que peuvent avoir les décisions prises localement sur le reste du système***. Dans la section suivante (*cf. section 3.2.5*) et dont le but est d'identifier les différentes technologies hétérogènes permettant le pilotage informationnel des marchandises tout au long de la chaine du transport intermodal, nous allons aborder le système informationnel pour pouvoir comprendre l'architecture de pilotage existante en se basant sur le cas spécifique de la vallée de la Seine.

3.2.5. Système informationnel de la chaine de transport intermodal

3.2.5.1. Introduction

Les échanges d'informations sont stratégiques pour toute organisation. En effet, le système de transport intermodal gérant des flux importants de marchandises et des moyens logistiques d'acheminement (*cf. section 3.2.3*) demande une maitrise de la gestion de l'information et des échanges d'informations (*cf. section 3.2.4*). Donc toutes les organisations

de ce système intermodal sont très impliquées dans la mise en œuvre de systèmes informatiques assurant une maitrise de ces flux d'informations, en vue de renforcer les capacités existantes dans le secteur du commerce et de promouvoir la coopération internationale et l'échange de connaissances spécialisées.

L'intervention d'entreprises distinctes, la prise en charge traditionnelle des différents documents par chaque intervenant dans son propre système d'informations, la diversités des procédures administratives et aussi le port, lieu de rupture de charge, frontière entre le transport terrestre et le transport maritime, représentant un lieu de convergence de nombreux flux. Tout ceci s'accompagne de pertes de temps, a poussé l'ensemble des acteurs à décider de faire appel à la collaboration pour établir ***une approche logistique globale de la chaine de transport***.

La présente section (*cf. section 3.2.5*) est destinée à faire : d'une part une synthèse des fonctions assurées par les principaux systèmes informatiques liées aux opérations du transport intermodal (*cf. section 3.2.5.2*), qui seraient : « les échanges d'informations ***relatifs au pré et post acheminement*** (*cf. section 3.2.5.2.a*), les échanges relatifs au ***booking*** (*cf. section 3.2.5.2.b*), la transmission du ***connaissement*** et du ***manifeste*** (*cf. section 3.2.5.2.c*), les échanges d'informations avec les ***douanes*** (*cf. section 3.2.5.2.d*) et le ***suivi*** logistique des conteneurs (*cf. section 3.2.5.2.e*)». D'autre part, une présentation de l'***EDI portuaire*** mis en œuvre par le port du Havre (*cf. section 3.2.5.3*) et une description du système ***AP+*** de suivi de toute la chaine logistique sur tout le corridor de la vallée Seine (*cf. section 3.2.5.4*).

3.2.5.2. Principaux échanges d'informations relatifs au transport intermodal

a. Les échanges d'informations relatifs au pré et post acheminement

Les échanges d'informations relatifs au pré et post acheminement font intervenir divers acteurs : l'expéditeur, le destinataire final, le commissionnaire de transport, le transitaire, l'opérateur terminal, l'autorité portuaire et les transporteurs. La maitrise de telles liaisons permettait non seulement d'optimiser les circuits d'informations entre les donneurs d'ordre et les transporteurs mais aussi d'anticiper les mouvements d'enlèvement et de réception des conteneurs. En effet, la transmission simultanée d'un ordre de transport au transporteur et au manutentionnaire permet une grande anticipation. Il convient de signaler que l'automatisation des échanges informationnels avec les transporteurs terrestres est très difficile à mettre en place. En effet, un grand nombre de transporteurs n'ont pas la taille critique pour mettre en œuvre des messages *EDI*.

b. Les échanges relatifs au « booking »

La réservation provisoire ou ferme qui contient les conditions demandées pour le transport et la réponse indiquant si la réservation demandée est acceptée avec éventuellement des conditions, forment les échanges relatifs au « *booking* ». Toute informatisation permettant l'automatisation de la saisie du *booking* présente des multiples avantages pour le consignataire non seulement en terme de diminution des tâches de ressaisies mais aussi en terme de qualité de l'information reçue et des traitements associées.

c. La transmission du connaissement et du manifeste

Les informations du connaissement, éditées le plus souvent par le transitaire, sont ressaisies par le commissionnaire sur son système informatique. L'envoi des connaissements par voie électronique diminue les délais de création de la documentation, d'accélérer les flux financiers et de réduire le transit portuaire de la marchandise. Certains commissionnaires de transport développent sur leurs systèmes des éditeurs de formats propres à chaque armateur. Le manifeste est le document qui détaille la totalité de la marchandise transportée. Ce document a non seulement un rôle de titre de transit communautaire mais aussi un rôle déclaratif des différentes marchandises déchargées. En effet, les douanes comparent les conteneurs réellement vus à quai avec les déclarations effectives. Le manifeste permet aussi de calculer les droits du port sur la marchandise. Donc ce document est imposé par les autorités douanières et portuaires, l'automatisation de sa transmission représente peu d'intérêt commercial mais il a davantage de gain de productivité et de l'accélération des escales.

d. Les échanges d'informations avec les douanes

Les échanges d'informations avec la douane peuvent contenir : *1)* La déclaration des marchandises importées, exportées ou en transit faite par un déclarant à la douane ; *2)* L'envoi d'un dédouanement informatisé ; *3)* L'envoi d'informations du transporteur à la douane concernant les marchandises transportée et concernant le moyen de transport. L'automatisation des échanges d'informations avec l'administration douanière est l'un des principaux domaines où de fortes réductions du transit-time sont réalisables.

e. Le suivi logistique des conteneurs

Le plan de chargement des conteneurs (*bay-plan*) accompagné des instructions de manutention, listes des chargements, listes des déchargements, instructions de la mise à

disposition de conteneurs pour un transporteur, instructions particulières pour un conteneur (frigo ou dangereux), listes de sorties et d'entrées des conteneurs. L'automatisation de ces rapports permet non seulement de préparer l'escale mais aussi met en place une gestion informatisée des conteneurs et le suivi de ces derniers et des navires qui nécessite de nombreux échanges, qui ne sont pas les mêmes, d'où ces échanges prennent en compte la diversité des circuits dans l'organisation des chaines d'informations.

3.2.5.3. EDI portuaire

L'informatisation des procédures administratives et commerciales et le développement des outils *EDI* est un élément essentiel de compétitivité des professionnels portuaires. Il s'agit pour les places portuaires d'améliorer les conditions de traitements de marchandises, d'accélérer le transit portuaire, d'améliorer les conditions d'accueil des différents modes de transport et de mener une grande fiabilité dans l'organisation de la chaine de transport de porte à porte. En effet, la liaison *EDI* permet d'aiguiller tout abonné professionnel vers les services communautaires ou privatifs portuaires.

La création d'une société des professionnels portuaires « ***SOGET*** (*SOciété de GEstion des Terminaux informatiques*) » pour la réalisation et l'exploitation du système informatique portuaire permettant qu'un unique opérateur de rassembler et organiser ces services communs. Sa mission intervient dans différents domaines comme [*Lelarge et al., 1993*]: *1)* L'exploitation, le suivi et l'évolution du réseau communautaire portuaire; *2)* Le traitement en temps réel du suivi des marchandises et des conteneurs sur le port du Havre ; *3)* L'audit et l'assistance technique ; *4)* La formation ; *5)* Le conseil et l'analyse en informatique …

L'introduction des *EDI* par le port autonome du Havre a nécessité une participation directe des entreprises utilisatrices en passant d'un système des bases de données centralisées ***ADEMAR+*** à une véritable plateforme d'interconnexion ***AP+*** (*cf. section 3.2.5.4*).

3.2.5.4. AP +

L'*AP+* est un système de suivi de toute la chaine logistique sur la zone portuaire ou aéroportuaire du corridor de la vallée Seine (*Le Havre, Caen, Rouen, Paris …*). Il permet aux différents utilisateurs de bénéficier des services gérés par une seule plateforme de communication (*Fig.3.17*). Il permet de répondre aux besoins de fluidité, de sécurité et de traçabilité de la marchandise (*Fig.3.18*). L'*AP+* est accessible à partir d'une simple connexion

Internet ou via un réseau dédié, il permet [*CCS, 2014*]: *1)* la rationalisation des procédures en conformité avec les autorités douanières, administratives et portuaires ; *2)* la dématérialisation des documents échangés ; *3)* l'interopérabilité entre les systèmes d'information des utilisateurs (*DELT@*, *SYDONIA*, *SIGAD*…); *4)* la sécurisation de la chaine logistique grâce au *tracking - tracing* de la marchandise tout en assurant la confidentialité.

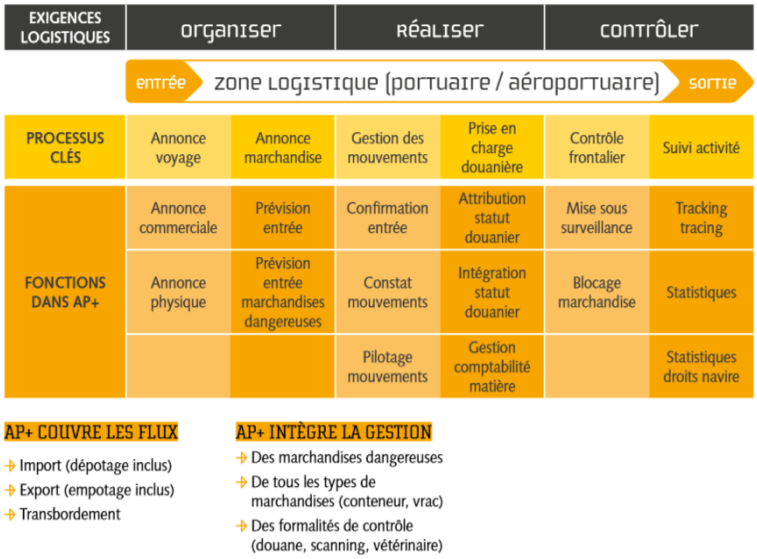


Fig.3.17: L'*AP+* et la chaine logistique [*CCS, 2014*].

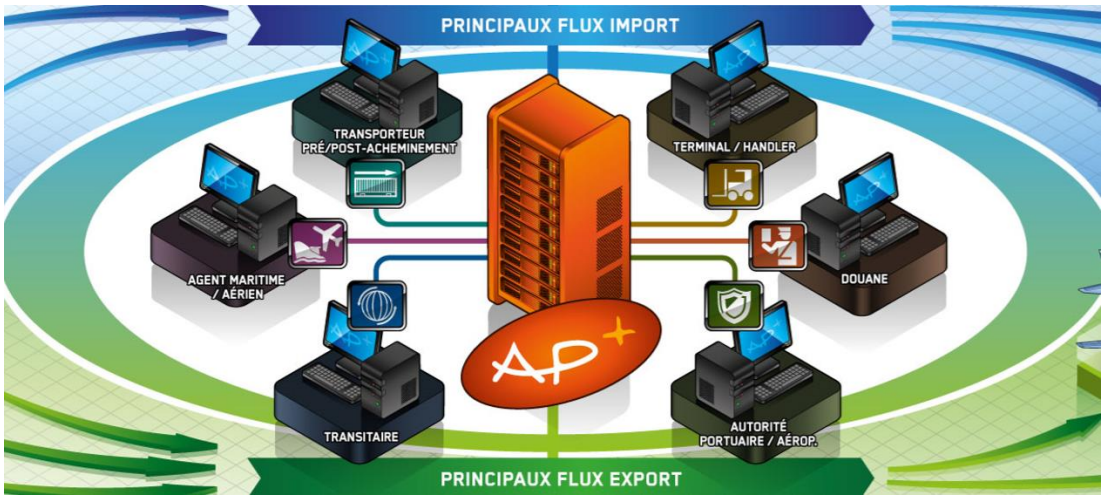


Fig.3.18: *AP+* et interopérabilité avec systèmes informatiques privés des entreprises [*CCS, 2014*].

3.2.5.5. Bilan – Conclusion

Tout au long de cette sous-section (*cf. section 3.2.5*), nous avons présenté un état de l'art non exhaustif sur le système informationnel de la chaine du transport intermodal permettant ainsi de synthétiser les principales fonctions assurées par les principaux systèmes informatiques liées aux opérations du transport intermodal et de présenter l'importance de l'***EDI portuaire*** mis en œuvre par le port du *Havre* et le système d'interconnexion ***AP+*** sur tout le corridor de

la *vallée de la Seine*. L'objectif est de pouvoir dégager le système nerveux assurant la communication entre les différents acteurs de notre système et donc comprendre l'architecture du système d'informations existante en se basant sur le cas spécifique de la *vallée de la Seine*.

Dans cette perspective, nous avons fait un tour d'horizon sur l'ensemble des échanges d'informations relatifs aux diverses fonctions intermodales, les avantages de l'automatisation de ces échanges et l'importance de la maitrise de telles liaisons. En conclusion, nous pouvons dire que le système informationnel du transport intermodal de marchandises se caractérise par le fait qu'il fait intervenir d'entreprises distinctes, chacune se base sur son propre système d'informations. En vue de renforcer leurs capacités, ces acteurs ont fait appel à la collaboration pour établir une approche logistique globale de la chaine de transport mais cette implication reste communautaire ou privative et donc des efforts restent à fournir pour réaliser une ***interopérabilité beaucoup plus étendue*** qui permet d'aiguiller tous ces systèmes hétérogènes vers un ***système unique de porte à porte***.

3.2.6. Synthèse de la sous-section 3.2 du chapitre 3

Le secteur du transport de marchandises intermodal recueille divers concepts de base formant un jargon spécialisé (*cf. GLOSSAIRE*), il a fallu dans un premier temps de faciliter leurs compréhensions techniques : de la notion de l'***intermodalité*** en passant par la ***conteneurisation*** nous avons éclairci la composante du ***corridor***. Dans un deuxième temps nous avons étudié les défis spécifiques au ***système opérant*** du transport intermodal. En effet, ce dernier fait intervenir plusieurs ressources humaines et physiques afin de réaliser les activités et les fonctions souhaitées, ceci nécessite une bonne gestion des flux physiques et informationnels. C'est sur l'axe de la ***modélisation de la chaine logistique globale de transport de porte à porte*** que nous positionnons la première phase de nos travaux. Cet axe suppose la maîtrise des différents flux et donc l'identification ***des décideurs*** qui gèrent ces flux pour pouvoir dégager les centres de décision pilotant notre système et donc comprendre l'architecture de pilotage existante en se basant sur le cas spécifique de *la vallée de la Seine*. Le système décisionnel de la chaine étudiée se caractérise par le fait que tout acteur possède un centre de décision qui est ***totalement autonome*** dans ses prises de décisions à condition de ***respecter les contraintes globales*** fournies par le système de décision supérieur mais ***il n'existe pas de structure dirigeante de l'ensemble de l'organisation***. Il s'agit bien ici d'***une organisation distribuée*** dont l'inconvénient est dû à la difficulté de ***mesurer la cohérence et l'influence que peuvent avoir les décisions prises localement sur le reste du système***.

Le ***système d'information*** regroupe un ensemble des échanges d'informations relatifs aux diverses fonctions intermodales. Pour mener une approche de l'automatisation de ces échanges, il faut veiller à maitriser de telles liaisons. Nous pouvons dire que le système informationnel du transport intermodal de marchandises se caractérise par le fait qu'il fait intervenir d'entreprises distinctes, chacune se base sur son propre système d'informations. En vue de renforcer leurs capacités, ces acteurs ont fait appel à la collaboration pour établir une approche logistique globale de la chaine de transport mais cette implication reste communautaire ou privative et donc des efforts restent à fournir pour réaliser une ***interopérabilité plus étendue*** afin d'aiguiller tous ces systèmes hétérogènes vers un ***système unique de porte à porte***.

3.3. Contribution à la conception d'une architecture du contrôle dans un environnement de transport intermodal de marchandises

3.3.1. Introduction

Cette partie du troisième chapitre se focalise sur ***les premières contributions*** de nos travaux de recherche en matière de ***la conception d'une structure de contrôle de la performance*** dans un environnement de transport intermodal de marchandises (porte à porte):

La ***deuxième sous-section*** (*cf. section 3.3.2*) recueille une ***analyse descriptive de notre méthodologie de la conceptualisation***, fondée sur les principaux travaux préalablement réalisés en matière d'état de l'art. Cette analyse effectuée suivant deux visions (***statique*** et ***dynamique***) nous a permis de dégager une ***structure générique*** capable de représenter une chaine de transport intermodal de marchandises.

Dans la ***troisième sous-section*** (*cf. section 3.3.3*) nous représentons notre ***architecture de contrôle*** qui vise non seulement à maintenir le système sur sa trajectoire nominale, correctionnelle et prévisionnelle mais aussi à contrôler la disponibilité des ressources (collaboration) et la fiabilité des règles des instructions (coordination), des contraintes et des objectifs (coopération) locaux et globaux ***afin de pouvoir modéliser*** notre système d'étude.

3.3.2. Méthodologie de la conceptualisation de l'architecture de contrôle proposée

Dans cette sous-section, nous proposons d'abord, une analyse du système de transport intermodal fondée sur les travaux de description présentés ci-dessus (*cf. section 3.2*). Cette

analyse est effectuée suivant deux visions (*Tab.3.9*), qui seraient : « la vision statique (*cf. section 2.2.2*) et la vision dynamique (*cf. section 2.2.3*)». Ensuite, nous proposons une structure générique capable de représenter une chaine de transport intermodal de marchandises composée de trois niveaux d'abstraction (*Fig.3.19*).

<table>
<tr><td colspan="4">Vue statique de la chaine de transport intermodal de marchandises</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Acteurs et structures de la chaine</td><td rowspan="3">Dimension horizontale</td><td>Structure organisationnelle</td><td>Entreprise étendue : elle nécessite un très haut niveau de collaboration. Les entreprises impliquées doivent partager un système de gestion permettant l'interopérabilité des différents systèmes de gestion associés à chaque entreprise.</td></tr>
<tr><td>Etendue de l'intégration</td><td>Chaine globale : sa complexité est due d'une part au nombre de maillons présents et d'une autre part à la variété des relations existantes.</td></tr>
<tr><td>Structure topographique</td><td>Structure en réseau : sa complexité est due au fait qu'elle est générale et mixte.</td></tr>
<tr><td>Dimension verticale</td><td colspan="2">La chaine est considérée comme un ensemble des processus mais cette dimension la structure autour de la distribution en se focalisant sur les activités de la livraison et en traitant plus précisément les processus liés aux mécanismes des ruptures de charge.</td></tr>
<tr><td>Positionnement des acteurs</td><td colspan="2">Organisation distribuée : chacun des acteurs est totalement autonome dans ses prises de décisions. Il n'existe pas de structure dirigeante de l'ensemble de l'organisation. Il est difficile de mesurer la cohérence et l'influence que peuvent avoir les décisions prises localement sur le reste du système.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Flux de la chaine</td><td>Flux physique</td><td colspan="2">Ce flux est représenté par la circulation de l'unité de transport intermodal. Le conteneur dans notre cas d'étude.</td></tr>
<tr><td>Flux d'information</td><td colspan="2">Organisation simultanée des flux d'information. Elle trouve ses limites dans le besoin de confidentialité entre acteurs.</td></tr>
<tr><td colspan="4">Vue dynamique de la chaine de transport intermodal de marchandises</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Ententes industrielles</td><td>Collaboration</td><td colspan="2">Le cadre permettant d'ordonner la manière de la répartition des instructions et des règles qui régissent un groupe d'acteurs.</td></tr>
<tr><td>Coordination</td><td colspan="2">Le cadre permettant d'assurer les contraintes du fonctionnement d'un groupe d'acteurs.</td></tr>
<tr><td>Coopération</td><td colspan="2">Le cadre permettant d'assurer les objectifs de la chaine.</td></tr>
<tr><td>Communication</td><td colspan="2">Le cadre permettant d'assurer non seulement l'échange d'information mais aussi l'échange de connaissances.</td></tr>
</table>

Philosophie de gestion	***Approche systémique***	Elle associe et rassemble dans le but de prendre en compte la vision globale d'une problématique liée à la chaine en séparant le système opérant (système opérationnel) du système de conduite (système décisionnel) et du système informationnel.
Degré de décision des processus décisionnels	***Processus n°1 :*** *déclenchement et clôture du système intermodal*	Le plus haut degré de décision : le comportement nominal des acteurs réalisant ce processus réside dans la limitation du périmètre fonctionnel de la chaine. En cas de perturbation, ces acteurs doivent (re) négocier les contraintes et / ou reconsidérer les objectifs du système intermodal.
	Processus n°2 : *organisation du système intermodal*	Le degré de décision moyen : le comportement nominal des acteurs réalisant ce processus réside dans le contrôle et la planification des fonctions de la chaine. En cas de perturbation, ces acteurs doivent (re) évaluer les instructions et les plans assignés aux groupes.
	Processus n°3 : *acheminement des conteneurs*	Le plus bas degré de décision : le comportement nominal des acteurs réalisant ce processus réside dans l'exécution des opérations physiques liées au déplacement des conteneurs. En cas de perturbation, ces acteurs doivent (re) vérifier la disponibilité de leurs ressources physiques et l'adéquation de leurs rôles.

Tab.3.9: Analyse de la chaine intermodale selon la vue statique et la vue dynamique.

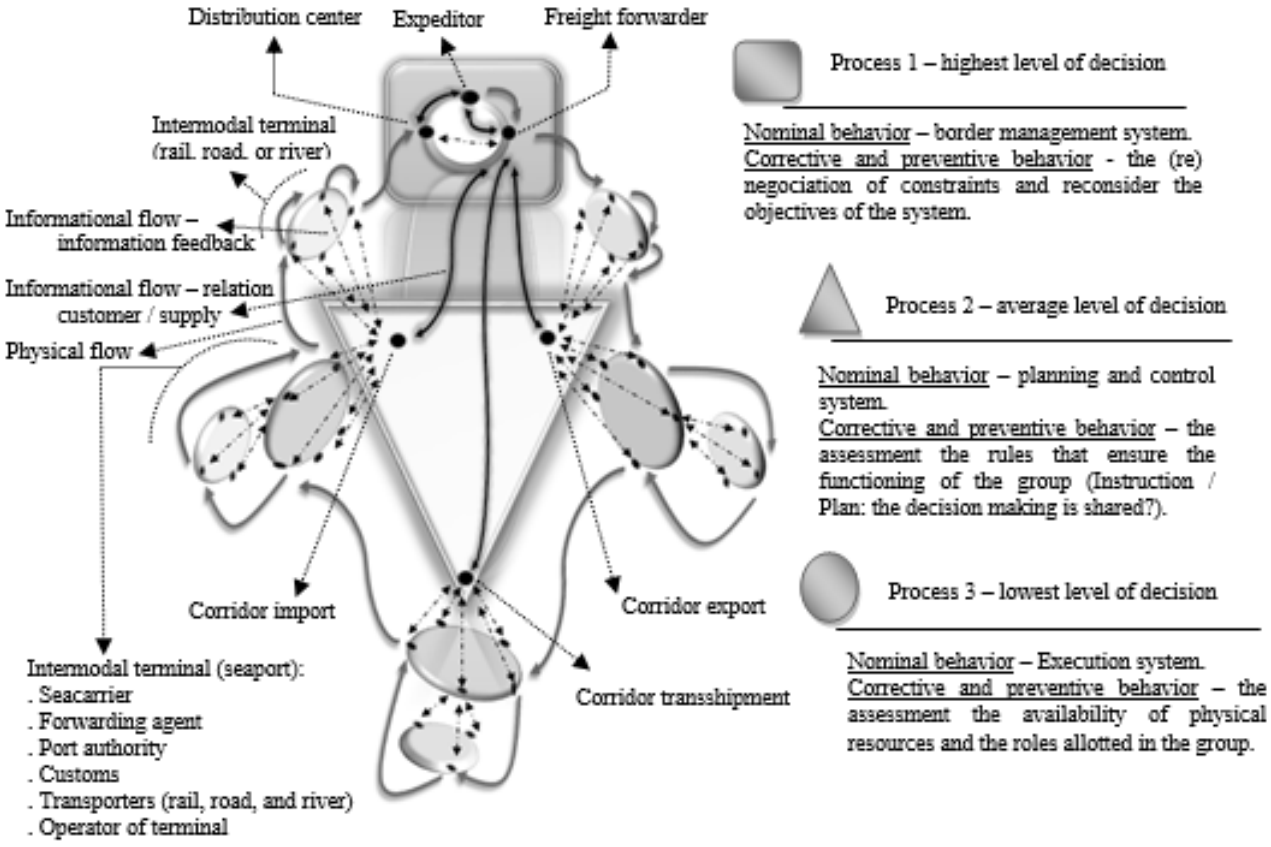


Fig.3.19: Structure générique du système intermodal composée de trois niveaux d'abstraction.

3.3.3. Architecture de contrôle de la chaine de transport intermodal de marchandises

La littérature fait référence à plusieurs architectures de contrôle, après avoir recensé et établit une description succincte de la plupart d'entre elles dans le deuxième chapitre (*cf. section 2.2.3.3*). Notre choix d'une structure de contrôle de la performance du système étudié opte pour une architecture mixte (*Fig.2.11*), il s'agit d'une architecture orientée centre de décision proposée par *François* dans [*François, 2007*]. Ce type de structure apporte d'une part de nombreux avantages en termes d'intégration des déterminants de la performance proposés par *Lauras* dans [*Lauras, 2004*]: Le triplet efficacité / efficience / pertinence (*cf. section 2.4.2.2.b*). D'autre part, elle apporte l'aspect de la structure générique de la chaine de transport intermodal en tenant compte de ses trois niveaux d'abstraction (*Fig.3.19*). En effet, le mécanisme de contrôle de la performance que nous avons conçu tient non seulement à maintenir le système sur sa trajectoire nominale, correctionnelle et prévisionnelle mais aussi à contrôler la disponibilité des ressources (collaboration) et la fiabilité des règles des instructions (coordination), des contraintes et des objectifs (coopération) locaux et globaux. Notre processus de contrôle se construit par la mise en place de trois axes (collaboration, coordination et coopération) définis selon le niveau d'abstraction du système afin que les diverses décisions seront prises en considération à différents moments et différentes situations. Ainsi, nous pouvons présenter l'architecture du contrôle de la chaine de transport intermodal selon une structure mixe à plusieurs superviseurs ayant des liens communs (*Fig.3.20*).

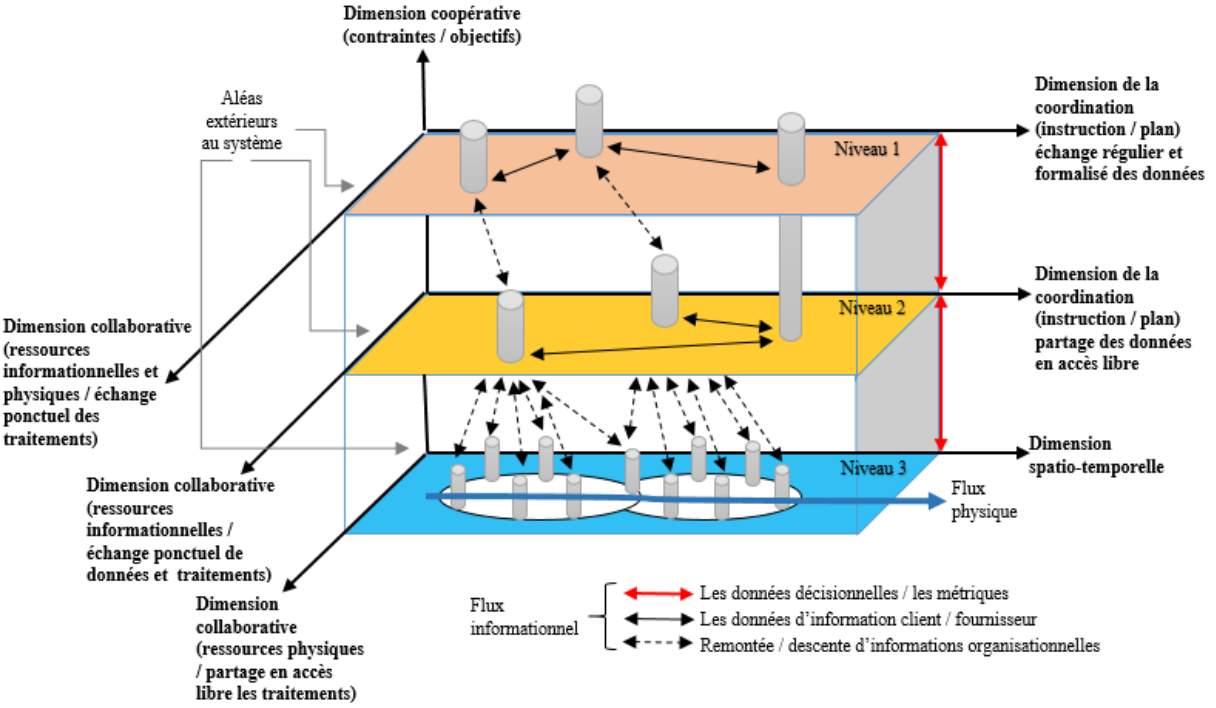


Fig.3.20: Le modèle abstrait de l'architecture du contrôle de la chaine de transport intermodal.

3.3.4. Bilan – Conclusion

Tout au long de cette sous-section (*cf. section 3.3*), nous avons présenté notre ***méthodologie*** adoptée pour la conceptualisation d'une architecture du contrôle de la performance de la chaine de transport intermodal (*cf. section 3.3.2*). L'objectif est de pouvoir dégager une structure de contrôle capable d'une part d'apporter de nombreux avantages en termes d'***intégration des déterminants de la performance*** et d'autre part de ***respecter l'aspect de la structure générique*** de la chaine de transport intermodal (*cf. section 3.3.3*).

Dans cette perspective, nous avons effectué une analyse suivant une vue statique et une vue dynamique. En conclusion, nous pouvons dire que le processus de contrôle que nous proposons vise non seulement à maintenir le système sur sa trajectoire nominale, correctionnelle et prévisionnelle mais aussi à contrôler l'ensemble de ses ententes industrielles. En vue de modéliser notre système d'étude (*cf. Chapitre 4*), l'architecture proposée va nous permettre d'introduire les concepts fondamentaux structurant l'approche de cette modélisation.

3.4. Synthèse du chapitre 3

L'analyse conjointe des trois sous-systèmes (***opérationnel***, ***décisionnel*** et ***informationnel***) formant la chaine du transport intermodal de marchandises de porte à porte nous a permis de bien ***positionner nos travaux de recherche dans leur environnement***. Cette dissociation nous a aidés à mener notre étude suivant une ***approche systémique*** afin que la considération de la chaine ne soit pas complexe et sa lisibilité ne reste pas réduite. Nous avons consacré toute une partie de ce troisième chapitre (*cf. section 3.2.6*) à la synthèse de cet état de l'art où nous avons situé les défis spécifiques à ces trois sous-systèmes: *1)* le ***système opérant*** fait intervenir plusieurs ressources humaines et physiques afin de réaliser les activités et les fonctions souhaitées, ceci nécessite une bonne gestion des flux physiques et informationnels ; *2)* le ***système de décisions*** est une organisation distribuée dont l'inconvénient est dû à la difficulté de mesurer la cohérence et l'influence que peuvent avoir les décisions prises localement sur le reste du système ; et *3)* le ***système informationnel*** fait intervenir d'entreprises distinctes, chacune se base sur son propre système d'informations, l'implication de ces entreprises reste communautaire ou privative ce qui bloque la réalisation d'une interopérabilité plus étendue afin d'aiguiller ces systèmes hétérogènes vers un système unique de porte à porte.

C'est sur l'axe de ***la conceptualisation d'une architecture de contrôle de la performance*** de la chaine de transport intermodal de marchandises (service porte à porte) que

nous positionnons la première phase de notre contribution dans nos travaux de recherche. Cet axe suppose la ***bonne maitrise des mécanismes*** d'activités, de concertation et des échanges dans le cadre de notre système étudié (*cf. section 3.2*). Dans ce troisième chapitre, nous proposons une ***formalisation de la méthodologie*** adoptée pour dégager ***une structure de contrôle*** capable d'une part d'apporter de nombreux avantages en termes ***d'intégration des déterminants de la performance*** et d'autre part de ***respecter l'aspect de la structure générique*** de la chaine de transport intermodal (*cf. section 3.3*). Nous pouvons dire que le ***processus de contrôle*** que nous proposons, nous parait très prometteur pour introduire les concepts fondamentaux structurant l'***approche de modélisation*** pour la simulation de la chaine logistique globale dans un environnement de transport intermodal de marchandises (*cf. Chapitre 4*).

Chapitre 4

CONTRIBUTION A LA MODÉLISATION POUR LA SIMULATION DE LA CHAINE LOGISTIQUE GLOBALE DANS UN ENVIRONNEMENT DE TRANSPORT INTERMODAL DE MARCHANDISES

Table des matières

4.1. Introduction

4.2. État de l'art sur les Systèmes Multi-Agent (*SMA*)

4.2.1. Introduction

4.2.2. Systèmes multi-agents : définitions et concepts

4.2.2.1. La vue « agent »

4.2.2.2. La vue « environnement »

4.2.2.3. La vue « interaction »

4.2.2.4. La vue « organisation »

4.2.3. Analogie entre la chaine logistique et le *SMA*

4.3. Méthodologie de la modélisation de la chaine du transport intermodal

4.4. Application de la méthodologie

4.4.1. Le méta-modèle du domaine

4.4.1.1. Vison 1 : aspect structurel

4.4.1.2. Vision 2 : aspect orienté processus

4.4.1.3. Vision 3 : aspect orienté « pertinence, efficacité et efficience »

4.4.2. Le méta-modèle multi-agent

4.4.2.1. Le méta-modèle agent

4.4.2.2. Le méta-modèle environnement

4.4.2.3. Le méta-modèle organisation

4.4.2.4. Le méta-modèle interaction

4.4.3. Le méta-modèle du domaine agentifié

4.4.4. Intégration du protocole d'interaction

4.4.4.1. Le comportement nominal des acteurs impliqués

4.4.4.2. Le comportement correctif des acteurs impliqués

4.4.4.3. Le comportement préventif des acteurs impliqués

4.4.5. Le méta-modèle d'implémentation

4.5. Synthèse du chapitre 4

4.1. Introduction

Après avoir positionné nos travaux de recherche dans leur environnement en analysant conjointement les trois sous-systèmes (opérationnel, décisionnel et informationnel) de la chaine de transport intermodal de marchandises (*cf. section 3.2*). Nous finalisons la première étape de la construction de la solution répondant à la problématique de nos travaux de thèse, par la structuration de la tâche de « ***conceptualisation*** ». Ce ***quatrième chapitre*** de ce manuscrit se focalise sur la ***construction*** d'***une modélisation*** reflétant de façon plus fidèle, en partant de la conceptualisation, la propre image de la chaine logistique globale dans un environnement du transport intermodal porte à porte:

La ***deuxième section*** (*cf. section 4.2*) présente un état de l'art sur les *SMA*. Ceci a dégagé une forte similarité entre les concepts et les pratiques des chaines logistiques et celles des systèmes multi-agents, ce qui nous a permis de constater l'importance des modèles à base des agents qui sont adaptés aux caractéristiques dynamiques et le non linéarités des comportements de tels systèmes complexes.

La ***troisième section*** (*cf. section 4.3*) recueille les principaux concepts liés au ***processus de développement « ArchMDE »*** adopté afin de mener à terme cette étape de modélisation. C'est dans cette optique que nous abordons la méthodologie de la modélisation de la chaine du transport intermodal en partant de la conceptualisation réalisée préalablement (*cf. section 3.3*).

Dans la ***quatrième section*** (*cf. section 4.4*), nous nous focalisons sur l'application de la méthodologie proposée dans la section précédente (*cf. section 4.3*). En effet, cette section consiste à spécifier des méta-modèles et les relations de fusion entre eux : *1)* Un ***méta-modèle du domaine*** (*cf. section 4.4.1*) qui décrit les concepts et les propriétés liées à un domaine particulier (soit la chaîne du transport intermodal des marchandises dans notre cas) ; *2)* Un ***méta-modèle multi-agent*** (*cf. section 4.4.2*) qui décrit les concepts orientés agent ; *3)* Un ***méta-modèle du domaine agentifié*** (*cf. section 4.4.3*) qui combine les deux méta-modèles (le *méta-modèle du domaine* et le *méta-modèle multi-agent*) ; *4)* Une intégration des ***protocoles d'interaction*** (*cf. section 4.4.4*) ; et *5)* Un ***méta-modèle d'implémentation*** permettant le passage de la phase de modélisation à la phase d'implémentation (*cf. section 4.4.5*). Tout au long de ce chapitre nous avons opté pour des notations anglophones pour garder la cohérence avec les publications internationales qui ont été faites et qui vont suivre. Enfin, une synthèse qui positionne nos travaux sera proposée dans la ***cinquième section*** (*cf. section 4.5*).

4.2. État de l'art sur les Systèmes Multi-Agents (SMA)

4.2.1. Introduction

De manière imagée, on pourrait dire que l'« ***Intelligence Artificielle*** » (*IA*) a tout d'abord pris pour métaphore centrale le ***cerveau humain***, la nouvelle *IA* a tenté d'élargir cette métaphore au ***corps humain*** dans son entier. L'aile cognitive des *SMA* a encore élargi cette image à celle des ***sociétés humaines*** tandis que l'aile réactive des *SMA* prendrait plutôt comme métaphore de base celle des ***sociétés d'insectes*** (fourmis, abeilles, ...) [*Amiguet., 2003*].

Le centre d'intérêt dans la recherche multi-agents s'est progressivement déplacé de l'agent au système dans son entier : de questions du type « *Que dois-je ajouter à un agent pour qu'il devienne social ?* », on a passé à des problèmes du type « *Si je veux un SMA possédant tel comportement dans son ensemble, comment dois-je en programmer les agents ?* ». Cette question est encore ouverte, nous ne possédons pas de recette pour passer de la spécification d'un *SMA* à celle des agents le composant. Néanmoins, des pistes existent dans cette direction. Parmi celles-ci, on pourrait citer l'« *émergentisme* » [*Jean, 1997*], les approches « *orientées agent* » [*Wooldridge et al., 2000*] et l'« *approche organisationnelle* » [*Amiguet, 2003*].

Au cours des dernières années, les notions d'organisation, de rôle et d'autres concepts apparentés ont fait leur apparition dans le domaine des systèmes multi-agents. Ainsi, une séparation dans les approches des *SMA* peut être dégagée [*Amiguet, 2003*]:

- D'un côté, les approches dites « ***mentalistes*** », qui mettent l'accent sur le ***fonctionnement interne des agents*** [*Panzarasa et al., 1999*]. Les notions organisationnelles sont alors généralement normatives : faire partie d'un groupement social implique essentiellement d'adapter son comportement de manière à suivre les normes y étant rattachées. Les rôles sont vus comme des ensembles de responsabilités, dépendances, etc. D'un point de vue technique, ces approches sont généralement des extensions de l'architecture ***BDI*** (*Belief-Desire-Intention*) [*Rao et Georgeff, 1991*], elle s'aligne sur la théorie ***BDI*** de l'action rationnelle [*Bratman, 1987*] ;
- De l'autre côté, les approches « ***comportementalistes*** » s'intéressent aux ***groupements sociaux*** en tant que patterns institutionnalisés d'interactions. Les notions organisationnelles décrivent alors généralement de tels patterns, ***indépendamment de la structure interne de l'agent***. *Aalaadin* ([*Ferber et Gutknecht, 1997*], [*Ferber et*

Gutknecht, 1999] et [*Gutknecht, 2001*]) est la plus connue des approches comportementalistes des *SMA*. Elle est centrée autour des trois concepts : l'agent, le groupe et le rôle, appelé modèle ***AGR*** (*Agent-Groupe-Rôle*), des extensions à ce modèle ont été proposées par [*Parunak et Odell, 2001*] et [*Soulié, 2001*].

4.2.2. Systèmes multi-agents : définitions et concepts

Un système multi-agents peut, d'une manière simpliste, être considéré comme un ensemble d'agents partageant un environnement commun. *Jacques Ferber* propose une définition détaillée des *systèmes multi-agents* comme étant un système composé des éléments suivants [*Ferber, 1995*]:

- Un ***environnement E***, disposant en général d'une métrique ;
- Un ***ensemble d'objets O***, auxquels on peut associer une position dans ***E*** à un moment donné. Ces objets (hormis les ***agents***) sont passifs : les agents peuvent les percevoir, les créer, les détruire et les modifier ;
- Un ***ensemble d'agents A***, lesquels représentent les entités actives du système ;
- Un ***ensemble de relations R***, qui unissent les objets (et agents) entre eux ;
- Un ***ensemble d'opérateurs Op*** permettant aux agents de ***A*** de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets de ***O*** ;
- Et, des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification, que l'on appellera les ***lois de l'univers***.

Geen et al., dans [*Geen et al., 1997*] définissent un système multi-agents en tant qu'« *un réseau d'agents (solveurs) faiblement couplés qui* ***coopèrent ensemble*** *pour résoudre des problèmes qui dépassent les capacités ou les connaissances individuelles de chaque agent. Les agents sont* ***autonomes*** *et peuvent être de* ***natures hétérogènes*** ».

Yves Demazeau introduit une vision d'un système multi-agents communément admise aujourd'hui [*Demazeau, 1995*]. Il s'agit de la ***décomposition Voyelles***, cette dernière identifie un axe ***Agent***, un axe ***Environnement***, des ***Interactions*** et une structure ***Organisationnelle*** explicite ou non. Ainsi les *SMA* peuvent être étudiés suivant ces quatre vues:

SMA = Agent + Environnement + Interaction + Organisation.

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.

4.2.2.1. La vue « agent »

Le terme agent est « *pluri-défini* » puisqu'on trouve dans la littérature une multitude de définitions. En effet, la majorité des définitions qui ont été proposées pour le terme agent sont fortement liées à l'application ou au domaine d'application considéré [*Ferber et Gutknecht, 1999*], [*Briot et Demazeau, 2001*].

Jacques Ferber définit un agent entant qu'«*une entité relativement autonome présente dans un système qui lui permet d'évoluer et de communiquer. Ce système est appelé un Système Multi-Agents (SMA)* » [*Ferber, 1995*]. Donc la caractéristique principale des agents tirée de cette définition est:

- ***Autonomie*** : est la capacité d'un agent de prendre des initiatives, d'exercer des contrôles sur ses actions et sur ses états, de percevoir les changements de son environnement et de décider quand il va agir.

Dans [*Russell et Norvig, 1995*], les acteurs définissent un système autonome dans le sens où son comportement est déterminé par ses propres expériences. Donc, nous dégageons la caractéristique d'***apprentissage*** et d'***adaptabilité*** :

- ***Apprentissage et adaptabilité*** : est la capacité d'un agent d'apprendre et de modifier son comportement suivant les expériences.

Selon *Yves Demazeau*: « *un agent est une entité réelle ou virtuelle dont le comportement est autonome, évoluant dans un environnement qu'il est capable de percevoir et sur lequel il est capable d'agir, et d'interagir avec les autres agents* » [*Demazeau et Costa, 1996*]. Cette définition introduit l'***interaction*** qui, comme nous le verrons par la suite, est le moteur des systèmes multi-agents. En effet, l'interaction suppose la présence d'agents capables de se ***rencontrer***, de ***communiquer***, de ***collaborer*** et d'***agir***. Les caractéristiques principales des agents tirées de cette définition sont :

- ***Situé*** : l'agent est « *incorporé* » dans l'environnement. Il est capable d'agir sur son environnement à partir des entrées sensorielles qu'il reçoit de ce même environnement ;

- ***Comportement Social*** : un agent est capable d'interagir avec les autres agents (artificiels ou humains) dans un but ***coopératif*** ou bien ***compétitif***.

Pour *Mickael Wooldridge* « *un agent est un système informatique capable d'agir de manière autonome et flexible dans un environnement* » [*Wooldridge et al., 2000*]. Par ***flexibilité*** on entend « *réactivité* et *proactivité* »: *1)* ***Réactivité*** **-** Un *agent réactif* maintient un lien constant avec son environnement et répond aux changements qui y surviennent ; *2)* ***Proactivité*** **-** Un *agent proactif* (dénommé aussi *téléonomique* ou *orienté-but*) génère et satisfait des buts. Son comportement n'est donc pas uniquement dirigé par des événements.

La présence des propriétés comme l'***autonomie***, la ***flexibilité*** et la ***sociabilité***, donne naissance au paradigme « *agent* » tout en le distinguant des systèmes conventionnels comme les systèmes orientés objets et les systèmes experts. Un agent adopte différentes ***granularités décisionnelles*** dans les *SMA*, qui seraient « *agent réactif, agent cognitif* et *agent hybride* » :

- ***Les agents réactifs*** **-** Ils ne disposent ni de représentation du monde, ni de représentation de leurs actions qui, prises individuellement, consistent surtout en une réaction rapide face à un stimulus. Ils ont une ***faible capacité de coopération*** qui est limitée à la communication par message, le plus souvent de façon indirecte [*Bourjot et al., 1999*]. Un ensemble d'agents réactifs peut avoir un comportement complexe. Il s'agit de l'émergence d'un comportement [*Brooks, 1991*]. Ainsi *Bonabeau* propose l'utilisation d'un système multi-agents reproduisant le comportement de fourmis pour trouver le chemin le plus rapide entre deux points d'un réseau dont le nombre de nœuds et de passerelles est inconnu [*Bonabeau et al., 1999*];
- ***Les agents cognitifs*** **-** Ils possèdent une représentation symbolique de l'environnement sur lequel ils peuvent raisonner. Ils regroupent plusieurs sous-types d'agents qui seraient « *agent intelligent, agent collaboratif, agent interface* et *agent information* » :
  - Les agents « ***intelligents*** » : combinent les trois caractéristiques (***autonomie***, ***coopération*** et ***adaptation***) à leur plus haut niveau. Ils sont donc capables de planifier leurs actions, de négocier avec d'autres agents et d'acquérir ou de modifier leurs connaissances. Ils sont, en général, dotés de la ***capacité d'apprentissage*** ;
  - Les agents « ***collaboratifs*** » : sont des agents cognitifs non apprenants. Ils possèdent un grand degré de ***coopération*** et d'***autonomie***, mais ***peu adaptatifs***. Ils sont surtout

utilisés dans les domaines qui nécessitent une décentralisation comme la maintenance de réseau ;

- Les agents « ***interfaces*** » [*Koda, 1996*], [*Lashkari, 1994*]: dénommés aussi ***agents assistants***. Ils sont principalement utilisés pour l'assistance à l'utilisateur dans le cas d'interfaces aux fonctionnalités nombreuses et complexes que l'on rencontre le plus souvent lors de l'utilisation de certains logiciels de bureautique (les actions sur le clavier, la souris, etc.). Ces agents possèdent une capacité de ***coopération limitée*** ;
- Les agents « ***informations*** » [*Rhodes, 2000*], [*Rus et al., 1997*] : sont dédiés à la recherche d'information, principalement sur ***Internet***. Cet agent devrait posséder une ***grande autonomie***, tout en étant capable d'agir seul. Il doit être capable d'adapter son comportement selon les besoins de l'utilisateur (*SAIRE* [*Odubiyi, 1997*] et *Softbot* [*Etzioni et Weld, 1994*]).

- ***Les agents hybrides*** - Ils sont des agents ayant des ***capacités cognitives et réactives***. En effet, ils conjuguent la rapidité de réponse des agents réactifs ainsi que les capacités de raisonnement des agents cognitifs. Cette famille regroupe donc des agents dont le modèle est un compromis autonomie/coopération et efficacité/complexité. Pour illustrer cette famille, nous pouvons citer l'architecture *ASIC* [*Boissier et Demazeau, 1996*] utilisée pour le traitement numérique d'images et l'architecture *ARCO* [*Rodriguez, 1994*] créé dans le cadre de la robotique collective.

Le choix du ou des types d'agents à utiliser dépend du *SMA* le plus pertinent pour le problème à résoudre. Le *modèle d'agents*, l'*architecture d'agents* et l'*implémentation d'agents* constituent les différents niveaux de description d'un agent [*Wooldridge et Jennings, 1995*]: *1)* Le ***modèle*** d'agent décrit comment l'agent est compris, ses propriétés et comment on peut les représenter; *2)* L'***architecture*** d'agent est un niveau intermédiaire entre le modèle, le contrôle et l'implémentation. Elle précise les propriétés qu'il doit posséder conformément au modèle et les liaisons avec les autres agents; *3)* L'***implémentation*** d'agent s'occupe de la réalisation pratique de l'architecture des agents à l'aide de langages de programmation.

4.2.2.2. La vue « environnement »

L'environnement est communément défini par tout ce qui entoure l'agent. *Danny Weyns* définit l'environnement entant qu' « *une première classe d'abstraction qui fournit les conditions environnantes aux agents pour exister, et qui sert d'intermédiaire pour les*

interactions entre agents ainsi que l'accès aux ressources » [*Weyns, 2006*]. Dans [*Russell et Norvig, 1995*] et [*Wooldridge et al., 2000*] les auteurs proposent un certain nombre de propriétés d'environnement et les classent de telle manière que l'environnement peut être « *accessible, déterministe, épisodique, statique* et *discret* »: *1)* ***Accessible***, si un agent peut, à l'aide des primitives de perception, déterminer l'état de l'environnement et ainsi procéder à une action. Si l'environnement est ***inaccessible*** alors il faut que l'agent soit doté de moyens de mémorisation afin d'enregistrer les modifications qui sont intervenues ; *2)* ***Déterministe***, ou non, selon que l'état futur de l'environnement ne soit, ou non, fixé que par son état courant et les actions de l'agent ; *3)* ***Episodique***, si le prochain état de l'environnement ne dépend pas des actions réalisées par les agents ; *4)* ***Statique***, si l'état de l'environnement est stable (ne change pas) pendant que l'agent réfléchit. Dans le cas contraire, il sera qualifié de ***dynamique*** ; *5)* ***Discret***, si le nombre des actions faisables et des états de l'environnement est fini.

Selon l'angle de vue d'*Azaiez*, l'environnement peut être ***social*** ou ***physique*** [*Azaiez, 2007*] : *1)* ***L'environnement social*** : correspond aux autres agents avec lesquels un agent est en interaction par envoi de messages ; *2)* ***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*]. Cette partie consiste donc à trouver les éléments nécessaires à la réalisation des interactions extérieures au système comme par exemple la perception de cet environnement et les actions que l'on peut y faire.

4.2.2.3. La vue « interaction »

La notion d'interaction constitue l'essence d'un système multi-agents puisque c'est grâce à elle que les agents vont pouvoir produire des comportements collectifs complexes. *Jacques Ferber* définit l'interaction comme une mise en relation dynamique de deux ou plusieurs agents par le biais d'un ensemble d'actions réciproques [*Ferber, 1995*].

Un système multi-agents se distingue, donc, d'un ensemble d'agents indépendants par le fait qu'ils interagissent en vue de réaliser conjointement une tâche ou d'atteindre conjointement un but particulier. Les agents peuvent interagir en communiquant directement entre eux ou indirectement par l'intermédiaire d'un autre agent ou même en agissant sur leur environnement [*Jarras et Chaib-Draa, 2002*]. La communication dans ce cas est vue comme

une forme d'interaction. En effet, dans la littérature la communication peut être catégorisée en deux grandes classes « *communication directe* et *communication indirecte* » [*Huget, 2005*]:

- ***La communication indirecte*** : il s'agit soit d'une action ***non intentionnelle*** qui se fait par le biais de l'environnement en laissant des traces ou des signaux, soit une action ***intentionnelle*** qui se fait par le biais d'un tableau noir 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*** : elle se fait d'une manière ***intentionnelle*** par envoi de messages à un ou plusieurs destinataires bien définis. Elle se base sur trois éléments qui seraient « *le langage de communication*, *l'ontologie* et *le support de communication* » :
  - ***Le langage de communication*** permettant de structurer les messages échangés entre les agents. Les protocoles de communication les plus utilisés et les plus connus sont ***KQML*** (*Knowledge Query and Manipulation Language*) et ***FIPA-ACL*** (*Foundation for Intelligent Physical Agents - Agent Communication Language*). Ils sont basés sur la théorie des actes de langages [*Austin, 1962*], [*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.).

Il existe plusieurs types d'interactions, qui dépendent de trois paramètres : « les ***buts***, les ***ressources*** et les ***compétences*** » [*Ferber, 1995*]. *Weiss* définit la coordination comme « *la propriété d'un système composé d'au moins deux agents, exécutant des actions dans un environnement partagé* » [*Weiss, 2000*]. Les agents devraient coordonner leurs actions individuelles avec les autres pour aboutir à l'objectif global du groupe. Ceci permet d'éviter les situations de conflits par la négociation pour les agents antagonistes (ayant des buts et des objectifs contradictoires – ***le cadre conflictuel***) et d'améliorer l'efficacité et l'utilité de chaque agent par la coopération pour les agents non antagonistes (***le cadre collectif***).

4.2.2.4. La vue « organisation »

Dans un *SMA*, l'***organisation*** est le facteur structurant, elle permet aux agents de savoir quels sont leurs partenaires et quels rôles ils jouent de façon à répondre à un objectif donné. C'est un arrangement des agents et de leurs comportements conditionné par les contraintes imposées par l'environnement [*Gechter, 2003*]. Dans [*Hübner et al., 2002*] l'organisation est décrite via une spécification ***structurelle***, une spécification ***fonctionnelle*** et une spécification ***déontique***. *Jacques Ferber* [*Ferber, 1995*] affirme que les organisations constituent à la fois le support et la manière dont se passent les interrelations entre les agents, c'est-à-dire dont sont réparties les tâches, les informations, les ressources et la coordination d'actions. Il précise que ce qui rend l'organisation si difficile à cerner est ***qu'elle est à la fois le processus d'élaboration d'une structure et le résultat de ce processus***. Cette citation met en avant la dualité du terme organisation. En effet, il y a l'***aspect statique*** et l'***aspect dynamique*** : l'aspect dynamique est relatif aux relations entre les éléments du système, qui sont soumis à des changements dynamiques. L'aspect statique provient de la raison d'être des organisations qui est la nécessité pour des individus de se regrouper pour repousser leurs propres limites, en termes de capacités.

4.2.3. Analogie entre la chaine logistique et le SMA

L'étude des deux domaines (*chaîne logistique* et *système multi-agents*) montre une forte similarité entre les concepts et les pratiques. En effet, ces deux systèmes peuvent se définir comme des réseaux d'entités (acteur pour *SC* et agent pour *SMA*) qui coopèrent pour l'atteinte d'objectifs communs et individuels, le partage de ressources ainsi qu'à la résolution de problèmes. *Yuan et al.,* [*Yuan et al., 2002*] constatent un ensemble de critères de comparaison entre les systèmes industriels et les *SMA* recensées dans le tableau suivant (*Tab.4.1*) :

Critère d'analogie	**Chaine logistique**	**Système multi-agent**
La multiplicité des entités agissantes	Multiples entités aux rôles et compétences différents pour la réalisation de tâches communes.	Multiples entités aux rôles et compétences différents pour la réalisation de tâches communes.
Les propriétés des entités	Les acteurs possèdent des objectifs, moyens et compétences nécessaires à l'exécution de 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.

L'habilité sociale des entités	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.
Les capacités décisionnelles	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.
La coordination entre entités	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.
La distribution et l'incomplétude de l'information	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.
La répartition des tâches	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.
L'évolutivité des systèmes	Structures dynamiques, les acteurs s'inscrivent ou quittent la chaîne logistique.	Les agents peuvent rejoindre le système et d'autres peuvent être détruits.

Tab.4.1 : Analogie entre la chaine logistique et les *SMA* [*Yuan et al., 2002*].

Sur la base de cette analogie, force est de constater que les systèmes multi-agents proposent un cadre de modélisation adapté pour la représentation de réseaux des chaines logistiques. En effet, la modélisation et la simulation par les systèmes multi-agents permettent de considérer la nature distribuée, les environnements changeants, la variabilité des décisions et le comportement de coopération au sein du *Supply Chain*.

Dans la littérature, nous trouvons plusieurs travaux de recherche qui s'appuient sur la modélisation et la simulation multi-agent pour représenter les chaînes logistiques. Parmi ces travaux, nous pouvons citer : [*Shen et al., 2006*], [*Labarthe et al., 2007*] et [*Jihene, 2011*].

4.3. Méthodologie de la modélisation de la chaine du transport intermodal

Le cœur de nos travaux de recherche est la ***modélisation*** de la chaîne de transport intermodal de marchandises à base des ***Systèmes Multi-Agents*** (*SMA*) (*cf. section 4.2*). Les *SMA* proposent un cadre de modélisation adapté pour la représentation de réseaux des chaines logistiques. En effet, la modélisation et la simulation par les systèmes multi-agents permettent de considérer la nature distribuée, les environnements changeants, la variabilité des décisions et le comportement de coopération au sein du *Supply Chain* (*cf. section 4.2.3*). Ceci nous semble être une approche prometteuse, afin de concevoir un modèle souple et réutilisable. Pour atteindre cet objectif, nous avons adopté un processus de développement appelé ***ArchMDE*** proposée par *AZAIEZ* en *2007* [*Azaiez, 2007*] et nous avons été inspirés par une application de cette approche dans un environnement de production impliquant des Petites et Moyennes Entreprises (*PME*) mécatroniques proposée par *JIHENE* en *2011* [*Jihene, 2011*].

L'approche *ArchMDE* est cohérente supportant le développement des systèmes multi-agents. Cette approche que *AZAIEZ* a baptisé, se base sur une combinaison de l'***approche centrée architecture*** et de ***l''Ingénierie Dirigée par les Modèles*** (*IDM*) [*Azaiez, 2007*] : *1)* L'***approche centrée architecture*** permet de raisonner sur les éléments qui structurent le système multi-agents ainsi que leurs interactions. Elle identifie les patrons architecturaux nécessaires au développement des systèmes multi-agents en prenant en compte les différentes vues du système, ***décomposition voyelles*** (*cf. section 4.2.2*); *2)* L'***approche dirigée par les modèles*** permet d'exprimer de façon explicite la manière de combiner ces patrons architecturaux afin d'avoir une représentation globale du système multi-agents. Les questions importantes dans l'approche *IDM* est la ***méta-modélisation***. Un méta-modèle définit les concepts de domaine, leurs relations, leurs propriétés et il est (en *IDM*) au cœur de l'élaboration de tous les modèles produits dans les différentes phases de développement (de l'analyse jusqu'à la mise en œuvre) [*Jihene, 2011*]. Selon *ArchMDE*, pour créer un cadre de développement spécifique à un domaine d'application, deux niveaux sont à considérer (*Fig.4.1*):

- Le ***premier niveau*** consiste à spécifier des méta-modèles et les relations de fusion entre eux. Plusieurs types de méta-modèles sont identifiés [*Jihene, 2011*]:
  - Un ***méta-modèle du domaine*** (*cf. section 4.4.1*) qui décrit les propriétés liées à un domaine particulier (soit la chaîne du transport intermodal des marchandises dans notre cas). Nous avons réalisé ce méta-modèle en se basant sur trois visions : *1)* une ***vision structurelle*** qui décrit, de manière abstraite, l'aspect structurel de l'organisation de la

chaine de transport intermodal, ses entités et son environnement ; *2)* une ***vision orientée processus*** qui identifie les éléments nécessaires à la chaine pour réaliser ses activités. Cette vision traduit, de manière abstraite, les trois niveaux d'abstraction décrits dans la ***structure générique*** de cette chaine (*cf. section 3.3.2*); *3)* une ***vision orientée triplet « pertinence, efficacité et efficience »*** (*cf. section 2.4.2.2.b*) qui fait apparaitre ce lien entre la vue décisionnelle, la vue fonctionnelle et la performance. Cette vision traduit, selon ***l'architecture de contrôle de la performance*** proposée (*cf. section 3.3.3*), l'image statique des trois axes contrôlant chaque niveau d'abstraction de la structure générique ;

- Un ***méta-modèle multi-agent*** (*cf. section 4.4.2*) qui décrit les concepts orientés agent ainsi que leurs principales relations et propriétés architecturales adaptées à notre domaine d'étude en appliquant l'approche voyelle (*cf. Section 4.2.2*);

- Un ***méta-modèle du domaine agentifié*** (*cf. section 4.4.3*) qui combine les deux méta-modèles (le *méta-modèle du domaine* et le *méta-modèle multi-agent*) qui constituent les modèles conceptuels de départ;

- De ce méta-modèle agentifié, différents méta-modèles sont décrits dans le but : d'une part, de présenter l'image dynamique du système en intégrant le ***protocole d'interaction*** (*cf. section 4.4.4*). D'autre part, de générer le code de la simulation en concevant le ***méta-modèle d'implémentation*** (*cf. section 4.4.5*).

➢ Le ***deuxième niveau*** consiste à générer des modèles basés sur ces méta-modèles à partir de cas réels afin de générer le code de la plateforme souhaitée (*cf. Chapitre 5, section 5.2*).

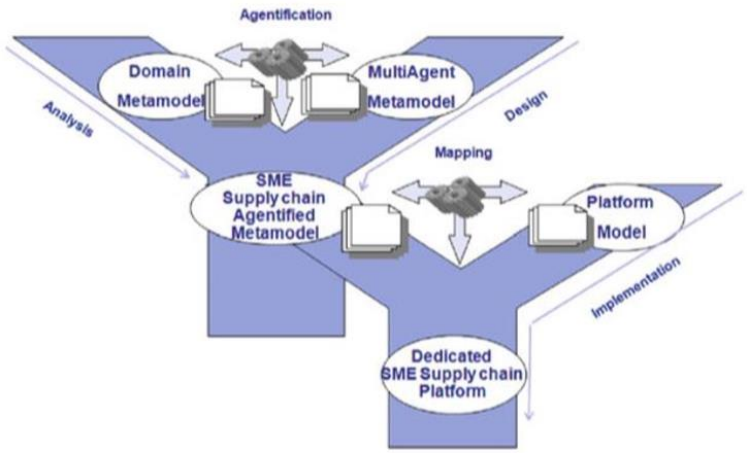


Fig.4.1: Le processus de développement *ArchMDE* [*Jihene, 2011*].

4.4. Application de la méthodologie

4.4.1. Le méta-modèle du domaine

4.4.1.1. Vision 1 : aspect structurel

En se basant sur la méthodologie de modélisation fournie par l'étape précédente (*cf. section 4.3*). En appliquant, la première vision, nous avons identifié le cadre général de notre contexte : le type de l'environnement ainsi que les organisations impliquées en prenant comme référence la circulation du conteneur ou de l'information. En se concentrant premièrement sur ces objectifs, nous avons dégagé les concepts et les axiomes suivants :

- ✓ L'*Intermodal Freight Transportation Chain* (***IFTC***) – Dans le contexte étudié, l'***IFTC*** modélise, de manière abstraite, l'organisation dans laquelle plusieurs intervenants (***Actor***) se concertent pour réaliser un objectif global (*service de porte à porte*) de la chaine de transport intermodal de marchandises ;

- ✓ La chaine de transport intermodal (***IFTC***) est composée d'une ou plusieurs organisations (***Actor***) et d'un environnement (***Environment***) ;

- ✓ Chaque ***Actor*** est membre d'au moins d'un groupement des acteurs (***Group of actors***). Il doit être possible pour un ***Group of actors*** de prendre un rôle dans une ***IFTC***, ceci permettant de voir un ***Actor*** tantôt comme une entité atomique (***Atomic actor***) et tantôt comme une entité composée (***Group of actors***) selon les besoins ;

- ✓ Un ***Actor*** est un ***Atomic actor*** ou ***Group of actors***. Les ***Atomic actor*** sont des acteurs ayant une existence physique. Les ***Group of actors*** sont abstraits, ils existent au travers leurs composants. Autrement dit, chaque ***Actor*** est vu comme un ***Group of actors*** et chaque ***Group of actors***, à tour de rôle, peut être vu comme un ***Actor*** ;

- ✓ L'environnement (***Environment***) est composé de deux parties intégrantes : *1)* un environnement physique (***Physical environment***) ayant une existence physique à travers le système opérationnel d'***IFTC*** ; *2)* et un environnement informationnel (***Informational environment***) ayant une existence virtuelle à travers le système informationnel d'***IFTC*** ;

- ✓ Un ***Physical environment*** est soutenu par au moins un ***Group of actors*** où cet environnement représente son périmètre d'influence physique. De sa part, un ***Informational environment*** est soutenu par au moins un ***Actor*** où cet environnement représente son périmètre d'influence informationnelle ;

- ✓ Chaque ***Physical environment*** est composé d'une ou plusieurs ressources physiques (***P_Resource*** : *Physical Resource*) ou de plusieurs conteneurs en circulation (***P_ME*** : *Physical Moving Entity*). De même, chaque ***Informational environment*** et composé d'une ou plusieurs ressources informationnelles (***I_Resource*** : *Informational Resource*) ou de plusieurs informations en circulation (***I_ME*** : *Informational Moving Entity*).

Le ***méta-modèle abstrait du domaine*** (*Fig.4.2*) est le formalisme du modèle conceptuel abstrait en utilisant la notation *UML* (diagramme de classes). Il a pour objet de décrire, de manière abstraite, l'aspect structurel de l'organisation de la chaine de transport intermodal, ses entités et son environnement.

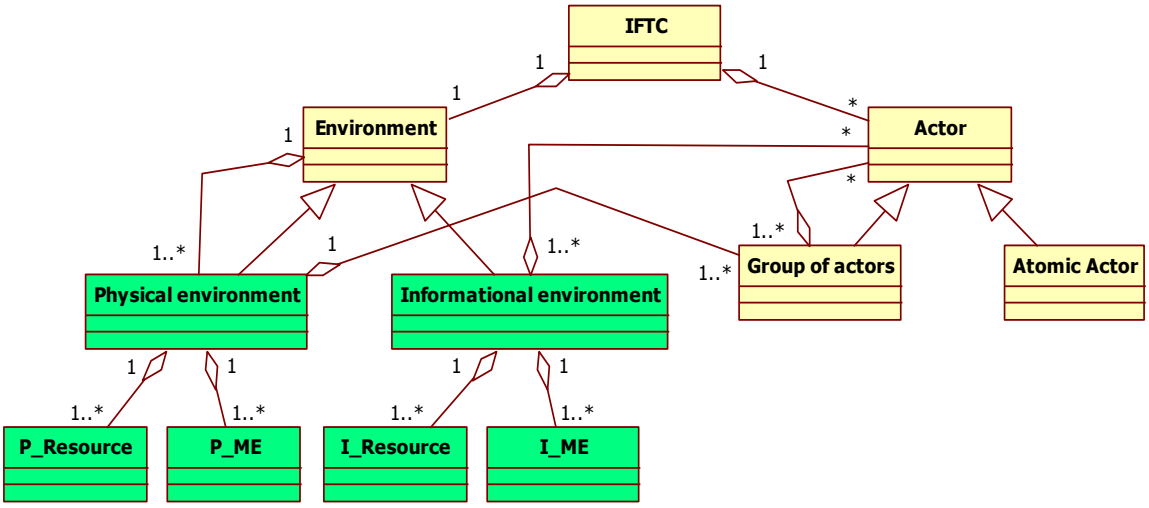


Fig.4.2: Le méta-modèle abstrait du domaine.

Selon le diagramme de classes, cette étape de la modélisation ne représente pas la structure interne de ***Group of actors*** ainsi que la partie visible de l'***environnement*** à l'***Actor*** (le *périmètre d'influence*). Ce qui nécessite une abstraction moins élevée (*raffinement*) fournie par l'étape suivante.

4.4.1.2. Vision 2 : aspect orienté processus

En se basant sur le méta-modèle abstrait du domaine fourni par l'étape précédente. En appliquant la deuxième vision basée sur l'aspect orienté processus, un raffinement de ce méta-modèle est généré en identifiant les éléments nécessaires à l'***IFTC*** pour réaliser ses activités. En se focalisant sur ces objectifs, nous avons dégagé les concepts et les axiomes suivants :

- ✓ Nous modélisons le ***Group of actors*** comme étant une composition de quatre couches représentant les différents processus de décision abordés dans le *chapitre 3* de ce manuscrit (*cf. Section 3.3*) : le système de déclenchement et clôture du système intermodal « ***Border management system*** », le système d'organisation de la chaine de transport intermodal « ***Planning and control system*** » et le système d'acheminement des conteneurs représenté par deux processus : « ***Execution system*** » et « ***Physical process*** ». La couche « ***Physical process*** » modélise le périmètre d'influence du ***Group of actors*** ;

- ✓ ***Border management system*** : c'est le groupe *limitant le périmètre fonctionnel* des ***Group of actors*** du système étudié en assurant la négociation et l'accord entre l'ensemble des ***Actor*** d'***IFTC***. Un ***Actor*** de ce système va être modélisé par le concept ***BMA*** :

  - ➢ ***BMA*** (*Border Management Actor*) : représente un ***Actor*** modélisant, dans notre cas, un ***Group of actors*** qui prend part aux échanges informationnels et financiers. La décision d'un ***BMA*** correspond ici à un critère d'accord et de satisfaction / retour représentant le seuil à partir duquel l'***IFTC*** démarrera (clôturera). Cet ***Actor*** peut jouer un rôle dans ***Planning and control system*** en prenant une décision qui correspond ici à un critère d'optimisation du coût et du temps ;

- ✓ ***Planning and control system*** : c'est le groupe intelligent des ***Group of actors*** qui assure le choix d'actions de planification permises par un ***Environment*** ainsi que la coordination des activités d'***IFTC*** et de son implication dans la prise de décision des deux couches : ***Execution system*** et ***Physical system***. Un ***Actor*** de ce système va être modélisé par le concept ***PCA*** :

- ***PCA*** (*Planning and Control Actor*) : représente un ***Actor*** modélisant, dans notre cas, un ***Group of actors*** qui prend part à la planification et le contrôle de ce ***Group of actors*** en interne et dans l'***IFTC***. La décision d'un ***PCA*** correspond ici à la satisfaction d'un critère d'optimisation du coût et du temps. Cet ***Actor*** peut jouer un rôle dans ***Execution system*** en prenant une décision qui correspond ici à la satisfaction d'un critère de sécurité et de niveau de service ;

✓ ***Execution system*** : c'est le groupe *réactif* des ***Group of actors*** qui assure le contrôle et la synchronisation de l'acheminement des conteneurs. Il se base d'une part sur le pilotage du ***Planning and control system***. D'autre part, il récolte les données du ***Physical process*** pour détecter et rectifier les dérives. Un ***Actor*** de ce système va être modélisé par le concept ***EA*** :

- ***EA*** (*Execution Actor*) : représente un ***Actor*** modélisant, dans notre cas, un ***Group of actors*** qui ne fait qu'exécuter les décisions du ***Planning and control system***. Cet ***Actor*** a un *comportement réactif*. En effet, il observe la ***Physical process*** et agit en conséquence pour contrôler et synchroniser le flux physique;

✓ ***Physical process*** : c'est le champ d'observation et d'action qui regroupe toutes les entités passives envers elles-mêmes. D'où la transformation du ***P_ME*** est pilotée par les ***EA*** et le ***P_Resource*** modélise les ressources nécessaires pour effectuer ces transformations.

✓ Les acteurs ***PCA*** et ***EA*** héritent tous les deux de la classe ***Group of actors*** et l'acteur ***BMA*** hérite de la classe ***Atomic actor***. Ceci représente les caractéristiques structurelles et comportementales de ces acteurs. Cependant les caractéristiques individuelles de chacun seront considérées dans les classes ***BMA***, ***PCA*** et ***EA***.

Le ***méta-modèle raffiné du domaine*** (*Fig.4.3*) a pour objet de décrire, de manière abstraite, l'aspect orienté processus de la chaine de transport intermodal. Cette étape de la modélisation ne représente pas le comportement dynamique des relations de causalités tenant en compte l'articulation entre centres de décision et processus opérationnels.

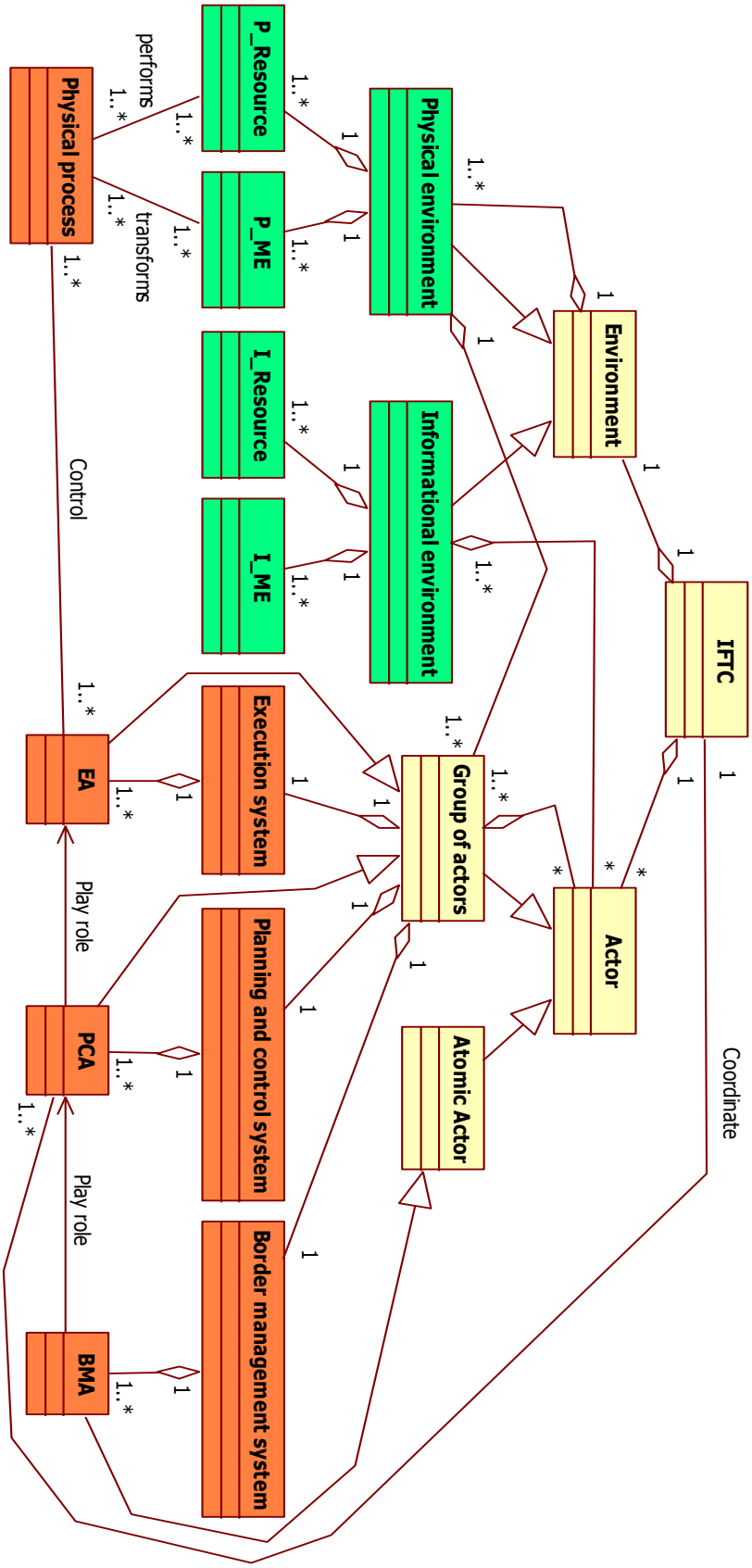


Fig.4.3: Le méta-modèle raffiné du domaine.

4.4.1.3. Vision 3 : aspect orienté « pertinence, efficacité et efficience »

En se basant sur le méta-modèle raffiné du domaine fourni par l'étape précédente. En appliquant la troisième vision basée sur le triptyque « pertinence, efficacité et efficience », le méta-modèle du domaine est généré en apparaissant ce lien entre la vue décisionnelle, la vue fonctionnelle et la performance. De ce fait, nous identifions les éléments essentiels en fonction desquels la performance peut être pilotée en se basant sur des éléments informationnels nécessaires aux acteurs afin de réaliser leurs tâches. En se focalisant sur ces objectifs, nous avons dégagé les concepts et les axiomes suivants :

- ✓ L'***Indicator*** modélise le concept sur lequel les ***Actor*** se basent pour évaluer leur performance interne et globale au niveau d'***IFTC*** ;

- ✓ Chaque ***Actor*** vise un ou plusieurs ***Objective***. Ce concept modélise l'intérêt pour lequel un ou plusieurs ***PCA*** se concertent pour le réaliser ;

- ✓ Les ***PCA*** utilisent, à chaque déviation d'un ***Indicator***, les leviers de commande lui permettant de transformer des ***Knowledges*** en ***Instruction*** en fonction d'***Objective*** et ***Constraint*** potentiellement issus d'autres ***Actor***. Les ***Instruction*** vont cadrer la ou les activités qui composent le ***Physical environment*** correspondant ;

- ✓ ***Knowledges*** : c'est le champ d'observation qui intègre tous les éléments informationnels nécessaires aux ***Actor*** afin de mener les mécanismes de communication et de contrôle ;

- ✓ ***Knowledges*** est composé de deux parties intégrantes : *1)* ***Organizational knowledge*** – il s'agit des informations pertinentes que doit avoir chaque ***Actor*** sur les autres ***Actor*** d'***IFTC*** ; *2)* ***Constraint*** – il s'agit des informations portées sur le cadre de décision et les moyens alloués pour chaque ***Actor*** ;

- ✓ D'où la transformation des ***I_ME*** est pilotée d'une part par les ***EA*** dans la mise à jour de ses connaissances organisationnelles (***Organizational knowledge***). D'autre part, cette transformation est pilotée par les ***PCA*** dans sa prise de décision et la mise en place des nouvelles ***Instruction*** (***Constraint***). Les ***I_Resource*** modélisent les ressources informationnelles nécessaires pour effectuer ces transformations.

Nous obtenons la ***version détaillée du méta-modèle du domaine*** suivant (*Fig.4.4*):

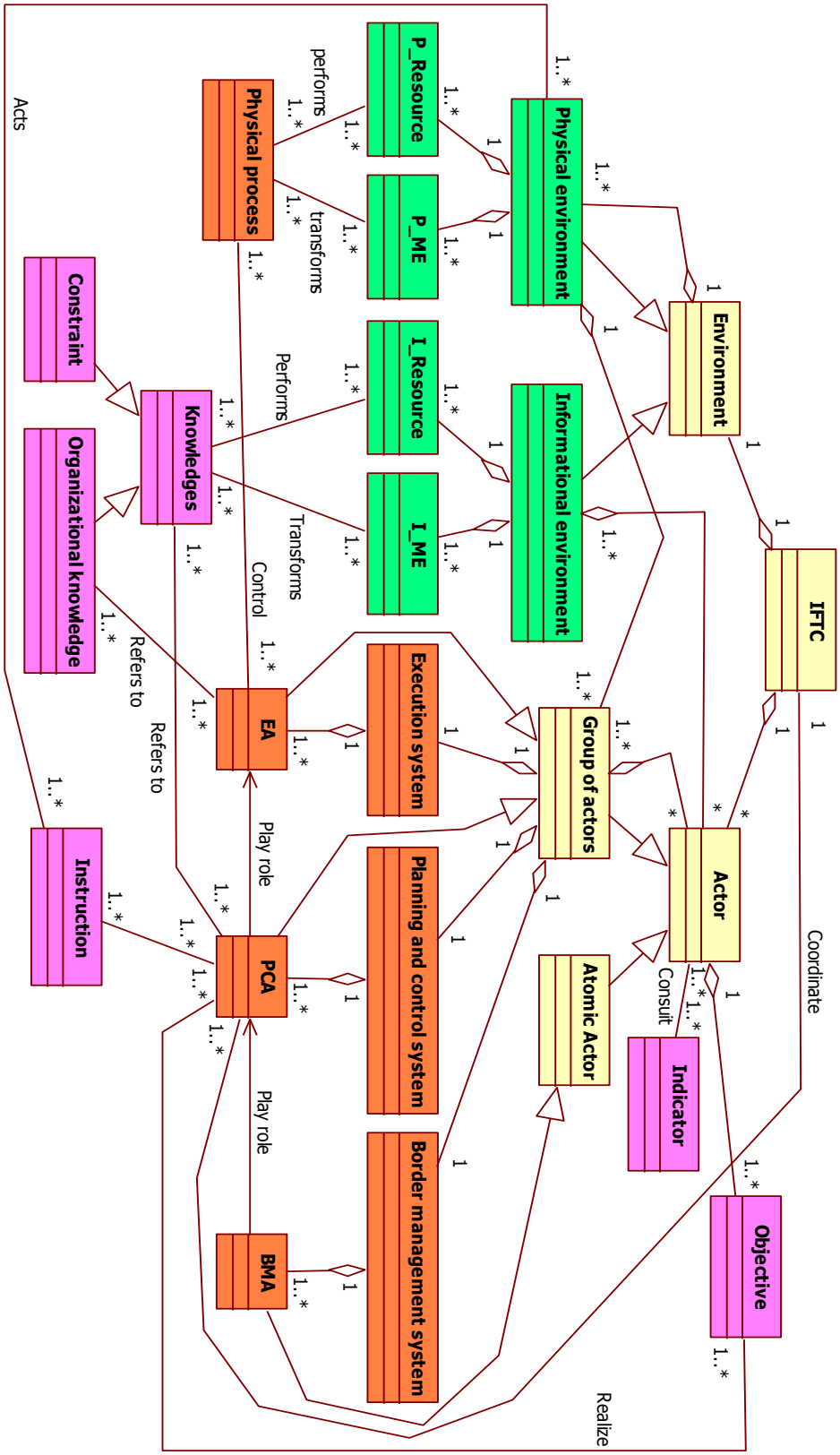


Fig.4.4: La version détaillée du méta-modèle du domaine.

4.4.2. Le méta-modèle multi-agent

En se basant sur des travaux de recherche réalisés au sein de l'*Université de Savoie* [*Azaiez, 2007*] [*Jihene, 2011*], nous avons raffiné un méta-modèle multi-agent. En appliquant l'approche voyelle définit précédemment (*cf. Section 4.2.2*), nous présentons, le long de cette section, cette notion du méta-modèle multi-agent qui décrit les concepts orientés agent ainsi que leurs principales relations et propriétés architecturales formalisées avec la notation *UML* (*diagramme de classe*).

4.4.2.1. Le méta-modèle agent

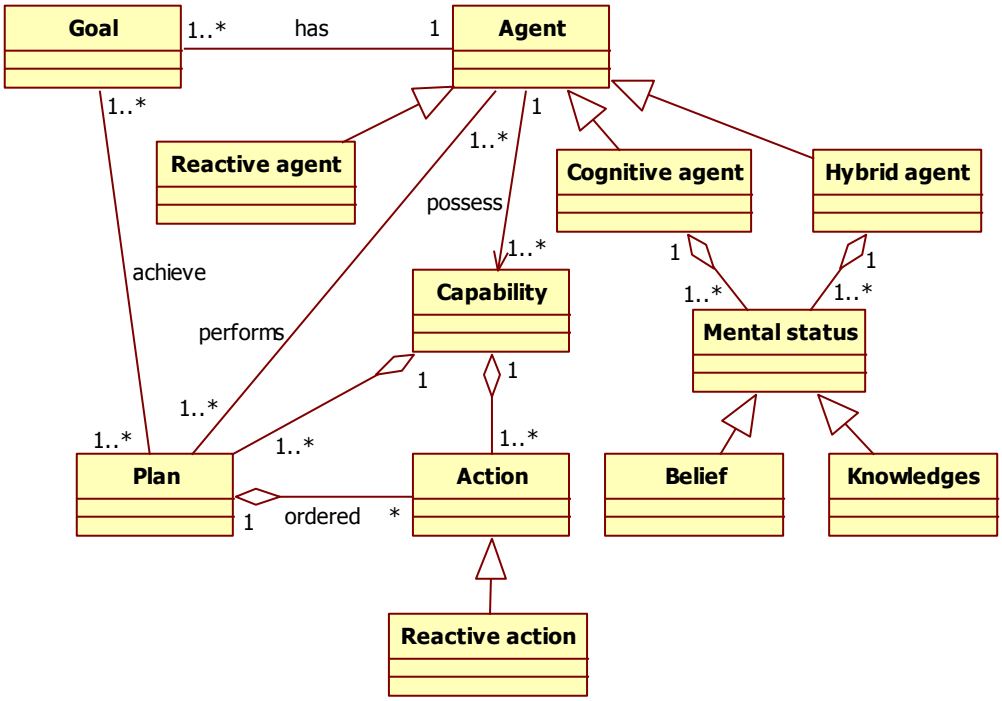


Fig.4.5: Le méta-modèle multi-agent : la vue agent.

Le méta-modèle agent identifie la structure interne d'un agent. La figure au-dessus (*Fig.4.5*) décrit cette vue en dégageant les concepts suivants :

- ✓ L'***Agent*** modélise les agents du système. Les trois types d'***Agent*** : ***Hybrid agent***, ***Cognitive agent*** et ***Reactive agent*** héritent des caractéristiques de l'***Agent*** ;

- ✓ Le ***Reactive agent*** modélise les agents du système dotés d'une réaction rapide face à un stimulus (*capacités réactives*); Le ***Cognitive agent*** modélise les agents dotés d'une intelligence lui permettant, selon la situation, d'atteindre d'une manière

optimale leurs objectifs (*capacités cognitives*); L'***Hybrid agent*** modélise les agents qui conjuguent la rapidité de réponse des ***Reactive agent*** ainsi que les capacités de raisonnement des ***Cognitive agent*** (*capacités cognitives et réactives*);

- ✓ Le concept « ***Goal*** » modélise l'objectif que l'***Agent*** voudra atteindre. Ces ***Goal*** seront effectués suivant un ou plusieurs plans (modélisé par ***Plan***) mis en œuvre par un ou plusieurs ***Agent***. Chaque ***Plan*** est composé d'une ou plusieurs actions élémentaires modélisées par le concept « ***Action*** ». D'où la nécessité du concept « ***Capability*** » qui modélise la ou les capacités que l'***Agent*** doit posséder pour mettre en œuvre des ***Plan*** ou / et pour réaliser une ou plusieurs ***Action***. Le concept « ***Reactive action*** » modélise l'***Action*** élémentaire effectuée le plus souvent par ***Reactive agent*** ou ***Hybrid agent***;

- ✓ Le concept « ***Mental status*** » modélise les attitudes mentales composant les capacités cognitives de chaque ***Cognitive agent*** et ***Hybrid agent***. Ce concept intègre les *croyances* de chacun de ces ***Agent*** (modélisées par le concept « ***Belief*** ») et les *connaissances* (modélisées par le concept « ***Knowledges*** ») nécessaires pour agir d'une manière appropriée.

4.4.2.2. Le méta-modèle environnement

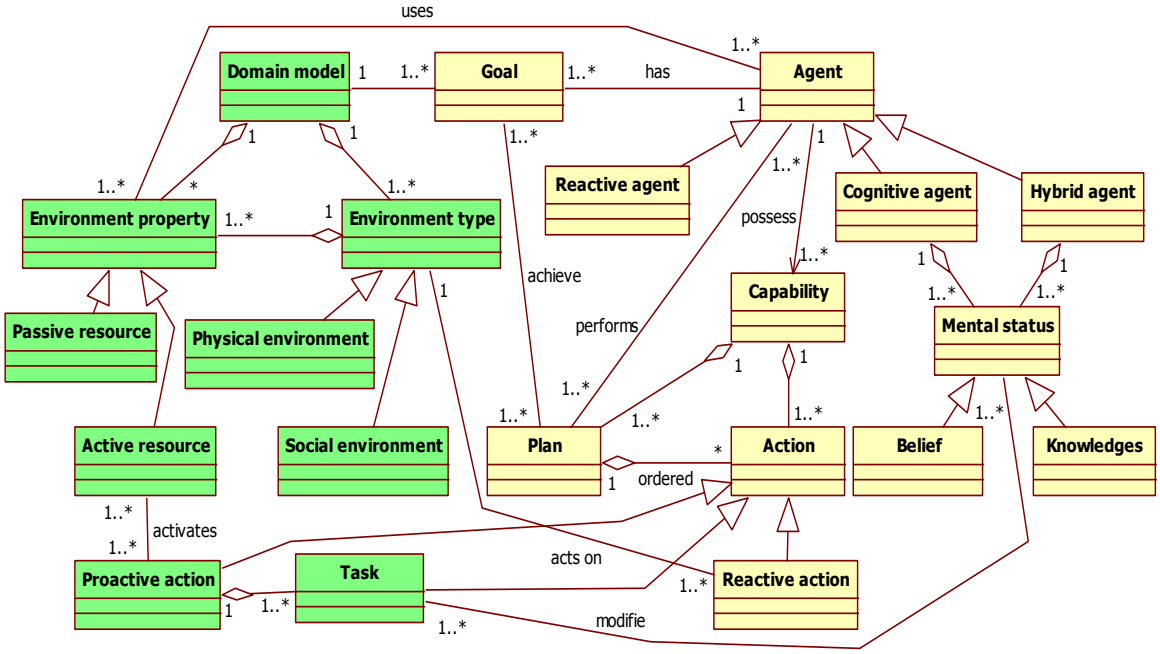


Fig.4.6: Le méta-modèle multi-agent : intégration de la vue environnement.

Le méta-modèle environnement illustré par la figure (*Fig.4.6*) est composé des concepts suivants :

- ✓ Le concept « ***Environment type*** » modélise les environnements nécessaires à la réalisation des interactions extérieures du domaine étudié (modélisé par le concept « ***Domain model*** »). Ces environnements peuvent être physiques (modélisés par le concept « ***Physical environment*** ») ou sociaux (modélisés par le concept « ***Social environment*** »). Un « ***Physical environment*** » modélise un environnement correspondant aux ressources matérielles que l'***Agent*** peut percevoir et sur lesquelles il peut agir. Un « ***Social environment*** » modélise un environnement correspond aux ressources avec lesquelles un ***Agent*** peut interagir avec les autres ***Agent*** du système par envoi de messages ;

- ✓ Le concept « ***Environment property*** » modélise les ressources composant un environnement (physique ou social). Ces ressources peuvent être actives (modélisées par le concept « ***Active resource*** ») ou passives (modélisées par le concept « ***Passive resource*** »). Une « ***Active resource*** » modélise les ressources qui activent le comportement de l'***Agent*** par des signaux ou la génération d'événements. Une « ***Passive resource*** » modélise les ressources nécessaires à un ou plusieurs ***Agent*** pour achever une tâche ;

- ✓ Le concept « ***Proactive action*** » modélise un événement que les ressources activent. Il s'agit d'une action orienté-but composée d'une ou plusieurs tâches (modélisées par le concept « ***Task*** ») qui seront accomplies par l'***Agent*** en modifiant les « ***Mental status*** » d'autres ***Agent***.

4.4.2.3. Le méta-modèle organisation

L'organisation est le facteur structurant, elle permet aux « ***Agent*** » de savoir quels sont leurs partenaires de quels rôles ils jouent de façon à répondre à un « ***Goal*** » donné. Le méta-modèle organisation (*Fig.4.7*) est composé des concepts suivant :

- ✓ Le concept « ***Organization*** » modélise la topologie du système : hiérarchique (modélisée par le concept « ***Hierarchy*** »), groupe (modélisée par le concept « ***Group*** ») ou marché (modélisée par le concept « ***Market*** ») ;

✓ Une « ***Organization*** » est composée des différents rôles (modélisés par le concept « ***Role*** ») que les « ***Agent*** » peuvent assurer dans le système.

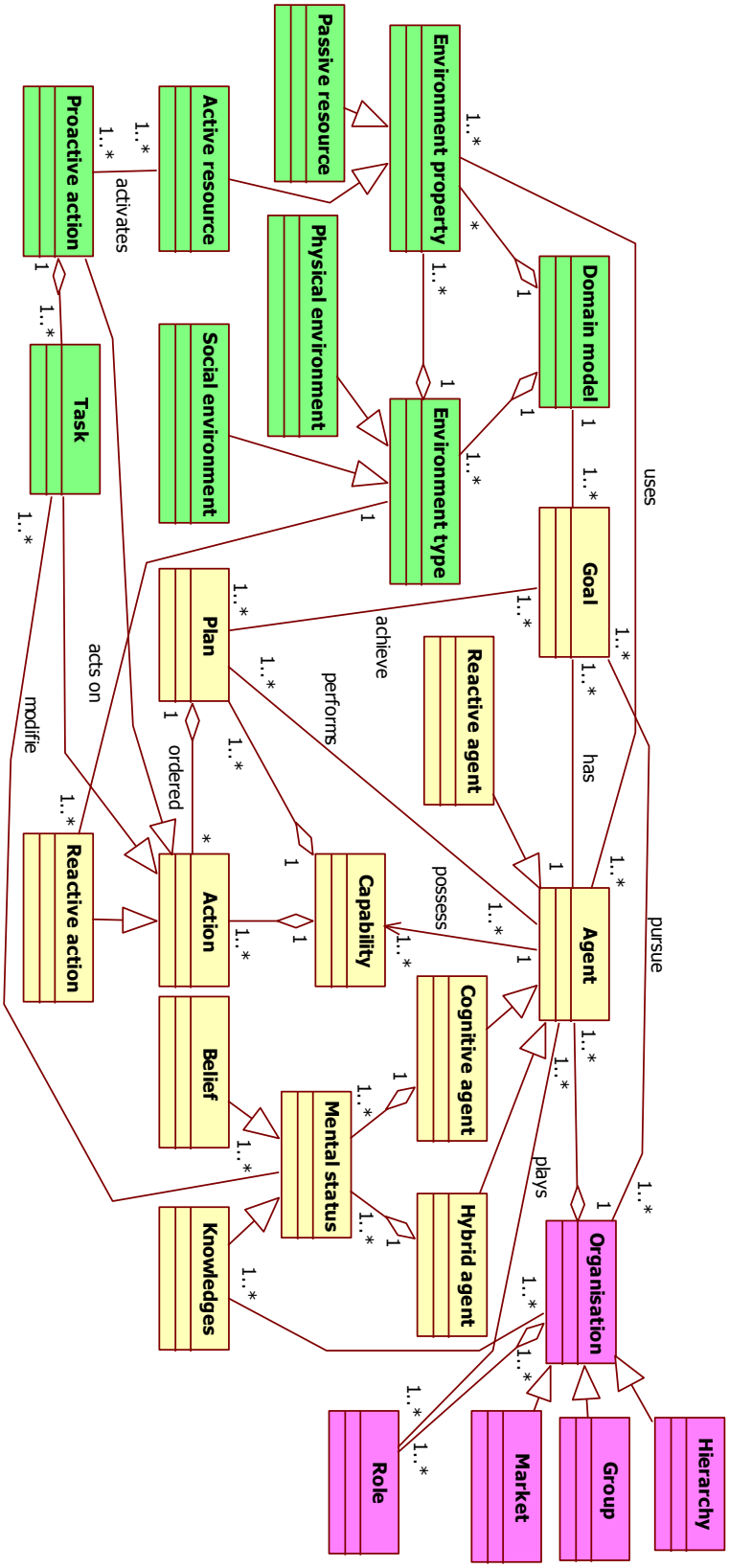


Fig.4.7: Le méta-modèle multi-agent : intégration de la vue organisation.

4.4.2.4. Le méta-modèle interaction

La version finale du méta-modèle multi-agent intégrant la vue interaction fait appel aux concepts suivants (*Fig.4.8*):

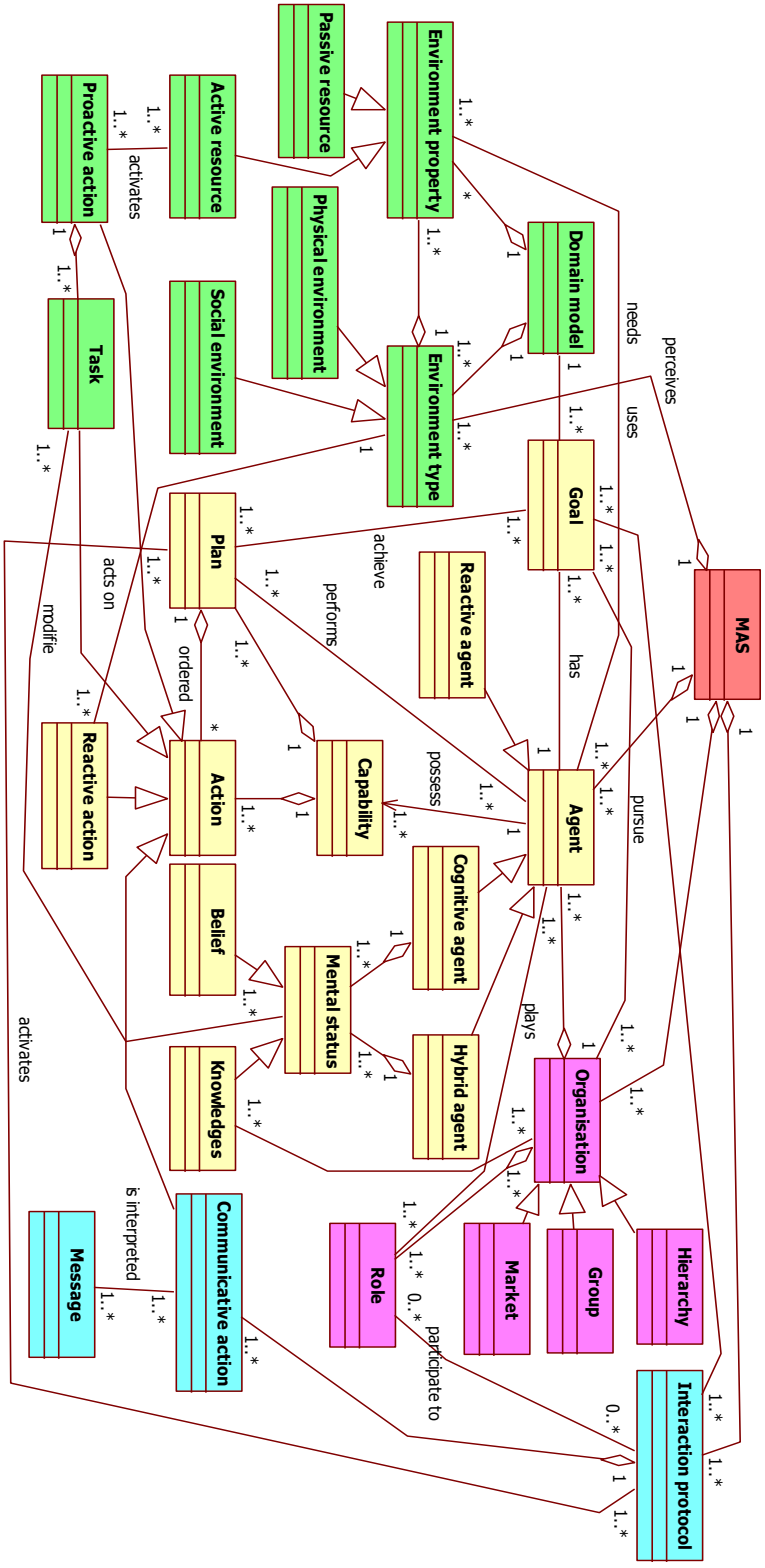


Fig.4.8: La version finale du méta-modèle multi-agent.

- ✓ « ***Interaction protocol*** » modélise le langage de communication permettant de structurer les messages échangés entre les « ***Agent*** ». Les messages (modélisés par le concept « ***Message*** ») sont des actes communicatifs interprétés par les « ***Agent*** » en se basant sur des actions communicatives ;

- ✓ « ***Communicative action*** » modélise les actions élémentaires communicatives qui composent le protocole d'interaction.

4.4.3. Le méta-modèle du domaine agentifié

En se basant sur le méta-modèle du domaine (*cf. section 4.4.1*) et le méta-modèle multi-agent (*cf. section 4.4.2*) fournis par les étapes précédentes. En s'appuyant sur l'ensemble des concepts traités dans l'état de l'art : *1)* Chaine logistique, gestion de la chaine logistique, modélisation et performance (*cf. Chapitre 2*) ; *2)* Transport intermodal de marchandises (*cf. Chapitre 3*). Nous établissons le processus d'agentification illustré par le tableau de correspondance suivant (*Tab.4.2*) qui dégage le domaine agentifié (*Fig.4.9*) (*cf. Annexe 3)*.

Concept du méta-modèle du domaine	Concept équivalent du méta-modèle multi-agent	Description
IFTC	***MAS***	***IFTC*** est l'organisation dans laquelle plusieurs intervenants se concertent pour réaliser un objectif global permis par un environnement. Ainsi ***IFTC***, la racine du méta-modèle du domaine, est modélisée informatiquement par la racine du méta-modèle multi-agent : ***MAS***.
Actor	***Agent***	***Actor*** prend un rôle dans une ***IFTC***. Ainsi le concept ***Actor*** est modélisé informatiquement par le concept ***Agent***. Il peut être un *agent réactif*, *cognitif* ou *hybride* selon sa granularité décisionnelle. En plus, ce concept a un niveau d'abstraction conceptuel plus haut que celui du concept ***Atomic actor*** puisqu'il peut être vu comme un ***Group of actors*** (***Organization***).
Group of actors	***Organization***	Le concept ***Group of actors*** est modélisé informatiquement comme étant une organisation (***Organization***). Il prend un ou plusieurs rôles dans une ***IFTC***, composée d'un ensemble d'acteurs

		respectant une structure topoloique : *hiérarchique*, *groupe* ou *marché*.
Atomic actor	***Agent***	Un ***Atomic actor*** est un ***Actor*** qui n'est pas vu comme étant une entité composée (***Organization***) mais il est vu comme étant une entité atomique. D'où le choix de lui attribuer le concept ***Agent***.
Environment	***Environment type***	Par analogie, le concept ***Environment*** correspond au concept ***Environment type***. Il s'agit, pour les deux méta-modèles, de l'espace (*physique* ou *social*) alloué aux ressources pour réaliser des interactions extérieures.
Physical environment	***Physical environment***	Par analogie, le concept ***Physical environment*** du méta-modèle du domaine correspond au concept ***Physical environment*** du méta-modèle multi-agent. Il s'agit, pour les deux méta-modèles, d'un environnement correspondant aux ressources matérielles que l'acteur peut percevoir et sur lesquelles il peut agir.
Informational environment	***Social environment***	Par analogie, le concept ***Informational environment*** du méta-modèle du domaine correspond au concept ***Social environment*** du méta-modèle multi-agent. Il s'agit, pour les deux méta-modèles, d'un environnement correspondant aux ressources avec lesquelles un acteur peut interagir avec les autres acteurs.
P_Resource	***Passive resource***	Le concept ***P_Resource*** représente les ressources nécessaires pour achever des tâches physiques. D'où le choix de lui attribuer l'équivalent du concept ***Passive resource*** dans le ***MAS***.
I_Resource	***Passive resource***	Le concept ***I_Resource*** représente les ressources nécessaires pour interagir avec les autres acteurs. D'où le choix de lui attribuer l'équivalent du concept ***Passive resource*** dans le ***MAS***.
P_ME	***Active resource***	Le concept ***P_ME*** active le comportement des acteurs exécutifs par génération d'événements (*flux physique*). D'où le choix de lui attribuer l'équivalent du concept ***Active resource*** dans le ***MAS***.

I_ME	***Active resource***	Le concept ***I_ME*** active le comportement des acteurs par génération des signaux (*flux informationnel*). D'où le choix de lui attribuer l'équivalent du concept ***Active resource*** dans le ***MAS***.
Execution system	***Group***	Il s'agit d'une organisation ayant la structure topologique d'un groupe. Elle est composée d'acteurs réactifs d'exécution pour assurer les tâches physiques attribuées à leur groupe. Ainsi le concept ***Execution system*** est modélisé par le concept ***Group***.
Planning and control system	***Group***	Il s'agit d'une organisation ayant la structure topologique d'un groupe. Elle est composée d'acteurs intelligents qui collaborent pour atteindre l'objectif interne de leur groupe et qui coordonnent leurs activités avec les autres organisations. Ainsi le concept ***Planning and control system*** est modélisé par le concept ***Group***.
Border management system	***Market***	Il s'agit d'une organisation ayant la structure topologique d'un marché. Elle est composée d'acteurs coordinateurs et exécutants. Ainsi le concept ***Border management system*** est modélisé par le concept ***Market*** dans le ***MAS***.
Physical process	***Task***	***Physical process*** regroupe les tâches ou les activités prises en charge par les acteurs. Ainsi le concept ***Physical process*** est modélisé par le concept ***Task***.
EA	***Reactive agent***	L'***EA*** a un comportement réactif. Il observe le ***Physical process*** et agit en conséquence pour synchroniser le flux physique. D'où le choix de lui attribuer l'équivalent du concept de ***Reactive agent*** dans le ***MAS***.
PCA	***Cognitive agent***	Le ***PCA*** a un comportement cognitif. Il planifie, contrôle, collabore et coordonne. D'où le choix de lui attribuer l'équivalent du concept de ***Cognitive agent*** dans le ***MAS***.
BMA	***Hybrid agent***	Le ***BMA*** a un comportement réactif en prenant part aux échanges informationnels et financiers, et il a un comportement cognitif en prenant part à la décision, la collaboration et la

		coordination. D'où le choix de lui attribuer l'équivalent du concept de ***Hybrid agent*** dans le ***MAS***.
Knowledges	***Knowledges***	Par analogie, le concept ***Knowledges*** du méta-modèle du domaine correspond au concept ***Knowledges*** du méta-modèle multi-agent. Il s'agit, pour les deux méta-modèles, de toutes les connaissances nécessaires pour mener les mécanismes de communication et de contrôle.
Constraint	***Knowledges***	Il s'agit des informations portées sur le cadre de décision concernant les moyens alloués, le produit et les autres organisations. Ainsi le concept ***Constraint*** est modélisé par le concept ***Knowledges*** dans le ***MAS***.
Organizational knowledges	***Knowledges***	Il s'agit des informations externes portées sur le cadre organisationnel que doit avoir chaque acteur sur les autres acteurs afin de mener les mécanismes de communication. Ainsi le concept ***Organizational knowledges*** est modélisé par le concept ***Knowledges*** dans le ***MAS***.
Instruction	***Plan***	Il s'agit d'une action ou un plan d'actions à appliquer par un acteur pour effectuer sa tâche ou rectifier une situation. Ainsi le concept ***Instruction*** est modélisé par le concept ***Plan***.
Objective	***Goal***	Le concept ***Objective*** représente l'intérêt pour lequel un ou plusieurs ***PCA*** se concertent pour le réaliser. Il est alors équivalent au but (désires) de l'agent. Ainsi le concept ***Objective*** est modélisé par le concept ***Goal*** dans le ***MAS***.
Indicator	***Belief***	Il s'agit du concept sur lequel les acteurs se basent pour évaluer leur performance interne et globale. Donc ce concept représente les croyances d'un agent. D'où le choix de lui attribuer l'équivalent du concept ***Belief*** dans le ***MAS***.

Tab.4.2 : Le tableau de correspondance du processus d'agentification.

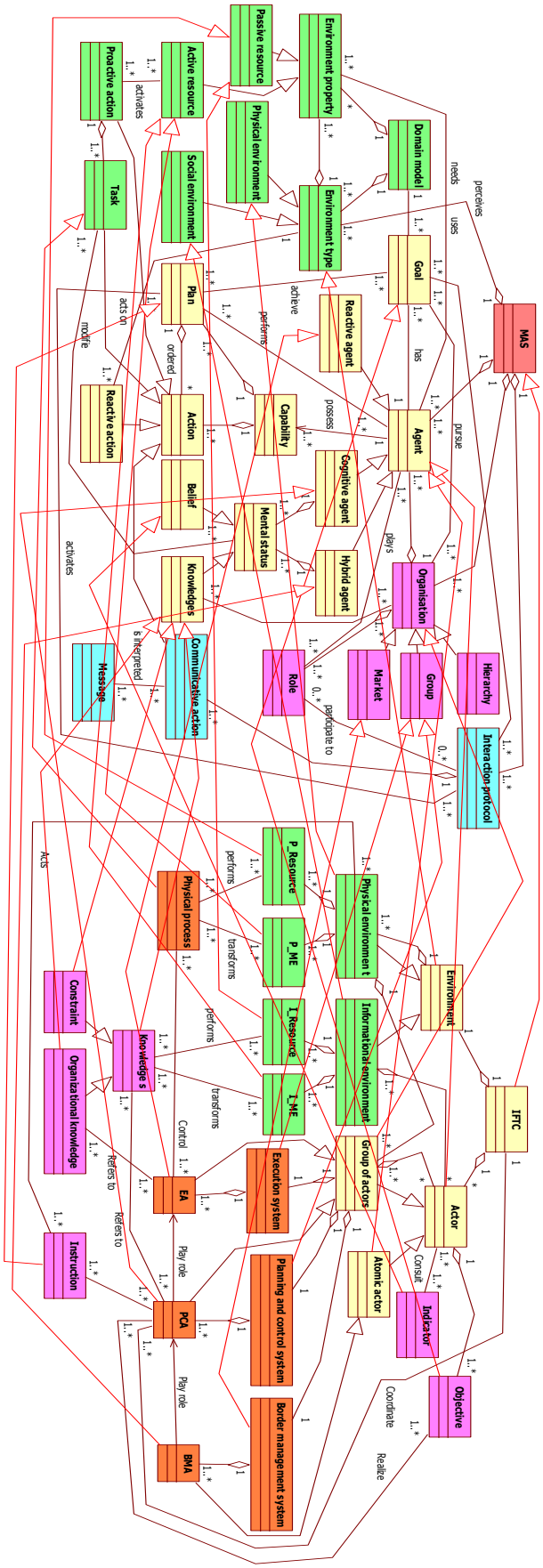


Fig.4.9: Le méta-modèle du domaine agentifié.

4.4.4. Intégration du protocole d'interaction

Dans cette section, nous intégrons les protocoles d'interaction. Ces protocoles permettent d'identifier et décrire les ***comportements dynamiques*** des agents, qui seraient :

- Le ***comportement nominal***, qui décrit le comportement applicatif et attendu des agents (*cf. section 4.4.4.1*);
- Le ***comportement correctif***, qui a comme but de redresser un comportement suite à une perturbation (intervention en cas de défaillance) (*cf. section 4.4.4.2*);
- Le ***comportement préventif***, qui tend à éviter la survenue des complications (intervention sur la base des mesures de performance) (*cf. section 4.4.4.3*).

4.4.4.1. Le comportement nominal des acteurs impliqués

Nous traduisons le comportement dynamique attendu des agents (*réactifs*, *cognitifs* et *hybrides*) par cette séquence des mécanismes de concertation qui peuvent être faits par les acteurs impliqués (*Fig.4.10*):

- L'acteur (*réactif*, *cognitif* ou *hybride*) reçoit un signal (*I_ME* et / ou *P_ME*) pour solliciter l'activation de son comportement nominal ;
- L'acteur (*réactif* / *cognitif*) vérifie s'il s'agit d'une demande de collaboration informationnelle (*I_ME*) dans le cadre de sa tâche nominale au sein de l'organisation. Cette vérification s'effectue en comparaissant les propriétés du message reçu (identité d'émetteur, contenu, etc.) avec celles qui doit être prises en compte et définies dans son ***ontologie de négociation***. L'ontologie de négociation contient les différentes règles qui régissent le processus de négociation entamé par l'établissement d'un accord sur les conditions dans lesquelles un ou plusieurs comportements vont être. Si après vérification, le comportement doit être, l'acteur s'engage à envoyer un signal (*I_ME*) à l'acteur membre concerné en répondant à ses besoins (informer, accepter, proposer, demander, etc.);
- Dans le cas contraire, et *1)* si l'acteur est réactif (*EA / BMA*). Ce dernier vérifie s'il s'agit d'une demande de collaboration en exécutant sa tâche physique nominale (*PhysicalProcess*) en consultant son ontologie de négociation. S'il s'agit bien d'une tâche physique et en tenant compte de la disponibilité de ses ressources physiques (*P_Resource*), l'acteur s'engage à exécuter sa tâche et il envoie un message (*I_ME* et *P_ME*) à son

superviseur (agent coordinateur du « *Planning and control system* ») en lui informant de la réalisation avec succès de la nième tâche de rupture de charge dans la chaine globale (*IFTC*) (voir *2)*). La vérification de la disponibilité des ressources physiques s'effectue en consultant l'***ontologie de domaine*** de l'acteur impliqué. En effet, l'ontologie de domaine dans notre cas d'étude traduit les concepts organisationnels dédiés à chaque intervenant (*Organizational knowledge*) ;

- En cas d'indisponibilité des ressources physiques de l'acteur concerné (*EA* / *BMA*). Ce dernier s'engage à activer son comportement correctif interne (*cf. section 4.4.4.2*) constitué des demandes de maintenance et d'assistance interne ;

- Sinon, *2)* l'acteur est cognitif (*PCA* / *BMA*). Il vérifie alors, en consultant son ontologie de négociation, s'il s'agit de son comportement nominal de coordinateur, celui de dispatcher le signal (*I_ME*) de fin de tâche (la réalisation avec succès de la nième tâche de rupture de charge) reçu d'*EA* concerné. Dispatcher les signaux nécessite la vérification de la disponibilité des ressources informationnelles (*I_Resource*) en consultant l'ontologie de domaine du *PCA* concerné. En cas d'indisponibilité de la ressource informationnelle, l'acteur s'engage à activer son comportement correctif (*cf. section 4.4.4.2*).

4.4.4.2. Le comportement correctif des acteurs impliqués

Nous éclaircissons tout d'abord le comportement correctif des agents réactives (*Fig.4.11*) et par la suite celui des agents cognitifs (*Fig.4.12*) par cette séquence des étapes en langage textuel:

- *Le comportement correctif de l'acteur réactif*

- Si le message reçu est une demande d'activation de son comportement correctif interne, alors l'*EA* (ou *BMA*) cherche en consultant son ontologie de domaine s'il existe une solution alternative en se basant sur son entité atomique. S'il arrive à accomplir sa tâche physique, il envoie un message (*I_ME* et *P_ME*) à son superviseur (agent coordinateur du « *Planning and control system* ») en lui informant de la réalisation avec succès de la nième tâche de rupture de charge dans la chaine globale (*IFTC*) (*cf. section 4.3.4.1*). Sinon, il active le comportement correctif d'un autre *EA* membre en lui demandant de l'aide ;

- Si le message est une sollicitation d'aide par un autre *EA* afin d'accomplir la tâche. Si les ressources physiques du récepteur sont disponibles pour aider. Ce dernier retourne un

message d'acceptation, une fois la tâche physique est accomplie, il envoie un message (*I_ME* et *P_ME*) à son superviseur (agent coordinateur du « *Planning and control system* ») en lui informant de la réalisation avec succès de la nième tâche de rupture de charge dans la chaine globale (*IFTC*) (*cf. section 4.4.4.1*) en activant le ***comportement préventif*** des acteurs qui peuvent être concernés par la complication rencontrée (*cf. section 4.4.4.3*). Sinon (indisponibilité des ressources physiques pour aider) il retourne un message de refus ;

- Si l'*EA* concerné ne reçoit aucun message d'acceptation d'aide, il remonte l'information à son superviseur (agent coordinateur du « *Planning and control system* ») en lui activant son comportement correctif (*échec de collaboration*).

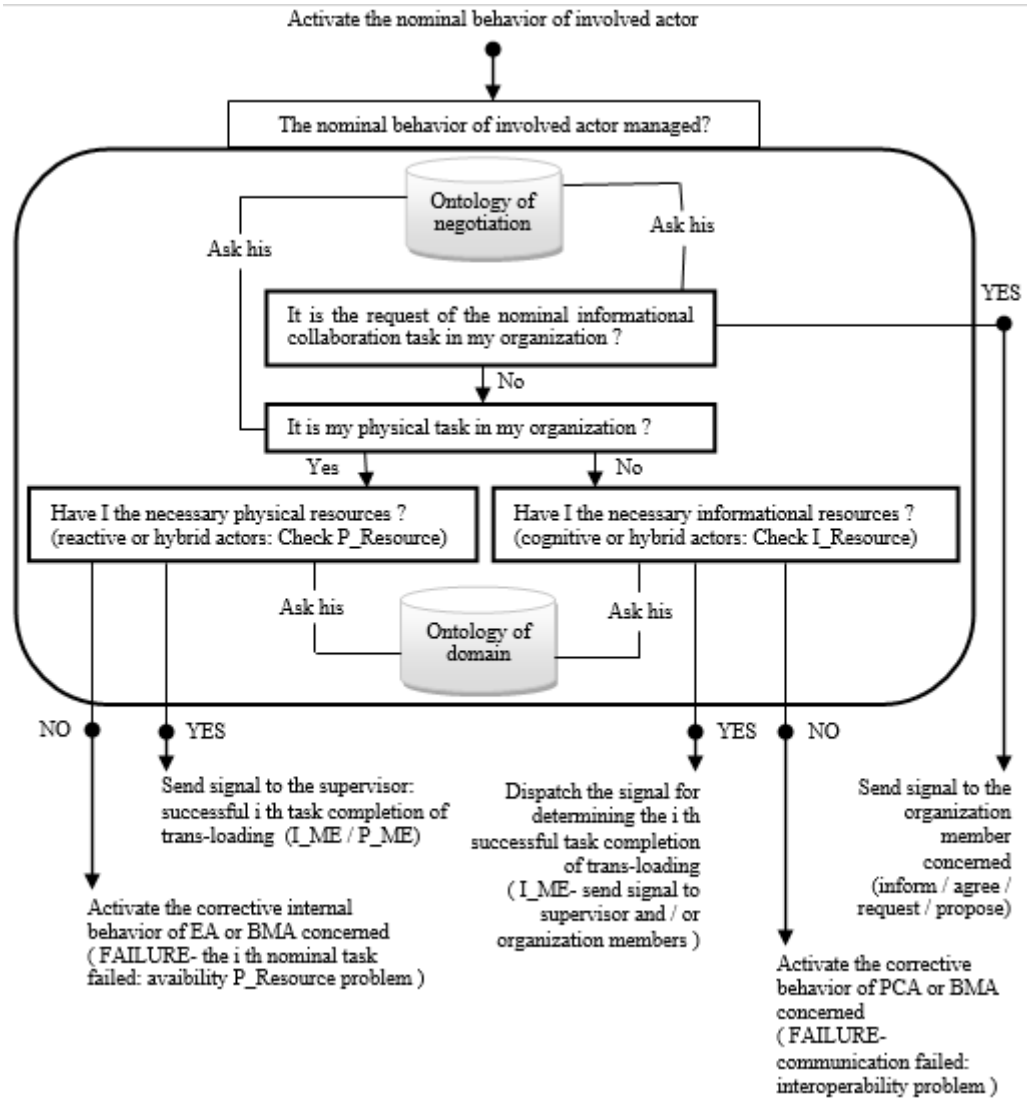


Fig.4.10: Le protocole d'interaction du comportement nominal des acteurs

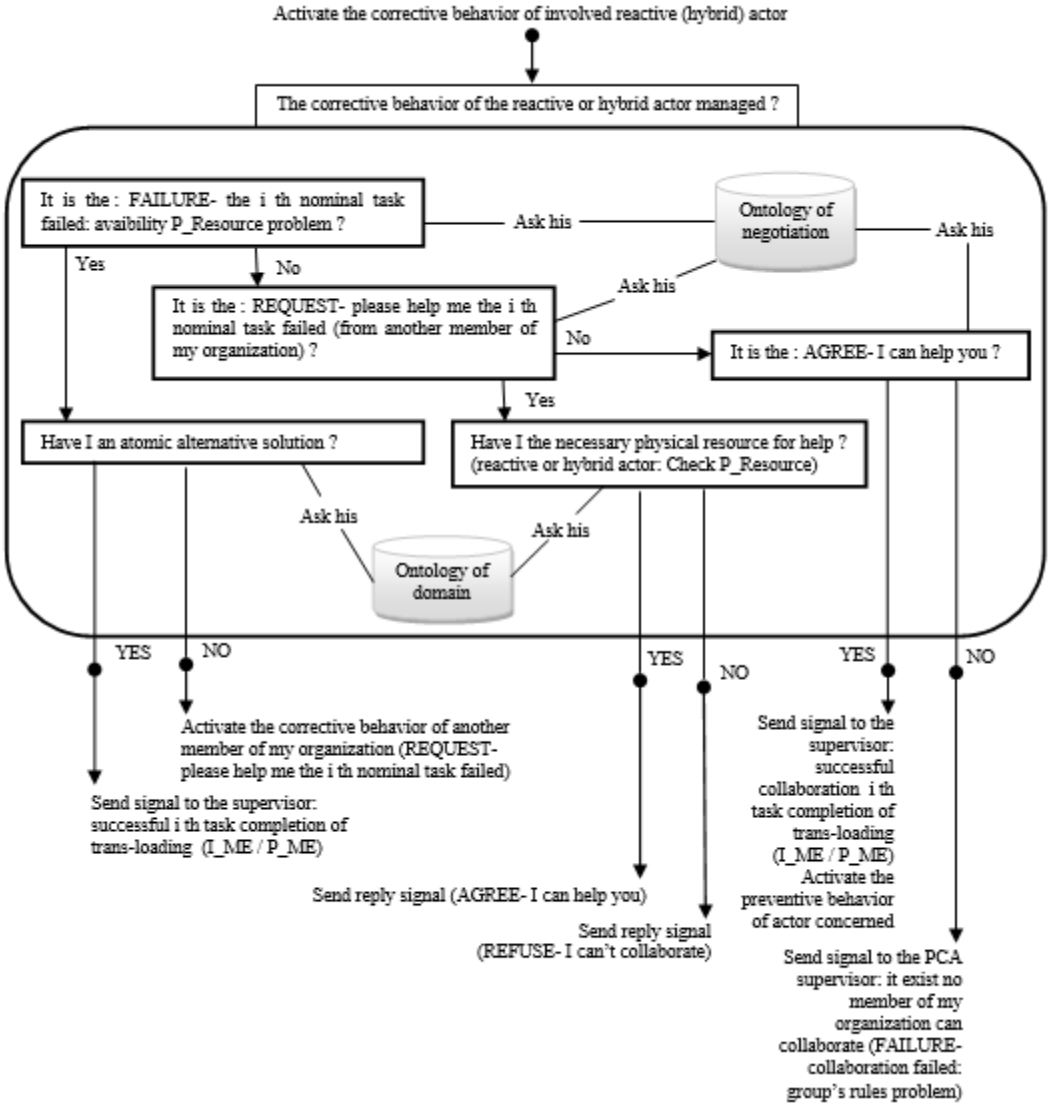


Fig.4.11: Le protocole d'interaction du comportement correctif des acteurs réactifs.

- *Le comportement correctif de l'acteur cognitif*

➢ Si le *PCA* reçoit un message (*échec de collaboration*) du « *Execution system* », il vérifie si le problème a d'impact sur la ***performance des instructions*** (*Instruction* / *Indicator*) en consultant l'***ontologie de connaissance*** qui englobe, pour chaque agent cognitif, la connaissance au sujet des tâches affectées et les indicateurs qui contrôlent leur performance. Alors le *PCA* concerné cherche la solution en proposant un plan d'action au système d'exécution (*collaboration réussite*). Ce qui va activer le comportement préventif des acteurs qui peuvent être concernés par la complication rencontrée (*cf. section 4.4.4.3*) ;

- Sinon, en cas d'une déviation des indicateurs et une solution ne peut être trouvée, le *PCA* concerné envoie un message de sollicitation d'aide des membres du « *Planning and control system* » (*échec de coordination*) ;

- En cas d'échec de coordination, le « *Planning and control system* » vérifie si le problème a d'impact sur la ***performance des contraintes*** (*Constraint* / *Indicator*) en consultant l'ontologie de connaissance. Si une solution est trouvée (*coordination réussite*), le comportement préventif des acteurs qui peuvent être concernés par la complication rencontrée, est activé (*cf. section 4.4.4.3*) ;

- Sinon, en cas d'une déviation des indicateurs et une solution ne peut être trouvée, un message de sollicitation d'aide des membres du « *Border management system* », est envoyé (*échec de coopération*) ;

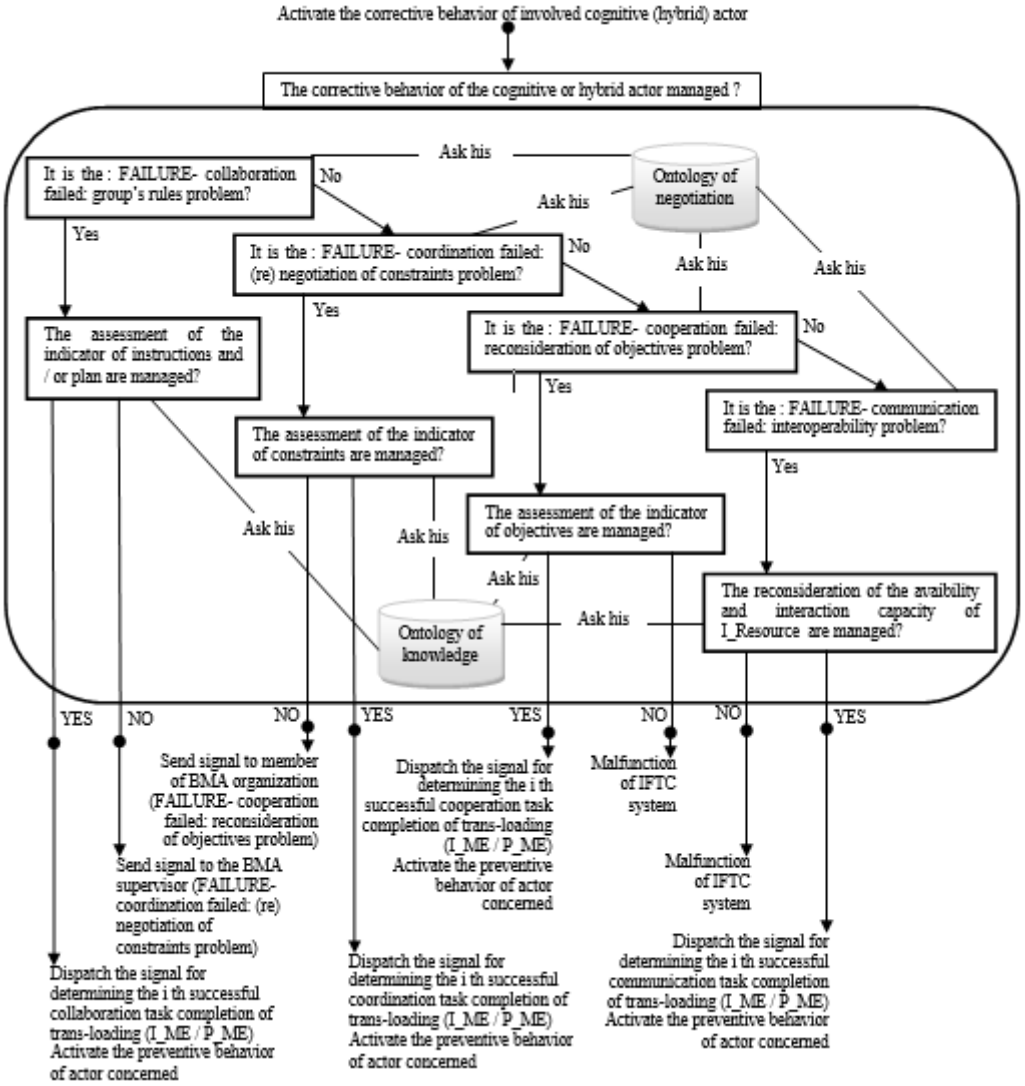


Fig.4.12: Le protocole d'interaction du comportement correctif des acteurs cognitifs.

- En cas d'échec de coopération, le « *Border management system* » vérifie si le problème a d'impact sur la ***performance des objectifs*** (*Objective* / *Indicator*) en consultant l'ontologie de connaissance. Si une solution est trouvée (*coopération réussite*), le comportement préventif des acteurs qui peuvent être concernés par la complication rencontrée, est activé (*cf. section 4.4.4.3*) ;

- Sinon, en cas d'une déviation des indicateurs et une solution ne peut être trouvée, ceci va entrainer le ***disfonctionnement de tout le système*** (*IFTC*). Ce disfonctionnement peut être aussi causé si les *I_Resource* sont indisponibles (*échec de communication*).

4.4.4.3. Le comportement préventif des acteurs impliqués

A la fin de chaque comportement correctif (*cf. section 4.4.4.2*):

- Si la ***déviation est habituelle***, l'acteur concerné effectue la maintenance corrective selon la complication rencontrée et envoie par la suite les mesures à son superviseur afin qu'ils puissent mettre à jour ses connaissances;

- Si la ***déviation n'a jamais survenue***, l'acteur transfère les mesures au « *Planning and control system* » par le biais de son superviseur qui les diffuse au niveau du système. Les *PCA* mettent à jour leurs connaissances puis analysent la situation par rapport à leurs critères (*Indicator* / *Belief*).

4.4.5. Le méta-modèle d'implémentation

Après avoir identifié le comportement dynamique des concepts du méta-modèle agentifié en intégrant le protocole d'interaction (*cf. section 4.4.4*). Nous allons raffiner ces concepts en mettant l'accent sur les principaux attributs et méthodes qui leur permettent d'assurer leurs rôles. Cette section permet donc la description du passage de la phase de modélisation à la phase d'implémentation. Cette dernière phase est composée de deux étapes essentielles : *1)* la première étant la conception d'un méta-modèle d'implémentation (*cf. section 4.4.5*). Les tableaux suivants (*Tab.4.3, Tab.4.4, Tab.4.5, Tab.4.6, Tab.4.7, Tab.4.8, Tab.4.9, Tab.4.10, Tab.4.11, Tab.4.12, Tab.4.13, Tab.4.14, Tab.4.15, Tab.4.16, Tab.4.17, Tab.4.18, Tab.4.19, Tab.4.20, Tab.4.21, Tab.4.22, Tab.4.23, Tab.4.24, Tab.4.25* et *Tab.4.26*) résument le méta-modèle raffiné qui fait l'objet du diagramme de classe (*Fig.4.13*) (*cf. Annexe 4)*. Chaque tableau fait l'objet du raffinement d'un concept du méta-modèle de domaine agentifié, pour

alléger les tableaux, nous ne faisons pas apparaitre les méthodes permettant d'accéder aux informations d'un objet ou l'objet lui-même et de le modifier (les méthodes *getter* et *setter*). ; *2)* La deuxième étape traduit le choix de la plate-forme d'implémentation (*cf. section 5.3*).

Le concept « IFTC »	
Attributs	
id_IFTC : *String*	L'identifiant de la chaine de transport intermodal de marchandises.
id_environment : *String*	L'identifiant de l'environnement global de l'« *IFTC* ».
list_PCA : *PCA*	Les identifiants des acteurs « *PCA* » qui participent à la coordination des activités de l'« *IFTC* ».
list_ACTOR : *Actor*	Les identifiants des acteurs qui forment l'« *IFTC* ».
Méthodes	
get	Méthode d'accès à un élément de la classe « *IFTC* ».
set	Méthode permettant d'ajouter un nouvel élément à la classe « *IFTC* ».
main	Méthode permettant le lancement de l'exécution du la chaine.

Tab.4.3 : Raffinement du concept « *IFTC* » pour l'implémentation.

Le concept « Actor »	
Attributs	
id_Actor : *String*	L'identifiant d'une organisation composante de l'« *IFTC* ».
list_objective : *Objective*	Les identifiants des objectifs de l'acteur.
list_indicator : *Indicator*	Les identifiants des indicateurs de l'acteur.
list_SocialAcquaintance : *Informational_environment*	Les identifiants des environnements informationnels de l'acteur.
list_ContractualAcquaintance : *Group_of_actors*	Les identifiants des « *Group_of_actors* » que forme l'acteur.
Méthodes	
Run	Méthode permettant l'activation du fonctionnement de l'acteur.
Analyze_Signal	Méthode permettant d'analyser un signal reçu par l'acteur.
Send_Signal	Méthode permettant d'envoyer un signal vers un destinataire.
Send_Reply_Signal	Méthode permettant de renvoyer un message à un émetteur.
Activate_Nominal_Behavior	Méthode d'activation du comportement nominal de l'acteur.
Activate_Corrective_Behavior	Méthode d'activation du comportement correctif de l'acteur.
Activate_Preventive_Behavior	Méthode d'activation du comportement préventif de l'acteur.

Tab.4.4 : Raffinement du concept « *Actor* » pour l'implémentation.

Le concept « Group_of_actors »	
Attributs	
id_GroupOfActors : *String*	L'identifiant d'un acteur abstrait de l'« *IFTC* » qui existe au travers leurs composants.
id_BorderManagementSystem : *String*	L'identifiant du système de la gestion du périmètre fonctionnel formant le « *Group_of_actors* ».
id_PlanningAndControlSystem : *String*	L'identifiant du système de la planification et le control formant le « *Group_of_actors* ».

id_ExecutionSystem : *String*	L'identifiant du système d'exécution formant le « *Group_of_actors* ».
list_Actor : *Actor*	Les identifiants des acteurs qui forment l'acteur abstrait.
list_PhysicalAcquaintance : *Physical_environmen_t*	Les identifiants des environnements physiques de l'acteur.

Tab.4.5 : Raffinement du concept « *Group_of_actors* » pour l'implémentation.

Le concept « Environment »	
Attributs	
id_Environment : *String*	L'identifiant de l'environnement global de l'« *IFTC* ».
list_PhysicalEnvironment : *Physical_environmen_t*	Les identifiants des environnements physiques qui forment l'environnement global.

Tab.4.6 : Raffinement du concept « *Environment* » pour l'implémentation.

Le concept « Atomic_actor »	
Attributs	
id_AtomicActor : *String*	L'identifiant d'un acteur de l'« *IFTC* » ayant une existence physique vu comme une entité atomique.
list_description : *String*	Description de l'entité atomique.

Tab.4.7 : Raffinement du concept « *Atomic_actor* » pour l'implémentation.

Le concept « Physical_environmen_t »	
Attributs	
id_PhysicalEnvironment : *String*	L'identifiant de l'environnement physique ayant une existence physique à travers le système opérationnel de l'« *IFTC* ».
list_PhysicalProcess : *Physical_process*	Les identifiants des processus physiques de l'environnement physique.
list_P_Resource : *P_Resource*	Les identifiants des ressources physiques nécessaires pour composer l'environnement physique.
list_P_ME : *P_ME*	Les identifiants des transformations « *P_ME* » effectuées dans l'environnement physique.
list_instruction : *Instruction*	Les identifiants des instructions qui cadrent les activités qui composent l'environnement physique.
list_GroupOfActors : *Group_of_actors*	Les identifiants des « *Group of actors* » que l'environnement physique modélise leur périmètre d'influence.

Tab.4.8 : Raffinement du concept « *Physical_environmen_t* » pour l'implémentation.

Le concept « Informational_environment »	
Attributs	
id_InformationalEnvironment : *String*	L'identifiant de l'environnement informationnel ayant une existence virtuelle à travers le système informationnel de l'« *IFTC* ».
list_actor : *Actor*	Les identifiants des acteurs formant l'environnement informationnel.

list_Knowledges : *Knowledge_s*	Les identifiants des informations que doit avoir l'environnement informationnel.
list_I_Resource : *I_Resource*	Les identifiants des ressources informationnelles qui composent l'environnement informationnel.
list_I_ME : *I_ME*	Les identifiants des informations circulant dans l'environnement informationnel.

Tab.4.9 : Raffinement du concept « *Informational_environment*» pour l'implémentation.

Le concept « P_Resource »	
Attributs	
id_P_Resource : *String*	L'identifiant de la ressource physique.
id_Physical_Environment : *String*	L'identifiant de l'environnement physique composé de la ressource physique.
id_Physical_process : *String*	L'identifiant du processus physique au sein duquel la ressource physique est activée.
Lib_P_Resource : *String*	Libellé de la ressource physique.
Capacity : *Integer*	Capacité de la ressource physique.
Disponibility : *Boolean*	Disponibilité de la ressource physique : s'elle peut prendre en charge le « *P_ME* ».
Speed_Coefficient : *Integer*	Rapidité de la ressource physique à transformer « *P_ME* ».

Tab.4.10 : Raffinement du concept « *P_Resource*» pour l'implémentation.

Le concept « P_ME »	
Attributs	
id_P_ME : *String*	L'identifiant du conteneur.
id_Physical_environment : *String*	L'identifiant de l'environnement physique ou circule le conteneur à un instant donné.
Lib_P_ME : *String*	Libellé de « *P_ME* ».
State : *Boolean*	Etat du « *P_ME* ».

Tab.4.11 : Raffinement du concept « *P_ME*» pour l'implémentation.

Le concept « I_Resource »	
Attributs	
id_I_Resource : *String*	L'identifiant de la ressource informationnelle.
id_Informational_Environment : *String*	L'identifiant de l'environnement informationnel composé de la ressource informationnelle.
Lib_I_Resource : *String*	Libellé de la ressource informationnelle.
Interaction_Capacity : *String*	Capacité de la ressource informationnelle du traitement de l'information (*Information Processing Capacity*).
Disponibility : *Boolean*	Disponibilité de la ressource informationnelle : s'elle peut prendre en charge l'« *I_ME* ».

Tab.4.12 : Raffinement du concept « *I_Resource*» pour l'implémentation.

Le concept « I_ME »
Attributs

id_I_ME : *String*	L'identifiant de l'information.
id_Informational_environment : *String*	L'identifiant de l'environnement informationnel ou circule l'information à un instant donné.
Lib_I_ME : *String*	Libellé du « *I_ME* ».
State : *Boolean*	Etat du « *I_ME* ».

Tab.4.13 : Raffinement du concept « *I_ME*» pour l'implémentation.

Le concept « Physical_process »	
Attributs	
id_PhysicalProcess : *String*	L'identifiant du processus physique.
id_EA : *String*	L'identifiant de l'acteur qui exécute le processus physique.
list_P_resource : *P_resource*	Liste contenant les identifiants des ressources physiques nécessaires.
id_P_Me : *String*	L'identifiant du conteneur à prendre en compte.
Méthodes	
Activate_P_Resource	Méthode permettant d'activer une ressource physique.

Tab.4.14 : Raffinement du concept « *Physical_process*» pour l'implémentation.

Le concept « Execution_system »	
Attributs	
id_ExecutionSystem : *String*	L'identifiant du système d'exécution.
list_ExecutionActor : *String*	Liste contenant les identifiants des acteurs « *EA* » composant le système d'exécution.
Méthodes	
Run_ExecutionActor	Méthode permettant d'activer le comportement d'un « *EA* ».

Tab.4.15 : Raffinement du concept « *Execution_system*» pour l'implémentation.

Le concept « Planning_and_control_system »	
Attributs	
id_PlanningAndControlSystem : *String*	L'identifiant du système de la planification et le control.
list_PlanningAndControlActor : *String*	Liste contenant les identifiants des acteurs « *PCA* » composant le système de la planification et le control.
Méthodes	
Run_PlanningControlActor	Méthode permettant d'activer le comportement d'un « *PCA* ».

Tab.4.16 : Raffinement du concept « *Planning_and_control_system*» pour l'implémentation.

Le concept « Border_management_system »	
Attributs	
id_BorderManagementSystem : *String*	L'identifiant du système de la gestion de périmètre fonctionnel.
list_BorderManagementActor : *String*	Liste contenant les identifiants des acteurs « *BMA* » composant le système de la gestion du périmètre fonctionnel.
Méthodes	
Run_BorderManagementActor	Méthode permettant d'activer le comportement d'un « *BMA* ».

Tab.4.17 : Raffinement du concept « *Border_management_system*» pour l'implémentation.

Le concept « EA »	
Attributs	
id_ExecutionActor : *String*	L'identifiant de l'acteur « *EA* ».
id_OrganizationalKnowledge : *String*	L'identifiant des informations que doit avoir l'acteur.
id_ES : *String*	L'identifiant du système d'exécution contenant l'acteur.
list_Physical_Process : *Physical_process*	Liste contenant les identifiants des processus physiques à exécuter par l'acteur « *EA* ».
Méthodes	
PResource_check	Méthode de vérification de la disponibilité de *P_Resource.*

Tab.4.18 : Raffinement du concept « *EA*» pour l'implémentation.

Le concept « PCA »	
Attributs	
id_PlanningAndControlActor : *String*	L'identifiant de l'acteur « *PCA* ».
id__IFTC : *String*	L'identifiant de l'« *IFTC* » coordonné par l'acteur.
id_PACS : *String*	L'identifiant du système de la planification et le control contenant l'acteur.
id__Knowledges : *Knowledge_s*	L'identifiant des informations que doit avoir l'acteur.
list_Instruction : *Instruction*	Liste contenant les instructions de l'acteur « *PCA* ».
list_Constraint : *Constraint*	Liste contenant les contraintes de l'acteur « *PCA* ».
Méthodes	
IResource_check	Méthode permettant la vérification de la disponibilité d'une ressource informationnelle.
Update_Instruction	Méthode de mise à jour des instructions.
Update_Constraint	Méthode de mise à jour des contraintes.
Think	Algorithme du raisonnement du « *PCA* ».

Tab.4.19 : Raffinement du concept « *PCA*» pour l'implémentation.

Le concept « BMA »	
Attributs	
id_BorderManagementActor : *String*	L'identifiant de l'acteur « *BMA* ».
id_BMS : *String*	L'identifiant du système de la gestion du périmètre fonctionnel contenant l'acteur.
list_Objective : *Objective*	Liste contenant les objectifs de l'acteur « *BMA* ».
Méthodes	
Update_Objective	Méthode de mise à jour des objectifs.

Tab.4.20 : Raffinement du concept « *BMA*» pour l'implémentation.

Le concept « Knowledge_s »	
Attributs	
id_Knowledges : *String*	L'identifiant des informations que doit avoir les acteurs « *PCA* ».
id_I_resource : *I_Resource*	L'identifiant de la ressource informationnelle nécessaire.
id_I_Me : *String*	L'identifiant de l'information à prendre en compte.
list__PCA : *String*	Liste contenant les identifiants des acteurs « *PCA* » ayant droit d'avoir accès aux informations.

Tab.4.21 : Raffinement du concept « *Knowledge_s*» pour l'implémentation.

Le concept « Organizational_knowledge »	
Attributs	
id_Organizational_Knowledge : *String*	L'identifiant des informations que doit avoir les acteurs « *EA* ».
list_Execution_Actor : *String*	Liste contenant les identifiants des « *EA* » qui ont droit d'avoir accès aux informations.

Tab.4.22 : Raffinement du concept « *Organizational_knowledge* » pour l'implémentation.

Le concept « Constraint »	
Attributs	
id_Constraint : *String*	L'identifiant de la contrainte
Lib_Constraint : *String*	Libellé de la contrainte.
Value : *Float*	La valeur de la contrainte.

Tab.4.23 : Raffinement du concept « *Constraint* » pour l'implémentation.

Le concept « Instruction »	
Attributs	
id_Instruction : *Integer*	L'identifiant de l'instruction.
id_PlanningAndControl_Actor : *String*	L'identifiant de l'acteur « *PCA* » qui cadre l'instruction.
id_Physical_environment : *String*	L'identifiant de l'environnement physique contenant l'activité cadré par l'instruction.
Lib_Instruction : *String*	Libellé de l'instruction.
Indicator : *Integer*	L'identifiant de l'indicateur de l'instruction.

Tab.4.24 : Raffinement du concept « *Instruction* » pour l'implémentation.

Le concept « Objective »	
Attributs	
id_Objective : *Integer*	L'identifiant de l'objective.
id__PCA : *String*	L'identifiant de l'acteur « *PCA* » qui vise l'objective.
Lib_Objective : *String*	Libellé de l'objectif.
Value_Min : *Float*	La valeur minimum de l'objectif.
Value_Max : *Float*	La valeur maximum de l'objectif.

Tab.4.25 : Raffinement du concept « *Objective* » pour l'implémentation.

Le concept « Indicator »	
Attributs	
id_Indicator : *Integer*	L'identifiant de l'indicateur.
id_ACTOR : *String*	L'identifiant de l'acteur qui utilise la déviation de l'indicateur.
Lib_Indicator : *String*	Libellé de l'indicateur.
Min_Step : *Float*	La mesure minimum de l'indicateur.
Max_Step : *Float*	La mesure maximum de l'indicateur.
Calcul_Method : *String*	La méthode de calcul de la valeur de l'indicateur.

Tab.4.26 : Raffinement du concept « *Indicator* » pour l'implémentation.

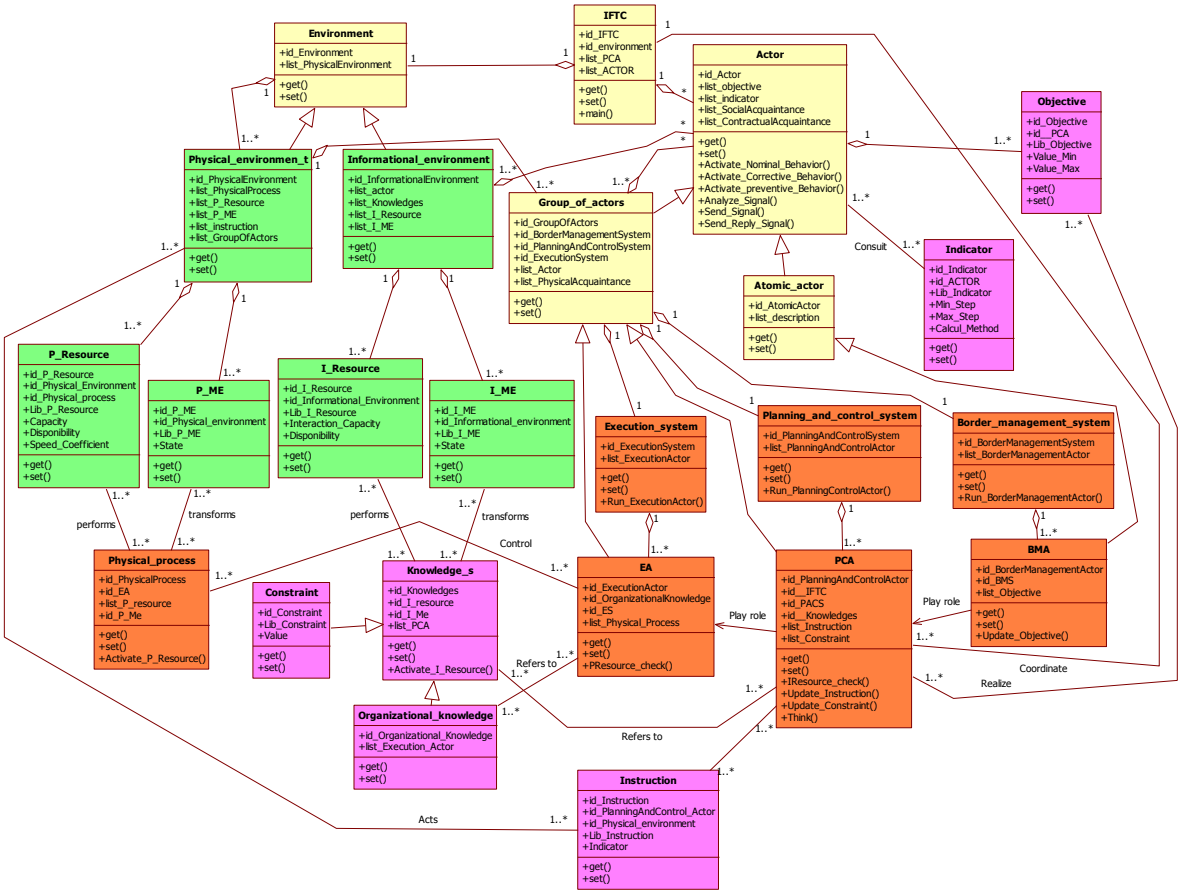


Fig.4.13: Le méta-modèle d'implémentation.

4.5. Synthèse du chapitre 4

C'est sur l'axe de la modélisation de la chaine de transport intermodal de marchandises (service porte à porte) que nous positionnons le ***cœur de notre contribution dans nos travaux de recherche***. Cet axe suppose la conceptualisation d'une structure de contrôle capable d'une part d'apporter de nombreux avantages en termes d'intégration des déterminants de la performance et d'autre part de respecter l'aspect de la structure générique de la chaine de transport intermodal (*cf. Chapitre 3*). Dans cette perspective, nous avons exploité toutes les différentes visions traitées dans la conceptualisation afin de mettre en place la méthodologie adoptée « *ArchMDE* ». Nous pouvons dire que le formalisme des résultats obtenus suite à l'application de cette méthodologie, avec le langage *UML*, nous a permis de générer les premiers artefacts qui sont : le méta-modèle du domaine, le méta-modèle multi-agent, le méta-modèle du domaine agentifié, les protocoles d'interaction et le méta-modèle d'implémentation. Dans la suite de ce manuscrit, nous abordons une ***partie expérimentale de notre solution***.

Chapitre 5

CONTRIBUTION A LA SIMULATION POUR LA VALIDATION DES META-MODELES STATIQUES ET DYNAMIQUES DE LA CHAINE DE TRANSPORT INTERMODAL DE MARCHANDISES

Table des matières

5.1. Introduction

5.2. La génération d'un modèle à l'implémentation

5.3. Le choix de la plateforme d'implémentation

5.3.1. Les plateformes orientées agent

5.3.1.1. La plateforme Zeus

5.3.1.2. La plateforme MadKit

5.3.1.3. La plateforme AgentBuilder

5.3.1.4. La plateforme Jade

5.3.2. Etude comparative des plateformes agents

5.4. Simulation pour la validation des approches proposées

5.4.1. Création d'un agent de la plateforme

5.4.2. Création et envoi d'un message

5.4.3. La communication inter-agents

5.4.4. La validation des comportements dynamiques des agents

5.4.4.1. Le comportement nominal

5.4.4.2. Le comportement correctif

5.5. Synthèse du chapitre 5

5.1. Introduction

Après avoir positionné le cœur de notre contribution dans nos travaux de recherche sur l'axe de la modélisation de la chaine de transport intermodal de marchandises (service porte à porte) (*cf. Chapitre 4*). Nous avons généré les premiers artefacts qui sont : le *méta-modèle du domaine*, le *méta-modèle multi-agent*, le *méta-modèle du domaine agentifié*, les *protocoles d'interaction* et le *méta-modèle d'implémentation*. Ce ***cinquième chapitre*** de ce manuscrit se focalise sur la validation des artefacts de notre solution mis en place dans les phases précédentes. Il s'agit d'une vérification de la compatibilité de notre méta-modèle avec la réalité du terrain:

La ***deuxième section*** (*cf. section 5.2*) exploite l'étude sur le terrain de cas du corridor de la vallée de Seine dans la région de la *Haute Normandie* (précisément *Le Havre*) établie préalablement (*cf. section 3.2*) afin de générer un modèle nécessaire à l'implémentation de notre cas industriel en établissant une correspondance entre ses éléments clés et les concepts du domaine. Par la suite, elle élabore une instanciation du méta-modèle d'implémentation afin d'aboutir à un modèle prêt d'être implémenté dans une plateforme de programmation.

Dans la ***troisième section*** (*cf. section 5.3*), nous nous proposons une étude de différents outils d'environnements de développement orientés-agents. La justification de notre choix de l'outil d'implémentation *Jade* repose sur les travaux de *Garneau* et *Delisle* en *2002* [*Garneau et Delisle, 2002*] qui se base sur un ensemble de critères déterminés à partir des caractéristiques jugées importantes pour les environnements de développement de systèmes multi-agents. La plateforme *Jade* répond parfaitement à nos attentes.

Tout au long de la ***quatrième section*** (*cf. section 5.4*), nous avons implémenté les structures et les comportements des agents sur la plateforme *Jade*. L'outil graphique « *Sniffer* » nous a permis de visualiser la communication inter-agent et d'afficher le contenu de chaque message échangé. Une fois notre modélisation a été couplée à la simulation, le mécanisme obtenu reflète le comportement du système réel.

Enfin, une synthèse qui positionne nos travaux de recherche sera proposée dans la ***cinquième section*** (*cf. section 5.5*).

5.2. La génération d'un modèle à l'implémentation

La mise en place des éléments clés du cas industriel étudié dans le cadre de nos travaux (***le corridor de la vallée de Seine***), est une tâche préalablement établie. En effet, nous avons présenté dans le troisième chapitre de ce manuscrit, d'une façon non exhaustive, les atouts (*infrastructures, pôles de compétitivité, parcs éoliens*, etc.) que regorge ce corridor (*cf. section 3.2.2.4*). Dans cette section, nous cherchons à vérifier la compatibilité de notre méta-modèle d'implémentation (*cf. section 4.4.5*) avec la réalité du terrain. L'étude sur le terrain de cas du corridor de la vallée de Seine dans la région de la *Haute Normandie* (précisément *Le Havre*) (*cf. section 3.2*) nous a permis de dégager la structure de ce réseau, les processus gérés par ce corridor, le sens de la circulation des flux et la récolte des données qui circulent entre les différents acteurs. A base de cette étude, nous avons généré un modèle nécessaire à l'implémentation de notre cas industriel en établissant une correspondance entre ses éléments clés et les concepts du domaine (*Tab.5.1*). Par la suite, nous avons instancié le méta-modèle d'implémentation afin d'aboutir à un modèle prêt d'être implémenté dans une plateforme de programmation (*Fig.5.1*).

Concept du domaine	**Concept du cas industriel**
Group of actors	***Seine_Valley_Corridor***
Physical environment	***PE_HavrePort***
Informational environment	***IE_AP+***
P_Resource	***Quay_Crane***
I_Resource	***SI_TerminalOperator_Import***
Execution system	***SV_Import_ES ; SV_Export_ES***
Planning and control system	***SV_Corridor_PCS***
Border management system	***SV_Corridor_BMS***
Physical process	***PPi_Unloading and supported the container and reception observation***
EA	***EA1_Customs_Import ; EA2_ForwardingAgent_Import; EA3_PortAuthority_Import; EA4_SeaCarrier_Import; EA5_TerminalOperator_Import; EA6_Transport_Import; EA1_Customs_Export; EA2_ForwardingAgent_Export; EA3_PortAuthority_Export; EA4_SeaCarrier_Export; EA5_TerminalOperator_Export; EA6_Transport_Export***

PCA	***SV_Export_Corridor ; SV_Import_Corridor***
BMA	***Consignor_Export ; DistributionCenter_Import ; FreightForwarder***
Constraint	***Constraint_i***
Knowledge_s	***BMA1_Knowledge_Ontology ; PCA1_Knowledge_Ontology***
Organizational knowledges	***EA5_Domain_Ontology***
Instruction	***Plan_Instruction_i***
Objective	***Objective_i***
Indicator	***Indicators***

Tab.5.1 : Tableau de correspondance entre les concepts du domaine et les concepts du cas industriel.

Dans le tableau ci-dessus (*Tab.5.1*), nous avons défini à titre d'exemple quelques éléments clés qui composent notre modèle d'implémentation :

- Le concept du domaine « ***Group of actors*** » a comme instance le concept « ***Seine_Valley_Corridor*** ». Il s'agit du groupe des acteurs formant le corridor de la vallée de Seine. En réalité, nous avons dû considérer au moins deux corridors en rajoutant par exemple « ***Trans_Texas_Corridor*** » en se référant au corridor Trans-Texas des états unis. Un corridor qui exporte les marchandises et l'autre les importe. A cause de l'indisponibilité des données suffisantes, nous nous sommes contentés du *corridor de la vallée de Seine* en le considérant tantôt le corridor d'importation et tantôt le corridor d'exportation afin de pouvoir mener à terme la simulation de son comportement au sein d'une chaine du transport intermodal;

- C'est à base de ces deux fonctions du « ***Seine_Valley_Corridor*** » (*import* / *export*) que le concept du domaine « ***Execution system*** » va avoir deux instances : « ***SV_Import_ES*** » (**S**eine **V**alley **Import** **E**xecution **S**ystem) et « ***SV_Export_ES*** » (**S**eine **V**alley **Export** **E**xecution **S**ystem). Le concept d'acteur exécutif « ***EA*** » dans le cas du « ***SV_Import_ES*** » et du « ***SV_Export_ES*** » ont pour instances respectivement les concepts suivants :

  - ✓ « ***EA1_Customs_Import*** » (**E**xecution **A**ctor **1** : **Customs Import**); « ***EA1_Customs_Export*** » (**E**xecution **A**ctor **1** : **Customs Export**);

- ✓ « ***EA2_ForwardingAgent_Import***» (**E**xecution **A**ctor **2** : **Frowarding Agent Import**); « ***EA2_ForwardingAgent_Export***» (**E**xecution **A**ctor **2** : **Frowarding Agent Export**);
- ✓ « ***EA3_PortAuthority_Import*** » (**E**xecution **A**ctor **3** : **Port Authority Import**); « ***EA3_PortAuthority_Export***» (**E**xecution **A**ctor **3** : **Port Authority Export**);
- ✓ « ***EA4_SeaCarrier_Import*** » (**E**xecution **A**ctor **4** : **Sea Carrier Import**); « ***EA4_SeaCarrier_Export***» (**E**xecution **A**ctor **4** : **Sea Carrier Export**);
- ✓ « ***EA5_TerminalOperator_Import*** » (**E**xecution **A**ctor **5** : **Terminal Operator Import**);« ***EA5_TerminalOperator_Export***» (**E**xecution **A**ctor **5** : **Terminal Operator Export**);
- ✓ « ***EA6_Transport_Import*** » (**E**xecution **A**ctor **6** : **Transport Import**); « ***EA6_Transport_Export***» (**E**xecution **A**ctor **6** : **Transport Export**);

- Alors que l'instance du concept « ***Planning and control system*** » et l'instance du concept « ***Border management system*** » sont respectivement : « ***SV_Corridor_PCS*** » (**S**eine **V**alley **Corridor P**lanning and **C**ontrol **S**ystem) et « ***SV_Corridor_BMS***» (**S**eine **V**alley **Corridor B**order **M**anagement **S**ystem). Le concept d'acteur « ***BMA*** » a comme instance les concepts suivants : « ***Consignor_Export*** » ; « ***DistributionCenter_Import*** »; et « ***FreightForwarder*** ». Nous supposons que l'expéditeur et le centre de distribution sont sur les pieds du port du *Havre*. D'autre part, le méta-modèle d'implémentation permet à un acteur « ***BMA*** » de jouer le rôle d'un acteur « ***PCA*** », ça sera dans notre étude, le cas du commissionnaire du transport. La raison pour laquelle le concept d'acteur « ***PCA*** » n'a comme instance que les deux concepts suivant sans intégrer le « ***FreightForwarder*** » : « ***SV_Export_Corridor*** » et « ***SV_Import_Corridor*** » ;

- L'environnement du « ***Seine_Valley_Corridor*** » peut être constitué de plusieurs environnements physiques selon les décompositions voulues (par région, per terminal, etc.). Dans notre cas d'étude, nous choisissons que l'instance de «***Physical environment*** » soit le concept «***PE_HavrePort***» (**P**hysical **E**nvironment **Havre Port**). Il s'agit d'une décomposition par *nœud intermodal* et pour ne pas encombrer la simulation nous avions la possibilité de considérer tous les nœuds intermodaux existants sur l'*axe Seine* comme par exemple Le port de *Rouen* «***PE_RouenPort***». Alors que le concept « ***Informational environment*** » est instancié par « ***IE_AP+*** » (**I**nformational **E**nvironment **AP+**);

- An niveau de la simulation (*cf. section 5.4*), nous avons considéré *14* processus physiques. En effet, dans le cadre de notre problématique, nous nous focalisons sur les processus physiques liés à la « ***rupture de charge*** » en prenant en considération *7* ruptures tout au long de la chaine de transport intermodal (*cf. section 3.2.3*). Chaque rupture de charge est modélisée par deux processus physiques (*loading* / *unloading*), ce qui fait un total de *14* processus physiques. Dans l'objectif de ne pas encombrer le schéma de l'instanciation du méta-modèle d'implémentation (*Fig.5.1*), nous avons pris à titre d'exemple une seule instance du concept « ***Physical process*** », celle de « ***PPi_Unloading and supported the container and reception observation*** » (the **i** th **P**hysical **P**rocess). L'acteur exécutif chargé de la réalisation de cette tâche est l'opérateur du terminal d'importation, la raison pour laquelle l'instance de « ***I_Resource*** » est son système informationnel « ***SI_TerminalOperator_Import*** » et l'instance de « ***P_Resource*** » est l'un de ses équipements utilisé pour la réalisation de cette tâche, par exemple une grue à quai «***Quay_Crane*** » ;

- L'implémentation du comportement nominal des acteurs est basée sur la cartographie des principaux flux d'import et d'export présentée dans le troisième chapitre (*cf. section 3.2.4*). Les données nécessaires à chaque acteur « ***Organizational knowledges*** » pour mener à terme son comportement nominal a pour instance son ontologie de domaine « ***EA5_Domain_Ontology*** » (**E**xecution **A**ctor **5**) ce qui respecte les notions définies par le protocole d'interaction dans le quatrième chapitre (*cf. section 4.4.4*). Ainsi pour chaque comportement correctif les superviseurs cognitifs vont disposer des ontologies de connaissances, dans l'exemple présenté dans le modèle d'implémentation : « ***BMA1_Knowledge_Ontology*** » et « ***PCA1_Knowledge_Ontology*** » instanciées par le concept « ***Knowledge_s*** ». Afin de bien mener les comportements correctifs et préventifs, les superviseurs se basent sur : les contraintes « ***Constraint_i*** » (instance de « ***Constraint*** ») ; les instructions « ***Plan_Instruction_i*** » (instance de « ***Instruction*** ») et les objectifs « ***Objective_i*** » (instance de « ***Objective*** ») pour supporter les aléas de la tâche ***i***, et ce n'est qu'à la base de leurs indicateurs « ***Indicators*** » (instance de « ***Indicator*** ») que l'ensemble des décisions sont prises.

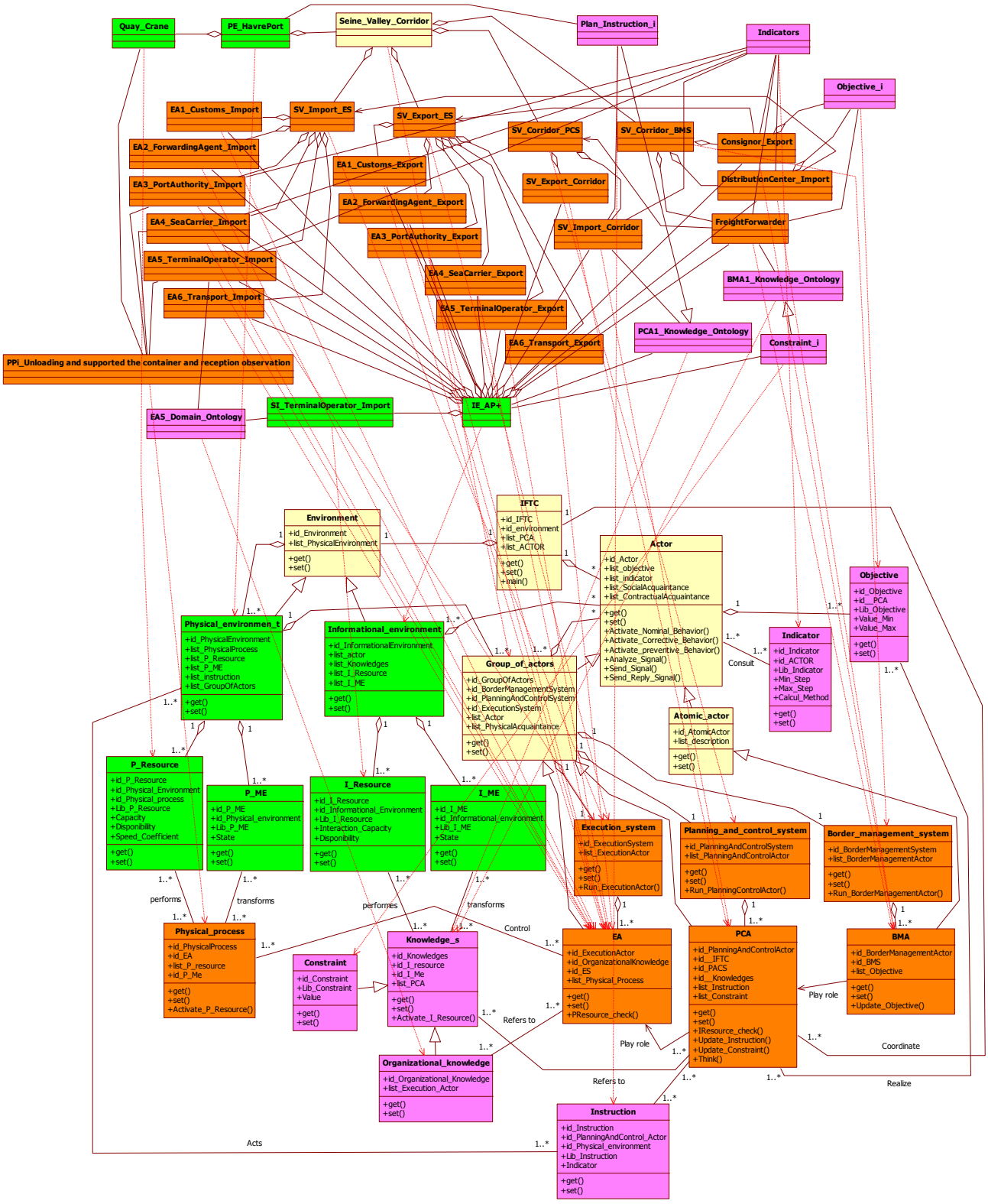


Fig.5.1: Instanciation du méta-modèle d'implémentation.

5.3. Le choix de la plateforme d'implémentation

5.3.1. Les plateformes orientées agent

5.3.1.1. La plateforme Zeus

Zeus est un environnement complet qui utilise une méthodologie appelée « ***role modeling*** » pour le développement de systèmes collaboratifs. En effet, cette plateforme est développée par l'*Agent Research Programm* du *British Telecom Intelligent System Research Laboratory*, qui permet la construction rapide d'application à base d'agents collaboratifs [*Collis et al., 1998*]. Un agent dans *Zeus* est constitué en trois couches [*Garneau et Delisle, 2002*]: *1)* la ***couche de définition*** permet la définition où l'agent est vu comme une entité autonome capable de raisonner en termes de ses croyances, ses ressources et de ses préférences; *2)* la ***couche organisationnelle*** permet la détermination des relations entre les agents. Elle contient la base de connaissance et les accointances de l'agent; et *3)* la ***couche de coordination*** permet la décision des modes de communication entre les agents, protocoles, coordination et autres mécanismes d'interactions.

La construction d'agents dans *Zeus* se base sur quatre phases, qui seraient [*Azaiez, 2007*] : *1)* L'***analyse du domaine*** consiste à modéliser des rôles. A ce stade aucun outil logiciel n'est fourni et le langage *UML* est utilisé ; *2)* La ***conception*** consiste à spécifier des buts et des tâches qui permettent de les réaliser. Cette spécification se fait par le langage naturel et n'est supportée par aucun outil ; *3)* Le ***développement*** est réalisée en quatre étapes, qui seraient: « *création de l'ontologie*, *création des agents*, *configuration de l'agent utilitaire*, *configuration de l'agent tâche* et *implémentation des agents* ». Des outils supportant des notations graphiques sont fournies afin d'aider à l'élaboration de ces étapes ; et *4)* Le ***déploiement*** : dans cette phase, le système multi-agents est lancé. Un outil de visualisation permet le suivi de l'exécution. Cet outil permet de visualiser l'organisation, les interactions ayant lieu dans la société d'agents, la décomposition des tâches et l'état interne des agents.

L'environnement de développement d'agents est fourni par *Zeus* grâce à des bibliothèques *Java* qu'on peut réutiliser pour créer leurs agents [*Azaiez, 2007*]. Le développement de *SMA* avec *Zeus* est cependant conditionnel à l'utilisation de l'approche « *role modeling* ». L'outil est assez complexe et sa maîtrise nécessite beaucoup de temps.

5.3.1.2. La plateforme MadKit

La plateforme ***MadKit*** (*Multi-Agent Developpement Kit*), conçue par *Ferber* et *Gutknecht* en *1997*, est fondée sur les concepts de base d'*Aalaadan* [*Ferber et Gutknecht, 1997*]: *AGR* (*Agent, Groupe, Role*). Cette plateforme fournit un éditeur permettant le déploiement et la gestion des *SMA* (*G-box*). La gestion faite via cet éditeur offre plusieurs possibilités intéressantes. L'outil offre aussi un utilitaire pour effectuer des simulations [*Garneau et Delisle, 2002*]. En effet, *MadKit* fournit une *API* permettant la construction d'agent en spécialisant une classe d'agent abstraite. Les agents sont lancés par le noyau de *MadKit*, qui propose notamment les services de gestion des groupes et de communication. L'échange des messages se fait à travers le rôle que l'agent est en train de jouer.

5.3.1.3. La plateforme AgentBuilder

La plateforme *AgentBuilder* est un environnement de développement complet. Une modélisation orientée-objet avec *OMT* constitue la base de la conception des systèmes à laquelle on ajoute une partie « *ontologie* ». L'élaboration du comportement des agents se fait à partir du modèle *BDI* (*Belief, Desire, Intention*) et du langage *AGENT-0*. *KQML* est utilisé comme langage de communication entre les agents [*Garneau et Delisle, 2002*]. *AgentBuilder* est un outil complexe qui demande des efforts d'apprentissage importants et de bonnes connaissances dans le domaine des systèmes multi-agents pour être utilisé de façon performante. Il est limité au niveau de l'extensibilité, du déploiement et de la réutilisabilité.

5.3.1.4. La plateforme Jade

Jade (*Java Agent DEveloppement framework*) [*Bellifemine et al., 1999*], est une plateforme qui permet la développement et l'exécution des applications distribuées basées sur le concept d'agents et d'agents mobiles. Cette plateforme est la plus utilisée par la communauté scientifique des systèmes multi-agents [*Azaiez, 2007*]. *Jade* est un outil qui répond aux normes *FIPA97*. Aucune méthodologie n'est spécifiée pour le développement mais plusieurs méthodologies génèrent des codes compatibles avec la plateforme *Jade*, telles que *GAIA*, *PASSI*, *INGENIAS*, etc. Cette plateforme fournit des classes qui implémentent « *JESS* » pour la définition du comportement des agents. L'outil possède trois modules principaux [*Garneau et Delisle, 2002*]: *1)* le *DF* «*Director Facilitor* » fournit un service de pages jaunes à la plateforme ; *2)* le *ACC* « *Agent Communication Chanel* » gère la communication entre les agents ; et *3)* le *AMS* « *Agent Management System* » supervise l'enregistrement des agents, leur

authentification, leur accès et utilisation du système. Les agents communiquent par le langage *FIPA-ACL*. Un éditeur est disponible pour l'enregistrement et la gestion des agents.

5.3.2. Etude comparative des plateformes agents

Les plateformes orientées agents présentées dans la section précédente (*cf. section 5.3.1*) sont proches de notre objectif de simulation du comportement de la chaine intermodal de marchandises. Dans cette section, nous justifions le choix de l'outil d'implémentation des concepts préalablement conçus (*cf. Chapitre 4*). Cette justification repose sur les travaux de *Garneau* et *Delisle* en *2002* [*Garneau et Delisle, 2002*] en matière d'évaluation comparative d'outils et environnements orientées agent en poursuivant, dans une perspective complémentaire, les travaux de recherche de *Sabas* en *2001* [*Sabas, 2001*].

Cette évaluation se base sur un ensemble de critères déterminés à partir des caractéristiques jugées importantes pour les environnements de développement de systèmes multi-agents. Selon *Garneau* et *Delisle*, les objectifs essentiels d'un environnement de développement de *SMA* sont : *1)* Accélérer le développement et diminuer l'effort de programmation; *2)* Abstraire les mécanismes de communication, d'interaction et de coordination ; *3)* Permettre l'implémentation de systèmes relativement complexes ; *4)* Permettre une bonne extensibilité du code ; et *5)* Fournir un support pour le déploiement (et l'exécution) des systèmes. La description des quatorze critères d'évaluation considérés est comme suite [*Garneau et Delisle, 2002*]:

- ***La méthodologie liée à l'outil couvre les différentes étapes (1) –*** La méthodologie couvre les différentes étapes du développement. Comme la majorité des auteurs, *Garneau* et *Delisle* considèrent que le processus de développement des *SMA* se divise en quatre étapes : l'analyse, le développement, l'implémentation et l'exécution (déploiement) ;
- ***Facilité d'apprentissage de l'outil (2)*** – Ce critère est déterminé en fonction de : la qualité de la documentation, la complexité des composants et les concepts utilisés. Les connaissances préalables à son utilisation comme le langage de programmation, le langage de communication entre les agents, les protocoles d'interactions et autres sont aussi à prendre en considération ;
- ***Facilité de transition entre le développement et l'implémentation (3) –*** Facilité de passer du modèle à son implémentation. Plusieurs méthodologies développées sont très

intéressantes au niveau conceptuel, mais difficilement applicables, notamment en ce qui concerne l'implémentation ;

- ***Souplesse de l'outil (4)*** – Il s'agit de la flexibilité et la polyvalence de l'outil par rapport à l'utilisation de ses composants et de sa méthodologie.
- ***Communication inter-agents (5)*** – Le programmeur ne doit pas avoir à se préoccuper de l'implémentation des connections entre les différentes machines, des protocoles de communications, de la sécurité, de la synchronisation, des services de messagerie et autres. Ces services doivent donc être déjà implémentés ;
- ***Outils de « débuggage » (6)*** – Les erreurs de coordination et de synchronisme risquent de se glisser à l'intérieur des programmes. La découverte (et la correction) de ces erreurs peut s'avérer très difficile voire même impossible sans outils appropriés ;
- ***Support graphique pour le développement et l'implémentation (7)*** – L'environnement propose des interfaces graphiques facilitant et accélérant le développement et l'implémentation. Ces dernières peuvent servir à la création du modèle, la création des agents, l'élaboration de conversations, le déploiement des agents sur les différentes plateformes, etc. ;
- ***Support pour la gestion du SMA (8)*** – L'outil permet l'interaction avec le système. Il permet par exemple, d'ajouter, de modifier ou de supprimer dynamiquement des agents dans le système. L'intérêt de ce type de gestion n'est pas à négliger, elle peut être très utile pour l'étude du système au niveau de l'exécution, de la vérification et validation ;
- ***Diminution de l'effort demandé et Simplicité d'implémentation (9)*** – Plusieurs facteurs doivent être pris en considération. Un langage supportant bien la programmation orientée-objet, le « multithreads » et la programmation réseau procurent des avantages importants. Les composants doivent aussi être facilement identifiables (nom, packages, documentation, paramètres, etc.). De plus, les classes et les services disponibles doivent être faciles à utiliser. La diminution de l'effort demandé en termes de quantité de code à écrire, de complexité des composants à implémenter, de facilité d'utilisation des composants existants sont aussi des facteurs à prendre en considération ;
- ***Support pour les bases de données (10)*** – Il est intéressant d'abstraire le processus de la sauvegarde des données le plus possible et fournir des outils facilitant ceci;

- ***Génération automatique de code (11)*** – Si les spécifications du système sont possibles au niveau des interfaces, il est important de pouvoir générer le code source du système (au moins les squelettes) et de ses différents composants ;
- ***Extensibilité du code (12)*** – Les utilitaires fournis par les outils comme les modules, les agents prédéfinis ou le code généré doivent être facilement modifiables. Il faut aussi pouvoir ajouter facilement du code à celui existant ;
- ***Déploiement (13)*** – La possibilité de répartir le système sur plusieurs machines est un critère très important au niveau de l'exécution. L'outil doit aussi permettre une exécution simple du système. L'exécution doit être indépendante de l'environnement ;
- ***Documentation (14)*** – La documentation disponible est de qualité. Elle couvre l'ensemble des composants de l'outil. De plus, elle est claire, concise et non ambiguë.

Le barème choisi pour l'évaluation de ces critères est un nombre compris entre *0* et *4* qui est interprété comme suit : *1) 4* si l'outil répond très bien au critère ; *2) 3* si l'outil répond bien au critère ; *3) 2* si l'outil répond moyennement au critère ; *4) 1* si l'outil répond peu au critère ; et *5) 0* si l'outil ne répond pas du tout au critère. La grille décrite dans le tableau suivant (*Tab.5.2*), donne un extrait de la grille des résultats des outils présentée par *Garneau* et *Delisle* dans [*Garneau et Delisle, 2002*] pour les critères considérés dans l'implémentation appropriée à notre cas d'étude (*(4), (5), (8), (9), (12), (13)* et *(14)*).

Critères	*Jade*	*AgentBuilder*	*Zeus*	*Madkit*
Souplesse de l'outil **(4)**	3	1	1	3
Communication inter-agents **(5)**	4	4	4	3
Gestion du SMA **(8)**	4	3	3	4
Effort et simplicité **(9)**	2	2	2	1
Extensibilité du code **(12)**	4	1	2	3
Déploiement **(13)**	4	2	2	3
Documentation disponible **(14)**	3	4	4	3
Total (sur 30)	**24**	**17**	**18**	**20**

Tab.5.2 : Extrait de la grille des résultats pour les critères appropriés [*Garneau et Delisle, 2002*].

L'utilisation de la plateforme *Jade* permet de faciliter la programmation de Système Multi-Agents. De plus, elle garantit la flexibilité, la polyvalence, l'hétérogénéité, la synchronisation, la sécurité (*Tab.5.2*) et propose également une solution pour faciliter

l'utilisation des protocoles d'interactions et une exécution indépendante de l'environnement. Ceci justifie notre choix porté sur cette plateforme qui répond parfaitement à nos attentes.

5.4. Simulation pour la validation des approches proposées

5.4.1. Création d'un agent de la plateforme

Pour l'implémentation de nos approches proposées, nous procédons tout d'abord par la création des concepts du domaine sur la plateforme *Jade*. La classe « ***Agent »*** de la plateforme *Jade* qui hérite de « ***jade.core.Agent*** » contient la méthode « ***setup*** » permettant l'initialisation d'agent. En effet, la classe ***Agent*** représente la classe de base commune à tous les agents définis par l'utilisateur « ***jade.core.Agent*** », par héritage, il a la possibilité d'interagir avec la plateforme *Jade*: enregistrement, configuration, gestion à distance… et d'utiliser un ensemble de méthodes qui peuvent être appelées pour implémenter des comportements particuliers de l'agent (envoi/réception de messages, utilisation de protocoles d'interaction standard, …). Chaque ***Agent*** est identifié auprès de l'***AMS*** (*Agent Management System*) par un ***AID*** (*Agent IDentifer*), Cet identifiant est un objet de type « ***jade.core.AID*** », Les attributs de cet objet sont :

- ✓ **name** : <*nickname*>@<*plateforme*> [*getLocalName()*, *getName()*]
- ✓ **addresses** : adresses de la plateforme [*getAllAddresses()*]
- ✓ **resolvers** : services de page blanche [*getAllResolvers()*]

Ces informations sont accessibles par les méthodes suivantes de la classe « ***jade.core.Agent*** »:

- ✓ *getAID()* : retourne l'identifiant unique de l'agent,
- ✓ *getName()* : retourne le nom de l'agent, i.e. <*nickname*>@<*plateforme*>
- ✓ *getLocalName()* : retourne uniquement le *nickname* (nom local),
- ✓ *getHap()* : retourne l'adresse de la plateforme.
- ✓ *getAMS()* : retourne l'*AID* de l'*AMS* de la plateforme sur laquelle l'agent est situé.

L'invocation au lancement de l'agent nécessite l'implémentation de la méthode obligatoire « ***setup()*** ». Cette méthode est utilisée aussi pour (*Fig.5.2*):

- ✓ Enregistrer les langages de contenu, les Ontologies et traiter les paramètres passés en arguments « *getArguments()* »
- ✓ Enregistrer les Services auprès du *DF* (*Directory Facilitator*), « *DFService.register()* »

✓ Démarrer et ajouter des comportements à l'agent, « *addBehaviour()* »

```
public void Activate_Nominal_Behaviour(Agent a)
{
    String s=a.getLocalName();
    Run_BorderManagementActor BMA_Actor= new Run_BorderManagementActor();
    Run_PlanningControlActor  PCA_Actor= new Run_PlanningControlActor();
    Run_ExecutionActor        EA_Actor= new Run_ExecutionActor();
    if(s.equals("Customs_Import")
            ||s.equals("TerminalOperator_Import")
            ||s.equals("Transporter_Import")
            ||s.equals("SeaCarrier_Import")
            ||s.equals("ForwardingAgent_Import")
            ||s.equals("PortAuthority_Import")||s.equals("Customs_Export")
            ||s.equals("TerminalOperator_Export")
            ||s.equals("Transporter_Export")
            ||s.equals("SeaCarrier_Export")
            ||s.equals("ForwardingAgent_Export")
            ||s.equals("PortAuthority_Export"))
     {
        EA_Actor.setup();
     }
    else
        if(s.equals("Consignor_Export")
            ||s.equals("DistributionCenter_Import")
            ||s.equals("FreightForwarder"))
        {
            BMA_Actor.setup();
        }
        else
            if(s.equals("Corridor_Import")||s.equals("Corridor_Export"))
            {
                PCA_Actor.setup();
            }
}
```

Fig.5.2: Exemple d'appel de la méthode « *setup()* » pour démarrer un comportement nominal.

Le modèle d'exécution d'un agent est multitâches dans lequel les comportements «***Behaviour*** » d'un agent sont exécutés en parallèle, le comportement d'un agent est implémenté par une classe dérivant de la classe « ***Behaviour »***, Un ordonnanceur, interne à la classe « ***Agent »***, ordonnance ces comportements. En effet, l'implémentation de « ***Behaviour »*** est effectuée comme des instances de classe héritant de « ***jade.core.behaviours.Behaviour*** ». Il existe deux types de « ***Behaviour »*** : *1)* ***One-shot behaviours*** : son exécution s'effectue une seule fois ; *2)* ***Cyclic Behaviour*** : ce type de comportement ne se termine pas, il s'exécute en boucle jusqu'à ce que l'agent meurt. Par exemple, l'attente d'un message pour l'analyser et le traiter (*Analyze_Signal()*) est considérée dans notre plateforme comme étant un « ***Cyclic Behaviour*** » de l'acteur impliqué (*Fig.5.3*).

```
class Analyze_Signal extends CyclicBehaviour
{
    public Analyze_Signal(Agent a) { super(a); }

    @Override
    public void action() {
        System.out.println("[" + getLocalName() + "] Waiting for a message ...");

        ACLMessage msg = blockingReceive();
        String s = getLocalName();

        if(msg!=null)
        {
            switch(msg.getPerformative())
            {
```

Fig.5.3: Utilisation du « *CyclicBehaviour* » afin d'exécuter en boucle un comportement.

5.4.2. Création et envoi d'un message

Un message est une instance de la classe « ***ACLMessage*** » appartenant au package « ***jade.lang.acl*** ». Un « ***ACLMessage*** » vérifie les spécifications ***FIPA*** et il est composé au minimum d'un performatif (*getPerformative()*, *setPerformative()*) et d'un ensemble de destinataires (*addReceiver()*, *removeReceiver()*). L'instance « ***ACLMessage*** » contient de préférence (*Fig.5.4*): un contenu (*getContent()*, *setContent()*), un expéditeur (*getSender()*, *setSender()*), un protocole d'interaction (*getProtocol()*, *setProtocol()*), un identifiant de conversation (*getConversationId()*, *setConversationId()*), un langage (*getLanguage()*, *setLanguage()*), une ontologie (*getOntology()*, *setOntology()*), etc.

```
switch(msg.getPerformative())
{
case ACLMessage.INFORM :
{
    if(s.equals("Consignor_Export"))
    {
        if(msg.getSender().getLocalName().equals("FreightForwarder") && msg.getContent()
        {
```

Fig.5.4: Exemple d'utilisation du « *ACLMessage* » afin de traiter un message reçu.

Les performatifs sont des variables statiques de la classe « ***ACLMessage*** ». A titre d'exemple : le performatif « ***INFORM*** » envoi d'information, le performatif « ***FAILURE*** » signale une action non réalisable, le performatif « ***REQUEST*** » demande d'information, etc. Un message est donc créé comme instance de la classe « ***ACLMessage*** ». Suite à la réception d'un message, il peut également être créé en utilisant la méthode « ***createReply()*** ». L'envoi du message s'effectue par l'appel de la méthode « ***send()*** » de la classe ***Agent*** (*Fig.5.5*). La

réception des messages utilisée dans notre plateforme est « *bloquante* » à l'aide de la méthode « ***blockingReceive()*** ». En effet, la réception bloquante permet à un agent de passer à l'état « *Waiting* » jusqu'à réception d'un nouveau message ce qui entraine l'arrêt de tous ses comportements jusqu'à la réception de ce message (*Fig.5.3*).

```
public void Send_Reply_Signal(ACLMessage msg,String Content,int Performative)
{
      ACLMessage reply= msg.createReply();
      reply.setPerformative(Performative);
      reply.setContent(Content);
      send(reply);
}
```

Fig.5.5: Utilisation du « *ACLMessage* » pour concevoir la méthode « *Send_Reply_Signal* ».

5.4.3. La communication inter-agents

Par la suite, nous avons visualisé la communication inter-agent afin de voir les comportements d'interaction. En effet, *Jade* fournit des outils graphiques, comme l'agent «***RMA*** » (*Remote Monitoring Agent*) (*Fig.5.6*) qui représente l'interface principale de surveille de la plate-forme *Jade* et de tous ses conteneurs distants et aussi il contrôle l'accès ainsi que l'utilisation du canal de communication des agents « ***ACC*** » (*Agent Communication Channel*). L'***ACC*** est le moyen de communication par défaut qui connecte tous les agents sur une plate-forme et entre plates-formes. La figure 5.7 illustre l'interface *RMA* contenant les conteneurs créés dans le cadre de notre plateforme (*Fig.5.7*).

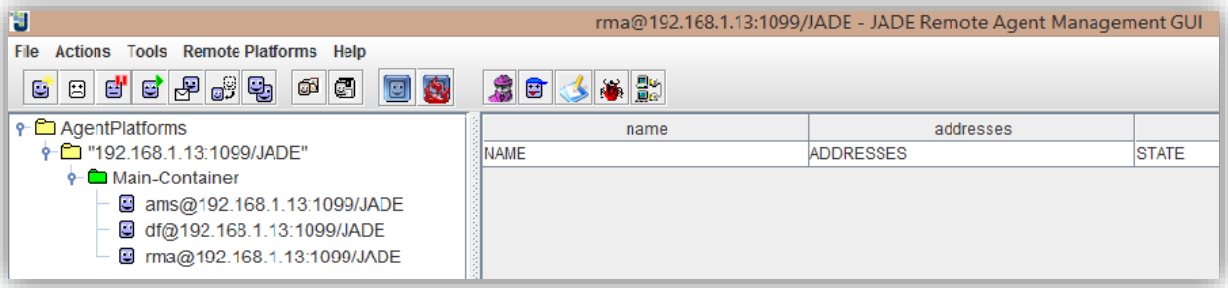


Fig.5.6: L'outil graphique fournit par Jade – « *RMA* : *Remote Monitoring Agent* ».

Nous utilisons *RMA* pour lancer d'autres outils graphiques de *Jade* : « ***Dummy Agent*** », « ***Sniffer Agent*** » et « ***Inspector Agent*** ». L'outil « ***Dummy Agent*** » permet d'envoyer des messages aux agents (*Fig.5.8*). L'outil « ***Sniffer Agent*** » permet d'analyser les messages échangés entre agents (*Fig.5.9*). Alors que l'outil « ***Inspector Agent*** » permet d'afficher le détail du cycle de vie d'un agent (*Fig.5.10*).

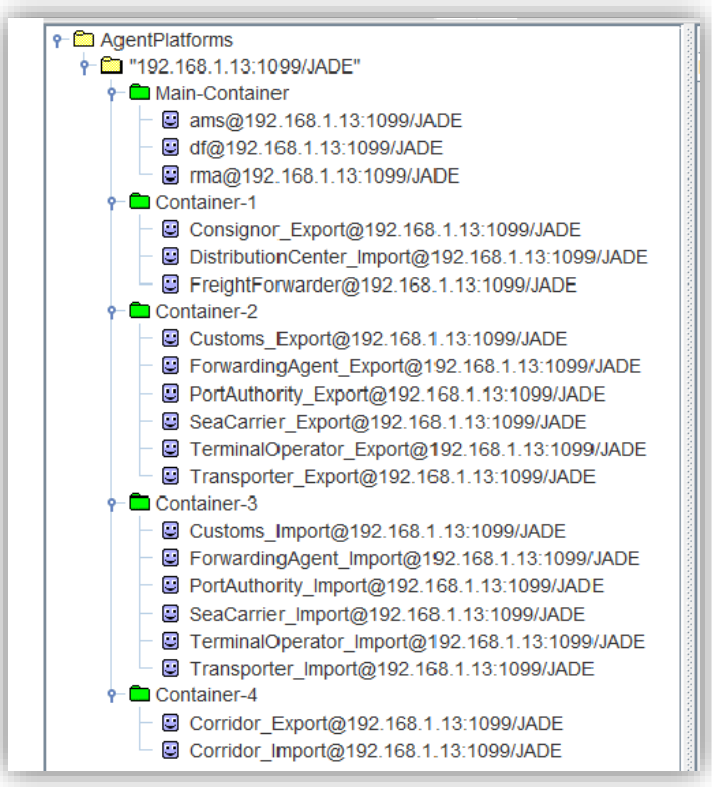


Fig.5.7: L'interface *RMA* contenant les conteneurs créés dans le cadre de nos travaux.

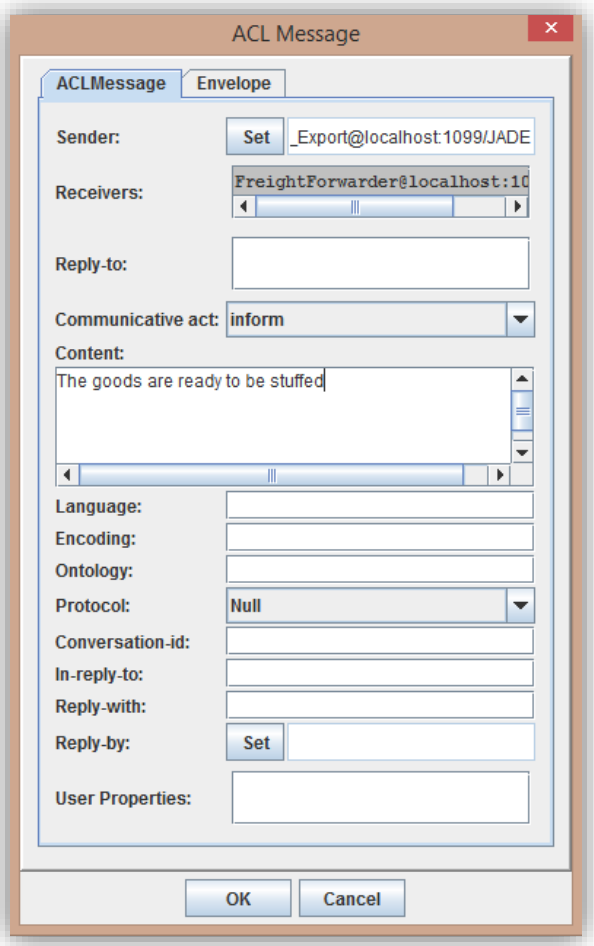


Fig.5.8: Exemple d'envoi de messages entre agents à l'aide de l'outil « *Dummy Agent* ».

Soit la tâche à réaliser suivante : « *PP1_Stuffing_Procedures* », il s'agit bien ici de l'opération d'empotage. L'acteur exécutif chargé de la réalisation de cette tâche est le « *FreightForwarder* ». L'acteur « *Consignor_Export* » déclenche le comportement nominal de l'acteur exécutif en envoyant le message ayant le contenu suivant : « *The goods are ready to be stuffed* ». La figure ci-dessus (*Fig.5.8*) illustre, à titre d'exemple, la possibilité d'envoi à l'aide de l'outil « *Dummy Agent* » en précisant le performatif « *INFORM* ». Une fois que ce processus physique est exécuté sans rencontrer de problème (comportement nominal), un message de remontée d'information est envoyé par le « *FreightForwarder* » aux acteurs « *Consignor_Export* » et « *DistributionCenter_Import* ». La figure ci-dessous (*Fig.5.9*) montre, grâce à l'outil « *Sniffer Agent* » que l'échange a bien eu lieu. On a voulu vérifier le cycle de vie des acteurs impliqués dans ce processus, l'outil « *Inspector Agent* » (*Fig.5.10*) nous a permis d'afficher le détail de l'état des acteurs et ils sont bien en état d'attente (*waiting*).

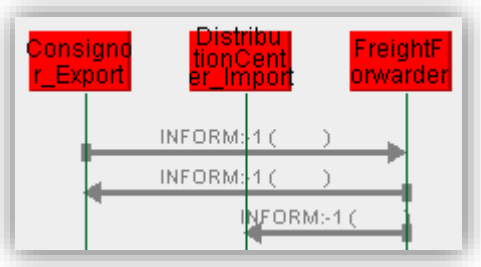


Fig.5.9: Analyse des messages échangés entre agents à l'aide de l'outil « *Sniffer Agent* ».

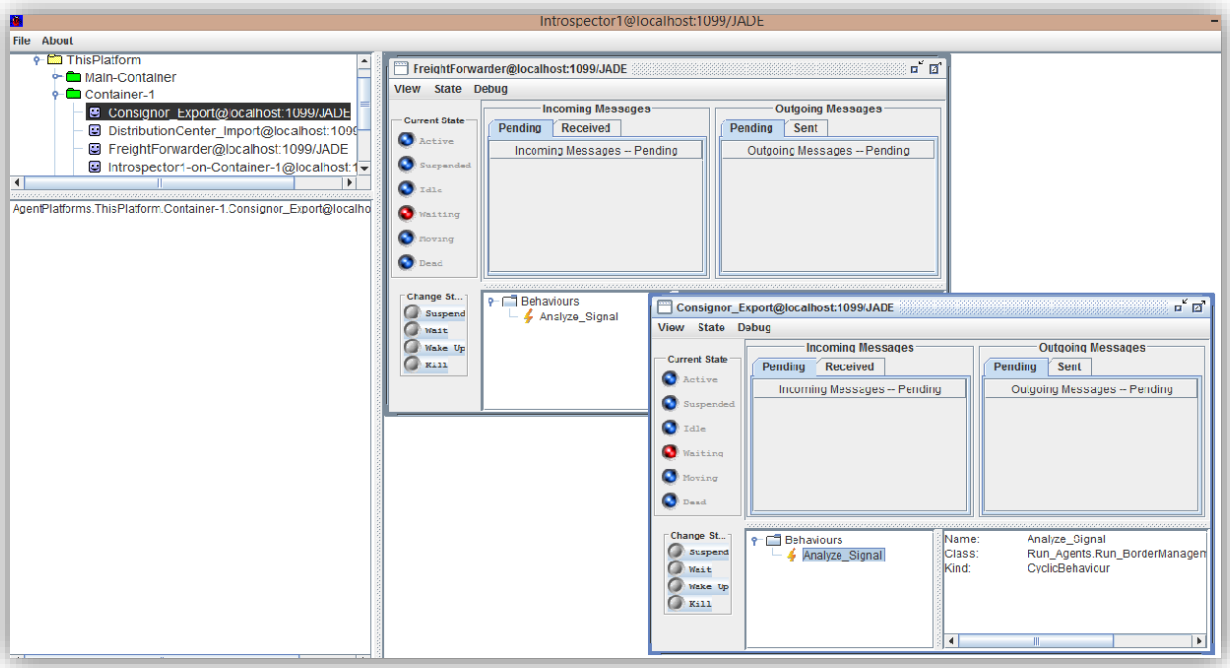


Fig.5.10: Affichage de l'état des agents à l'aide de l'outil « *Inspector Agent* ».

5.4.4. La validation des comportements dynamiques des agents

Dans cette section, nous allons traiter les flux d'interaction obtenus après avoir lancé d'une part le comportement nominal (*cf. section 5.4.4.1*) et d'autre part le comportement correctif, en proposant un scénario de perturbation (*cf. section 5.4.4.2*).

5.4.4.1. Le comportement nominal

Il est souhaitable de représenter dans cette sous-section les services attendus du système étudié en montrant les interactions entre les acteurs. Chaque cas de rupture de charge doit bien représenter une intervention autonome rendue par l'acteur concerné en respectant le scénario de la succession d'enchaînements, s'exécutant du début à la fin de la chaine du transport intermodal de marchandises, un enchaînement étant l'unité de description de séquences d'actions / réactions. Ce comportement contient en général un scénario nominal et les scénarios alternatifs (qui se terminent de façon normale) ou d'erreur (qui se terminent en échec) seront traités dans la sous-section suivante (*cf. section 5.4.4.2*).

Les critères de validation du comportement nominal de notre système sont : l'auto-organisation et l'auto-configuration. L'auto-organisation est le processus par lequel notre système change, lors de son exécution, son organisation sans aucune intervention externe. Et l'auto-configuration est le processus permettant au système de devenir conforme aux besoins de l'application tout en gardant les agents autonomes, conduisant ainsi à l'émergence du comportement collectif. En s'appuyant sur l'outil graphique « *Sniffer Agent* », nous avons répondu à l'objectif de nos travaux de simulation. Cet objectif a été de fournir une plate-forme de simulation reposant sur des systèmes multi-agents auto-organisateurs permettant de comprendre le comportement nominal de notre système en validant ainsi nos approches proposées en matière de modélisation. La figure ci-dessous (*Fig.5.11*) montre les flux d'interaction qui décrivent le comportement nominal des agents après avoir lancer notre plateforme. L'auto-configuration des agents autonomes a bien mené le comportement collectif à la fin de la chaine du transport intermodal (les flux *1, 2, 3, 4, 5* : voir la figure *5.11*). En effet, le « *Transporter_Import* » informe le « *Corridor_Import* » (*flux 1*) que le conteneur a bien été livré au « *DistributionCenter_Import* ». Par la suite, le « *Corridor_Import* » (*flux 2*) et le « *FreightForwarder* » (*flux 3*) dispache l'information aux agents concernés. De même, le « *DistributionCenter_Import* » informe le « *FreightForwarder* » que la procédure de dépotage est réalisée (*flux 4*). De sa part, le « *FreightForwarder* » dispache l'information (*flux 5*).

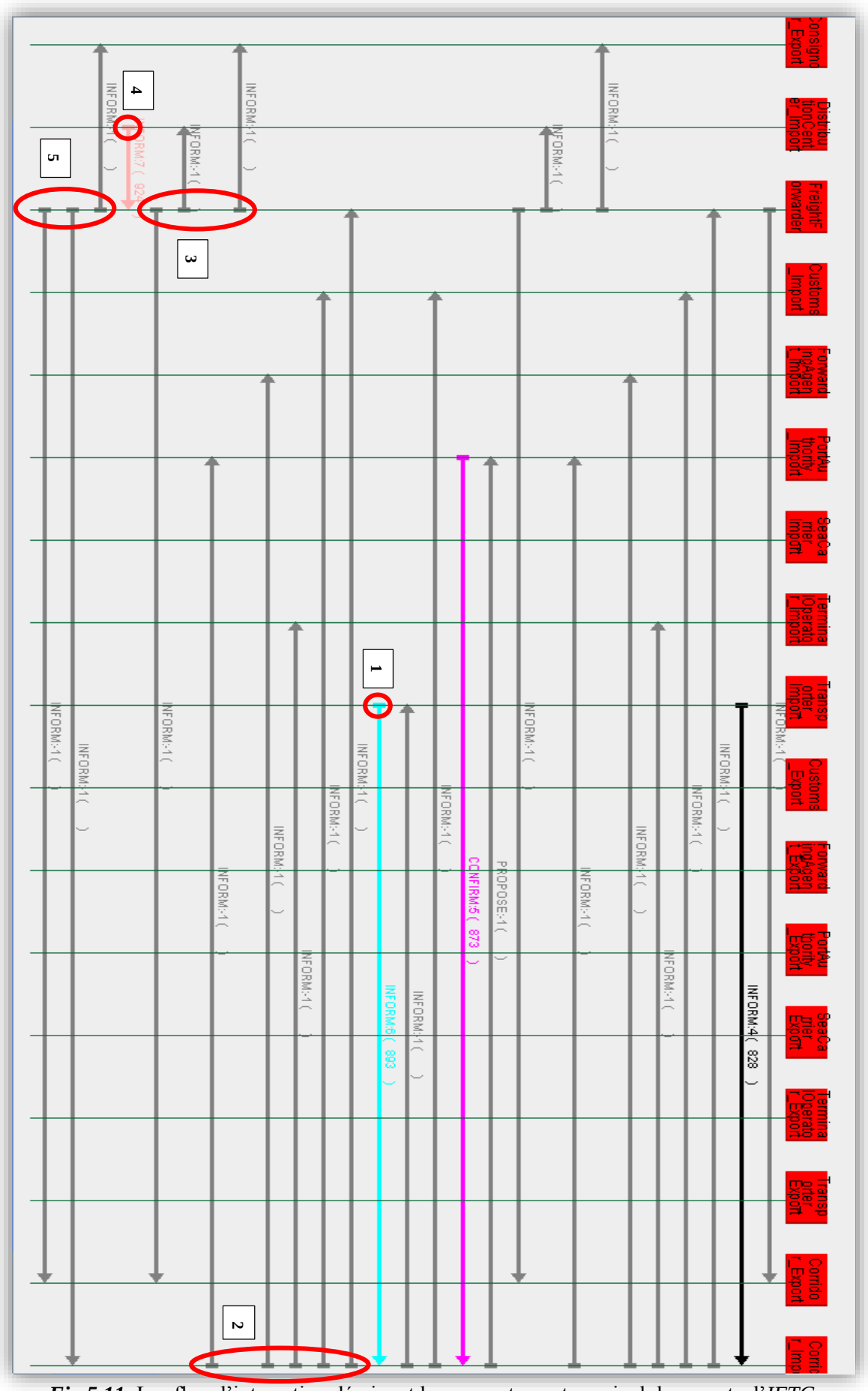


Fig.5.11: Les flux d'interaction décrivant le comportement nominal des agents d'*IFTC*.

5.4.4.2. Le comportement correctif

Au stade actuel de développement de la simulation pour la validation de nos approches proposées en matière de modélisation de la chaine de transport intermodal de marchandises, seuls les comportements correctifs sont pris en compte dans cette sous-section. Il s'agit des comportements de réorganisation en cas de perturbation, le comportement préventif permettant l'apprentissage et l'ajustement des indicateurs de performances étant encore à l'étude. Le critère d'évaluation du comportement correctif est l'auto-adaptation. Ce critère gère les dynamiques dues aux changements apportés à l'environnement de chaque agent.

En s'appuyant sur l'outil graphique « *Sniffer Agent* », nous avons répondu à l'objectif de nos travaux de simulation. Cet objectif a été de fournir une plate-forme de simulation reposant sur des systèmes multi-agents non seulement auto-organisateurs mais aussi auto-adaptatifs permettant de gérer les perturbations qui apportent un changement à notre système. La figure ci-dessous (*Fig.5.12*) montre les flux d'interaction qui décrivent le comportement correctif des agents après avoir lancer notre plateforme. En effet, les flux *1*, *2* et *3* décrites dans la figure ci-dessous montrent que les agents ont bien remis le comportement dérivé du système à son scénario nominal qui se termine de façon normale.

Le « *Transporter_Export* » devait réaliser sa tâche nominale celle de prendre en charge le conteneur après la réalisation de la procédure d'empotage. Cet agent n'a pas pu accomplir sa tâche suite à une perturbation due à l'indisponibilité d'une de ses ressources physiques et aucuns acteurs n'a accepté de l'aider, il remonte alors l'information (*flux 1*) (*FAILURE - Please help me : collaboration failed / group's rules problem, Task 2*) à son superviseur « *Corridor_Export* ». Ce message a bien activé le comportement correctif du « *Corridor_Export* » en vérifiant si le problème a d'impact sur la performance des contraintes (*Constraint / Indicator*) en consultant l'ontologie de connaissance. A cause d'une déviation des indicateurs, ce dernier n'a pas pu trouver une solution, il remonte donc un message de sollicitation d'aide (*flux 2*) (*FAILURE - Please help me : coordination failed / (re)negociation of constraints, Task 2*) au « *FreightForwarder* ». Suite à cet échec de coordination, le « *FreightForwarder* » vérifie si le problème a d'impact sur la performance des objectifs (*Objective / Indicator*) en consultant l'ontologie de connaissance. Ce dernier a pu trouver une solution et il remonte l'information au « *Corridor_Export* » (*flux 3*) (*INFORM - Successful corrective task completion: coordination failed / (re)negociation of constraints, Task 2*).

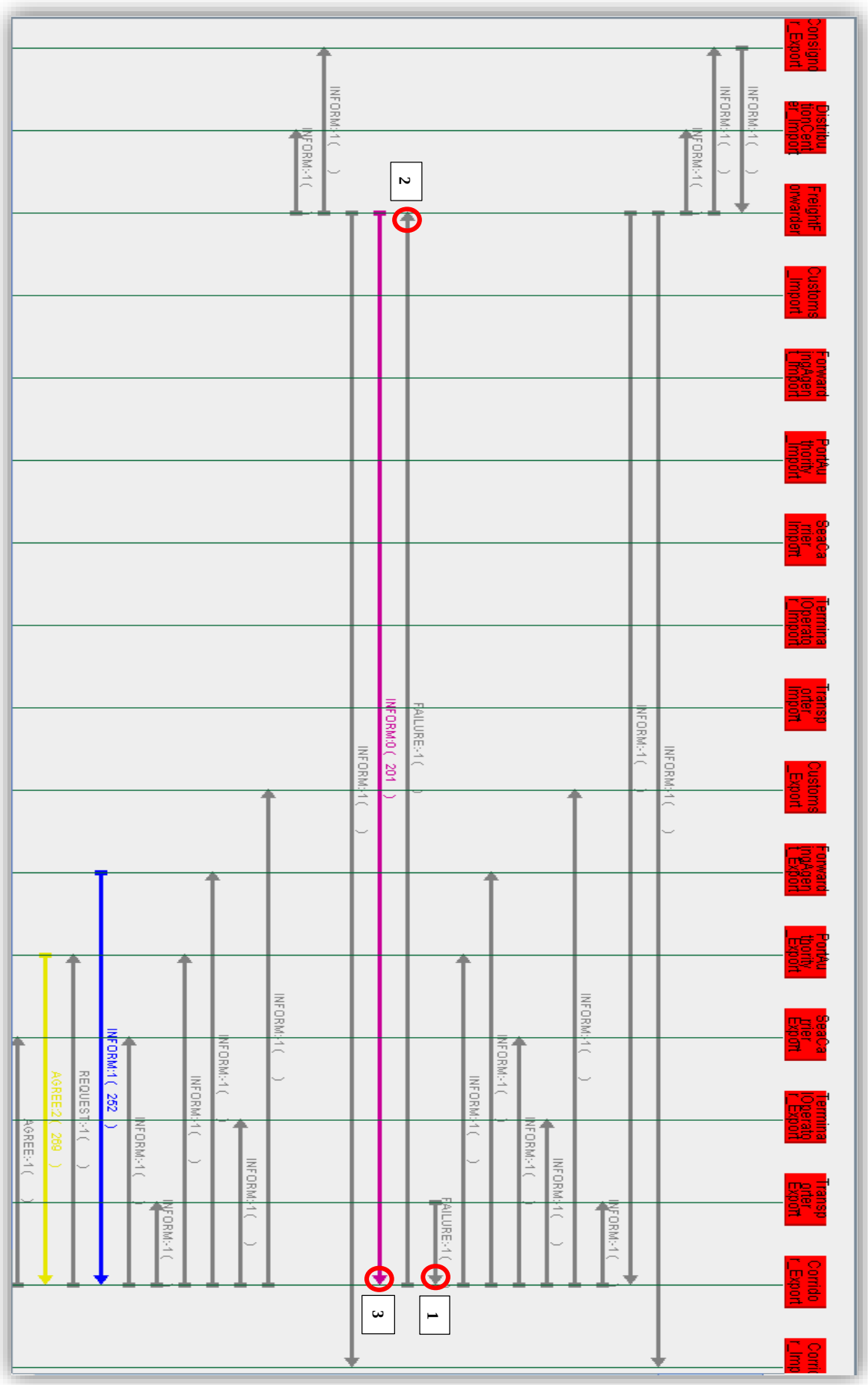


Fig.5.12: Les flux d'interaction décrivant le comportement correctif des agents d'*IFTC*.

La simulation a pu gérer le comportement dynamique de la chaine de transport intermodal dans un environnement incertain. En effet, nous avons testé quelques scénarios où la chaine subit des aléas environnementaux (perturbations), le comportement correctif des acteurs impliqués a été validé avec succès (*Fig.5.12*). Nous pouvons dire qu'une fois notre modélisation a été couplée à la simulation, le mécanisme obtenu reflète le comportement du système réel. Dans l'état actuel de la plateforme qui est en cours de réalisation, quelques concepts (réalité d'un objet) du modèle, précisément ceux liés aux ontologies, ont été conçus en les faisant passer pour des ensembles de données sans aucun problème à l'aide des bibliothèques proposées par l'environnement *Java*. Ce qui nous a permis d'avoir une vision minimale de l'implémentation du comportement préventif des agents.

5.5. Synthèse du chapitre 5

Dans l'optique de valider les artefacts mis en place dans les phases précédentes (*cf. Chapitre 4*). Nous avons proposé dans ce cinquième chapitre de ce manuscrit un modèle nécessaire à l'implémentation de notre cas industriel (*le corridor de la vallée de Seine*) en établissant une correspondance entre ses éléments clés et les concepts du domaine. Une instanciation du méta-modèle d'implémentation nous a permis d'aboutir à un modèle prêt d'être implémenté dans une plateforme de programmation. Après avoir effectué une étude comparative des outils de développement orientés agent, nous avons justifié notre choix porté sur la plateforme Jade qui répond parfaitement à nos attentes. Nous pouvons dire que grâce à l'implémentation de nos approches proposées, nous avons testé avec succès les structures et les comportements des acteurs impliqués. Nous envisageons encore des modifications à importer à la plateforme qui est en cours de réalisation.

Chapitre 6

BILAN, CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

La tendance à la mondialisation et à la logistique est en voie de remodeler les activités de transport. Un avantage stratégique de la logistique est la planification et l'amélioration de la coordination de transport, particulièrement le transport intermodal de marchandises. La logistique influencera le développement futur du transport intermodal et créera à la fois des opportunités et des défis dans ce domaine. En effet, les coûts de ruptures de charge constituent l'obstacle essentiel au développement des transports intermodaux, un aspect important de l'efficacité intermodale tient à la connexion aux points nodaux, peu de progrès ont été faits pour arriver à un contrôle des flux de transport intermodal, les systèmes de transport doivent être intégrés pour arriver à l'intermodalité. Nos travaux de recherche sur la chaîne de transport intermodal s'inscrivent dans ce domaine puisqu'ils s'orientent vers la recherche d'une solution pour une amélioration de la performance de la chaine de transport intermodal de porte à porte.

Dans cette optique, notre mission a consisté à proposer une contribution au développement de moyens d'analyse et de la structuration de l'information, de renseignement et d'expertise dans le domaine des systèmes de transport intermodal. Il s'agissait aussi pour nous de faire évoluer les règles d'intégration de la logistique en harmonisant son système informationnel et en revenant, sur nos apports quant au problème posé, tant sur les fondements académiques qu'industriels.

Le bilan de nos apports académiques et industriels répond à la problématique dégagée dans le *Chapitre 1*. Il a couvert trois volets d'investigation :

- ✓ L'axe de la *conceptualisation* d'une architecture de contrôle de la performance de la chaine de transport intermodal de marchandises (service porte à porte). Nous avons dégagé une structure de contrôle capable d'une part d'apporter de nombreux avantages en termes d'intégration des déterminants de la performance et d'autre part de respecter l'aspect de la structure générique de la chaine de transport intermodal. Cette phase s'inspire largement d'une revue de la littérature sur les concepts sous-jacents à la gestion des chaînes logistiques, aux ententes industrielles et aux méthodes d'évaluation de performance et elle suppose la bonne maitrise des trois sous-systèmes (opérationnel, décisionnel et

informationnel) formant la chaine du transport intermodal de marchandises de porte à porte. Nous avons noté, par ailleurs, l'absence de mécanismes qui ne sont pas liés directement aux activités des ruptures de charge;

- ✓ L'axe de la *modélisation* de la chaine de transport intermodal de marchandises. Nous avons construit, sur la base des apports de la phase précédente en mettant en place la méthodologie adoptée « *ArchMDE* », les premiers artefacts qui sont : le *méta-modèle du domaine,* le *méta-modèle multi-agent,* le *méta-modèle du domaine agentifié*, les *protocoles d'interaction* et le *méta-modèle d'implémentation*. Cette phase nous a permis de considérer la nature distribuée, les environnements changeants, la variabilité des décisions et le comportement de coopération au sein du système de transport intermodal. Cet apport a effectivement permis de constituer un moyen d'analyse et de la structuration de l'information ;

- ✓ L'axe de la *validation* des apports conçus dans la phase précédente. La réalité de ces apports a été mise en évidence au travers d'une simulation auprès d'un modèle nécessaire à l'implémentation de notre cas industriel (*le corridor de la vallée de Seine*) en établissant une correspondance entre ses éléments et les concepts du domaine. La mise en œuvre de l'expérimentation des approches proposées, à l'aide d'un système multi-agent, montre que notre contribution répond à notre problématique et apporte des solutions de bonnes qualités.

Les travaux de recherche réalisés ont donné lieu à des perspectives d'amélioration et d'extension :

- ✓ Procéder à la finalisation de la plateforme. En effet, dans l'état actuel de la plateforme qui est en cours de réalisation, quelques concepts (réalité d'un objet) du modèle, précisément ceux liés aux ontologies, ont été conçus en les faisant passer pour des ensembles de données sans aucun problème à l'aide des bibliothèques proposées par l'environnement *Java*. Ce qui nous a permis d'avoir une vision minimale de l'implémentation du comportement préventif des agents. Une extension possible consiste alors à finaliser l'implémentation du comportement préventif de l'ensemble des agents impliqués ;

- ✓ Réaliser une étude de la robustesse et la complétude avec des ontologies et des algorithmes qui portent sur des horizons décisionnels à temps réel pour l'ensemble des activités de la chaine ;

- ✓ Mener un travail approfondi sur un type d'indicateurs lié à la chaine de transport intermodal et son intégration dans l'analyse des comportements des agents. En effet, nous envisageons dans le cadre de nos travaux une perspective intéressante, celle de mener une analyse de la performance de l'interopérabilité des systèmes informationnels de la chaine du transport intermodal de marchandises ;

- ✓ La solution proposée est ouverte. En effet, elle permettra aux futurs chercheurs d'intégrer des modules : de raisonnements, d'apprentissages, d'améliorations des protocoles et de structurations des comportements des agents. 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.

PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS INTERNATIONALES

- ✓ **[Gouiza et al, 2014]** Gouiza, F., Benabdelhafid, A., Yassine, A., « *Measurement of intermodal accessibility : Container transport example*, » International journal on Advanced Logistics Transport, IEEE Xplore, pp. 241-246, 2014. (Indexé par Scopus)

- ✓ **30 Septembre – 1 Octobre 2015** : Participation à la e-conférence internationale sur le campus numérique des systèmes complexes **CS-DC'15** (**The world e-conference on Complex Systems Digital Campus**), Tempe, Arizona - Etats Unis – Participation avec une communication sous forme d'une présentation intitulée : « *Modeling and performance evaluation of the intermodal freight transportation chain (door to door service)* ».

- ✓ **1 – 3 Mai 2014** : Participation à la IEEE conférence internationale sur la logistique avancée et le transport **ICALT** (**The IEEE International Conference on Advanced Logistics and Transport**), Hôtel El Mouradi El Menzah, Hammamet – Tunisie - Participation avec une communication sous forme d'une présentation intitulée : « *Measurement of intermodal accessibility: Container transport example* ».

- ✓ **8 – 10 Août 2013** : Participation à la conférence internationale sur le tourisme d'affaires et les sciences appliquées **ICBTS** (**The International Conference on Business Tourism and applied Sciences**), Université de Londres, Londres – Royaume-Uni - Participation avec une communication sous forme d'une présentation intitulée : « *Tourism and intermodal transportation: The complexity of a Tourist Information System (TIS)* ».

- ✓ **21 – 22 Mai 2012** : Participation à la conférence internationale sur les ports et le transport maritime **WCTRS-SIG2** (**World Conference on Transport Research Society – Maritime transport and ports**), Université d'Anvers, Anvers – Belgique.

GLOSSAIRE

La distribution de Fisk en économie – Dans la théorie des probabilités et en statistiques, la loi log-logistique (connue aussi comme la distribution de Fisk enéconomie) est une loi de probabilité continue pour une variable aléatoire non-négative [*Le Petit Robert, 2015*].

Facture-devis (Proforma invoice) – Une facture (abrégée ou estimée) envoyée par le vendeur à un acheteur à l'avance d'une expédition ou de livraison de marchandises. Il note le type et la qualité des marchandises, leur valeur, et d'autres informations importantes telles que les frais de poids et de transport. Les factures Proforma sont couramment utilisés comme les factures préliminaires avec une citation, ou à des fins douanières à l'importation. Ils diffèrent de la facture à ne pas être une exigence ou demande de paiement [*Venturelli et al., 2010*].

Transaction fictive – Un acte par lequel des parties mettent fin à une contestation en faisant des concessions réciproques. L'acte d'obtenir et de payer pour un article / un service [*Le Petit Robert, 2015*].

Lettre de crédit (letter of credit) – Document émis par la banque de l'importateur afin d'assurer le paiement des biens et services importés. La banque émettrice met à la disposition du bénéficiaire la somme convenue entre les parties, conformément aux conditions de la lettre [*Le Petit Robert, 2015*].

Transfert électronique de fonds (Electronic Funds Transfer) – C'est un échange électronique, le transfert d'argent d'un compte à un autre, que ce soit au sein d'une seule institution financière ou à travers de multiples institutions, grâce à des systèmes informatiques [*Le Petit Robert, 2015*].

Insurance certificate – Document remis à chaque participant à un régime d'assurance collective et qui résume les garanties et les principales dispositions du contrat de base [*Venturelli et al., 2010*].

Shipper's letter of instruction – Elle est délivrée par l'exportateur au commissionnaire de transport et elle comprend les instructions d'expédition pour l'expédition maritime [*Venturelli et al., 2010*].

Shipper's export declaration – Déclaration d'exportation : une déclaration détaillée des marchandises exportées, faite sur des imprimés types « D.E » conformes aux modèles officiels conservés à la Direction des Douanes. Dans la déclaration d'exportation, le déclarant indique le régime douanier à assigner aux marchandises et communique les éléments requis pour l'application des droits de douanes et taxes et pour les besoins du contrôle douanier [*Venturelli et al., 2010*].

Shipper's import declaration – Déclaration d'importation : une déclaration détaillée des marchandises importées, faite sur des imprimés types « D.I » conformes aux modèles officiels conservés à la Direction des Douanes. Dans la déclaration d'importation, le déclarant indique le régime douanier à assigner aux marchandises et communique les éléments requis pour l'application des droits de douanes et taxes et pour les besoins du contrôle douanier [*Venturelli et al., 2010*].

Customs declarations – Une déclaration indiquant les marchandises importées sur lesquelles les droits devront être payés [*Venturelli et al., 2010*].

Customs clearance / permit – L'autorisation documentée permettant de faire passer des marchandises importées afin qu'elles puissent entrer dans ce pays ou à des marchandises exportées afin qu'ils puissent quitter ce pays [*Venturelli et al., 2010*].

Customs invoice / letter – Il s'agit d'une forme étendue de la facture commerciale requise par les douanes (souvent dans un format spécifié) dans laquelle la description de l'état de marchandises, la quantité et le prix de vente, les coûts de fret, l'assurance et l'emballage, les conditions de livraison et de paiement, le poids et / ou le volume des marchandises dans le but de déterminer la valeur en douane d'importation au port de destination [*Venturelli et al., 2010*].

Packing list – Liste de colisage détaillée des articles habituellement inclus dans chaque colis d'expédition, donnant la quantité, la description, et le poids du contenu. Préparée par l'expéditeur et envoyée au destinataire pour décompte précis des marchandises livrées. Dénommée aussi projet de loi de colis, bordereau d'expédition, ou le déballage note [*Venturelli et al., 2010*].

Transit declaration – Déclaration pour le transit : une déclaration sous régime suspensif total ou partiel des droits et taxes sera exigée pour toutes les opérations d'importation soumises aux procédures douanières relatives au transit ordinaire, au transit international, à l'entrée en entrepôt ou à la mise en admission temporaire [*Venturelli et al., 2010*].

Certificate of inspection – Habituellement requis pour l'importation d'équipements industriels, produits de viande, et de marchandises périssables, il certifie que le produit répond aux spécifications requises et était en bon état et la quantité correcte quand il a quitté le port de départ. Dénommée aussi certificat d'inspection ou d'un rapport d'inspection [*Venturelli et al., 2010*].

Fumigration certificate – Document certifiant qu'une fumigation a été effectuée par des opérateurs spécialisés ou un organisme accrédité dans le pays d'origine. Elle est réalisée dans l'entrepôt ou dans le conteneur avant l'expédition par bateau. La fumigation est l'opération qui consiste à introduire un gaz ou une substance donnant naissance à un gaz dans l'atmosphère d'une enceinte dans le but de détruire les organismes nuisibles. Ex. Conteneur de friperie [*Venturelli et al., 2010*].

Bill of lading – le connaissement, titre représentatif de la marchandise lors d'un transport maritime, tenant lieu de reçu de ce que l'armement charge à bord du navire. Il est établi par l'armateur et il permet au destinataire de réclamer la marchandise auprès de l'armateur [*Venturelli et al., 2010*].

Manifest – Le manifeste, document de transport maritime qui récapitule l'ensemble des marchandises chargées dans un port à destination d'un autre port [*Venturelli et al., 2010*].

Certificate of origin – Certificat d'origine : Document attestant de l'origine d'une marchandise et établi par une autorité habilitée dans le pays d'origine. Document ayant une valeur indicative ne liant en rien le service de douane d'importation. Visé par les chambres de commerce, le certificat d'origine est souvent exigé à l'importation (contrôle des quotas, application de tarifs préférentiels). Le certificat d'origine est aussi exigé dans le cadre d'un crédit documentaire. Les principaux types : MINEF, EUR1, OIC. Si la fabrication du produit est issue de plusieurs pays, il sera mentionné dans le certificat d'origine, le pays où a eu lieu la dernière transformation [*Venturelli et al., 2010*].

VAT registration – Processus d'admission (entreprise) pour le retour de la *TVA* [*Venturelli et al., 2010*].

Consular invoice – Facture consulaire : elle est exigée par certains pays, elle fournit le détail des biens expédiés et informe sur les identités du donneur d'ordre et du destinataire et sur la valeur de l'expédition. Elle doit être présentée à un commissionnaire en douane [*Venturelli et al., 2010*].

Remorqueur / remorquage – Bateau spécialement conçu pour le remorquage des gros bateaux en mer ou arrivant dans un port. Remorquage : Fait de tirer un bateau dépourvu de moyens de propulsion par un autre [*Venturelli et al., 2010*].

Lamaneur / lamanage – Une personne chargée des opérations d'amarrage ou d'appareillage des navires. Les lamaneurs utilisent des véhicules (parcours terrestre) ou des bateaux (parcours maritime) pour se rendre au poste à quai [*Venturelli et al., 2010*].

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[***AFNOR, 2000***] « Normes Qualité ISO 9000 ». Editions AFNOR, 2000.

[***Amiguet, 2003***] Amiguet, M., « MOCA, Un modèle componentiel dynamique pour les systèmes multi-agents organisationnels ». Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel, Suisse, 2003.

[***Austin, 1962***] Austin, J.L, « How To Do Things with Words ». Clarendon Press, 1962.

[***Azaiez, 2007***] Azaiez, S., « Approche Dirigée par les modèles pour le développement de systèmes multi-agents ». Thèse de l'Université de Savoie, Spécialité Informatique, Annecy le vieux, France, 11 décembre, 2007.

[***Beamon et Chen, 2001***] Beamon, B., Chen, V., « Performance Analysis of Conjoined Supply Chain ». International Journal of Production Research, Vol. 39, n° 14, pp. 3195-3218, 2001.

[***Beamon, 1998***] Beamon, B.M., « Supply chain design and analysis : Models and methods ». International Journal of Production Economics, 55, pp. 281-294, 1998.

[***Bellifemine et al., 1999***] Bellifemine, F., Poggi, A., et Rimassa, G., « JADE – A FIPA-compliant agent framework ». International Conference and Exhibition on the Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology (PAAM), Londres, avril 1999.

[***Benmoussa et Laachir, 2007***] Benmoussa, R., Laachir, H., « Mesure de la performance d'une chaîne logistique : méthode basée sur l'approche processus ». SYstème d'information Logistique PROductique, Ecole Nationale des Sciences Appliquées Marrakech (ENSAM), 2007.

[***Bierwirth et Meisel, 2010***] Bierwirth, C., Meisel, F., « A survey of beth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals ». European Journal of Operational Research 202, pp. 615–627, 2010.

[***Biteau, 1998***] Biteau, R.S., « Maitriser les flux industriels : les outils d"analyse ». Editions d'Organisation, Paris, 1998.

[***Bitton, 1990***] Bitton, M., « ECOGRAI: méthode de conception et d'implantation de systèmes de mesure de performance pour organisations industrielles ». Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 220 p., septembre 1990.

[***Blanc, 2006***] Blanc, S., « Contribution à la caractérisation et à l'évaluation de l'interopérabilité pour les entreprises collaboratives ». Thèse de doctorat, université Bordeaux I, 20 décembre 2006.

[***Boissier et Demazeau, 1996***] Boissier, O., Demazeau, Y., « Asic: An architecture for social and individual control and its application to computer vision ». In John W. Perram and Jean Pierre Müller, Ed. Distributed Software Agents and Applications, 6th European Workshop on Modelling Autonomous Agents - MAAMAW '94, volume 1069, pp. 1–18, Denmark. Springer, 1996.

[***Bonabeau et al., 1999***] Bonabeau, E., Dorigo, E., Theraulaz, G., « L'intelligence en essaim. Ingénierie des Systèmes Multi-Agent ». Actes des Journées Francophones de l'Intelligence Artificielle Distribuée et des Systèmes Multi-Agents, JFIADSMA'99, Ed. Marie-Pierre Gleizes, Paris - Hermes, novembre 1999.

[***Botta-Genoulaz, 2003***] Botta-Genoulaz, V., « Les systèmes d'information supports à la chaîne logistique ». Ecole d'été d'automatique – Gestion de la Chaîne Logistique. Session 24, Grenoble, France Septembre 2003.

[***Bourjot et al., 1999***] Bourjot C., Chevrier V., Bernard A., Krafft B., « Coordination par le biais de l'environnement une approche biologique ». Ingénierie des Systèmes Multi-Agent (Actes des Journées Francophones de l'Intelligence Artificielle Distribuée et des Systèmes Multi-Agents, novembre 1999, Saint Gilles), JFIADSMA'99, Ed. par Marie-Pierre Gleizes, Paris : Hermes, 1999.

[***Bratman, 1987***] Bratman, M.E., « Intention, Plans, and Practical Reason ». Harvard University Press, Cambridge, MA, 1987.

[***Briot et Demazeau, 2001***] Briot, J., Demazeau, Y., « Principes et architecture des systèmes multi-agents, chapitre Introduction aux systèmes multi-agents ». pp. 17–25. Hermes Science, 2001.

[***Brooks, 1991***] Brooks R.A., « Intelligence Without Reason ». Proceeding of the 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI'91, Ed. by Myopoulos J.& Reiter R., pp. 569 – 595, Sydney, Australie, août 1991.

[***Burlat et Boucher, 2000***] Burlat P.,Boucher X., « Pilotage distribué des groupements d'entreprises : Modélisation et perspectives ». Journal Européen des systèmes automatisés, Novembre, vol.35, n° :7-8, pp.991- 1018. 2001.

[***Calvez, 1990***] Calvez, J.P, «Spécification et conception des systèmes. Une méthodologie: MCSE». Paris: MASSON, pp. 614, 1990.

[***Campagne et Sénéchal, 2002***] Campagne J.P., Senechal O., « Les nouvelles exigences de la coopération ». Groupe PROSPER, 2002.

[***Carbone et Meunier, 2006***] Carbone, V., Meunier C., « Supply Chain Management: portée et limites. L'apport des théories des réseaux ». In Actes de la 15e Conférence internationale de Management Stratégique, Annecy, Genève, AIMS, 2006.

[***Cassandras et Lafortune, 1999***] Cassandras, C., Lafortune, S., « Introduction to discrète event Systems ». Kluwer Académie Publishers, Boston, MA, 1999.

[***Caveing, 1997***] Caveing, M., « La figure et le nombre : recherches sur les premières mathématiques des Grecs ». Presses Universitaires du Septentrion, Vol. 2, 1997.

[***CCI Normandie, 2014***] CCI Normandie, « La Normandie en chiffres et en cartes : Panorama économique 2014 ». Publication économique de CCI Normandie, une réalisation du Pôle Etudes et Aménagement Territorial, directeur de publication : Désormeaux, J.P., www.sie-hn.com, 2014.

[***CCS, 2014***] Cargo Community System, « AP+ : unir pour optimiser les échanges». www.soget.fr consulté en juin 2014.

[***Chen, 2005***] Chen, D., « Modélisation d'entreprise pour l'intégration et l'interopérabilité des systèmes industriels ». Université Bordeaux 1, Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Talence, 2005.

[***Cheyroux, 2003***] Cheyroux, L., « Sur l'évaluation de performances des chaînes logistiques ». Thèse de doctorat, Laboratoire d'Automatique de Grenoble, 2003.

[***Christopher, 1992***] Christopher, M., « Logistics and Supply Chain Management ». Pitman, Publishing, London, 1992.

[***Cirrelet, 2008***] Cirrelet 2008-38, « Novel constraints satisfaction models for optimization problems in container terminals ». pp. 11-18, 2008.

[***Claver et al., 1996***] Claver, J.F., Pitt, D., Gelinier, J., « Gestion de flux en entreprise: modélisation et simulation ». Hermès, 1996.

[***Colin, 1996***] Colin, J., « La logistique : histoire et perspectives ». Communication a été présentée lors de la Deuxième rencontre de logistique ARFILOG, Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand à Montluçon, 25-26 mars 1996. Revue Logistique & Management, Vol.4, n° 2, 1996.

[***Collis et al., 1998***] Collis, J. C., Ndumu, D. T., Nwana, H. S., et Lee, L. C., « The ZEUS agent building toolkit». BT Technology Journal, 16(3), 1998.

[***Comtois, 2007***] Comtois, C., «Marketing Green Logistics: Environmental Strategies for Transportation Based Gateways and Corridors». Discussion paper presented at the International Conference on Gateways and Corridors, Vancouver, pp. 15, 2007.

[***Comtois, 2012***] Comtois, C., «Définition et périmètre des grands corridors de transport fluvio-maritime». Livre : les corridors de transport, Edition EMS, Cormelles-le-royal, pp. 63, 2012.

[***Cooper et al., 1997***] Cooper M., Lambert D.M, Pagh J.D., « Supply chain management: more than a new name for logistics ». International Journal of Logistics Management, vol. 18, n° 2, pp. 1-13, 1997.

[***Coquillard et Hill, 1997***] Coquillard, P., Hill, D., « Modélisation et Simulation des Écosystèmes », Masson, 1997.

[***Cottet et al., 2005***] Cottet, F., Grolleau, E., « Systèmes temps réel de contrôlecommande ». Ed. Dunond, 2005.

[***Crainic et Kim, 2005***] Crainic, TG, Kim, KH., « Intermodal transportation. In Transportation ». Handbooks in operations Research and Management Science, Sous la direction de Barnhart c et Laporte G, North-Holland, Amsterdam, 2005.

[***Crainic et Kim, 2007***] Crainic, T.G., Kim, K.H., « Chapter 8: Intermodal transportation ». C. Barnhart and G. Laporte (Eds), Handbook in OR & MS, Vol. 14, 2007.

[***Croom et al, 2000***] Croom, S., Romano, P., Giannakis, M., « Supply chain management: an analytical framework for critical literature review ». European Journal of Purchasing & Supply Management, 6, pp. 67-83, 2000.

[***Demazeau et Costa, 1996***] Demazeau, Y., Costa, A.R., « Populations and organisations in open multi-agent systems». In 1st Symposium on Parallel and Distributed AI, Hyderabad, India, 1996.

[***Demazeau, 1995***] Demazeau, Y., « From interactions to collective behavior in agent-based systems ». In European Conference on Cognitive Science, Saint-Malo France, 1995.

[***Despontin-Monsarrat et al., 2005]*** Despontin-Monsarrat, E., Briand, C., Esquirol, P., « Approche par contraintes pour une aide à la coopération inter-entreprises ». 6ème Congrès International de Génie Industriel, Besançon, France, 7-10 Juin 2005.

[***Dilts et al, 1991***] Dilts, D.M., Boyd, N.P., Whorms, H.H., « The évolution of control architectures for automated manufacturing Systems ». Journal of Manufacturing Systems, vol. 10, n° 1, pp. 79-93, 1991.

[***Drogoul, 1993***] Drogoul, A., « 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, 1993.

[***Ducq et al., 2003***] Ducq, Y., Gentil, M.H., Merle, C., Doumeingts, G., « Conception et implantation de systèmes d'indicateurs de performance ». Chapitre d'ouvrage « Evaluation des performances des systèmes de production » sous la direction de C. Tahon, Edition Hermès, p.143-174, 2003.

[***Duffie, 1990***] Duffie, N.A. « Synthesis of heterarchical manufacturing Systems ». Computers in Industry, vol. 14, n° 1-3, pp. 167-174, 1990.

[***Erschler et al., 1993***] Erschler J., Fontan G., Mercé C., « Approche par Contraintes en planification et ordonnancement de la production ». RAIRO-APII, 1993.

[***Etzioni et Weld, 1994***] Etzioni, O., Weld, D., « An Softbot-based interface to the internet ». Communication of the ACM, 37, 7, pp. 72-76, 1994.

[***Famuel, 1690***] Famuel, M., « La logistique, ou arithmétique française ». Imprimeur et marchand libraire à la bible d'or : François Bouchard, Metz, 1690.

[***Fenies et Gourgand, 2004***] Fenies P., Gourgand M., «La mesure de la performance industrielle : application à la supply chain». Dans Lièvre P., Tchernev, N. La logistique entre management et optimisation, Paris : Hermès, pp.210 – 221, 2004.

[***Ferber et Gutknecht, 1997***] Ferber J., Gutknecht O., « Aladin: a meta-model for the analysis and design of organization in multi-agent systems ». Rapport de recherche LIRMM 97189, Laboratoire d'Informatique, de Mécanique et de Micro-électronique de Montppelier, décembre 1997.

[***Ferber et Gutknecht, 1999***] Ferber J., Gutknecht, O., « Operational Semantics of a Role-based Agent Architecture». Dans ATAL'99. 1999.

[***Ferber, 1995***] Ferber, J., « Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective ». IIA, Paris : InterEditions, 1995.

[***Francella et Doherty, 1998***] Francella, K., Doherty, K., « Supply Chain Solutions: Linking the Chains ». Supplement to Food Logistics, Mars 1998.

[***François, 2007***] François, J., « Planification des chaînes logistiques : Modélisation du système décisionnel et performance ». Thèse de doctorat, Ecole Doctorale des Sciences Physiques et de l'Ingénieur de l'Université de Bordeaux 1, France, 17 décembre 2007.

[***Frayret, 2002***] Frayret, J.M., « A Conceptual Framework to Operate Collaborative Manufacturing Networks ». thèse de doctorat, Université Laval, 2002.

[***Frein, 1998***] Frein, Y., « Evaluation de performances pour la conception des flux ». Université d'été du pôle productique Rhône-Alpes, 1998.

[***Galasso, 2007***] Galasso, F., « Aide à la planification dans les chaînes logistiques en présence de demande flexible ». Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2007.

[***Ganeshan et al., 1998***] Ganeshan R., Jack E., Magazine M.J., Stephens P., « A Taxonomic Review of Supply Chain Management Research, in Quantitative Models for Supply Chain Management ». Kluwer Academic Publishers, Boston, pp 841-880, 1998.

[***Garneau et Delisle, 2002***] Garneau, T., Delisle, S., « Programmation orientée-agent : évaluation comparative d'outils et environnements ». JFIADSMA 2002, 28-30 octobre, Lille, France, 2002.

[***Gechter, 2003***] Gechter, F., « Modèle multi-agent réactif pour la fusion de percepts : application à la localisation et au suivi en robotique mobile ». Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré – Nancy, 2003.

[***Geen et al., 1997***] Geen, S., Hurst, L., Nangle, B., Cunningham, P., Somers, F., Evans, R., « Software Agents: A review ». Rapport technique, Trinity College Dublin, 1997.

[***Génin, 2003***] Génin, P., « Planification tactique robuste avec usage d'un A.P.S – Proposition d'un mode de gestion par plan de référence ». Thèse de doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 2003.

[***Geunes et Pardalos, 2003***] Geunes, J., Pardalos, P.M., « Network Optimisation in Supply Chain Management and Financial Engineering: An Annoted Bibliography ». Networks, vol. 42, n° 2, pp. 66-84, 2003.

[***Giard, 2003***] Giard, V., « Gestion de la production et des flux ». Economica, 2003.

[***Gomez-Perez et al., 2003***] Gomez-Perez, A., Corcho, O., Fernandez-Lopez, M., « Ontological Engineering : with examples from the areas of knowledge management, e-commerce and semantic web ». Springer Verlag, 2003.

[***Govil et Proth, 2002***] Govil, M., Proth, J., « Supply Chain Design and Management: Strategic and Tactical Perpectives ». Academic Press, 2002.

[***Greis et Kasarda, 1997***] Greis, N., Kasarda, J., « Entreprise Logistics in the information Era. California Management ». Review, 39 (3), pp 55-78, 1997.

[***Griffith, 2006***] Griffith, S.B., « Sun Tzu. L'art de la guerre : la nouvelle édition illustrée ». Evergreen, septembre 2006.

[***Gutknecht, 2001***] Gutknecht, O., « Proposition d'un modèle organisationnel générique de systèmes multi-agents et examen de ses conséquences formelles, implémentatoires et méthodologiques ». Thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 2001.

[***HAROPA, 2014***] Le magazine des ports de Paris Seine Normandie : HAROPA mag, « HAROPA, acteur vigilant de l'Europe ». n°7, été 2014.

[***Hennessy et al., 2003***] Henesey, L., Wernstedt, F., Davidsson, P., « Market-Driven Control in Container Terminal Management ». in: 2nd International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries, 2003.

[***Hübner et al., 2002***] Hübner, J. F., Sichman, J. S., Boissier, O., « A model for the structural, functional, and deontic specification of organizations in multiagent systems ». In 16th Brazilian Symposium on Artificial Intelligence, pp. 118–128, 2002.

[***Huget, 2005]*** Huget, M.P, « 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, 2005.

[***Imai et al., 2005***] Imai, A., Sun, X., Nishimura, E., Papadimitriou, S., « Berth allocation in a container port: using a continuous location space approach ». Transportation Research Part B 39 (3), pp. 199–221, 2005.

[***IREPP, 2001***] Institut de Recherches Et Prospective Postales, « L'intégration des systèmes d'information dans les grandes entreprises et ses conséquences sur les entreprises de transport et de logistique ». Direction de la recherche et des affaires scientifiques et techniques, 2001.

[***Isaac, 2003***] Isaac, H., « Chaine logistique & TIC ». DAUPHINE, 2003.

[***Jacot, 1990***] Jacot, J-H., « A propos de l'évaluation économique des systèmes intégrés de production ». In ECOSIP Gestion industrielle et mesure économique, Economica, Paris, 1990.

[***Jarras et Chaib-Draa, 2002***] Jarras, I., Chaib-Draa, B., « Aperçu sur les systèmes multi-agents ». Rapport technique, CIRANO, 2002.

[***Jean, 1997***] Jean, M.R., « Emergence et SMA ». In Actes des Journées Francophones Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents - Nice, 1997.

[***Jihene, 2011***] Jihene, T., «Modélisation pour la simulation de la chaîne logistique globale dans un environnement de production PME mécatroniques». Thèse de doctorat, Université de Savoie, France, 7 février 2011.

[***Julien, 1994***] Julien P.A., « L'entreprise partagée : contraintes et avantages ». Gestion, Vol.19, N°4, pp.48 - 58, 1994.

[***Kaplan et Norton, 1996***] Kaplan, R.S., Norton, D.P., « Le tableau de bord prospectif, traduit de l'américain « The Balanced Scorecard » ». Editions d'Organisation, 311 p., 1996.

[***Kaplan et Norton, 2001***] Kaplan, R.S., Norton, D.P., « Comment utiliser le tableau de bord prospectif ». Les éditions d'organisation, 440 p., 2001.

[***Koda, 1996***] Koda, T., « Agents with Faces: A study on the effects of personification of software agents ». M.S. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1996.

[***Koestler, 1990***] Koestler, A., « The Ghost in the Machine ». Arkana, 1990.

[***Konings et Ludema, 2000***] Konings, R. et Ludema, M., «The competitiveness of the river-sea transport system: market perspectives on the United-Kingdom-Germany corridor». Journal of Transport Geography, vol. 8, n° 3, pp. 221-228, 2000.

[***La Forme-Chrétien, 2007***] La Forme-Chrétien, F-A.G., « Référentiel d'évaluation de la performance d'une chaîne logistique : Application à une entreprise de l'ameublement ». Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 6 décembre 2007.

[***La Londe et Masters, 1994***] La Londe, B., Masters, J., « Emerging Logistics Strategies: Blue-print for the next century ». International Journal of Physical distribution and Logistics Management, 24 (7), pp. 35-47, 1994.

[***Labarthe et al., 2007***] Labarthe, O., Espinasse, B., Ferrarini, A., Montreuil, B., « 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, 2007.

[***Labarthe, 2006***] Labarthe, O., « 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 2006.

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

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

[***Lashkari, 1994***] Lashkari, Y., Metral, M., Maes, P., « Collaborative Interface Agents ». Proceedings of the Twelfth National Conference on Artificial Intelligence, AAAI'94, AAAI Press, Seattle, USA, 1-4 August 1994.

[***Lauras et al., 2003***] Lauras M., Parrod N., Telle O., Lamothe J., Thierry C., « Référentiel de l'entente industrielle : trois approches dans le domaine de la gestion des chaînes logistiques ». 5ème Congrès de Génie Industriel, Québec, 2003.

[***Lauras, 2004***] Lauras, M., «Méthodes de diagnostic et d'évaluation de performance pour la gestion de chaînes logistiques : application à la coopération maison-mère – filiales internationales dans un groupe pharmaceutique et cosmétique». Thèse de doctorat, L'Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 7 juillet 2004.

[***Le Moigne, 1973***] Le Moigne, J.L., «Les systèmes d'information dans les organisations». Paris : Presses Universitaires de France, 1973.

[***Le Moigne, 1977***] Le Moigne, J.L., « La théorie du système général, théorie de la modélisation ». Presses Universitaires de France, 1977.

[***Le Petit Robert, 2011***] Dictionnaire Le Petit Robert, 2011.

[***Le Petit Robert, 2015***] Robert, P., « Le Petit Robert de la langue française ». LeRobert, édition 2015.

[***Lee et Billington, 1993***] Lee, H., Billington, C., « Material management in decentralized supply chains ». Operations Research, 41, pp. 835-847, 1993.

[***Lelarge et al., 1993***] Lelarge, P., Denel, J. et Herman, P., « Les échanges de données informatisées portuaires ». Séries de monographies établies pour la CNUCED en collaboration avec l'association internationale des ports (AIP), Nations Unies, New York, 1993.

[***Leo, 2010***] Leo VI, « The Taktika of Leo VI text, translation, and commentary by George T. Dennis ». Dumbarton Oaks Texts series, Book 12, 2010.

[***Lexique, 2006***] Académie de Besançon, « Lexique ». http://artic.ac-besancon.fr/s%5Fe%5Fs /entmarch/lexique/lexiquede.htm, 2006.

[***Lièvre, 2007***] Lièvre, P., « La logistique ». Collection Repères n° 474, Editions La Découverte, février 2007.

[***Lorino, 1995***] Lorino, P., « Comptes et récits de la performance ». Editions d'Organisation, Paris, 1995.

[***Lummus et Vokurka, 2004***] Lummus, R.R., Vokurka, R.J., « Defining supply chain management: a historical perspective and practical guidelines ». Industrial Management & Data Systems, pp 11–17, 2004.

[***Lung, 1983***] Lung, J.E., « L'organisation du service des vivres aux armées de 1550 à 1650 ». Dans bibliothèques des chartes, Vol. 141, pp. 269-309, 1983.

[***Lutherer, 1996***] Lutherer, E., «Méthodes et outils de modélisation pour la productique». Thèse de doctorat, INSA Lyon, 1996.

[***Mattessich et al., 2001***] Mattessich, P.W, Muray-Close M., Monsey B.R, « Collaboration: what makes it Works ». 2 ed., Amherst H. Wilder Foundation, 2001.

[***Médan et Gratacap, 2008***] Médan, P., Gratacap, A., « Logistique et Supply Chain Management : intégration, collaboration et risque dans la chaine logistique globale ». DUNOD, Paris 2008.

[***MEDDTL, 2008***] Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement, « Les transports intelligents au service d'une mobilité durable». United Nations, New York, 2008.

[***Menachof et Son, 2003***] Menachoff D.A., Son B.G., « The truth about collaboration ». Chief Logistics officer – Penton Media, pp. 6-12, 2003.

[***Mentzer et al, 2001***] Mentzer, J., Dewitt, W., Keebler, J., Min, S., Nix, N., Smith, C., Zacharia, Z., « Defining supply chain management». Journal of business logistics Management, vol. 22, n°2, 2001.

[***Min et Zhou, 2002***] Min H, Zhou G., « Supply chain modelling: past, present and future ». Computers & Industrial engineering, vol. 43, n° 1--2, pp. 231-249, 2002.

[***Monteiro et Ladet, 2001***] Monteiro T., Ladet P., « Formalisation de la coopération dans le pilotage distribué des flux interentreprises ». APII-Journal Européen des Systèmes Automatisés – Pilotage Distribué, pp. 963-989, 2001.

[***Monteiro, 2001***] Monteiro, T., « Conduite distribuée d'une coopération, entre entreprises, le cas de la relation donneurs d'ordres – fournisseurs ». Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 2001.

[***Montferrier, 1835***] Montferrier, A.S., « Dictionnaire des sciences mathématiques pures et appliquées ». Bibliothèque de l'université de Michigan, Vol. 2, janvier 1835.

[***Nanci et al, 2001***] Nanci, D., Espinasse, B., Cohen, B., Asselborn, J.C. et Heckenroth, H., « Ingénierie des systèmes d'information : MERISE ». Vuibert, Paris, 2001.

[***Neuville, 1998***] Neuville J.P., « Béni soit le partenariat : les dix commandements du fournisseur performant ». Annale des Mines de Paris, pp. 55-64, 1998.

[***Nov@log, 2013***] Le Pôle de Compétitivité Logistique Nov@log, « Rapport d'activité : le pôle en mouvement ». Rédacteur : Talbot, S., www.nov@log.eu, 2013.

[***Odubiyi, 1997***] Odubiyi, J.B., Kocur, D.J., Weinstein, S.M., Wakim, N., Srivastava, S., Gokey, C., Graham, J., « SAIRE – A scalable agent-based information retrieval engine ». Proceedings of the Autonomous Agent conference, Agents'97, Ed. by Muller J., New York: ACM Press, pp. 292-299, 5-8 Février 1997.

[***Ortega et Lin, 2004***] Ortega, M., Lin, L., « Control theory applications to the production-inventory problem :a review ». International Journal of Production Research, vol. 42, n°l1, pp. 2303-2322, 2004.

[***Ounnar, 1999***] Ounnar, F., «Prise en compte des aspects décision dans la modélisation par réseaux de Petri des systèmes flexibles de production». Thèse d'état, INP de Grenoble, 1999.

[***Paché et Spalanzani, 2013***] Paché, G., Spalanzani, A., « La Gestion des chaînes logistiques multi-acteurs : perspectives stratégiques ». Presses universitaires de Grenoble, France, 3 novembre 2013.

[***Panzarasa et al., 1999***] Panzarasa, P., Norman, T.J., Jennings, N.R., « Modeling Sociality in the BDI Framework». Dans Proceedings of First Asia-Pacific Conference on Intelligent Agent Technology (IAT'99), pp. 202-206. 1999.

[***Parunak et al., 1999***] Parunak, H.V.D., Savit, R., Riolo, R.L. and Clark, S.J., « DASCh: Dynamic Analysis of Suppfy Chains ». Center for Electronic Commerce Final Report, 1999.

[***Parunak et Odell, 2001***] Parunak, H., J. Odell, J., «Representing social structures in UML». Dans Workshop Agent-Oriented Software Engineering, AOSE2001, 2001.

[***PIPAME, 2009***] Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques, « L'impact des technologies de l'information sur la logistique ». PIPAME, Novembre 2009.

[***Poirier et Reiter, 2001***] Poirier, C.C., Reiter, S.E., « Revoir le partenariat d'entreprise ». La Supply Chain, Editeurs : Poirier, C.C., Reiter, S.E., Dunod, p. 285, 2001.

[***Queau, 1986***] Queau, P., « Éloge de la simulation: de la vie des langages à la synthèse des images ». Champ Vallon, Paris, 1986.

[***Rao et Georgeff, 1991***] Rao, A.S., Georgeff, M.P., «Modelling rational agents within a bdi-architecture». In Proceedings of the Second International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning, KR '91, pp. 473–484, 1991.

[***Rhodes, 2000***] Rhodes, J., « Just-In-Time Information Retrieval ». Ph.D. Thesis, MIT Media Lab, May 2000.

[***Rimmer, 1999***] Rimmer, P.J., «The Asia-Pacific Rim's Transport and Telecommunications Systems: Spatial Structure and Corporate Control Since the Mid-1980s». Geojournal, vol. 48, pp. 43-65, 1999.

[***Roche, 2000***] Roche C., « Corporate antologies and concurrent enineering». Journal of Materials Processing Technology, N° 107, pp. 187-193, 2000.

[***Rodrigue, 2004***] Rodrigue, J-P., «Freight, Gateways and Mega-Urban Regions: The Logistical Integration of thee Bostwash Corridor». Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie, vol. 95, n° 2, pp. 147-161, 2004.

[***Rodriguez, 1994***] Rodriguez, M., « Modélisation d'un agent autonome: Approche constructiviste de l'architecture de contrôle et de la représentation de connaissances ». Thèse de doctorat, Université de Neufchâtel, 1994.

[***Roos, 2003***] Roos, P., « Les systèmes d'informations, leviers de la performance logistique de l'entreprise ». Creg-ac, Versailles, 2003.

[***Roquefort, 1829***] Roquefort, B., « Dictionnaire étymologique de la langue française, où les mots sont classés par familles ». Imprimeur-éditeur : Decourchant, Paris, 1829.

[***Rose et al., 2002***] Rose B., Garza L., Lombard M., Lossent L., Ris G., « Vers un référentiel commun pour les connaissances collaboratives dans l'activité de conception des produits ». 1er colloque du groupe de travail Gestion des Compétences et des Connaissances en génie Industriel, pp. 85-90, 2002.

[***Ross, 1977***] Ross, D.T., « Ross D. Structured Analysis (SA): a language for communicating ideas». IEEE Trans Soft Engineering, 1977.

[***Rota -Frantz et al, 2001***] Rota-Frantz, K., Bel, G., Thierry, C., « Gestion des flux dans les chaînes logistiques ». Dans Performance Industrielle et gestion des flux, pp. 153-187, Hermes Science, 2001.

[***Rotter, 2004***] Rotter, H., «New operating concepts for intermodal transport: the mega hub in Hanover/Lehrte in Germany». Transportation Planning and technology, vol. 27, n° 5, pp. 347-365, 2004.

[***Rus et al., 1997***] Rus, D., Gray, R., Kotz, D., « Transportable Information Agent ». Journal of Intelligent Information systems, pp. 215-238, 1997.

[***Russel et Whitehead, 1910-1913***] Russel, B., Whitehead, A.N., « Principia Mathematica ». Cambridge university press, 1910-1913.

[***Russell et Norvig, 1995***] Russell, S., Norvig, P., « Artificial Intelligence: a Modern Approach ». Prentice-Hall, 1995.

[***Sabas, 2001***] Sabas A., « Systèmes multi-agents : une analyse comparative des méthodologies de développement (Vers la convergence des méthodologies de développement et la standardisation des plateformes SMA) ». Mémoire de maîtrise en mathématiques et informatique appliquées, Université du Québec à Trois-Rivières, Octobre 2001.

[***Said, 2006***] Said, S-M., « Le système d'information : système nerveux des supply chains - De l'intégration à la modularisation ». Global Marketing Director, 2006.

[***Sardas et al., 2002***] Sardas J.C., Erschler J., Terssac G., « Coopération et organisation de l'action collective ». Groupe PROSPER, 2002.

[***Savy, 2007***] Savy, M., « Le transport de marchandises ». Ed Eyrolles, 2007.

[***Searle, 1969***] Searle, J., « Speech Acts: An Essay in the Philosophy of Language ». Cambridge University Press, Cambridge, 1969.

[***Shen et al., 2006***] Shen, W., Hao, Q., Yoon, H.J, Norrie, D.H., « Applications of agent-based systems in intelligent ;manufacturing : an updated review ». Advanced Engineering Informatics, vol. 20, pp. 415-431, 2006.

[***Smith, 1988***] Smith R.G, « 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, 1988.

[***Soulié, 2001***] Soulié, J-C., « Vers une approche multi-environnements pour les agents ». Thèse de doctorat, Université de la Réunion, 2001.

[***Stadlter et Kilger, 2000***] Stadtler, H., Kilger, C., « Supply chain Management and Advanced Planning ». Edition Springer – Verlag, p. 371, 2000.

[***Stratégie logistique, 2003***] Stratégie logistique : le magazine des secteurs du transport et de la logistique, « Alexandre Le Grand précurseur de la logistique moderne ? ». www.strategielogistique.com, n° 54, p. 134, mars 2003.

[***Supply Chain Council, 2005***] Supply Chain Council, http://www.supply-chain.org, 2005.

[***Tahon et Frein, 1999***] Tahon, C., Frein, Y., « Document de synthèse du Groupe de Recherches en Productique » Thème 4 : évaluation de performances, 1999.

[***Tan et al, 1998***] Tan, K., Handfield, R., Krause, D., « Enhancing the firm's performance through quality and supply base management: an empirical study ». International Journal of Production Research, 36 (10), p. 2813-2837, 1998.

[***Tardieu et al., 1989***] Tardieu, H., Rochfeld, A., Coletti, R., «La méthode Merise : Principes et outils». Tome 1, Les Editions d'Organisation, 1989.

[***Tardieu et al., 1991***] Tardieu, H., Rochfeld, O., Colleti, R., « La méthode Merise, principes et outils (tome 1) ». Editions Organisation, 1991.

[***Tardieu et al., 2000***] Tardieu, H., Rochfeld, A., et Collett, C., «La méthode MERISE». Éditions d'organisation, 2000.

[***Tayur et al, 1999***] S. Tayur, S., Ganeshan, R., Magazine, M., « Quantitative model for supply chain management». Kluwer Academic Publishers, 1999.

[***Tharumarajah, 2003***] Tharumarajah, A. « From fractals and bionics to holonics ». in DEEN, S.M. (Ed), Agent-Based Manufacturing, Springer-Verlag, Berlin, chapter 2, pp. 11-30, 2003.

[***Thomas et Griffin, 1996***] Thomas, D.J., Griffin, P.M., « Coordinated supply chain management ». European Journal of Operational Research, pp. 1-15, 1996.

[***Thorpe, 1986***] Thorpe, J.C., « Pure Logistics. The Science of War Preparation ». National Defense University Press Washington, DC, 1986.

[***Trentesaux, 2002***] Trentesaux, D., « Pilotage hétérarchique des systèmes de production ». Habilitation à diriger des recherches, Université de Valenciennes et du HainautCambrésis, 2002.

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

[***Tsay, 1999***] Tsay, A.A., « The Quantity Flexibility Contract and SupplierCustomer Incentives ». Management Science, vol. 45, n° 10, 1999.

[***UIRR, 2008***] Union internationale des sociétés de transport combiné, www.uirr.com, 2008.

[***Van brussel et al., 1998***] Van Brussel, H., Wyns, J., Valckenaers, P., Bongaerts, L., et Peeters, P., « Référence architecture for holonic manufacturing Systems: PROSA ». Computers in Industry, vol. 37, n° 3, pp. 255- 274, 1998.

[***Venturelli et al., 2010***] Venturelli, N., Miani, P., « Transport Logistique ». Les mémentos, 2010.

[***Vernadat, 1999***] Vernadat, F., «Techniques de modélisation en entreprise : applications aux processus opérationnels». Economica, 1999.

[***Ward et al., 1985***] Ward, P.T., Mellor, S.J., «Structured development for real-time systems». Vol.1, 2, 3, Ed. Facsimile, 1985.

[***Weiss, 2000***] Weiss, G., « Multiagent Systems, A Modern Approach to distributed Artificial Intelligence ». The MIT Press, 2000.

[***Weyns, 2006***] Weyns, D., « An architecture-centric approach for software engineering with situated multi-agent systems ». Thèse de doctorat, Katholieke Universiteit Leuven, 2006.

[***Wooldridge et al., 2000***] Wooldridge, M., Jennings, N., and Kinny, D., « The gaia methodology for agent-oriented analysis and design ». In Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. Kluwer Academic Publishers, 2000.

[***Wooldridge et Jennings, 1995***] Wooldridge, M., Jennings, N.R., « Intelligent agents : Theory and practice ». Knowledge Engineering Review, 10, pp. 115–152, 1995.

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

ANNEXES

Annexe 1 – Les éditeurs des logiciels logistiques mondiaux et français [*PIPAME, 2009*].

Annexe 2 – Les atouts du corridor de la vallée de Seine [*CCI Normandie, 2014*].

Annexe 3 – Le méta-modèle du domaine agentifié en grand format.

Annexe 4 – Le méta-modèle d'implémentation en grand format.

Annexe 1 : Les éditeurs des logiciels logistiques mondiaux et français [*PIPAME, 2009*]

Les éditeurs de logiciels ERP (progiciels de gestion intégrés)
En jaune : les éditeurs français

ERP	
Editeurs	Solution
AG2L	Industria
AGENA 3000 (France)	Genacod ERP
AGIPROD (Groupe SILOG)	AgiProd
ALDATA	Aldata G.O.L.D.
AUDAXIS (Compiere)	Compiere
CEGID	Cgid Business
CYLANDE	Cyrus
CYLANDE	Storeland
DIVALTO	Divalto
EUREKA SOLUTIONS	Eurêka ERP
EXACT SOFTWARE FRANCE	Exact Globe Enterprise/e-synergy
EXPERTUS SOLUTIONS	Pyra XRP
GALION SOLUTIONS	Galion Automotive
GENERIX/INFLUE	Generix Collaborative Enterprise
GP2	GPIC
IBS	IBS Enterprise
IFS	IFS Application 7
INFOR	Infor ERP LN 6.1
INFOR	Infor ERP Syteline
ISIA	Diapason
JEEVES	Jeeves ERP
LAWSON	Lawson M3
MICROSOFT	Dynamics AX
MICROSOFT	Dynamics Nav
ORACLE	JD Edwards Enterprise One
ORDIROPE	Minos
PROGINOV	ERP-Proginov
QUALIAC	Qualiac ERP
SAGE	Sage X3 Enterprise
SAP	SAP ERP
SILOG	Silog ERP
SILVERPROD	Silver CS
SYLOB	Sylob 7
VCS TIMELESS	Colombus
VIF	VIF

Les éditeurs de logiciels de gestion du transport (TMS)

Les outils TMS plutôt orientés chargeurs	
Sociétés	Solutions
CIRCON	Circon Transport pour Microsoft Dynamics AX
CJM International	Open PRF, Open TRM et Open RF
DDS Logistics	DDS Shipper, DDS Freight
E-Solutions	Transport Management Suite
i2 Technologies	TLM (Total Logistics Management)
OMP Informatique .....Transpo	R2000X
ORTEC	ORTEC Transport et Distribution, Shortrec Distriplanner
RedPrairie	E2e Transportation Management
Routing International	Winroute
SAP	SAP TM
Sextant Informatique	Synersys
Sigma Informatique	Trucking Online
Transept Informatique	Transept Suite
Urios Informatique	WinTrans, Spot

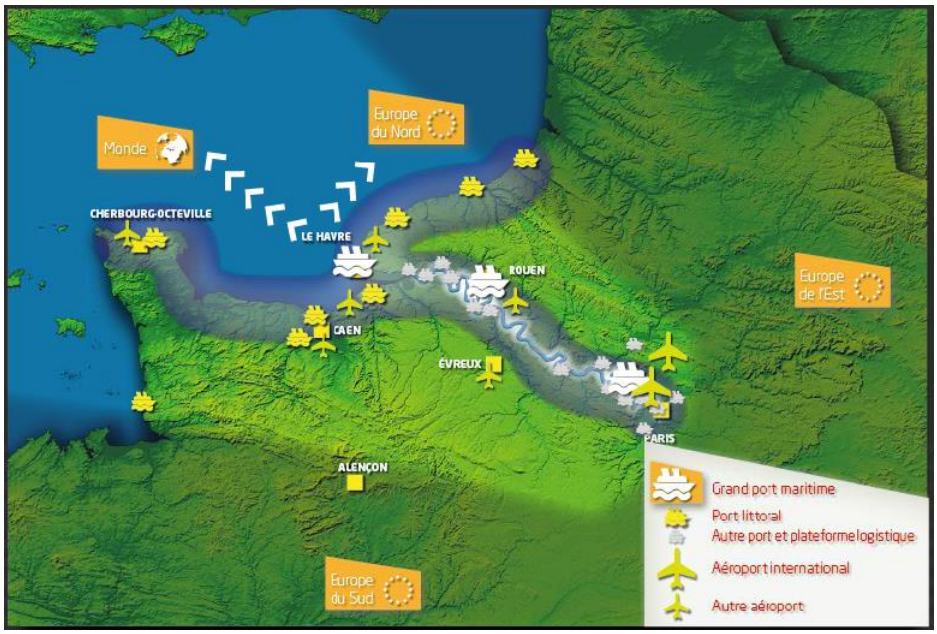
Les outils TMS plutôt orientés chargeurs	
Sociétés	Solutions
ABACOM Informatique	Winfret
APLUS Informatique	TRAPLUS
ELOsystèmes	ELOmobile
GeoConcept	GeoScheduling Suite for Delivery
GFI Informatique	VIEWTRANS
IER	IER's Transport Management Suite
Infflux	BEXT TS
ITEM Informatique	Item TRANS
Puissance i	DST
Sage	Sage Transport
Teamlog	Obbisoft
Wexlog	WexVS
Xyric	Proxylog
Young & Partners	NaviTrans

Les logiciels de planification et de prévision

APS (Advanced Planning Systems)	
Nom de l'éditeur	Nom de la solution
AIS	SteelPlanner
Axxom Software AG	Orion-PI
AZAP	AZAP
CEGID	SCM BPM/Orliweb SCM
DYNASYS	n.SKEP
FUTURMASTER	FuturMaster
ILOG	LogicTools Suite
INFOR	Infor SCM
JDA Software	Supply & Demand Optimization
LAWSON Software	Lawson M3 SCP
OM PARTNERS	OMP Plus
ORACLE	JD Edwards SCP
ORTEMS	Ortems
PLANIPE	Planipe
PREACTOR	Preactor MPS/APS
QUINTIQ	Quintic Software + Logistics Planner
SAP	APO
SERVIGITICS	Servigistics Service Parts Management
SLIMSTOCK	Slim4
TOOLSGROUP	Service Optimizer 99+
TXT e-solutions	TXTPerform 2008
VCS TIMELESS	Colombus.Next

Progiciels de Prévision	
Editeurs	Solutions
ALDATA Solution S.A.	G.O.L.D. Forecast
APERIA	Aperia Forecast
AZAP	AZAP Prévision
BFS	Forecast Pro Unlimited Forecast Pro Xe
CYLANDE CS	Storeland/United Retail
D3S Technologies	Optimate Forcol/Retail
DEMAND MANAGEMENT	Demand Solutions Forecast Management
DYNASYS	n.Skep Demand Planning
FUTURMASTER	Futurmaster Prévision
IFS	IFS Demand Planning
INFOR	INFOR SCM Demand Planning
JDA SOFTWARE	JDA Demand
JEEVES	Module Prévision
LAWSON SOFTWARE	Lawson M3 Demand Planning
MANHATTAN Associates	Demand Forecasting
OM PARTNERS	OM Forecaster
ORACLE	Oracle Demantra
PLANIPE	Planipe AAF
SAP	SAP SVM DP
SLIMSTOCK (ex. Progistock)	Slim4
SYSLIFE	Module prévision d'Adexio
TXT e-solutions	TXT Demand
VCS TIMELESS	Colombus.Next

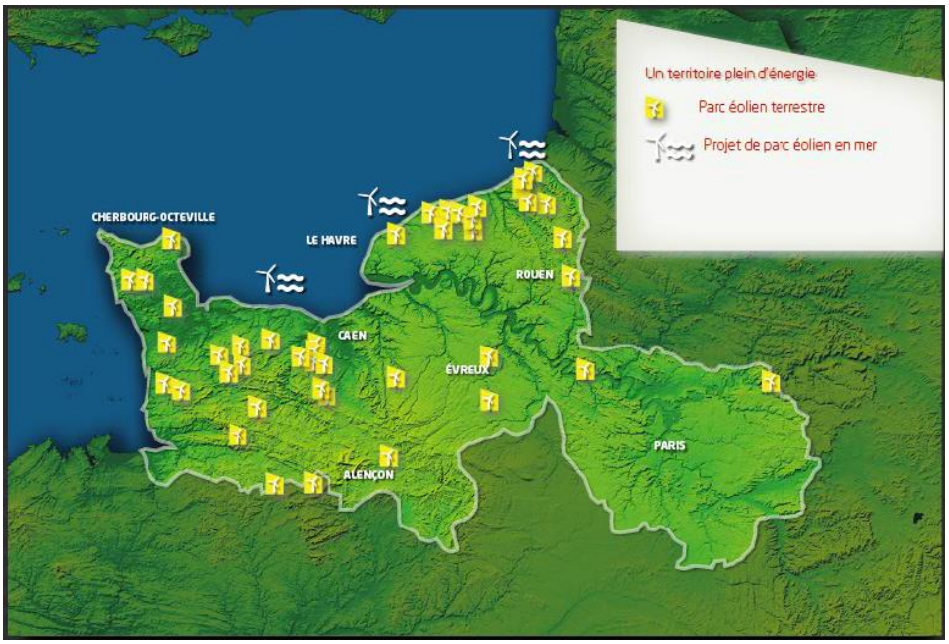
Annexe 2 : Les atouts du corridor de la vallée de Seine [*CCI Normandie, 2014*]



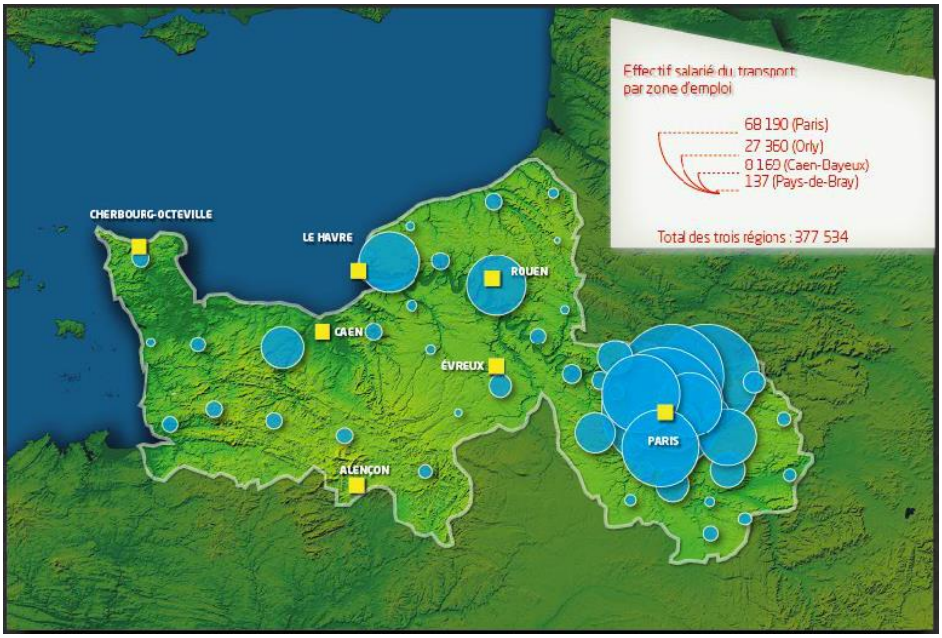
Les infrastructures de transport de la vallée de Seine.



Les pôles de compétitivité de la vallée de Seine.

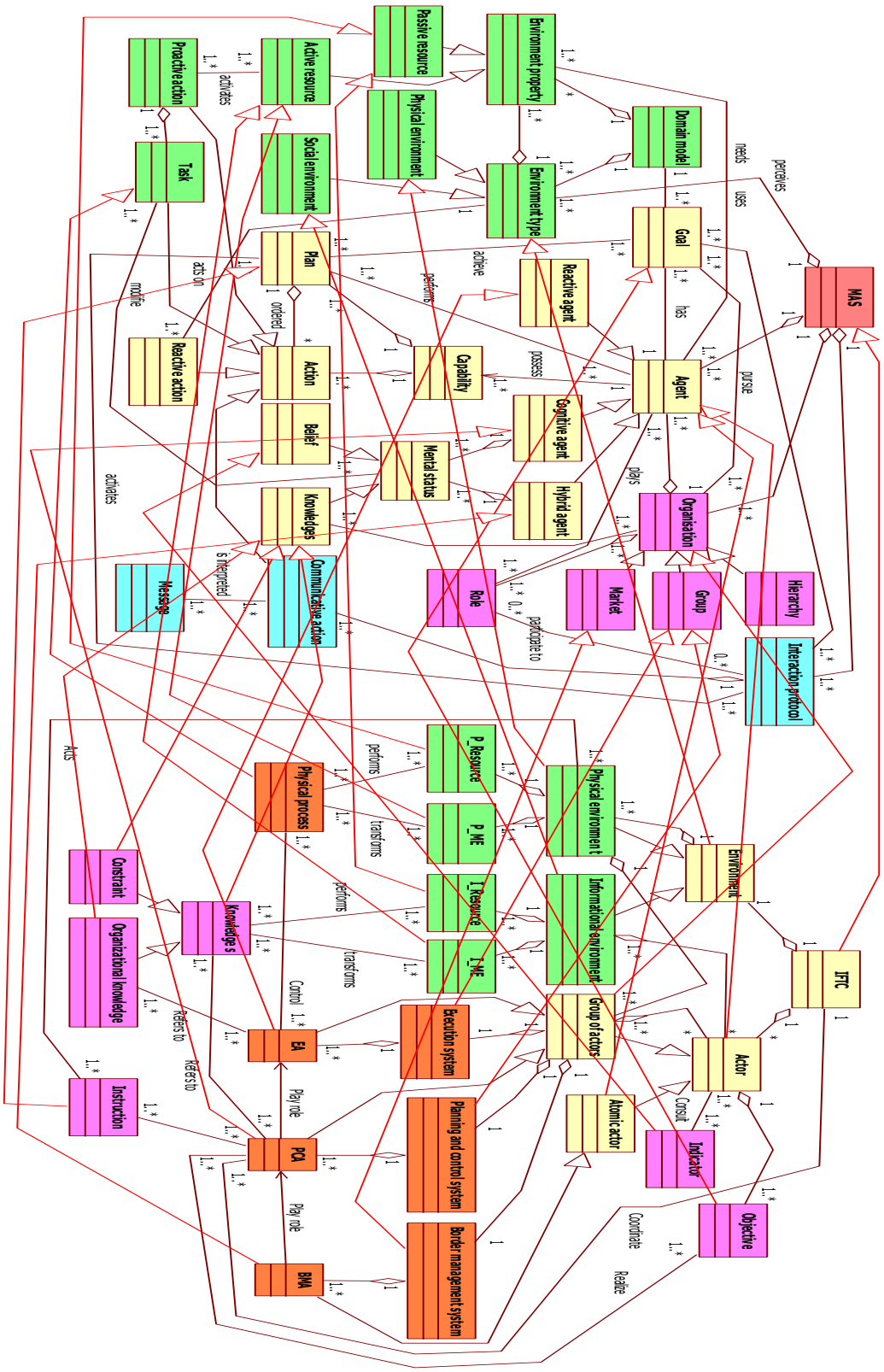


Les parcs éoliens de la vallée de Seine.



Effectif salarié du transport de la vallée de Seine.

Annexe 3 : Le méta-modèle du domaine agentifié en grand format



Annexe 4 : Le méta-modèle d'implémentation en grand format

