THÈSE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité : Informatique

Préparée au sein de « l'Université Le Havre Normandie et de l'Université Cadi Ayyad de Marrakech »

Gestion multi-agents d'un terminal à conteneurs

Présentée et soutenue par
Mohamed Nezar ABOURRAJA

Thèse soutenue publiquement le 09/02/2018 devant le jury composé de		
M. Mohamed Sadgal	PES, Université Cadi Ayyad de Marrakech, Maroc	Président
M. Abdelhamid Benaini	Professeur, Université Le Havre Normandie, France	Examinateur
M. Djamal Benslimane	PES, Université Claude Bernard Lyon 1, France	Rapporteur
M. Ladjel Bellatreche	PES, Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique, France	Rapporteur
Mme. Amina El Omri	PES, Université Hassan II de Casablanca, Maroc	Rapporteur
M. Jaouad Boukachour	MCF-HDR, Université Le Havre Normandie, France	Directeur de thèse
M. Abdelaziz El Fazziki	PES, Université Cadi Ayyad de Marrakech, Maroc	Directeur de thèse

Thèse codirigée par M. Jaouad BOUKACHOUR et M. Abdelaziz EL FAZZIKI, Laboratoire de Mathématiques Appliquées du Havre et Laboratoire Ingénierie des Systèmes Informatiques à la FSSM

À la mémoire de mon père avec lequel j'aurais tant aimé partager ce moment, le vide que t'as laissé ne sera jamais comblé, ton sourire et ta voix me manquent, qu'Allah t'accueille dans son vaste paradis, tu demeureras dans mon coeur jusqu'au jour où je te rejoindrai, Inch'Allah.

À celle qui m'a donné naissance, qui m'a donné amour et joie … en fait, qui m'a tout donné sans compter … à la perle de ma vie, à ma chère mère qu'Allah te préserve des malheurs de la vie, tu resteras à jamais le flambeau qui illuminera mon chemin.

Je vous dédie principalement à vous, mes parents, ce modeste travail, car sans vous, mais avant tout sans l'aide et le soutien et tout le guidage d'Allah, ce rêve d'enfance n'aurait jamais pu voir le jour … aishiteruze.

Je dédie ce travail aussi,

À tous les membres de ma famille sans aucune exception, pour vos encouragements continus et votre soutien inconditionnel. Puisse Allah vous donner santé, bonheur et longue vie.

À tous les enseignants qui ont contribué à ma formation … depuis la maternelle jusqu'au doctorat … Je vous serai gré, et éternellement reconnaissant, que Dieu vous protege.

À tous mes amis et collègues qui m'ont supporté … en souvenir des moments agréables que nous avons passés ensemble, puisse Allah vous préservez du mal et je le prie pour que notre amitié et fraternité soient éternelles.

Et à tous ceux que ma réussite leur tient à coeur, J'implore Allah pour qu'il vous garde en bonne santé.

Remerciements

En tout premier lieu, je remercie du plus profond de moi-même Dieu, tout Puissant, de m'avoir aidé à réaliser ce modeste travail et de m'avoir donné la force pour dépasser toutes les difficultés. Rien n'a de finalité sans la Puissance, la Bonté et la Volonté de Dieu (Allah).

J'adresse mes plus vifs remerciements à mes directeurs de thèse : M. Jaouad BOUKACHOUR, Maître de conférence HDR à l'université Le Havre Normandie, et M. Abdelaziz EL FAZZIKI, professeur de l'enseignement supérieur à l'université Cadi Ayyad de Marrakech. Je leurs témoigne toute ma gratitude et ma profonde reconnaissance pour leur encadrement, conseils, confiance et pour le soutien qu'ils ont su m'accorder durant toutes ces années.

J'adresse aussi mes remerciements les plus sincères à M. Mohamed SADGAL, professeur à l'université Cadi Ayyad de Marrakech, qui m'a fait l'honneur d'accepter d'examiner ce travail et de présider le jury de ma soutenance.

Je tiens à remercier M. Djamal BENSLIMANE, professeur à l'université Claude Bernard Lyon 1, M. Ladjel BELLATRECHE, professeur à l'école Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique France, et Mme. Amina El OMRI, professeur à l'université Hassan II de Casablanca, pour leur lecture approfondie de ce mémoire ainsi que pour les remarques et les suggestions qu'ils ont su apportées.

Je tiens à remercier M. Abdelhamid BENAINI, professeur à l'université du Havre, d'avoir accepté d'examiner cette thèse et d'apporter son point de vue sur ce travail.

Je tiens également à exprimer ma gratitude et mes remerciements les plus distingués à Madame Dalila BOUDEBOUS, Maître de conférences à l'université du Havre, pour ses conseils et l'intérêt qu'elle a bien voulu porter à ce travail.

Un grand merci à mes collègues du laboratoire LISI et du laboratoire LMAH pour ambiance assez chaleureuse qu'ils ont su faire régner.

Mes remerciements vont également à tous les membres de ma famille qui m'ont soutenu et encouragé.

Je remercie enfin toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail de cette thèse.

Résumé

De nos jours, les plateformes portuaires cherchent à massifier leurs capacités de projection de conteneurs vers et à partir de leurs réseaux hinterland en misant sur les modes ferroviaires et fluviaux. Cela pour évacuer plus rapidement un volume quasi croissant de conteneurs livré par voie maritime et d'éviter les situations indésirables, tels que les situations d'asphyxie. De plus, les plateformes portuaires ont pris conscience que leur attractivité aux yeux des prestataires logistiques dépend non seulement de leur fiabilité et de leurs qualités nautiques mais également de leur capacité à offrir une desserte massifiée de leur hinterland.

Contrairement à ce qui a pu être observé en Europe, la part du transport massifié a quasiment stagné au Havre dans les dernières années. A cet effet, le port du Havre a mis en place un terminal multimodal de conteneurs lié par rail et par voie navigable à un hinterland riche et dense en population (Bassin parisien, Marchés européens), et par des navettes ferroviaires aux autres terminaux maritimes du port Havre. L'intérêt économique et stratégique du ce nouveau terminal est de renforcer la position du GPMH au niveau national, européen et mondial, et d'un point de vue écologique, diminuer l'utilisation excessive du routier en misant sur les modes moins polluants.

Dans cette thèse, les efforts se focalisent sur la modélisation et la simulation du déroulement des opérations de manutention et d'allocation de ressource dans un terminal à conteneurs et particulièrement l'ordonnancement des portiques de manutention aux zones d'opérations. Étant donné qu'un terminal à conteneurs est un système complexe, nous avons d'abord défini une démarche de modélisation qui facilite le processus de construction du modèle de simulation. Cette démarche est un processus itératif permettant de raffiner le modèle au fur et à mesure des étapes de développement réalisées. Les différentes étapes de développement sont liées par une série de diagrammes qui permet d'exprimer de façon claire les éléments et les relations formant le modèle de simulation. Ensuite, nous avons intégré dans notre modèle deux stratégies de non-croisement de portiques à la cour ferroviaire du terminal multimodal. Le but de ces stratégies est la minimisation des temps et des mouvements improductifs pour améliorer la performance et la productivité des portiques de manutention. La première stratégie est basée sur des règles de mouvement et sur la collaboration et coopération entre agents portiques. Tandis que la deuxième stratégie est basée sur un modèle heuristique. Ces deux solutions ont été testées en utilisant l'outil de simulation AnyLogic et les résultats obtenus montrent la qualité de nos solutions. Concernant le problème d'ordonnancement des portiques à la cour fluviale, nous l'avons étudié en utilisant un couplage Optimisation-Simulation. Dans ce problème les temps de chargement et de déchargement de conteneurs et les temps de déplacement des portiques entre les baies sont considérés comme incertains. Le couplage est composé d'une méta-heuristique d'optimisation « colonie de fourmis » et d'un modèle de simulation à base d'agents. Chaque solution (une séquence de tâches) trouvée par l'algorithme d'optimisation est simulée et évaluée pour déterminer les nouvelles durées des tâches qui seront ensuite injectées comme donnée d'entrée à l'algorithme avant l'itération

suivante. Le couplage est exécuté jusqu'à ce que la différence entre les dernières itérations soit trop faible.

Mots-clés : Terminal à conteneurs, Ordonnancement de portiques, Modélisation et Simulation, Système multi-agents, Méta-heuristique.

Abstract

Nowadays, seaports seek to achieve a better massification share of their hinterland transport by promoting rail and river connections in order to more rapidly evacuate increasing container traffic shipped by sea and to avoid landside congestion. Furthermore, the attractiveness of a seaport to shipping enterprises depends not only on its reliability and nautical qualities but also on its massified hinterland connection capacity.

Contrary to what has been observed in Europe, the massification share of Le Havre seaport has stagnated in recent years. To overcome this situation, Le Havre Port Authority is putting into service a multimodal hub terminal. This terminal is linked only with massified modes to a rich and dense geographical regions (Ile de France, Lyon), and with rail shuttles to the maritime terminals of Le Havre seaport. The aim of this new terminal is to restrict the intensive use of roads and to provide a river connection to its maritime terminals (MTs) that do not include a river connection from the beginning.

In this study, we focus on the modeling and the simulation of container terminal operations (planning, scheduling, handling …) and particularly crane scheduling in operating areas. Designing multi-agents based simulation models for the operation management of a complex and dynamic system is often a laborious and tedious task, which requires the definition of a modeling approach in order to simplify the design process. In this way, we defined a top-down approach with several steps of specification, conception, implementation and verification-validation. This approach is an iterative process that allows the model to become more complex and more detailed. In this thesis, we pay more attention to crane scheduling problem in operating areas. For the rail-rail transshipment yard of the multimodal terminal, we designed two anti-collision strategies that aim to minimize unproductive times and moves to improve crane productivity and to speed up freight train processing. These strategies are tested using multi-method simulation software (Anylogic) and the simulation results reveal that our solutions are very satisfactory and outperform other existing solutions. With regard the fluvial yard, the stochastic version of crane scheduling problem is studied. The problem is solved with a mixed Optimization-Simulation approach, where the loading and unloading times of containers and travel times of cranes between bays are considered uncertain. The used approach is composed of an Ant Colony Optimization (ACO) metaheuristic coupled to an agent-based simulation model. Each solution (a tasks sequence) found by the optimization algorithm is simulated and evaluated to determine the new tasks' periods which will then be injected as input to the ACO algorithm before the next iteration. The coupling is executed until the difference between the last iterations is too low.

Keywords: Container Terminal, Crane Scheduling Problem, Modeling and Simulation, Multi-agents System, Meta-heuristics.

ملخـص الرسـالة

تسعى الموانئ في الوقت الراهن إلى تطوير و زيادة عدد الحاويات الواردة و المرسلة عبر السكك الحديدية والأنهار من خلال التركيز على وسائل النقل ذات القدارت العالية (النقل الجماعي للحاويات) .وهذا من أجل إجلاء عدد متزايد من الحاويات البحرية بشكل أسرع وتجنب الحالات غير المرغوب فيها، مثل حالات الاختناق. وبالإضافة إلى ذلك، أصبحت الموانئ على علم بأن جاذبيتها في نظر مقدمي الخدمات اللوجستية لا يعتمد فقط على موثوقيتها وقدراتها البحرية ولكن أيضا على قدرتها في تقديم خدمة ذات قدرة عالية إلى المناطق الداخلية.

وخلافا لما لوحظ في أوروبا، فإن حصة النقل الجماعي للحاويات قد سجلت ركودا في ميناء لو هافر في السنوات الأخيرة. ولهذا، فقد أنشأ ميناء لو هافر محطة حاويات متعددة الوسائط متصلة فقط بالسكك الحديدية ووسائل النقل النهرية. وتتمثل الفائدة الاقتصادية والاستراتيجية لهذه المحطة الجديدة في تعزيز مكانة ميناء لو هافر على المستوى الوطني والأوروبي والعالمي، ومن وجهة النظر الإيكولوجية، الحد من الاستخدام المفرط للشاحنات من خلال التركيز على وسائط أقل تلويثا.

هذه الأطروحة، تركز على نمذجة ومحاكاة عمليات المناولة وتخصيص الموارد في محطة الحاويات وخاصة جدولة رافعات المناولة في مناطق العمليات. علما أن محطة الحاويات هو نظام معقد، فقد حددنا أولا نهجا من أجل بناء نموذج لمحاكاة نظام تشغيلها. هذا النهج هو عملية تكرارية لصقل النموذج من مرحلة إلى أخرى. وترتبط المراحل المختلفة بسلسلة من الرسوم البيانية التي تتيح التعبير بوضوح عن العناصر والعلاقات التي تشكل نموذج المحاكاة. ثم بعد ذالك، قمنا بتطوير استراتيجيات معتمدة على نظام متعدد العملاء لإدارة رافعات المناولة. الهدف من هذه الاستراتيجيات هو التقليل إلى أدنى حد من الأوقات والحركات غير المنتجة لتحسين أداء وإنتاجية المناولة. فيما يتعلق بمشكلة جدولة رافعات المناولة في منطقة العمليات النهرية، فقد درسنا ذلك من خلال ربط أساليب الأمثلية والمحاكاة. وقد تم اعتبار أوقات تحميل الحاويات وسرعة تحرك رافعات المناولة على أنها غير مؤكدة.

الكلمات الرئيسية: محطة الحاويات، جدولة رافعات المناولة، النمذجة والمحاكاة، نظام متعدد الوكلاء.

Avant-propos

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire de thèse se sont déroulés dans le cadre d'une convention de cotutelle entre l'Université Le Havre Normandie, France et l'Université Cadi Ayyad de Marrakech, Maroc, sous la codirection de M. Jaouad BOUKACHOUR et M. Abdelaziz EL FAZZIKI. Une partie de nos travaux ont été réalisés dans le cadre de deux projets : DCAS (Direct Cargo Axe Seine) porté par le GPMH et CLASSE soutenu par l'UE, au sein du Laboratoire de Mathématiques Appliquées du Havre (LMAH). L'autre partie a été effectuée dans le Laboratoire Ingénierie des Systèmes Informatiques à la FSSM (LISI).

Tables des matières

Introduction générale **1**

Première Partie : État de l'art **11**

Chapitre I. Terminal à conteneurs **12**
1. Logistique de conteneurs **14**
1.1. Le conteneur 14
1.2. Défis actuels et perspectives d'avenir 16
1.3. Plateformes portuaires 19
2. Le terminal à conteneurs **20**
2.1. Introduction 20
2.2. Classifications et structure physique 22
2.3. Zones d'opérations et équipements 26
2.4. Terminaux automatisés et ports secs 36
2.5. Etude de cas : le terminal multimodal du port du Havre 37
2.6. Niveaux de planification et indicateurs de performance 41
3. Revue de littérature sur les travaux connexes **51**
3.1. Modélisation et simulation des terminaux à conteneurs 51
3.2. Gestion des opérations de manutention 53
3.3. Ordonnancement des grues de manutention 53
4. Apport et conclusion **54**

Chapitre II. Concepts de base, outils et méthodes de conception **56**
1. Modélisation **58**
1.1. Introduction 58
1.2. Définitions 60
1.3. Construction d'un modèle 64
1.4. Types de modèles et outils de conception 65
2. Simulation **69**
2.1. Introduction 69
2.2. Objectifs et avantages 70
2.3. L'approche optimisation-simulation 71
2.4. De l'abstraction à la concrétisation : l'implémentation 73
2.5. Vérification, validation et calibrage du modèle de simulation 77
3. Système multi-agents **79**
3.1. Introduction 79
3.2. Définitions et types 80
3.3. Spécification et organisation 82
3.4. Interactions 84
3.5. Système multi-agents et les terminaux à conteneurs : intérêts et analogies 85
4. Apport et conclusion **87**

Deuxième Partie : Contributions **89**

Chapitre III. Modèle de simulation à base d'agent pour le terminal multimodal **90**
1. Aperçu sur la démarche de modélisation **91**
2. Initialisation : définition du contexte et spécification des besoins **93**
2.1. Structure et contexte 93
2.2. Modélisation des besoins et des objectifs 97
2.3. Modèle primitif 100
2.4. Diagramme de cas d'utilisation 100
3. Analyse de cas d'utilisation **103**
3.1. Fiche descriptive 104

3.2. Diagramme d'activité ... 108
3.3. Modèle de simulation générale ... 110
4. Conception du modèle multi-agents ... 111
4.1. Agentification ... 112
4.2. Classification du système ... 122
4.3. Modèle de simulation à base d'agents ... 125
5. Structure du modèle exécutable ... 129
5.1. Package : TMMResourceModel ... 129
5.2. Package : TMMControllerModel ... 131
5.3. Package : TMMAgentsModel ... 131
5.4. Les événements et les *listeners* ... 132
6. Discussion et conclusion ... 133

Chapitre IV. Ordonnancement des portiques de manutention dans les zones d'opérations 135
1. Gestion d'interférence et de blocage des portiques à la cour ferroviaire ... 136
1.1. Introduction ... 136
1.2. Architecture proposée pour la cour ferroviaire ... 137
1.3. Déroulement des opérations de manutention ... 141
1.4. Approche I : la stratégie à base d'agents ... 143
1.5. Approche II : la stratégie à base d'heuristique ... 152
1.6. Implémentation de modèles et validation ... 155
1.7. Résultats des simulations et comparaison des modèles ... 160
2. Ordonnancement des opérations à la cour fluviale ... 167
2.1. Rappel : le modèle de simulation de la cour fluviale ... 169
2.2. Couplage Optimisation-Simulation ... 169
2.3. Implémentation et résultats ... 171
3. Conclusion ... 173

Conclusion générale ... 175

Références ... 179

Liste des figures

Introduction générale

Figure 1. Gestion d'un TC 4

Première Partie : État de l'art

Chapitre I

Figure I.1 Les acteurs de la chaîne logistique globale (source, Kemme (Kemme 2013)) 13
Figure I.2 Conteneurs ISO, voir Tableau I.1 16
Figure I.3 Trafic international de conteneurs échangés chaque année entre 2000-2014 17
Figure I.4 Ports et Hinterland (source : (Guerrero 2014) 17
Figure I.5 Structure physique d'un terminal à conteneurs 25
Figure I.6 Les quatre sous-systèmes d'opérations (source : (Steenken et al. 2004)) 26
Figure I.8 Navire porte-conteneurs 27
Figure I.7 Interface maritime 27
Figure I.9 Capacité de levage des grues de quai 28
Figure I.11 Les dispositions de la zone de stockage (source : (Carlo et al. 2014a)) 29
Figure I.10 Zone de stockage 29
Figure I.12 Capacité de stockage des systèmes les plus utilisés 30
Figure I.13 Les opérations de réception-expédition 32
Figure I.14 Les déplacement des grues de manutention 35
Figure I.15 Le sous-système de transport (une flotte d'AGV) 36
Figure I.16 Systèmes de transport interne 36
Figure I.17 Port du Havre 38
Figure I.18 Part modal dans les ports allant du Havre à Hambourg et Marseille 39
Figure I.19 L'ancien et l'actuel système logistique du port du Havre 39
Figure I.20 Le terminal multimodal (TMM) 40
Figure I.21 La cour ferroviaire (source : (Oudani 2016)) 40
Figure I.22 La cour fluvial (source : (Oudani 2016)) 41
Figure I.23 Schéma des indicateurs de performance 48

Chapitre II

Figure II.1. Modélisation (source : (Siebert 2011)) 59
Figure II.2 Représentation de la simulation (source : (Siebert 2011)) 69
Figure II.3 L'approche optimisation-simulation 73
Figure II.4 Les approches de simulation (source : (Borshchev 2013)) 75
Figure II.5 Agent (source : (Siebert 2011)) 81

Deuxième Partie : Contributions

Chapitre III

Figure III.1 Le processus de modélisation 92
Figure III.2 Diagramme de classe - infrastructure 95
Figure III.3 Diagramme de contexte 97
Figure III.4 Le TMM 97
Figure III.5 Diagramme AND/OR - objectifs et besoins 98
Figure III.6 Modèle primitif 100
Figure III.7 Diagramme de cas d'utilisation globale 101
Figure III.8 Fiche descriptive 105

Figure III.9. Diagramme d'activité : l'allocation de voies ferrées et le positionnement de wagons sur la cour ferroviaire 109
Figure III.10 Modèle de simulation générale 111
Figure III.11 Les stéréotypes ECB-agent 113
Figure III.12 Méta-modèle des stéréotypes ECB-Agent 113
Figure III.13 Diagramme de collaboration agent : allocation de voies ferrées au train 115
Figure III.14 Représentation de deux états d'un comportement 115
Figure III.15 Diagramme de séquence agent : allocation de voies ferrées au train 117
Figure III.16 Exemple d'un comportement à états finis 119
Figure III.17 Le modèle social du sous-système de contrôle 124
Figure III.18 Diagramme d'agents du modèle de simulation 125
Figure III.19 Modèle de simulation à base d'agents 126
Figure III.20 L'architecture du modèle exécutable 129
Figure III.21 Le package TMMResourceModel 130
Figure III.22 Les classes message et contenu 130
Figure III.23 Le package TMMControllerModel 131
Figure III.24 Le package TMMAgentsModel 132
Figure III.25 Le package TMMEventModel 133
Figure III.26 Le package TMMEventListenerModel 133

Chapitre VI

Figure IV.1 Les mouvements des grues de manutention 136
Figure IV.2 Les zones de la cour ferroviaire 138
Figure IV.3 L'allocation du séparateur dynamique 139
Figure IV.4 L'exemple illustratif 140
Figure IV.5 Le job collaboratif 140
Figure IV.6 Le diagramme de collaboration agent : planification et déroulement des opérations de manutention 142
Figure IV.7 Le processus de gestion 144
Figure IV.8 Le contrôle d'accès aux ressources communes 144
Figure IV.9 Le premier cas 146
Figure IV.10 Le deuxième cas 146
Figure IV.11 Couplage de la simulation et l'algorithme de colonie de fourmis 154
Figure IV.12 Capture d'écran de la simulation en 3D 156
Figure IV.13 Exemple de validation 160
Figure IV.14 Méthode de validation 160
Figure IV.15 Statistique de manutention de conteneurs 163
Figure IV.16 Distance parcourue par les deux portiques 163
Figure IV.17 Les différents temps des portiques 163
Figure IV.18 Productivité des portiques 163
Figure IV.19 Utilisation des portiques 164
Figure IV.20 Charge de travail des portiques 164
Figure IV.21 Durée des séjours des TGL et conteneurs 164
Figure IV.22 Taux de remplissage des navettes 165
Figure IV.23 Durée de séjours des navettes 165
Figure IV.24 La structure d'une barge 168
Figure IV.25 Les agents du modèle 169
Figure IV.26 Modèle de simulation 170
Figure IV.27 L'algorithme de colonie de fourmis proposé 170
Figure IV.28 Couplage O-S 172
Figure IV.29 Les blocs Anylogic impliqués dans l'implémentation du modèle de simulation 172
Figure IV.30 Evolution du gap 173

Liste des tableaux

Tableau I.1 Abréviations et usage de conteneurs 15
Tableau I.2 Evolution des porte-conteneurs depuis 1956 18
Tableau I.3 Comparaison entre le routier, le ferré et le fluvial (Oudani 2016). 18
Tableau I.4 Quelques caractéristiques des modes de transport de conteneurs 18
Tableau I.5 Classement des plus grands ports mondiaux en 2015 19
Tableau I.6 Classement des plus grands ports européens en 2015 19
Tableau I.7 Classement des plus grands ports français en 2015 19
Tableau III.1 Description du terminal multimodal 95
Tableau III.2 Description des équipements utilisés dans le terminal multimodal 96
Tableau III.3 Tous les cas d'utilisation (et sous cas) 102
Tableau III.4 Comportements et leurs états 119
Tableau III.5 La classification des messages 120
Tableau III.6 Les principaux attributs et méthodes des classes composant le package TMMResourceModel 130
Tableau III.7 Les Events du modèle de simulation 133
Tableau IV.1 Différences entre les zones du système 139
Tableau IV.2. Les valeurs du paramètre γ_j^c 154
Tableau IV.3 Les blocs de contrôle d'Anylogic impliqués dans l'implémentation des modèles 156
Tableau IV.4. Les données d'entrée 157
Tableau IV.5 Nombre de conteneurs et de TGL par jour 157
Tableau IV.6 Les navettes déployées par jour 157
Tableau IV.7 Les indicateurs de performance organisationnels 159
Tableau IV.8 Paramètres de simulation 161
Tableau IV.9 Valeurs optimales des paramètres 162
Tableau IV.10 Résultats des cinq jours de simulation 167
Tableau IV.11 Paramètres de simulation 169
Tableau IV.12 Instance utilisée 172
Tableau IV.13 Résultats 172

Introduction générale

Depuis la nuit des temps, le transport est devenu une artère de développement socio-économique nécessaire à l'évolution et à la prospérité de notre vie quotidienne. Nos ancêtres passaient des jours voire des mois pour aller d'un continent à un autre, aujourd'hui quelques heures suffisent pour faire le tour du globe. L'ingéniosité et l'intelligence humaine ont donné naissance à des engins qui ont révolutionné cette activité, ainsi l'homme comme les marchandises peuvent parcourir des grandes distances en peu temps.

Le transport change de visage d'une époque à l'autre et s'adapte aux avancées technologiques et scientifiques, en passant par l'introduction des véhicules à traction animale et en arrivant aux engins motorisés (voitures, bus, camions, trains, barges, navires, avions, etc.), ainsi diverses formes de transport ont vu le jour, notamment, le transport intermodal et le transport multimodal. Ces deux concepts de transport sont bien définis dans le document intitulé « Terminologie en transports combinés » publié par la Commission économique pour l'Europe (UN/ECE) en 2001. Ils sont caractérisés par l'emploi d'au moins deux modes de transport au cours d'un acheminement porte-à-porte de marchandises ou d'individus. Dans la présente thèse, seulement le transport et le traitement de marchandises sont pris en considération.

Durant le siècle passé, plus précisément aux années cinquante, le transport international de marchandises a connu des changements d'une magnitude et d'une rapidité sans précédent, grâce à un homme de métier, nommé « Malcolm Purcell McLean », qui a développé une nouvelle unité de transport intermodal novatrice, le conteneur (Gras 2010), annonçant ainsi l'avènement d'une nouvelle ère de transport de marchandises. Cette nouvelle pratique assure un passage souple de marchandises entre les divers modes de transport sans empotage ni dépotage permettant ainsi de faciliter et de rationaliser les opérations de manutention. En outre, le conteneur a permis aux prestataires logistiques de faire face à la demande accrue de différents produits au niveau mondial, d'améliorer la qualité de leurs services et d'apporter de meilleures solutions à leurs clients.

Par ailleurs, le conteneur a privilégié le transport maritime en valorisant sa position-clé dans la chaîne logistique globale. Le transport maritime se démarque par rapport aux autres modes de transport en termes de compétitivité et de capacité, assurant l'acheminement de 90 % des marchandises échangées à travers le monde (Najib 2014), dont la majorité est conteneurisée (Stahlbock and Voß 2008a). L'attrait pour ce mode est dû aussi à son rapport coût-délai raisonnable. De nos jours, le trafic de conteneurs maritime est estimé à 650 millions de conteneurs EVP (Equivalent Vingt Pieds)[1]. Des infrastructures lourdes sont donc nécessaires pour acheminer et traiter cet immense flux conteneurisé, notamment, les infrastructures de transport (routes, lignes ferroviaires, canaux fluviaux, voies maritimes, etc.) et les infrastructures de triage et d'inter-modalité, tels que les terminaux à conteneurs. Cependant, étudier et modéliser l'intégralité d'une chaîne logistique, composée de plusieurs intervenants, acteurs, nœuds, sous-chaînes logistique, sous-chaînes d'approvisionnement,…, demeure une

1. "Container port traffic (TEU: 20 foot equivalent units) | Data | Table." [Online]. Available: http://data.worldbank.org/indicator/is.shp.good.tu.

tâche difficile et fastidieuse. Ceci nous pousse à s'intéresser à la chaîne logistique portuaire vu que c'est un maillon très sensible au sein de la chaîne logistique globale (Benghalia 2015).

1. Contexte de la thèse

La gestion de l'ensemble des opérations d'une chaîne logistique portuaire est laborieuse et complexe. Cela s'explique par plusieurs facteurs, entre autres, la nature dynamique et distribuée de ce système, la diversité de ses opérations, et l'incertitude et le manque d'informations nécessaires au contrôle du flux conteneurisé transitant par les maillons de cette chaîne. D'autant plus, l'évolution annuelle du nombre de conteneurs engendre de nombreux problèmes pour les autorités portuaires et les met face à de multiples défis : (1) la fluidité d'acheminement de conteneurs aux destinataires de façon à éviter le goulot d'étranglement ; (2) le compromis entre la sécurité-sureté des opérations de manutention (gestion de risques) et l'aspect performance du système (niveau et qualité de service proposé) ; (3) l'efficience et l'efficacité des engins de manutention face à une nouvelle génération de porte-conteneurs à forte capacité.

Dans la chaîne logistique, l'amélioration de la performance des opérations, le rapport coût-délai-qualité et la productivité des engins de manutention exploités sont des enjeux très importants et vitaux pour un port maritime. Chaque port se doit d'assurer sa croissance et la rentabilité de ses activités de manière à maintenir (ou se forger) une position concurrentielle sur un marché où la compétitivité est de plus en plus rigoureuse et des risques de plus en plus fréquents (trafic de marchandises illicites, actes terroristes, …). D'ailleurs les investissements alloués d'une part au développement durable pour l'acquisition de nouveaux équipements, d'autre part, à l'augmentation de la capacité des terminaux à conteneurs doivent permettre aux terminaux d'être en mesure d'absorber les variations futures du flux conteneurisé (Dubreuil 2008), et de répondre au mieux aux exigences des clients, que ce soit des exigences actuelles ou futures. Cependant, certains terminaux arrivent à l'asphyxie en plus de souffrir d'un manque d'espace pour ajouter de nouvelles infrastructures. Face à cette situation ces terminaux n'ont d'autre choix que d'adopter des politiques d'optimisation permettant une meilleure utilisation des ressources disponibles.

L'aspect environnemental du transport de conteneurs est aussi un facteur qui joue un rôle important dans le développement durable de la chaîne logistique. De plus les prestataires logistiques accordent plus d'attention à l'impact négatif du transport de conteneurs sur l'environnement, entre autres, la pollution de l'air, de l'eau et le bruit. A cet effet, le choix du mode de transport de conteneurs est crucial. D'ailleurs, l'Union Européenne et ses Etats membres encouragent les modes les plus respectueux de l'environnement dans le cadre d'une stratégie qui vise l'amélioration de l'efficience énergétique et la diminution d'émissions de gaz à effet de serre (Energy 2006). Promouvoir le report modal constitue une solution alternative afin d'atténuer les méfaits des modes de transport les plus polluants (le mode routier), c.à.d. le report modal de la route vers le rail ou le fluvial (les modes massifiés). En revanche, face à la prédominance du mode routier, les modes massifiés n'ont d'autre choix que d'engager des

projets de modernisation de services et de renforcement des infrastructures en vue d'être plus attractif. En sus, les plateformes portuaires ont pris conscience que leur attractivité aux yeux des prestataires logistiques dépend non seulement de leur fiabilité et de leurs qualités nautiques mais également de leur capacité à offrir une desserte massifiée de leur hinterland.

En cohérence avec cette vision stratégique du transport, le GPMH (Grand Port Maritime du Havre) projette d'accroître sa part de massification très inférieure actuellement à celle de ses grands concurrents du range nord européens[1] (ports allant du Havre à Hambourg). Pour répondre à ce besoin, le GPMH a développé un terminal multimodal de conteneurs lié à un hinterland riche et dense en population (Bassin parisien, Marchés européens), et qui offre une desserte massifié par rail et voie navigable. Ce nouveau terminal est lié aux autres terminaux maritimes par des navettes ferroviaires. L'intérêt économique et stratégique du terminal multimodal est de renforcer la position du GPMH au niveau national, européen et mondial, et d'un point de vue écologique, diminuer l'utilisation excessive du routier en misant sur les modes massifiés.

Le travail de cette thèse concerne la modélisation/simulation de certains sous-systèmes de la chaîne logistique portuaire du port du Havre, plus particulièrement, le terminal multimodal et le transfert intra-portuaire de conteneurs. Les problématiques de nos recherches s'articuleront donc autour de deux axes : premièrement la gestion d'un terminal à conteneurs et deuxièmement la modélisation/simulation des systèmes complexes.

2. Problématique

2.1. Gestion d'un terminal à conteneurs

Le terminal à conteneurs (TC) est une plateforme portuaire ou terrestre liée habituellement à deux interfaces (maritime-hinterland, fluviale-ferroviaire), caractérisé par un aspect complexe et dynamique (interactions entre ses acteurs) et aménagée comme un point de transfert des flux physiques conteneurisés via plusieurs modalités de transport. De plus, ordonnancer les opérations de transport et de manutention d'un flux de conteneurs qui augmente annuellement, et qui est traité par un ensemble d'équipements variés, est une tâche extrêmement complexe (Günther and Kim 2006). Par ailleurs, appréhender la problématique liée à la gestion d'un TC passe tout d'abord par la mise en exergue de deux aspects : l'aspect ordinaire (qui a lieu de manière habituelle) et l'aspect stochastique (Figure 1).

En premier lieu, l'aspect ordinaire consiste principalement à répondre aux besoins fonctionnels et non-fonctionnels du TC. En effet, les processus de manutention sont régis par un ensemble de contraintes visant à optimiser l'utilisation des ressources disponibles pour en tirer le meilleur profit et à ordonnancer l'exécution des tâches de manutention afin de respecter les délais de livraison. Toutefois, optimiser et minimiser les coûts des opérations de manutention peut influencer négativement la qualité du service proposé. De plus, la performance du terminal ne dépend pas seulement de la pertinence des décisions au niveau opérationnel mais également au niveau tactique et stratégique (Benghalia 2015). Tous ces

1. "Modal Share of Freight Transport to and from EU Ports - Think Tank." [Online]. Available: http://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document.html?reference=IPOL_STU(2015)540350.

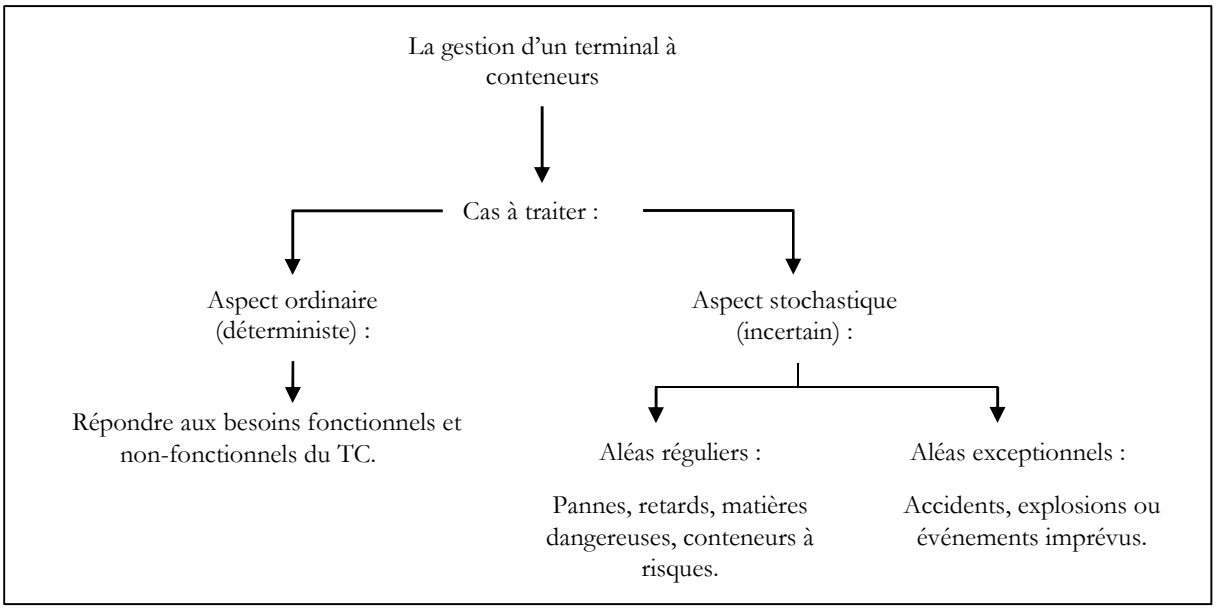


Figure 1. Gestion d'un TC

niveaux de planification sont liés entre eux par une relation de cause à effet, c.-à-d. les décisions prises à un niveau inférieur influencent ceux des niveaux supérieurs. Le contrôle de cet aspect nécessite un système d'opérations qui assure une planification judicieuse des ordres de manutention, un ordonnancement efficace des engins de manutention et une utilisation optimisée des ressources disponibles.

En second lieu, l'aspect stochastique est défini par la gestion de risques et d'évènements imprévus. De nombreuses organisations peuvent exploiter la vulnérabilité du système de transport pour le trafic d'armes, d'êtres humains, de drogues ou d'autres matières représentant une nuisance à la sécurité publique. Pour contrecarrer ce type d'exploitation, un renseignement en amont sur le conteneur pourrait suffire. Cependant, le TC est exposé à d'autres risques capables d'entraver son fonctionnement. Ces risques redoutables peuvent être classés en deux catégories. Premièrement, les risques réguliers : retard, panne, erreur opérationnelle, conteneur frauduleux, etc., deuxièmement, les risques irréguliers : accidents, explosion, aléas naturels, fuite de liquide ou de gaz toxique, naufrage et chavirement d'un navire, etc. Néanmoins, l'introduction de l'aspect sécuritaire au niveau de la gestion du TC cause des retards de services et augmente le coût des opérations, ainsi il est nécessaire de trouver un compromis entre la gestion de risques et le niveau de service du TC. Par ailleurs, certains pays exigent le respect des nouvelles normes internationales de sécurité et de sûreté, surtout après les attentats terroristes du 11 septembre. Ainsi, le respect de ces réglementations est devenu un synonyme de transparence et de crédibilité aux yeux des clients (Najib 2014). D'après Henesey (Henesey 2006), la compétitivité du TC dépend de la satisfaction des exigences de ses clients.

Selon Brinkmann (Brinkmann 2011), avoir un système d'opérations efficace qui couvre les deux aspects est une tâche difficile. De plus, le contrôle des opérations d'un TC est souvent orienté par la pratique plutôt que par la théorie (Henesey 2006).

2.2. Modélisation et simulations des systèmes complexes

Le terme « système complexe » fait référence à un ensemble d'éléments ou d'organisations unitaires de même objectifs évoluant dans un contexte dont le comportement est dynamiquement non-linéaire, stochastique et difficilement prévisible. La compréhension d'un tel système requiert beaucoup de temps, de patience et une analyse minutieuse des différents aspects selon le niveau approprié de détails, en plus elle doit être guidée par une approche adéquate. Le domaine des systèmes complexes est un champ d'études vaste et ouvert, qui attire l'attention d'une grande communauté scientifique pluridisciplinaire. En conséquence, une base de connaissance très riche en méthode et approche de modélisation/simulation s'est développée au fil des années. Seulement, certaines approches de modélisation ne sont pas adaptées à tous les types de système, à titre d'exemple, la modélisation par équations différentielles. Cette approche est limitée au niveau de la capture des phénomènes émergents qui caractérisent un bon nombre de systèmes complexes (Calvez 2007). Ceci nous met face à des questions très pertinentes :

« Peut-on étudier et comprendre le fonctionnement d'un quelconque système sans adopter une méthode ou approche spécifique ? ».

« Comment peut-on choisir une approche adaptée au type du système étudié ? »

Passer d'une description informelle pouvant être mal comprise (*i.e.*, décrire le fonctionnement d'un système verbalement), vers une spécification formelle claire et compréhensible, plus au moins transdisciplinaire (*i.e.*, représenter la description verbale sous format de modèles), est en soit un casse-tête, où sa complexité réside parfois dans le manque ou l'incomplétude de connaissances nécessaire au bon déroulement de ce processus de passage. Il ne s'agit pas d'avoir une vision complète à un niveau faible d'abstraction sur l'ensemble des éléments et mécanismes du système étudié (certaines entreprises préfèrent garder le secret sur leurs activités clés, pour des diverses raisons : de sécurité, de compétitivité, etc.), mais de capter l'essentiel afin de mettre en œuvre des modèles efficaces menant aux comportements attendus. La difficulté de ce processus de passage dépend particulièrement des caractéristiques du système à modéliser et le niveau de détails voulu. En effet, tant qu'on est à un niveau d'abstraction élevé et des comportements assez simples à analyser, on peut aisément construire un modèle général sans vraiment s'appuyer sur une approche bien spécifique. Prenons l'exemple du système suivant : « *Une colonie est composée d'un ensemble de fourmis, où chaque fourmi se lance dans la nature à la recherche de nourriture. Toute chose récupérée doit être entreposée dans un stock situé à l'intérieur de la colonie.* ». Le fonctionnent de ce système est facilement modélisé à l'aide d'un diagramme d'activités et les comportements simples des fourmis sous format d'un diagramme d'état de transition. Seulement, ceci n'est qu'une représentation abstraite ou plutôt macroscopique d'une colonie de fourmis. Enrichissons alors l'énoncé par une description plus détaillée : « *Une colonie est composée de quelques milliers d'individus et une seule reine, où chaque fourmi a un rôle bien précis dans la colonie (fourmi soldat, fourmi nourricière, fourmi ouvrière, etc.). Les fourmis soldats doivent protéger la*

colonie et aussi conquérir de nouveaux territoires afin d'élargir le champ de recherche des fourmis ouvrières et ainsi avoir plus de nourritures. Les fourmis ouvrières ont pour mission d'assurer la survie de la colonie, ils parcourent au hasard l'environnement autour de la colonie, et si une découvre une source de nourriture, elle transporte ce qu'elle peut (une fourmi peut transporter jusqu'à 60 fois son poids) et rentre aussitôt au nid en laissant sur son chemin des traces appelées : phéromones. Les fourmis passant à côté vont plus ou moins suivre ce chemin, cela dépond de son attractivité. Les fourmis qui utiliseront ce chemin doivent le renforcer par leurs propres phéromones. S'il y a plusieurs pistes pour atteindre la même source de nourriture, celle étant la plus courte sera renforcée pour devenir plus attractive, par conséquent les autres pistes finiront par disparaître …. Toute fourmi est capable de communiquer avec les autres (pour s'identifier), d'agir dans son environnement et d'apercevoir les changements qui s'y produisent (contourner un obstacle). … ("Fourmi, Wikipédia" 2016) ». A ce stade, les choses deviennent de plus en plus complexe et on risque de se perdre dans les détails. En effet, étudier le système comme un tout cohérent en prenant en compte l'hétérogénéité de ses éléments, le haut degré d'imbrication entre les différents niveaux d'organisations, les interactions acteur-acteur et les influences acteur-environnement obligeront le modélisateur à passer par une approche pour construire un modèle robuste.

Les outils mathématiques sont adaptés à ce genre de problèmes complexes, seulement dans les systèmes où l'interaction, l'incertitude et les phénomènes émergents jouent un rôle essentiel et fondamental dans leurs évolutions, les méthodes mathématiques s'avèrent très limitées. De nouvelles approches ont émergé durant les dernières décennies, entre autres, les automates cellulaires et des méthodes inspirées de l'aspect réel des systèmes, la modélisation à base d'agents. Ces méthodes sont le fruit de longues années de recherches, de retours d'expérience et une concrétisation des connaissances des experts. Sans aller jusqu'à dire qu'ils peuvent remplacer définitivement les modèles mathématiques, mais il est intéressant de constater leur évolution dans de nombreux domaines d'application et leur capacité à s'adapter aux différents types de systèmes, peu importe leurs caractéristiques. D'ailleurs, il existe de nombreuses applications où les modèles mathématiques sont incontournables (l'optimisation). Dans ce contexte, selon Morvan (Morvan 2009), le couplage entre les modèles mathématiques et les autres approches est une voie de recherche pertinente pour appréhender certains problèmes. Dans cette thèse, nous utiliserons la modélisation à base d'agents pour construire un modèle de simulation du terminal multimodal du port du Havre.

Le point fort des modèles à base d'agents est qu'ils sont basés sur les interactions et l'autonomie des entités composant le système étudié, ces entités appelées « agents » dont on spécifie les rôles, les comportements et les connaissances. Les agents sont regroupés en sous-systèmes (homogène ou hétérogène) et évoluent dans un environnement également modélisé pour faciliter la capture des phénomènes résultants des actions produites par les agents, soit entre eux soit sur leur environnement. Le terme agent ou système multi-agents s'adapte facilement aux systèmes possédant cinq propriétés (Parunak 1999) : modulaire, décentralisée, variable, mal structurée et complexe. En effet, cette approche prend le précepte « *diviser pour mieux régner* » comme règle de conduite, en décomposant le système en unités cohérentes plus

facile à gérer dont la difficulté est relativement réduite. En d'autres termes, la décomposition aide à appréhender la complexité d'un système en limitant le champ d'études. Cependant, ceci n'est pas une mince affaire. Construire un modèle modulaire et robuste nécessite un enchaînement d'étapes de développement pour spécifier le contexte, les processus métiers, les besoins fonctionnels et non-fonctionnels, et l'interdépendance entre les composants du système étudié. Même si l'approche à base d'agents offre une boîte à outils riche, il est préférable d'opter ou de définir une méthodologie de modélisation pour savoir utiliser ces outils de façon adéquate. La plupart des méthodologies existantes ont les mêmes principes de conception, mais ce qui rend une méthodologie plus pertinente que l'autre est l'intention du modélisateur (ce qu'il a en tête), *i.e.*, il est nécessaire de tout prendre en compte pour choisir une méthodologie appropriée, l'objectif de conception (ex : concevoir un simulateur, une simulation, un système d'aide à la décision, etc.), les aspects à étudier (ex : performance, planification, comportement, les risques, le système en entier, etc.), niveau d'abstraction voulu (ex : faible, moyen ou élevée), etc.

D'un autre côté, la robustesse d'un modèle est définie par sa façon de réagir aux perturbations, un modèle robuste doit donc être flexible et agile face aux évènements imprévus pouvant causer des changements brutaux. Seulement, dire qu'un modèle robuste est stable quelle que soit la perturbation appliquée est un peu exagéré, à la fin un modèle n'est juste qu'une simplification du système réel. En d'autres termes, face à des perturbations inattendues par un système (modèle en simulation), ce dernier peut changer radicalement de comportement et donner des résultats non souhaités par le modélisateur. Un autre point très important est la précision et le choix des valeurs paramétrant les comportements des agents et de l'environnement, un système peut être robuste et avoir toujours le même comportement, mais il est au contraire très sensible aux changements de paramètres (Rouquier 2008). En outre, un paramétrage erroné du modèle peut conduire à l'apparition de mauvais comportements qui ne correspondent pas du tout au système étudié. Selon Calvez (Calvez 2007), le choix des valeurs des paramètres n'est pas simple, car pour une grande part, ces paramètres correspondent à des valeurs estimées à partir de l'observation du système réel. Le calibrage du modèle apparaît donc comme une étape primordiale dans une méthodologie de modélisation, il consiste à régler les paramètres en faisant tourner le modèle plusieurs fois pour explorer l'espace de chaque paramètre (les valeurs possibles), ainsi relever les bonnes valeurs menant à de meilleurs résultats. Pourtant, parfois pour certains paramètres on ne dispose pas de plages de valeurs très précises, dû à un manque de connaissances détaillées du domaine étudié. La dernière étape dans le processus de conception est de s'assurer que le modèle construit est raisonnable, correctement implémenté et reflète la réalité du système étudié, en un mot « valider ». La validation peut se faire en plusieurs façons différentes, soit en comparant les indicateurs clés avec ceux du système réel (les indicateurs clés mesurent le succès des activités critiques d'une organisation), soit en se fiant aux avis des experts ou des intéressés, soit en calculant l'erreur du modèle (c.-à-d. la différence entre la simulation et la réalité). Néanmoins, on doit toujours se rappeler la citation très connue de George Box ("George Box, Wikipédia" 2016) qui illustre avec humour le fait

que même si le modèle est valide, il cache certainement des erreurs : « *all models are wrong but some are useful* ».

3. Objectifs

L'objectif de cette thèse est de développer un modèle multi-agents pour simuler les opérations de manutention et de transfert de conteneurs entre le terminal multimodal et les terminaux maritimes du port du Havre. Il existe déjà un modèle de simulation orienté objet proposé dans (Benghalia 2015). L'auteur s'est intéressé particulièrement à l'étude et l'évaluation des modes de transfert intra-portuaire de conteneurs et aux opérations de manutention à la cour ferroviaire du terminal multimodal, seulement l'aspect risque et l'ordonnancement des portiques n'ont pas été abordés, de plus le paradigme objet n'est pas approprié pour simuler les terminaux à conteneurs. Quant à Oudani (Oudani 2016), il a développé plusieurs modèles mathématiques pour optimiser les opérations ferroviaires du terminal multimodal. Cependant ces travaux se concentrent sur le cas déterministe, alors que dans la pratique, il est très rare que les valeurs des paramètres soient connues avec certitude, puisqu'elles dépendent de plusieurs facteurs.

Par ailleurs dans la littérature, les travaux qui utilisent les systèmes multi-agents pour gérer le croisement de portiques au niveau des zones d'opérations sont rares, même si les systèmes multi-agents sont une approche prometteuse pour appréhender la complexité des terminaux à conteneurs (Henesey 2006). Ainsi dans cette thèse, nous proposons une nouvelle stratégie de non-croisement de portiques basée sur le paradigme agent.

Ce document vise donc à :

- Proposer un modèle agent qui permet de reproduire le fonctionnement du terminal multimodal et les activités de transfert intra-portuaire de conteneurs.
- Proposer une solution basée sur le paradigme agent pour gérer le croisement de portiques. La solution développée permet d'éviter autant que possible les situations d'interférence et de blocages.
- Etudier l'aspect stochastique du problème d'ordonnancement des portiques de manutention.

4. Contributions

Nos travaux de recherche touchent plusieurs domaines, la logistique portuaire, la gestion de risques, la modélisation/simulation et l'optimisation. Nous nous focaliserons sur l'ordonnancement et l'allocation de ressources, le stockage des conteneurs et la gestion des engins mobiles, mais particulièrement la gestion de croisement entre portiques de manutention. Nos contributions sont trois : la première contribution porte sur un modèle à base d'agents pour simuler les opérations du terminal multimodal du port du Havre. La deuxième contribution concerne la gestion des risques d'interférence et de blocages des portiques ferroviaires. La

troisième contribution se focalise sur l'ordonnancement des opérations de chargement/déchargement de barges au niveau de la cour fluviale.

La première contribution : le modèle proposé est orienté distribution de charge de planification sur trois agents. L'agent planificateur tactique qui prend des décisions à moyen terme, l'agent planificateur opérationnel qui prend des décisions à court terme et l'agent planificateur temps réel qui s'occupe de la gestion de risques. Dans cette étude, nous ne nous intéressons pas à la planification stratégique. Cette distribution est motivée par la pluralité des opérations à gérer et par l'ensemble des décisions à prendre. De plus, elle vise la construction d'un système modulaire et flexible. Ces planificateurs interagissent entre eux et coopèrent de façon collective pour atteindre un objectif particulier.

La deuxième contribution : deux stratégies pour gérer le croisement entre portiques sont développées, évaluées et comparées à d'autres méthodes. Ces stratégies de non-croisement permet aux portiques de manutention de marquer leurs zones d'opérations comme territoires privés afin d'y interdire l'accès aux autres. Chaque portique réorganise son territoire selon ses besoins et remet à plus tard l'exécution d'une tâche s'il est dans l'incapacité de l'atteindre, et passe à une autre afin de diminuer au maximum les délais d'attente et d'améliorer la productivité. Toutefois, dans certaines situations d'impasses les deux portiques s'entraident pour accomplir une tâche donnée (récupérer ou bien déposer un conteneur).

La troisième contribution : cette contribution concerne le cas stochastique du problème d'ordonnancement des opérations de chargement et de déchargement des barges par des portiques. Ce problème est étudié via un couplage optimisation-simulation.

5. Plan du manuscrit

Ce document est divisé en deux parties : la première partie est intitulée « État de l'art » et la deuxième partie concerne nos contributions.

Première Partie : État de l'art

Cette partie compte deux chapitres :

- *Chapitre I. Terminal à conteneurs* : ce chapitre vise tout d'abord à initier le lecteur à la logistique de conteneurs et de lui permettre de comprendre le fonctionnement de la chaîne logistique. Ensuite, d'une part, il apporte un éclairage sur le soutien stratégique que portent les terminaux aux autres intervenants de la chaîne logistique, d'autre part, il décrit l'organisation physique et opérationnelle des terminaux à conteneurs, particulièrement celle du terminal multimodal. Enfin, à fournir un état de l'art sur les travaux connexes.

- *Chapitre II. Concepts de base, outils et méthodes de conception* : ce chapitre aborde la modélisation/simulation des systèmes complexes en introduisant les approches existantes, plus particulièrement les systèmes

multi-agents, et présente les notions de base et les outils utilisés dans la réalisation des modèles.

Deuxième Partie : Contributions

Cette partie comporte deux chapitres :

- *Chapitre III. Modèle de simulation à base d'agents pour le terminal multimodal* : ce chapitre explique tout d'abord la démarche adoptée pour construire le modèle de simulation et ensuite la composition du modèle. La mise en œuvre du modèle est basée sur deux paradigmes, le paradigme agent et le paradigme objet.

- *Chapitre IV. Ordonnancement des portiques de manutention dans les zones d'opérations :* ce chapitre présente les deux dernières contributions. Dans la première partie, nous nous intéressons aux portiques ferroviaires et dans la deuxième partie aux portiques fluviaux.

Première Partie : État de l'art

"... C'est une erreur capitale que de bâtir des théories tant qu'on n'a pas de données. Insensiblement, on se met à torturer les faits pour les faire cadrer avec les théories, au lieu d'adapter les théories aux faits ... "

Arthur Conan Doyle, Les Aventures de Sherlock Holmes : Un scandale en Bohême, 1891

Chapitre I

Terminal à conteneurs

Sommaire

1. Logistique de conteneurs 14
1.1. Le conteneur 14
1.2. Défis actuels et perspectives d'avenir 16
1.3. Plateformes portuaires 19
2. Le terminal à conteneurs 20
2.1. Introduction 20
2.2. Classifications et structure physique 22
2.2.1. Classification 22
2.2.2. Organisation physique 24
2.3. Zones d'opérations et équipements 26
2.3.1. Les opérations portuaires 26
2.3.2. Les opérations de stockage 28
2.3.3. Les opérations de réception-expédition 32
2.3.4. Les opérations de transport 35
2.4. Terminaux automatisés et ports secs 36
2.5. Etude de cas : le terminal multimodal du port du Havre 37
2.5.1. Port du Havre 37
2.5.2. Terminal multimodal 39
2.6. Niveaux de planification et indicateurs de performance 41
2.6.1. Niveaux de planification 41
2.6.2. Indicateurs de performance 48
3. Revue de littérature sur les travaux connexes 51
3.1. Modélisation et simulation des terminaux à conteneurs 51
3.2. Gestion des opérations de manutention 53
3.3. Ordonnancement des grues de manutention 53
4. Apport et conclusion 54

Dans un monde qui semble se rétrécir à vue d'œil, les chaînes logistiques (ou chaîne clients-fournisseurs) deviennent plus longues et plus complexes à gérer (voir Figure I.1). Le terme logistique provient du mot grec « logistikos » (Benghalia 2015), et selon la définition du dictionnaire « Petit Larousse » le mot logistique désigne « *la partie de l'art militaire ayant trait au problème de ravitaillement et de transport des armées* ». On peut donc définir la chaîne logistique comme étant un ensemble d'activité d'approvisionnement, de fabrication, de stockage et de distribution visant à alimenter les marchés par des produits ou des services exigés ou sollicités par un ensemble de clients (Cheyroux 2003) et (Amrani-Zouggar 2009).

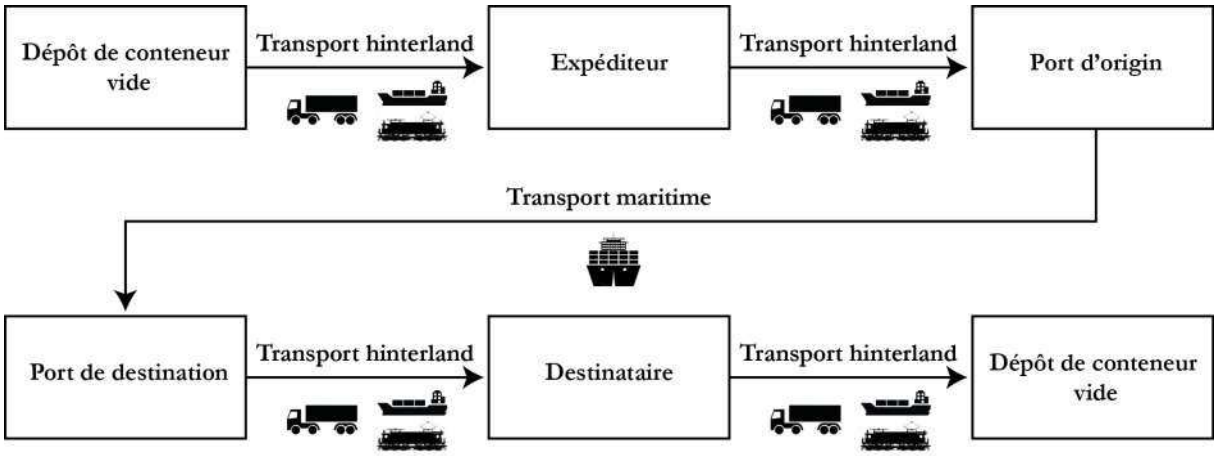


Figure I.1 Les acteurs de la chaîne logistique globale (source, Kemme (Kemme 2013))

La pression du client/consommateur (exigences et contraintes) sur le fournisseur n'est plus restreinte à l'échelle nationale. Aujourd'hui, les clients sont de plus en plus exigeants et capricieux, ils demandent une disponibilité accrue de produits et de services avec une multiplicité de choix, et d'être livrés dans un temps raisonnable même si le fournisseur se trouve à des milliers de kilomètres. La globalisation et internet ont aboli les distances entre clients et fournisseurs. Le client sur son canapé peut en quelques clics faire une demande de produit(s) au-delà des frontières de son pays, qui sera après traitée par un ensemble d'acteurs de la chaîne logistique. En premier lieu, le fournisseur fait appel à un conteneur vide pour y mettre les produits commandés. En second lieu, les prestataires de transport qui acheminent ces commandes conteneurisées aux clients par un recours aux modes de transport maritime, terrestre ou fluvial. En troisième lieu, ces flux de conteneurs transitent d'un mode vers l'autre à travers divers nœuds de transbordement, triage et d'inter-modalité (terminaux à conteneurs). Une gestion efficace de ces flux (en délai, qualité et coût) peut faire la différence entre le succès et l'échec (Charkaoui et al. 2012), en d'autres termes, toute attente imprévue ou retard d'une opération peut être sanctionné par des pertes des parts du marché et par une insatisfaction du client. Ainsi, les acteurs de la chaîne logistique, plus particulièrement le nœud vulnérable et sensible de cette chaîne « les terminaux à conteneurs » doivent se développer pour s'accorder avec les exigences du client et la volatilité du marché.

Ce chapitre vise à apporter un éclairage sur le fonctionnement des terminaux à conteneurs. Dans la première section, nous commençons par une brève description du conteneur et nous passons à l'impact de l'évolution du conteneur sur la compétitivité des terminaux. Ensuite dans

la deuxième section, nous présentons les multiples configurations, les différents équipements de manutention et les diverses opérations des terminaux, et nous décrivons aussi notre cas d'étude « le terminal multimodal du port du Havre ». Ensuite, nous exposons l'interdépendance qui régit les niveaux de planifications d'un terminal à conteneurs et les indicateurs de performance. La troisième section explore les méthodes de recherche utilisées pour étudier et résoudre les problèmes des terminaux à conteneurs en mettant le focus sur les travaux ayant adopté des techniques de simulation. La dernière section situe les travaux réalisés par rapport à la littérature présentée et met fin au chapitre.

1. Logistique de conteneurs

1.1. Le conteneur

Depuis son apparition, le conteneur joue un rôle capital dans le développement durable de la chaîne logistique globale. Il représente un atout technique considérable, apporte plus d'avantages en termes de gains, rend le transbordement de fret plus performant (diminue les ruptures de charge des marchandises) et assure un transport sécurisé de marchandises (protection contre le vol et le mauvais temps, moins de dommages, un excellent moyen pour le transport des marchandises dangereuses). C'est une unité de transport intermodal sous forme de caisse métallique parallélépipédique conçue dans les années cinquante et standardisée dans les années soixante. La première ligne maritime de transport de conteneurs a vu le jour vers 1961, elle reliée la côte Est des États-Unis et des points situés en Caraïbes, en Amérique centrale et du sud (Steenken et al. 2004), tandis que, le transport par porte-conteneurs a commencé le 26 avril 1956 entre Newark (New Jersey, USA) et Porto Rico, ce porte-conteneurs été la propriété de l'entreprise américaine « Sea-Land company » qui a était sous la direction de Malcolm McLean (Talley 2000) et (Kemme 2013b). Dix ans plus tard, la première route maritime de transport intercontinental de conteneurs est apparue, connectant les États-Unis d'Amérique à Rotterdam, i.e., l'Amérique du Nord à l'Europe (Talley 2000) et (Talley 2004).

L'organisme international de normalisation (ISO) avec l'aide du BIC (Bureau international des Conteneurs et du Transport) a normalisé les dimensions et les types de conteneurs en fonctions des besoins, i.e., type de marchandises à transporter. La construction de conteneurs est codifiée sous les normes ISO 668, ISO 1496 et ISO 6346. Le tableau I.1 donne l'abréviation et l'usage de chaque type de conteneurs, et la figure I.2 montre leurs structures physiques. Deux d'entre eux sont largement utilisés : conteneurs équivalent vingt pieds et conteneurs équivalent quarante pieds. Les dimensions de ces deux séries sont 20'×8'×8/9' 6" et 40'×8'×8/9' 6" (9' 6" est un conteneur High Cube), respectivement. Pour des fins pratiques, l'EVP (Equivalent Vingt Pieds) est la mesure utilisée pour calculer la capacité d'un mode de transport de conteneurs, d'un espace de stockage, d'un terminal à conteneurs, etc. Selon cette unité de mesure, un conteneur quarante pieds est équivaut à deux EVP. Cette standardisation du conteneur a encouragé et favorisé le développement du secteur de transport de marchandises par l'amélioration des conditions de transport et la facilitation des opérations de manutention (Najib 2014). D'un autre côté, elle n'empêche pas d'autres formats (non-standardisé) de

conteneurs d'exister pour des besoins plus spécifiques, à savoir, les conteneurs de stockage 6 et 8 pieds, les conteneurs pour le transport de palettes 40 et 45 pieds, les conteneurs isothermes, les conteneurs surdimensionnés de 48 et 53 pieds introduits par l'APL (*American President Lines*) pour utilisation en Amérique du nord, etc.

Tableau I.1 Abréviations et usage de conteneurs

Abréviation	Désignation	Usage/description
std	Standard	Conteneur avec une hauteur de 8'6" pieds.
hc	High cube	Conteneur permettant de gagner 30 centimètres en hauteur par rapport au std.
DV	Dry - sec	Conteneur à usage général pour le transport de cargaisons sèches. Il peut être utilisé pour certains types de marchandises en vrac.
VH	Ventilé	Conteneur similaire au dry, seulement il est ajouré pour permettre une meilleure ventilation à l'intérieur du conteneur. Il transporte des marchandises qui exigent de l'air frais au cours du voyage, par exemple, cacao, café, oignons, etc.
OT	Open top - toit ouvert	Un conteneur dont la spécification est presque identique à celle d'un conteneur dry. Il est dépourvu d'un toit rigide remplacé par une couverture mobile ou détachable, dans le but de faciliter le transport de marchandises lourdes, volumineuses et/ou peu manœuvrables et de permettre un empotage vertical.
OS	Open side - coté ouvert	Conteneur à ouverture latérale qui partage la même utilisation du OT, mais il a un toit rigide fixe. Il est équipé de deux portes vers l'extérieur pour une ouverture totale sur sa longueur.
RF	Reefer / isotherme	Conteneur muni de parois thermiquement isolées, il est équipé d'un dispositif de réfrigération ou de chauffage. Ce conteneur est spécialement conçu pour le transport de marchandises ayant besoin d'une température fixe ou contrôlée en vue de les conserver en bon état.
FR	Flat rack - plateforme avec 2 parois d'extrémité rabattables	Conteneur sans parois latérales (gauche et droit) ni toiture pour des chargements encombrants. Autrement dit, il permet le transport de marchandises hors gabarit (en extra hauteur ou largeur). Pour garantir une bonne fixation des produits transportés, ces dernières sont arrimées à l'aide de chaînes ou de sangles. De plus certains types de ce conteneur disposent d'extrémités (devant et arrière) pliables sur le plancher.
PL	Plateforme	Conteneur formé d'une lame d'acier plate et effilé. Son utilisation est identique au FR.
TK	Citerne	C'est une citerne encadrée par une structure métallique. Elle est développée pour le transport de liquides et de substances dangereuses.
BU	Bulk	Conteneur pour vrac sec et à usage général.

Le flux de conteneurs impliqués dans les échanges internationaux ne cesse de croître d'année en année, en passant de 50 millions EVP en 1985 à 680 millions EVP en 2014[1] (Figure I.3). Cette évolution spectaculaire peut être expliquée par quatre facteurs majeurs : la libéralisation des échanges qui instaure un climat de compétitivité plus agressive et plus globale (*i.e.*, réduire les barrières commerciales et douanières), la délocalisation des activités de production vers des pays à bas salaires ou l'offshoring selon le vocable anglo-saxon (en d'autres mots, étendre l'emprise géographique des grandes entreprises), le développement rapide des secteurs industriels nourrie par de grand capitaux, en particulier dans les pays économiquement forts et stables, et l'émergence des pays nouvellement industrialisés à bas coûts de main d'œuvre (le Brésil, l'Inde) en plus du changement de la politique économique de la Chine (récemment son incursion en Afrique). En 2009, le trafic international de conteneurs a enregistré une légère baisse en raison de la crise économique de 2008. Par ailleurs, en 2014, plus de 17 millions de conteneurs ont été en circulation dans le monde et une flotte de porte-conteneurs d'environ 5000 navires avec une capacité qui dépasse les 20 millions d'EVP, contre presque la moitié à la fin du vingtième siècle (Steenken et al. 2004), une croissance similaire est attendue dans les années à venir. Ces nouvelles circonstances ont créé de nombreux défis pour les plateformes portuaires, que ce soit au niveau de la gestion opérationnelle ou au niveau

1. "Container port traffic (TEU: 20 foot equivalent units) | Data | Table." [Online]. Available: http://data.worldbank.org/indicator/is.shp.good.tu.



Figure I.2 Conteneurs ISO, voir Tableau I.1

des services logistiques. En effet, la hausse progressive des flux entraîne des demandes élevées, ce qui exerce une pression opérationnelle considérable sur les services logistiques portuaires.

1.2. Défis actuels et perspectives d'avenir

L'essor drastique du volume conteneurisé a entraîné une expansion du trafic maritime accompagnée par un déploiement de nouveaux porte-conteneurs à forte capacité (tableau I.2). Ce mode de transport jouit d'une popularité croissante depuis des siècles et occupe une position-clé dans l'acheminement de conteneurs à travers le monde, en outre il est vu comme un levier indispensable pour la croissance du commerce international en liant des unités de production délocalisées (ou pas) à des marchés de consommation très loin, *i.e.*, transport sur des grandes distances. Le mode maritime se démarque des autres modes par sa capacité à transporter de grandes quantités de biens à un coût attractif, dont la majorité est conteneurisée. En fait, les navires de plus en plus gros réduisent les frais du transport (Kemme 2013). Le taux de conteneurisation atteint les 100% entre les pays industrialisés (Stahlbock and Voß 2008a). Par ailleurs, le climat économique, industriel et politique mondial subi constamment d'importantes transformations, ce qui réécrit les règles du jeu au sein de l'industrie du transport maritime (Dubreuil 2008). De ce fait, certains petits transporteurs s'intègrent à l'intérieur d'alliances pour survivre et d'autres compagnies de transport sont acquises par des géants du secteur, à cela s'ajoute la création de nouvelles routes intercontinentales et de nouveaux réseaux « *hub and*

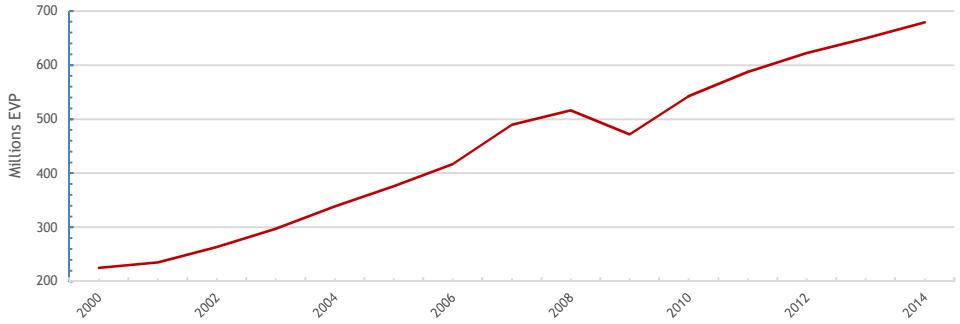


Figure I.3 Trafic international de conteneurs échangés chaque année entre 2000-2014

spoke ». Cette évolution permanente de ce secteur redessine le visage de la concurrence entre les ports maritimes et ouvre la porte à de nouvelles opportunités de gain, seulement plusieurs défis en résultent, tant en termes de mettre en place des stratégies de gestion robustes et d'infrastructures sophistiquées et modernes (intelligente) que de capacité à livrer les conteneurs aux clients au bon moment et avec un service de qualité.

Dans un contexte de compétitivité globale plutôt que locale sur le marché, les opportunités de gain sont fortes, mais pour en tirer parti, les ports maritimes ont dû s'adapter aux changements rapides qui ont révolutionné le secteur de transport de fret. Ils ont réformé leurs infrastructures, amélioré leurs niveaux de services et développé leurs capacités de transport de marchandises vers leur hinterland (Figure I.4), afin d'éviter la congestion de leurs accès terrestres. En effet, absorber le flux de conteneurs acheminé par des géants des mers nécessite une célérité des opérations élémentaires (transfert, transport, stockage), et une connexion port-hinterland fiable et efficace. Certains ports s'accommodent du « tout route (*road-only*) », alors que d'autres favorisent le transport massifié ou le transport combiné, néanmoins, en France comme dans certains pays européens la culture du tout routier prédomine (Frémont and Franc 2010). De plus, l'attractivité des ports aux yeux des prestataires logistiques dépend non seulement de leur fiabilité et de leurs qualités nautiques, mais également de leur capacité à offrir une desserte massifiée de leur hinterland, autrement, la capacité et la qualité du transport porte à porte de marchandises sont devenues pour les ports des questions cruciales. Par ailleurs, les prestataires logistiques doivent garantir un acheminement hinterland de conteneurs à moindre coût dans les meilleures conditions organisationnelles, infrastructurelles et environnementales (Blum 2010).

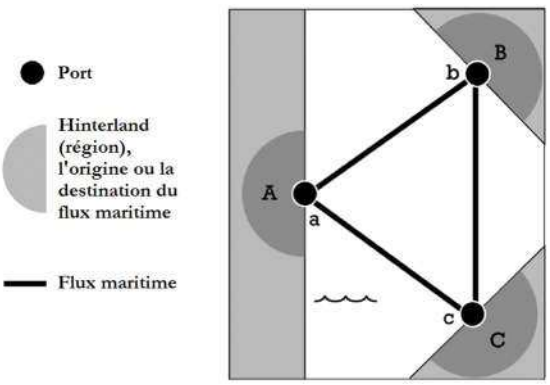


Figure I.4 Ports et Hinterland (source : (Guerrero 2014)

Tableau I.2 Evolution des porte-conteneurs depuis 1956 (voir aussi, "Liste des plus grands porte-conteneurs", Wikipédia 2016). *LOA : La longueur hors-tout, elle correspond à la distance entre les points extrêmes avant et arrière de la structure permanente du bateau ("Longueur hors-tout", Wikipédia 2016).

Année	Porte-conteneurs	Capacité (EVP)	Dimension (LOA×Largeur×Tirant d'eau, m)
1956	Early container ship	500 – 800	137×17×9
1970	Fully Cellular	1000 - 2500	215×20×10
1980	Panamax	3000 - 3400	250×32×12.5
1985	Panamax Max	3400 - 4500	290×32×12.5
1988	Post Panamax	4000 - 5000	285×40×13
2000	Post Panamax Plus	6000 - 8000	300×43×14.5
2009	New Panamax	12 5000	366×49×15.2
2013	Triple E	18 000	400×59×15.5
2016	MSC Diana	19 500	398.5×59.1×15.5

Le tableau qui suit présente une vue comparative des modes du transport routier et massifié, et donne les principaux avantages et inconvénients de chaque mode. Le tableau I.4 résume les caractéristiques des différents modes de transport de conteneurs.

Tableau I.3 Comparaison entre le routier, le ferré et le fluvial (Oudani 2016).

Mode de transport	Avantages	Inconvénients
Routier	Délais-coûts raisonnable et attractif, meilleur fréquence, flexibilité-fiabilité, capacité à atteindre des zones à accès très difficile (zone urbaines denses, zones montagneuses, etc.), très compétitifs sur des distances courtes et moyennes, incontournable pour acheminer les marchandises aux destinations finales et pour faire circuler les trafics entre les régions de faible émissions/réception de marchandises, transport tout type de marchandises, possède des unités de chargement variées, réseaux en expansion permanente à avec une grande capacité, coût d'acquisition des équipements attractif, fixe le prix du marché, peut être servi par plusieurs type d'engins de manutention (grue, chariot cavalier, chariot élévateurs, etc.).	Pollution atmosphérique et sonore, dégrade la qualité de vie, provoque des accidents, encombrements routiers, ralentir la circulation (poids lourds), etc.
Ferroviaire	Rapidité, sécurité, horaires bien planifiés et respect des délais, coût de transport plus économique, capacité très élevée en volume et en poids, favorable sur les grandes distances, moins polluant que la route, bruit sonore moins important, achemine de grandes quantités de conteneurs destinés à plusieurs lieux de réception, possibilité de faire du transport combiné rail/route, etc.	Réseaux limité en capacité dont la majorité est réserve au transport de passagers, coût des maintenances des infrastructures élevées, pré- et post- acheminements par la route, les horaires fixes de départ et d'arrivée, circulation de trains restreinte à un horaire prédéfinie sur le réseau ferré, nombre de ressources limitées, manœuvres ferroviaires trop complexes et couteuses en temps et en argent, desserte limitée par le réseau ferroviaire
Fluviale	Mode le moins polluant, consommation d'énergie faible, transport massif de conteneurs sur des grandes distances et sans rupture de charge entre deux ports, coût de transport plus économique, possibilité de faire du transport combiné fleuve/route, etc.	Capacité limitée des voies navigables, réseau de transport le plus faible, contraintes géographique (tirant d'eaux, niveau des cours d'eaux, marée), dessert uniquement les zones ayant un accès à un grand fleuve irrégulier, peu rapide, contraintes de stabilités (chargement/déchargement), etc.

Tableau I.4 Quelques caractéristiques des modes de transport de conteneurs

Mode de transport	Capacité	Portée/pertinence	Coût	Emission gaz à effet de serre
Navire géant (Deep-sea)	Jusqu'à 19 500 EVP	Très longue distance	Attractif	Faible
Navire nourricier (Short-sea/feeder)	Jusqu'à 3000 EVP	Longue ou moyenne distance	Attractif	Faible
Barge/péniche/convoi de barges	Jusqu'à 400 EVP pour barge ou péniche	Longue ou moyenne distance	Raisonnable (peu élevée)	Trop faible

	Jusqu'à 1000 EVP ou plus selon le nombre de barges composant le convoi.			
Train	Jusqu'à 120 EVP	Longue ou moyenne distance	Raisonnable (peu élevée)	Faible
Camion/camion remorque	Jusqu'à 2/3 EVP	Court ou moyenne distance	Attractif	Trop élevée

1.3. Plateformes portuaires

Le troisième intervenant de la chaîne logistique sont les ports (Figure I.1). Ils sont identifiés comme le nœud principal, et le maillon le plus sensible et vulnérable de la chaîne logistique globale. En effet, ce sont des systèmes ouverts et très dynamiques, équipés d'infrastructures sophistiquées et d'engins mobiles pour réaliser les opérations de transfert, de transport interne et de stockage de conteneurs. Les tableaux I.5-I.7, présentent le classement des ports maritimes mondiaux, européens et français par trafic annuel en EVP, respectivement. Plusieurs organismes internationaux publient annuellement des classements des plus grands ports à conteneurs sur leurs sites internet, notamment, l'*AAPA* (*American Association of Port Authorities*)[1], le quotidien *Lloyd's List* [2], UNCTAD (*United Nations Conference on Trade and Development*)[3], et l'encyclopédie Wikipédia.

Tableau I.5 Classement des plus grands ports mondiaux en 2015

Rang	Port	Pays	Trafic annuel en millions d'EVP
1	Port de Shanghai	Chine	36,537
2	Port de Singapour	Singapour	30,922
3	Port de Shenzhen	Chine	24,205
4	Port de Ningbo-Zhoushan	Chine	20,627
5	Port de Hong Kong	Chine	20,073
6	Port de Busan	Corée du Sud	19,467
7	Port de Canton (Guangzhou)	Chine	17,590
8	Port de Tsingtao (Qingdao)	Chine	17,436
9	Jebel Ali (Dubaï)	Émirats arabes unis	15,592
10	Port de Tianjin	Chine	14,111
11	Port de Rotterdam	Pays-Bas	12,234

Tableau I.6 Classement des plus grands ports européens en 2015

Rang	Port	Pays	Trafic annuel en millions d'EVP
1	Port de Rotterdam	Pays-Bas	12,453
2	Port d'Anvers	Belgique	9,65
2	Port de Hambourg	Allemagne	8,82
4	Port de Brême-Bremerhaven	Allemagne	5,55
5	Port de Valence	Espagne	4,62
6	Port d'Algésiras	Espagne	4,52
7	Port de Félixstowe	Royaume-Uni	3,98
8	Port du Pirée	Gréce	3,29
9	Port d'Ambarli	Turquie	3,08
10	Port de Marsaxlokk	Malte	3,06
11	Port du Havre	France	2,56

Tableau I.7 Classement des plus grands ports français en 2015

Rang	Port	Région	Trafic annuel en millions d'EVP
1	Port du Havre	Normandie	2,56
2	Port de Marseille	Provence-Alpes-Côte d'Azur	1,22

1. www.aapa-ports.org/
2. www.lloydslist.com/
3. unctad.org/

3	Port de Dunkerque	Hauts-de-France	0,31

Ces tableaux montrent que les plateformes portuaires ont un rôle très important dans le développement et la prospérité de la chaîne logistique globale. Pour traiter cet immense flux de conteneurs reçu par voie terrestre ou par voie navigable, ainsi que les opérations impliquées, les plateformes portuaires comptent plusieurs acteurs :

- Autorité portuaire : contrôle et supervise les opérations à l'intérieur du territoire du port (capitainerie).

- Douane : est un organisme gouvernemental ayant le rôle d'une institution fiscale et de sécurité. Il perçoit les droits de taxes imposées sur les marchandises exportées ou importées sur un territoire, mais aussi la lutte contre le trafic des marchandises illicites.

- Opérateur d'un terminal : une société qui exploite un terminal et gère ses ressources. Sa principale vocation est la livraison des conteneurs à leur mode de transport de sortie sous des bonnes conditions et dans les délais requis.

- Docker/manutentionnaire : est un ouvrier portuaire employé au chargement et déchargement de marchandises (conteneurisé ou en vrac) arrivant au port par navires. C'est une profession exclusivement masculine où la force physique est une ressource essentielle. Le terme docker/manutentionnaire regroupe plusieurs métiers portuaires, à savoir, grutiers, conducteurs d'engins mobiles (chariot cavalier, chariot élévateur), caliers, décrocheurs, pointeurs, signaleur (ou pareur), superviseur, acconier.

- Remorqueur : est un bateau relativement petit, très puissant et très manœuvrable. Il est utilisé pour guider, tirer, pousser, accoster les géants des mers (porte-conteneurs) entrant et sortant des ports. Chaque port dispose de plusieurs de ces engins.

Un port est traversé de part en part par un flux de conteneurs acheminé par différents moyens de transport. Ce flux est absorbé temporairement via divers nœuds de transbordement, de triage ou/et d'inter-modalité, appelé les terminaux à conteneurs. La section suivante présente en détail ces systèmes.

2. Le terminal à conteneurs

2.1. Introduction

Un terminal est une zone spécialisée d'un port ou d'un aéroport, aménagé comme un point d'arrivée ou de départ d'une charge ou d'un passager via un mode de transport ou plus. En général, un terminal est une infrastructure capable d'expédier ou de recevoir des biens ou des personnes. On peut définir un terminal à conteneur (TC) ainsi : c'est une plateforme distribuée et très dynamique liée à une ou plusieurs interfaces (maritimes, fluviales, terrestres ou hinterland), c'est un lieu logistique de transbordement de marchandises conteneurisées entre

plusieurs modes de transport. Chaque conteneur arrivant au terminal est soumis à un ensemble d'opérations de manutention (déchargement-réception, transport, stockage et chargement-livraison) impliquant divers équipements et engins mobiles pour acheminer le conteneur à son mode de transport de sortie. L'objectif d'un TC est d'assurer un enchaînement d'opérations rapide et de satisfaire les exigences de ses clients en leur proposant un service de qualité avec un coût raisonnable. Le soutien économique et social que portent les terminaux à une région ou à un pays toute entier est de grande portée (Henesey 2006), *i.e.*, des terminaux efficaces appâtent les grands armateurs mondiaux, ce qui contribue à la prospérité du commerce régional et national, et renforce la position économique du pays au niveau mondial.

Face à la croissance annuelle du flux de conteneurs qui s'écoule de la mer et la multiplicité des risques que cela peut engendrer, répondre aux besoins des clients en s'alignant avec les nouvelles réglementations de sécurité portuaire constitue une source de nuisance supplémentaire pour les TC, qui s'ajoute à de nombreux problèmes complexes déjà existants : l'allocation de ressources, la planification et l'ordonnancement des opérations de manutention. Augmenter la capacité de manutention de conteneurs permettra aux terminaux de faciliter la circulation des conteneurs à l'intérieur de leurs zones opérationnelles. En d'autres termes, développer de nouvelles infrastructures logistiques ou agrandir les infrastructures existantes (*i.e*., extension physique) et améliorer les équipements de manutention ou acquérir de nouveaux équipements plus performants. Adopter de telles solutions n'est pas à la portée de tout le monde, plusieurs terminaux souffrent d'un manque d'espace libre pour ajouter de nouvelles zones opérationnelles (quai, zone de stockage, etc.), de plus, les coûts de construction sont très importants, mais les investissements se font rares à cause de l'instabilité économique qui règne actuellement (les effets de la crise financière de 2008 et l'économie mondiale est encore en convalescence). De plus les équipements de manutention coûtent des milliers de dollars et les grues de quai sont les plus dispendieux, leur valeur est estimée à environ 8 millions de dollars (Dubreuil 2008).

En outre, durant les deux dernières décennies, la capacité des porte-conteneurs s'est multipliée par trois (voir tableau I.2), sans oublier la taille qui devient de plus en plus importante. En 2000 la capacité des navires était d'environ 6000-8000 EVP, aujourd'hui des porte-conteneurs de 20 000 à 21 000 EVP sont déjà en commande (Oudani 2016). L'armateur Japonais Mitsui OSK Lines, a commandé quatre navires géants de 20 150 EVP avec une dimension de 400×58.8×16, qui doivent être livrés en 2017 et seront exploités sur les lignes maritimes reliant l'Asie et l'Europe. Cette course au gigantisme a mis certaines grues de quai hors-jeu (certaines grues de quai n'ont pas la taille requise pour servir ces géants des mers). Face à cette situation, les terminaux n'ont que deux options devant eux : soit acheter de nouvelles grues de quai (Super-post-Panamax), soit améliorer les grues existantes. La première option est trop coûteuse vu que les grues de type post-Panamax sont déjà trop chères, alors acquérir des « Super-post-Panamax » sera plus dispendieux. La deuxième option qui est la plus favorable aux intérêts des TC consiste à redimensionner les grues de quai, c.-à-d., allonger le bec avant et augmenter la hauteur de levage des grues. Pour les terminaux qui manquent cruellement de moyens financiers, intégrer un réseau « *hub and spoke* » devient une priorité,

dans lequel les « *hubs* » sont les grands terminaux qui reçoivent les porte-conteneurs à haute capacité et les « *spoke*s » sont les petits terminaux connectés aux « *hubs* » par des navires nourriciers. Les réseaux *« hub and spoke* » sont une réponse au gigantisme des navires porte-conteneurs qui empêche la desserte des petits ports. D'un autre côté, la plupart des quais n'ont pas été destiné à recevoir des porte-conteneurs de 400 mètres de longue ou plus, cela pousse les terminaux, soit à réduire le nombre de postes à quai soit étendre certains quais.

Par ailleurs, aux coûts des opérations de manutention de conteneurs qui représentent des milliers de dollars par jour, ces dépenses additionnelles viennent alourdir considérablement la note des terminaux. De ce fait, chaque opérateur d'un terminal doit adopter des mesures d'optimisation judicieuses intégrées à des systèmes informatiques permettant une planification de tâches rentable et une meilleure utilisation des ressources disponibles, *i.e.*, un système d'exploitation du terminal (en anglais, *Terminal Operating System*). La compétitivité d'un terminal portuaire est évaluée à l'aide de plusieurs indicateurs, surtout le temps à quai des navires et leur séjour au port. De manière générale, la minimisation du temps qu'un navire passe amarrer au quai est synonyme de compétence. Un autre point important auquel la compétitivité d'un terminal est étroitement liée est la fiabilité des connexions port-hinterland (la connectivité des ports aux modes de transport terrestre et fluvial). En effet, absorber le flux de conteneurs tout en évitant la congestion des zones opérationnelles ou la saturation des zones de stockage nécessite une efficience opérationnelle, mais aussi une connexion avec des modes de transport interne capables d'évacuer plus rapidement les conteneurs vers leurs destinations (le hinterland). Le mode routier est le favori aux yeux des ports, mais les modes massifiés attirent plus en plus l'attention des dirigeants des ports et des autres prestataires logistiques. Plusieurs ports ont lancé des projets de construction de plateformes multimodales liées directement à l'hinterland par rail et par voie navigable en vue d'améliorer l'offre du transport massifié, mais le plus grand obstacle devant eux reste l'attractivité du mode routier, le maître du marché.

2.2. Classifications et structure physique

2.2.1. Classification

Le cœur de métier d'un terminal à conteneurs en tant qu'élément essentiel de la chaîne logistique consiste à amener les conteneurs reçus à leur mode de transport de sortie au bon moment. Le passage de conteneurs d'un moyen de transport vers un autre peut être effectué soit par une opération de transbordement soit par une opération de transfert. Dans la première manœuvre, le conteneur est déplacé d'un moyen de transport vers un autre de même type, par exemple, transbordement entre deux navires porte-conteneurs ou transbordement rail-rail (d'un train vers un autre train). Selon, Baird (Baird 2007), aux moins 30% de conteneurs traités aux ports passent d'un navire à un autre (navire-navire ou navire-feeder). Le transbordement rail-rail peut être assuré par un seul équipement de manutention, *i.e.*, un portique ferroviaire peut déplacer directement des conteneurs entre plusieurs trains, contrairement au transbordement entre deux navires qui implique au moins trois équipements, *i.e.*, tout d'abord le conteneur est saisi par une grue de quai, ensuite il est ramassé ou bien mis sur un véhicule de transport interne,

qui l'achemine vers une autre grue de quai pour être chargé sur le porte-conteneurs auquel il est destiné. En second lieu, l'opération de transfert de conteneurs se fait entre deux modes de transport, c'est-à-dire, le conteneur est déchargé d'un train pour être déposé sur un navire ou sur un camion. Il y a des terminaux spécialisés dans l'une de ces deux opérations, à savoir, terminaux de transbordement maritime (en anglais, *pure transshipment terminal*), terminaux de transbordement rapide rail-rail, terminaux de transfert rail/route ou fleuve/route, etc. Néanmoins, la plus grande partie des terminaux est équipée pour réaliser les deux opérations. On peut aussi distinguer les terminaux par leur emplacement géographique. Les terminaux portuaires situés dans un port maritime, les terminaux terrestres localisés à l'intérieur des terres ou dans un port sec et les terminaux fluviaux situés sur le bord d'un fleuve, d'une rivière ou d'un canal. A la lumière de ces explications, on propose de classifier les terminaux à conteneurs comme suit :

- Terminal de transbordement maritime/terrestre : assure le routage des flux conteneurisés entre deux moyens de transport de même type. Les zones opérationnelles de ce type de terminaux sont conçues de façon à rendre le transbordement de conteneurs plus rapide. En outre, ces terminaux se limitent à une seule interface (exemple : terminal ferroviaire) et les grues sont les équipements les plus utilisés.

- Terminal de transfert terrestre/fluvial : il est aussi connu comme « terminal hinterland », il permet de soulager les terminaux maritimes très encombrés en absorbant le flux de conteneurs entrants via des modes massifiés, *i.e.*, connecté aux terminaux maritimes par trains et/ou barges. Au niveau de ce type de terminaux, les conteneurs passent du train vers le camion ou de la barge vers le camion. D'ailleurs, un terminal fluvial de transfert peut être membre d'un réseau « *hub and spoke* ».

- Terminal portuaire : c'est le type de terminaux qui implique les manutentions les plus complexes (Dubreuil 2008). En effet, contrairement aux deux autres types, ces terminaux sont des lieux de transbordement, de triage et d'intermodalité entre divers modes de transport (camion ou train ou barge vers navire). En plus, ce sont les terminaux qui coûtent le plus et traitent un volume de conteneurs très important.

- Terminal de collecte-distribution : c'est une plateforme logistique de massification pour la distribution des conteneurs exports et la collecte des conteneurs imports vers et à partir des terminaux maritimes/portuaires. En d'autres termes, il joue le rôle de point de concentration entre les terminaux maritimes d'un port et son réseau hinterland massifié. Ce type de terminaux est généralement équipé d'une zone ferroviaire pour le transbordement rail-rail et d'une cour fluviale pour les opérations sur les barges. De plus, il peut être directement lié au réseau ferré national (exemple : le terminal multimodal du port du Havre). Par ailleurs, un terminal de conteneurs vides (ou dépôt de conteneurs)

peut être considéré comme un terminal de collecte-distribution de conteneurs vides.

D'autres classifications existent dans la littérature. Wiegmans (Wiegmans et al. 1999) classifient les terminaux selon leur capacité et le volume de conteneurs traité annuellement. Dans un autre papier, Wiegmans (Wiegmans 2003), propose une classification basée sur la nature des marchandises manutentionnées et le type de connexion port-hinterland.

2.2.2. Organisation physique

Un terminal à conteneurs est divisé généralement en une ou deux zones d'opérations pour la réception et l'expédition de conteneurs import-export, et un espace de stockage pour le regroupage de conteneurs (Figure I.5). Une zone d'opérations sert à recevoir les conteneurs imports (réciproquement, les conteneurs exports) et expédier les conteneurs exports (réciproquement, les conteneurs imports). En effet, à l'interface maritime, les navires sont déchargés de leurs conteneurs exports pour ensuite accueillir leurs conteneurs imports, tandis qu'au niveau de l'interface terrestre/fluviale, les conteneurs exports sont collectés et les conteneurs imports sont projetés vers l'hinterland. Chaque zone peut être composée de plusieurs sous-zones spécialisées, à savoir, dépôt de conteneurs vides, zone de conteneurs réfrigérés, zone de conteneurs de matières dangereuses, zone de conteneurs surdimensionnés, buffer, entrepôt de marchandises, guérite, centre de maintenance et de reptation, parking de véhicules de manutentions, etc. L'aménagement de chaque zone ou espace est considéré comme une décision stratégique, qui prend en compte, les types et le volume de conteneurs à manutentionner, la localisation et la superficie du terminal, la nature des connexions du terminal (maritime, routière, massifiée), la nature des opérations, et le type et le nombre du matériel de manutention choisi. L'ensemble des équipements de manutention et les différentes opérations de transport, de transfert, de transbordement, et de stockage, représentent le système d'opérations du terminal (Brinkmann 2011).

Bien que les terminaux à conteneurs se différent en taille, en type d'opération, en équipements, etc., ou ils ont un emplacement géographique différent, les flux de conteneurs subissent un enchaînement d'opérations presque identique. Après son arrivée au terminal, le moyen de transport est affecté à une position (parking, voie ferrée, poste d'amarrage), où un équipement de manutention sera chargé d'exécuter les opérations demandées (grue, chariot cavalier, etc.). Chaque conteneur entrant est identifié et les informations qui le concernent sont enregistrées (contenu, origine, destination, compagnie maritime, date d'arrivée, …). Les conteneurs déchargés sont ensuite distribués sur les blocs de la zone de stockage. Le temps de séjour d'un conteneur au sein d'une zone de stockage varie de quelques heures à plusieurs semaines. Des déplacements supplémentaires sont effectués si des entrepôts de marchandises et/ou des dépôts de conteneurs vides existent dans le terminal, soit pour embarquer de la marchandise dans un conteneur vide, soit pour mettre à terre la charge utile du conteneur. Les buffers (ou zones tampons) servent à accumuler quelques conteneurs, si aucun véhicule de transport n'est disponible pour recevoir le conteneur déchargé, en d'autres mots, ils diminuent

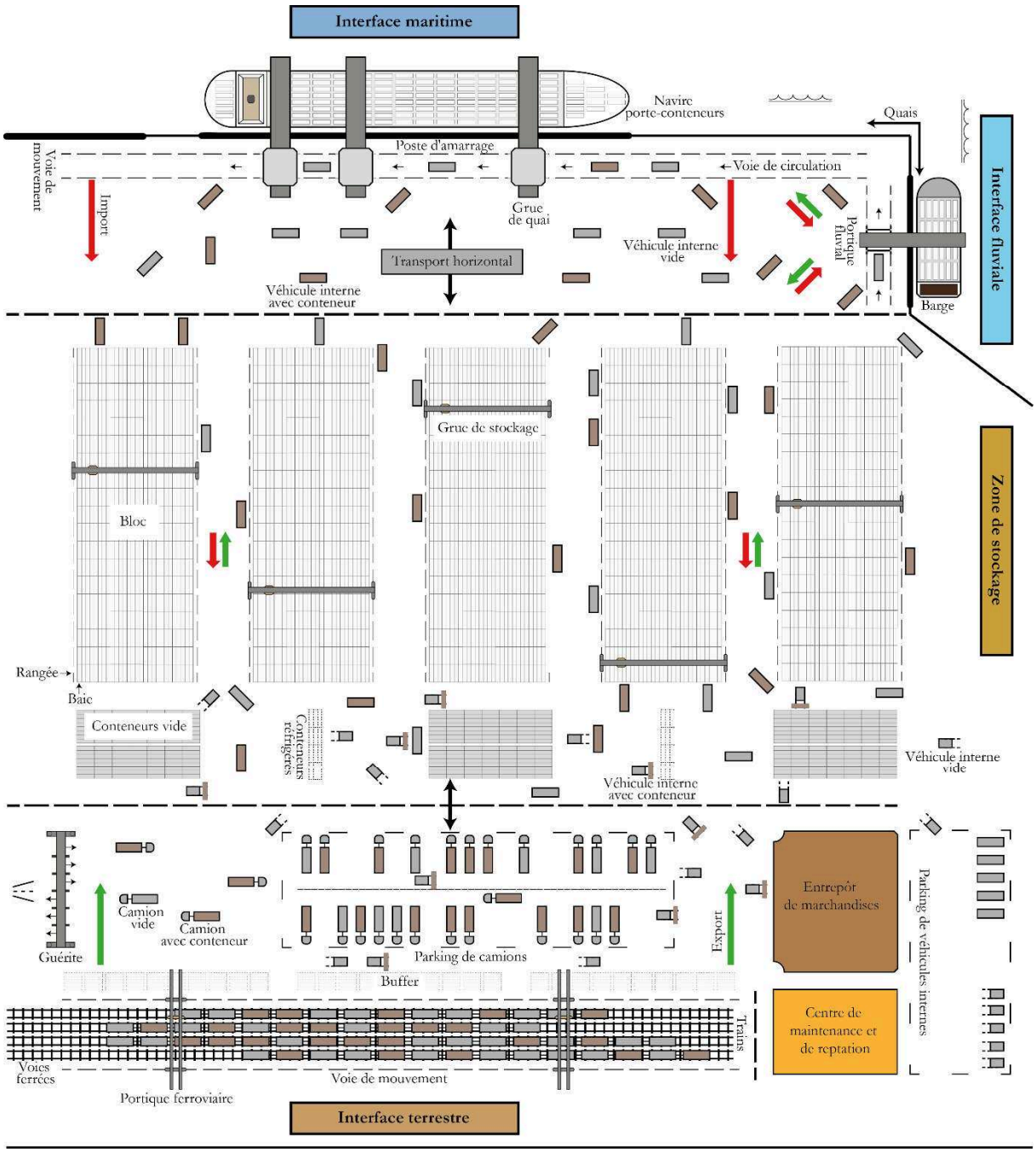


Figure I.5 Structure physique d'un terminal à conteneurs

le risque d'arrêt des équipements. Parfois, la mise à buffer du conteneur doit être évitée, puisqu'elle entraîne une double manutention.

Chacune des trois zones préalablement mentionnées peut constituer un terminal spécialisé à l'intérieur du port, mais cette organisation occasionne des liaisons ferrées ou routières additionnelles pour les relier aux autres terminaux, comme c'est le cas du terminal multimodal du port du Havre qui est connecté aux terminaux maritimes par des navettes ferroviaires.

Dans la littérature, les opérations d'un terminal à conteneurs, peu importe son type, sont classifiées en quatre sous-systèmes (Figure I.6) :

(1) les opérations portuaires (*Ship-to-Shore subsystem*),

(2) les opérations de transport/transfert (*Horizontal-Transport /Transfert subsystem*),

(3) les opérations de stockage (*Storage subsystem*),

(4) les opérations de réception-expédition (*Delivery-receipt subsystem*).

Chaque sous-système est caractérisé par des opérations uniques et son efficacité dépond de la performance des sous-systèmes auxquels il est lié (Henesey 2006). La sous-section suivante présente en détail ces quatre sous-systèmes et les équipements qui y sont utilisés.

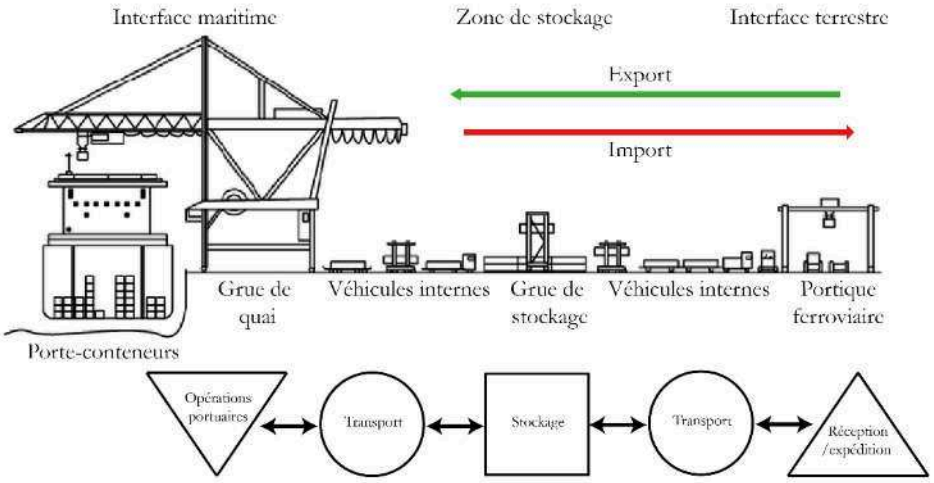


Figure I.6 Les quatre sous-systèmes d'opérations (source : (Steenken et al. 2004))

2.3. Zones d'opérations et équipements

2.3.1. Les opérations portuaires

La zone des opérations portuaires est caractérisée par la longueur de ses quais, le nombre de postes d'amarrages que compte un quai et le nombre de grues qui y sont déployés (Figure I.7). C'est la zone qui est soumise à plus de pressions, vu que la survie et la compétitivité du terminal maritime, bien évidement celles du port en dépend. En effet, le temps de séjour d'un navire porte-conteneurs au terminal est un critère crucial aux yeux des armateurs lors du choix d'un port d'escale, c'est pourquoi ils cherchent à utiliser les terminaux permettant de minimiser la durée des opérations de chargement et déchargement de leurs navires, puisqu'ils leur coûtent trop cher. En règle générale, la minimisation du temps qu'un navire passe au port est un objectif global pour les terminaux maritimes (Steenken et al. 2004).

Il existe deux possibilités d'acheminements pour les conteneurs maritimes déchargés (Dubreuil 2008). La première, c'est de les transporter vers une zone de stockage en attendant l'arrivée de leurs modes de transport de sortie. En revanche, la deuxième consiste à effectuer un transfert direct vers un mode de transport sans passer par la zone de stockage. Cette forme de transfert était autrefois répandue mais aujourd'hui rarement utilisée, car synchroniser l'arrivée des modes hinterland avec les opérations de déchargement des navires s'avère très complexe.



Figure I.7 Interface maritime

Un navire amarré au quai peut être déchargé d'une partie de ces conteneurs ou bien de la totalité. Le déchargement et le chargement de navires sont guidés par un plan d'opérations établi avant leurs arrivées. Ce plan contient une séquence de conteneurs à manutentionner par ordre de priorité, c.-à-d., le déchargement précède le chargement, au déchargement le pont avant la cale et au chargement c'est l'inverse (voir, Figure I.8). La première étape du processus de déchargement consiste à la prise du conteneur par une grue. Ensuite, elle le transporte de la cale ou du pont du navire à la terre (buffer), ou bien le dépose sur un véhicule de transport interne. Durant ces mouvements, le conteneur est identifié par un vérificateur installé sur une patte de la grue, puis les informations concernant le conteneur sont mises à jour par le système informatique du terminal, qui par la suite attribue une position de stockage au conteneur. Les porte-conteneurs sont les seuls navires qui peuvent être déchargés et chargés en même temps (Brinkmann 2011). L'opération de chargement débute à la pile où le conteneur réside. Un véhicule se dépêche vers la pile pour ramasser le conteneur, une fois récupéré le véhicule se dirige vers le quai, il dépose ensuite le conteneur à terre s'il en a la faculté ou bien se place dans une file d'attente pour être déchargé par une grue. En général, une grue est servie par une flotte de véhicules internes. Enfin, le conteneur est mis sur le navire à la position assignée et le système de gestion valide cette position en mettant à jour les données du conteneur (date de départ, …). D'ailleurs, lors des opérations sur les navires, le grutier travaille en collaboration avec les dockers situés soient au fond de la cale ou sur le pont du navire soient sur les docks, via une communication par radio ou par gestuelles. Quand les opérations prennent fin, l'autorité portuaire autorise le navire à quitter le terminal. La figure suivante montre la structure d'un porte-conteneurs composé de plusieurs baies (noter que chaque baie peut compter des centaines de conteneurs, en hauteur et en longueur).

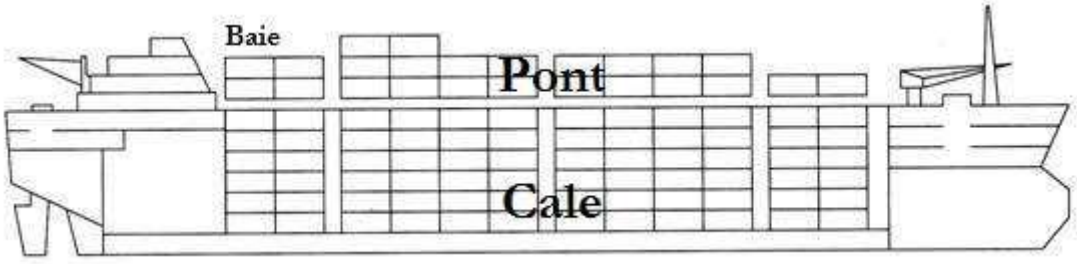


Figure I.8 Navire porte-conteneurs

Il existe deux types de grues de quai : les grues à pont roulant simple et les grues à pont roulant double. La différence c'est que le second type possède une plateforme bâtie dans l'empattement de la grue qui sert de tampon entre le chariot avant et arrière de la grue. Le chariot avant opère sur les navires tandis que l'arrière se charge des véhicules internes, cela permet d'accélérer les opérations portuaires. La capacité de levage des grues de quai varie entre 2 EVP et 6 EVP, *i.e.*, il y a des grues qui ne manutentionnent à la fois qu'un seul 40 pieds (ou deux 20 pieds) et d'autres qui peuvent ramasser simultanément six conteneurs de 20 pieds (ou trois de 40 pieds), voir figure I.9.

Les opérations de réception-expédition par barge peuvent se dérouler au niveau de la zone portuaire si le terminal ne dispose pas d'interface fluviale. La séquence des opérations sur la barge est similaire à celle du navire à la différence que la barge nécessite moins de ressources humaines et matérielles (une seule grue), et que le déchargement précède toujours le chargement (non simultané) puisque la barge a une stabilité fragile.



Figure I.9 Capacité de levage des grues de quai

2.3.2. Les opérations de stockage

La zone de stockage de conteneurs est composée d'un ensemble de blocs (en baies soudées ou scindées) séparés par des voies de circulation (Figure I.10), elle accumule les conteneurs exports et imports attendant leur mode de transport de sortie. Cette zone aborde temporairement le flux de conteneurs reçu par le terminal afin de diminuer la congestion des autres zones. Les conteneurs sont entreposés de façon à accélérer les opérations d'empilage et du désempilage (*i.e.*, stratégie de stockage). D'ailleurs, dans la plupart des cas, les conteneurs se retrouvent dans des blocs à proximité de l'endroit où s'installent leur moyen de transport de sortie (*i.e.*, les imports à proximité des modes hinterland et les exports à proximité de l'interface maritime). Le but de cette organisation de conteneurs est de diminuer la distance parcourue par les véhicules de transport interne lors des opérations de déchargement/chargement, ce qui donne davantage de temps aux véhicules pour mieux servir les grues, en particulier les grues de quai (Dubreuil 2008). L'emplacement assigné à chaque conteneur est défini par trois indices : rangée (colonne), baie (ligne) et niveau (étage), voir figures I.5 et I.11. Par ailleurs, les conteneurs peuvent être regroupés par compagnie maritime, mode de transport, date de livraison, taille, type, une combinaison de critères, etc. L'objectif global des politiques de stockage au niveau de cette zone est d'éviter les remaniements. Un remaniement est une manutention improductive supplémentaire nécessaire pour atteindre un conteneur situé sous un autre conteneur (le



Figure I.10 Zone de stockage

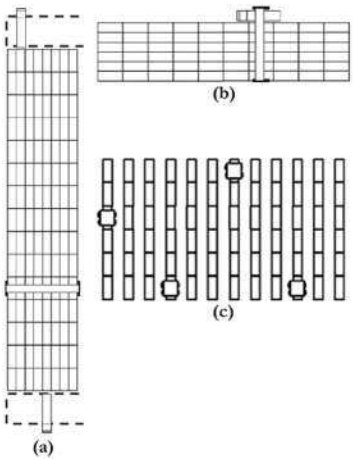


Figure I.11 Les dispositions de la zone de stockage (source : (Carlo et al. 2014a))

conteneur cible est inaccessible). Donc pour extraire le conteneur cible, le conteneur bloquant l'opération doit être déplacé vers une autre pile.

Il existe plusieurs aménagements de la zone de stockage de conteneurs, entre autres, la disposition perpendiculaire (par rapport au quai) de blocs composés de baies soudées et des points de transfert situés aux deux extrémités des blocs (Figure I.11, a), la disposition parallèle de blocs composés de baies soudées et d'une voie de transfert (figure I.11, b), et la disposition perpendiculaire de blocs en baies scindées (figure I.11, c). Günther et Kim (Günther and Kim 2005), identifient deux types de système de stockage, à savoir, le système de stockage direct qui utilise le même type d'équipement pour l'entreposage et le transport de conteneurs, et le système de stockage indirect qui emploie deux types d'équipement pour exécuter les deux opérations. Ce dernier est le plus répandu (Dubreuil 2008). Le système choisi définit l'aménagement de la zone ainsi que les équipements à utiliser et vice-versa. La figure I.12 compare la capacité des systèmes de stockage les plus utilisés.

Les systèmes de stockage directs sont :

- Le système à remorques (châssis) : les conteneurs sont placés sur des infrastructures métalliques équipées de roues qui s'attellent facilement à un tracteur (véhicule articulé). Ce système nécessite un espace important dû au fait que les conteneurs ne sont pas empilés, cependant le coût d'acquisition des équipements est faible, le nombre des opérations de manutention est minimisé et les remaniements sont évités.

- Le système d'entreposage par blocs en baies scindées (chariot cavalier, *straddle carrier*) : les baies sont séparées par un petit espace pour que les chariots cavaliers (les pattes) puissent circuler à l'intérieur des blocs. Le principal avantage du chariot cavalier est qu'il dépose les conteneurs sous les grues sans se placer d'une une file d'attente. Ce système permet une bonne utilisation de l'espace.

- Le système d'entreposage par blocs en baies soudées utilisant les chariots élévateurs : on retrouve plusieurs types de chariots : chariots à prise par le haut

(*toplift*), chariots à fourches (*forklift*) et les chariots à prise par le haut avec mat télescopique (*reachstacker*). Les deux premiers types sont utilisés pour la manutention des conteneurs vides, tandis que l'autre a la capacité de charger et décharger les modes hinterland (barge, train, camion). Les chariots élévateurs demandent un grand espace entre les blocs pour bien manœuvrer en plus ils peuvent empiler sept conteneurs en hauteur, néanmoins des piles de conteneurs à hauteur élevée entraînent une plus grande probabilité d'avoir à effectuer des remaniements (Dubreuil 2008). Bien que ce système soit inadéquat aux terminaux ayant des flux importants de conteneurs, les coûts d'acquisition et d'exploitation sont moins élevés par rapport à d'autres systèmes. Par ailleurs, on peut le transformer en système indirect à l'aide des AGV/tracteur, c.-à-d., les AGV assureront le transport de conteneur et les chariots élévateurs le stockage, cela permet de le rendre plus rapide.

- Le système automatisé « *RAIL GRID* » (Kim et al. 2012) : a été développé par l'entreprise Sea-Land en 1988 (Brickner et al. 1990). Les principaux équipements sont des navettes électriques suspendues à des rails aériens. Les navettes ramassent et déposent les conteneurs en passant au-dessus des piles pour atteindre rapidement l'interface maritime, de plus des mécanismes de commutation ferroviaires à l'extrémité de chaque rail permettent aux navettes de changer facilement de rail. Des plateformes automatisées placée au-dessous des grues de quai servent à accumuler les conteneurs déchargés et à charger sur les navires pour que les opérations aillent plus vite (minimiser les temps d'attente). L'objectif de cette configuration est d'offrir un système de stockage plus productif à haute densité de conteneurs, cependant l'infrastructure est très dispendieuse.

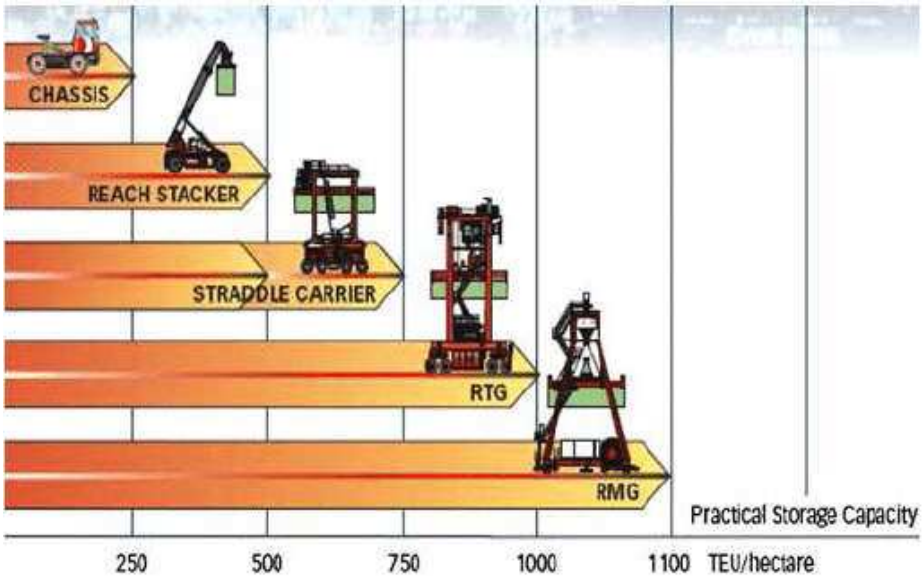


Figure I.12 Capacité de stockage des systèmes les plus utilisés

Les systèmes de stockage indirects sont :

- Le système d'entreposage en blocs perpendiculaires composés de baies soudées avec des points de transfert : c'est le système le plus utilisé dans les grands terminaux à conteneurs. Un pont roulant sur rails (RMG) est assigné à chaque bloc (il ne peut se déplacer entre les blocs) équipé de deux points de transfert situé au

haut et en bas. Ces points sont une sorte de liaison entre les AGV/tracteurs et les ponts roulants. Ce système offre des meilleurs gains et une utilisation efficace de l'espace dû à la densité de stockage de conteneurs. La combinaison entre les ponts roulants automatisés et les AGV donnent plus d'avantages en termes de productivité et de performance, mais la mise en place est coûteuse.

- Le système d'entreposage en blocs parallèles composés de baies soudées avec une voie de transfert : ce système est similaire au précédent. Par contre, les ponts roulants se déplacent sur des pneus (RTG), ce qui leur donne une certaine liberté pour aller d'un bloc à l'autre, noter que le pont roulant sur rails peut aussi être utilisé. Les véhicules internes empruntent la voie de transfert pour passer sous les ponts roulants, ainsi accélérer la récupération de conteneurs. En effet, le pont roulant ne se déplace pas vers le véhicule, c'est ce dernier qui achemine le conteneur jusqu'à la position où il est située. Par ailleurs, ce système permet aux camions d'accéder directement à la zone de stockage pour livrer et récupérer leurs conteneurs.

- Le système d'entreposage et d'extraction automatisé (AS/RS) : ce système est basé sur une grille de plusieurs étages composé d'un ensemble de cases, où chaque case sert à stocker un seul conteneur. Les conteneurs sortent et entrent par des rayons qui jouent le rôle de stations. Une plateforme automatisée est placée dans chaque rayon pour cueillir et déposer les conteneurs soit dans une case soit sur un véhicule de transport interne. Les principaux avantages de ce concept sont : pas de remaniements et l'ajout facile de la capacité de stockage en augmentant le nombre d'étages. Toutefois, le port de Hong-Kong est le seul à utiliser ce système pour l'entreposage de conteneurs vides, toutefois il n'a pas été installé à l'intérieur des terminaux à conteneurs (Dubreuil 2008).

Le système de gestion du terminal coordonne les opérations d'entreposage/extraction avec les opérations de déchargement/chargement. A chaque conteneur entrant identifiée, le système lui assigne une position dans un bloc ou à la cour. Ensuite, il affecte les tâches de transport et de stockage aux (à un) équipement(s) disponible(s). Pour le cas des conteneurs à charger sur les modes de transport, le système détermine les coordonnées du conteneur, puis indique aux (à un) équipement(s) choisis sa position. Les problèmes d'affectation de tâches aux équipements seront abordés ultérieurement dans ce chapitre (voir la sous-section 2.6.1).

Deux autres opérations vues comme complémentaires sont réalisées au niveau de cette zone. Tout d'abord, l'opération de triage si la cour de conteneurs est en désordre. Normalement, les opérations de triage sont exécutées par des équipements libres, *i.e.*, qui n'ont pas de tâches (de base) en attente, mais surtout quand la charge de travail est plutôt faible. En second lieu, l'opération de rapprochement consiste à repositionner les conteneurs maritimes d'un navire le plus près possible au quai. Ce processus est entamé soit quelques heures avant l'arrivée du navire soit quand le navire est en direction du terminal. Le triage et le rapprochement de conteneurs donnent un coup de pouce aux opérations élémentaires (transfert, transport, stockage)*, i.e.*, réduire la durée des opérations.

2.3.3. Les opérations de réception-expédition

L'interface hinterland relie le terminal à son arrière-pays, il sert de point de réception des exports et d'expédition des imports. La structure et la configuration de cette interface dépend des modes de transport hinterland connectés au terminal. De ce fait, on distingue quatre configurations possibles :

- Interface routière (camions seulement) : se compose d'une guérite pour le contrôle des camions, d'un parking pour leur stationnement et de plusieurs voies de circulation, voir figure I.13 (à droite).

- Interface ferroviaire (trains seulement) : équipée de faisceaux ferroviaires, de buffers, de voies de circulation et d'un portique, voir figure I.13 (en haut gauche).

- Interface fluviale (barge seulement) : elle est identique à l'interface maritime, à la différence qu'elle peut posséder des voies ferrées et à la place de la grue on retrouve un portique, voir figure I.13 (en bas gauche).

- Interface hybride (plusieurs modes) : interface terrestre qui contient l'interface routière et ferroviaire ou bien interface hinterland qui contient l'interface terrestre plus l'interface fluviale.



Figure I.13 Les opérations de réception-expédition

Boysen (Boysen et al. 2010), identifient trois générations des cours ferroviaires :

- 1ère génération : sont des cours de triage et de classification de wagons. Les wagons sont triés sur des voies en utilisant les opérations de couplage, de découplage, de changement de commutateur, et d'autres manœuvres ferroviaires. Les opérations de triage facilitent la manutention de conteneurs, toutefois elles prennent beaucoup de temps.

- 2ème génération : ici, les wagons restent intouchables (pas de triage). D'autre part, les éléments supplémentaires par rapport à la première génération : sont une zone de stockage (buffer) pour empiler les conteneurs temporairement et des voies d'accès pour que les engins mobiles passent au-dessous des portiques.

- 3ème génération : sont des cours purement transbordement rail-rail. Ils sont équipés d'un système automatisé pour le triage et le déplacement de conteneurs tout au long de la cour afin de rendre le transbordement rail-rail plus rapide et ainsi gagner en productivité. Des véhicules autonomes sont chargés de rapprocher les conteneurs déchargés par les portiques ferroviaires tout auprès de leurs trains de destination et de transporter au portique un conteneur qui lui est inaccessible.

Les opérations de réception-expédition ou également appelées opérations hinterland regroupent toutes les activités liées à l'accueil, au déchargement, au chargement et au départ des camions, trains et/ou barges. Les équipements déployés dans cette zone dépendent du système de stockage choisi. En effet, les terminaux optant pour un système de stockage par chariots (cavalier, élévateur), réutilisent ces mêmes équipements soit pour participer soit pour réaliser les opérations de réception-expédition de conteneurs en vue de maximiser le taux d'activité des équipements (Dubreuil 2008). Toutefois, dans la plupart des cas, les portiques sont souvent utilisés pour charger et décharger les trains et les barges. Pour les terminaux ayant un système de stockage direct, les véhicules de transport interne sont utilisés pour servir les portiques.

La première étape des opérations sur les camions est la gestion des entrée/sortie. L'ancienne méthode consiste à poster des employées aux différentes voies d'accès de la guérite. Leurs rôle est de valider la concordance des documents présentés par le chauffeur avec le contenu chargé sur le camion. Aujourd'hui la technologie moderne a remplacé le travail manuel traditionnel. Un système automatisé qui repose sur la reconnaissance optique des caractères via des caméras sophistiqués détermine le numéro du conteneur et de l'immatriculation du camion. Si les déclarations du conducteur correspondent aux informations collectées, la barrière est levée et le camionneur se dirige au bureau du terminal pour vérifier son identité et pour présenter son récépissé (en anglais, *waybill,* est un document fourni par le transporteur routière qui décrit le chargement transporté et le conteneur à récupérer (Dubreuil 2008)). Le processus est le même à la sortie du terminal. En général les camions se présentent au terminal chargé et sortent du terminal avec un autre conteneur de manière à maximiser leur revenue. Par contre, il se peut qu'un camion vide arrive au terminal ou sort vide du terminal. De ce fait, le reçu de terminal précise les besoins du camion (conteneur à livrer, conteneur à recevoir). L'étape suivante est la livraison du conteneur. Tout d'abord, le sceau de sécurité est contrôlé et une position est assignée au camion selon le l'organisation de la cour du terminal et du type d'équipement. Si le système indirect est adopté le camion peut être déchargé par un pont roulant près de pile où son conteneur sera entreposé. Dans le cas où les chariots sont choisis, les opérations sur le camion auront lieu dans une zone aménagée à cet effet. La livraison du conteneur met en branle le processus de récupération du conteneur. En revanche, pour le camion ayant juste besoin d'être déchargé le chauffeur signe le reçu et retourne à la guérite pour quitter le terminal. Inversement, pour être chargé le camion se dirige vers la pile où son conteneur sollicité est stocké ou bien attend que le chariot transporte le conteneur jusqu'à lui. Une fois le conteneur est mis sur le camion, le chauffeur termine les démarches administratives et prend la route vers sa prochaine destination.

En ce qui a trait aux trains, la gestion des entrée/sortie est plus. Car les trains ont une fréquence d'arrivée faible et que les horaires des allers-retours sont fixés par l'opérateur du réseau ferré. A l'arrivée au terminal, le train s'installe sur une voie ferrée qui lui a été assigné préalablement, ensuite sa locomotive est dételée. Au cas où, les voies ferrées n'ont pas la capacité de réception d'un train très long, ce dernier est divisé en blocs et le planificateur détermine l'ordre de priorité des blocs à pousser sur la voie ferrée assigné. Si les conteneurs sur les wagons doivent être classés selon des critères définis par le terminal, alors le processus de triage est déclenché. Pendant ce temps, le planificateur établit la séquence des opérations et l'envoie à l'opérateur du portique. Le système de gestion du terminal distribue les positions de stockage sur les conteneurs identifiées, *i.e.*, chaque conteneur sera placé près de l'endroit où son navire de sortie sera amarré. Les opérations de déchargement/chargement sont généralement effectuées par des portiques enjambant toutes les voies ferrées et les opérations de transport entre les buffers et la cour sont réalisées par des chariots, des AGV ou des tracteurs. Dans des terminaux, les chariots assurent entièrement ces opérations. Il arrive que les trains soient chargés et déchargés simultanément pour maximiser l'utilisation des équipements, réduire les délais d'attente des trains et améliorer la productivité de la cour ferroviaire. Lorsque les opérations sur un train sont complétées. La position de chaque conteneur est vérifiée pour valider le plan de chargement qui sera transmis au transporteur ferroviaire par la suite. D'ailleurs, la liste de conteneurs maritimes chargés sur le train sera envoyée aux compagnies maritimes concernées. Enfin, la locomotive du train est attelée pour qu'il puisse quitter le terminal à l'heure fixée par le gérant du réseau ferrée nationale.

Dans les zones de transbordement rail-rail, deux problèmes doivent être considérés : le problème d'interférence et le problème de blocage des portiques (Boysen et al. 2010). Les situations d'interférence peuvent émerger lorsqu'au moins deux grues se déplacent sur la même voie de circulation pour exécuter simultanément deux tâches de manutention adjacentes sur un ou plusieurs vecteurs de transport (voir la figure I.14, ligne jaune en pointillés). Étant donné que les grues maintiennent une distance de sécurité minimale entre elle à tout moment, une grue doit attendre que l'autre s'éloigne avant de pouvoir finir sa tâche pour éviter le risque d'interférence. D'ailleurs, plus il y a d'interférence, plus le temps d'attente augmente. Les temps d'attente sont considérés comme des temps improductifs à minimiser, puisqu'ils influencent négativement la productivité des grues. Le deuxième problème est l'incapacité d'une grue à exécuter entièrement un job (un job est composé de deux tâches : la tâche de récupération du conteneur et la tâche de dépôt du conteneur). Comme illustré par la ligne rouge en pointillés dans la figure I.14, le mouvement de la grue A est bloqué par l'autre grue opérant entre la position de départ et la position cible de la grue A (ces deux positions sont dans deux zones différentes). De plus, la grue A ne peut pas atteindre sa position cible (la position de destination du conteneur) car les grues ne peuvent pas aller au-delà des frontières de la zone d'opérations. Dans une telle situation de blocage, un équipement tiers est nécessaire pour permettre les déplacements de conteneurs d'une zone de grue vers l'autre.

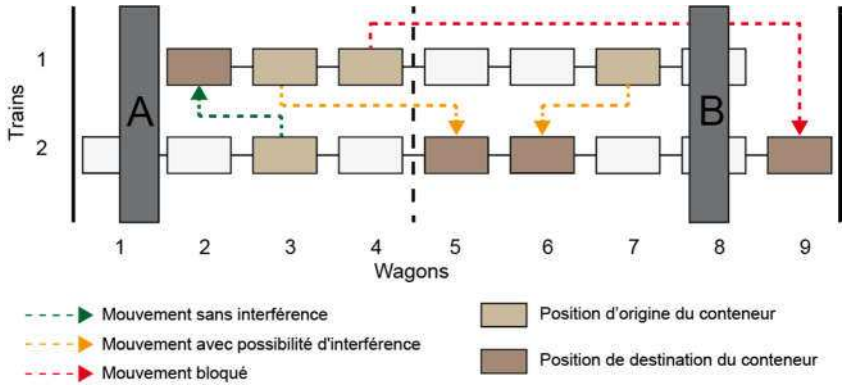


Figure I.14 Les déplacement des grues de manutention

Pour les terminaux qui ont aménagé une zone hinterland pour les barges, les opérations de déchargement et chargement sont semblables à la zone portuaire, mais ce sont les portiques qui s'occupent d'eux.

2.3.4. Les opérations de transport

Les opérations de transport horizontal de conteneurs (voir Figure I.15) servent de liaison entre les sous-systèmes du terminal. L'objectif de ce sous-système est le transport rapide et efficace pour une circulation fluide de conteneurs à l'intérieur du terminal (Kemme 2013b). Les véhicules internes utilisent les voies de circulation pour ramasser les conteneurs et les amener jusqu'à leur prochaine position. De plus, ce sont les équipements les plus nombreux au sein du terminal, alors le déploiement et le partage de véhicules entre les zones devraient être conçu de manière à éviter l'encombrement des voies de circulation et la congestion des quais (Carlo et al. 2014b). Les problèmes de déploiement des véhicules seront abordés ultérieurement dans ce chapitre (voir la sous-section 2.6.1). Ce système est très important car la productivité des interfaces dépend directement de sa performance. On peut le qualifier comme étant le « système sanguin » du terminal à conteneurs. Le type d'équipement utilisé dans ce système est déterminé selon le système de stockage choisi. Steenken et al. (Steenken et al. 2004), ont classifié les équipements de transport de conteneurs en deux catégories : les véhicules passifs (Figure I.16) et les véhicules actifs. La première catégorie assure seulement le transport horizontal de conteneurs (AGV, remorques/tracteurs, système à remorques multiples, système de convoyeurs à moteurs linéaires). La seconde catégorie est en mesure de soulever et de transporter les conteneurs (chariot cavaliers, chariot cavaliers automatisés (ALV), chariots élévateurs, navettes aériennes.

Parmi les systèmes de transport existants, celui qui a la plus grande capacité de transport est le système à remorques multiples. Il peut transporter jusqu'à dix EVP à la fois y compris les conteneurs 45 pieds. La raison derrière cette forme de transport est d'améliorer le rendement des tracteurs à simple unité de remorque. Ce système peut être aussi utilisé comme une liaison inter-terminaux (port de Rotterdam). Le système de convoyeurs à moteurs linéaires est un autre système (Ioannou et al. 2000) et (Kim et al. 2012), qui est basé sur une infrastructure de rails sur lesquels circulent des plateformes de transport de conteneurs, mais il n'est que peu utilisé dû aux coûts d'investissement trop élevés pour le mettre en place et la faible flexibilité de



Figure I.15 Le sous-système de transport (une flotte d'AGV)

routage des transporteurs (nombre limité de rails). En revanche, les convoyeurs peuvent effectuer des virages à angle droit pour changer de rail et faire des retours en arrière sans virée à gauche ni à droite. De plus, il est caractérisé par une haute précision de positionnement, par une infrastructure robuste et par son respect à l'environnement, puisqu'il est alimenté par l'électricité au lieu du diesel (AGV, chariot, remorque). Le terminal Eurokai du port de Hambourg est le seul qui a développé un prototype d'un tel système (Dubreuil 2008).



Figure I.16 Systèmes de transport interne

Les AGV sont des véhicules de transport automatisés sans pilote à bord qui suivent des chemins de circulation prédéfinis sous forme de fils électriques, ce qui permet un positionnement précis des AGV. Les AGV sont capables de transporter soit un conteneur 40/45 pieds soit deux de 20 pieds. Afin de détecter les obstacles et d'éviter les collisions, l'avant et l'arrière les AGV sont équipés de capteurs infrarouges. En outre, les chemins de circulation sont subdivisés en plusieurs segments, où chaque segment exploité par un AGV sera bloqué aux autres afin d'éviter les situations d'impasse et les collisions. On retrouve particulièrement le système de transport par AGV dans les régions ayant un coût de main-d'œuvre trop élevé.

2.4. Terminaux automatisés et ports secs

La dernière génération des terminaux multimodaux sont équipés d'un système automatisé pour le triage et le déplacement de conteneurs tout au long de la cour ferroviaire afin de rendre le transbordement rail-rail plus rapide et ainsi gagner en productivité (Boysen et al. 2010). Ce système automatisé est basé sur des véhicules autonomes répartis entre les zones opérationnelles de la cour, qui rapprochent les conteneurs déchargés par les portiques ferroviaires tout près de leur train de destination. L'automatisation des opérations, particulièrement dans les régions où les coûts de main-d'œuvre sont élevés, ne date pas d'hier,

le port de Rotterdam a été le premier à s'engager dans cette voie, en 1993 il a mis en service le terminal automatisé ECT (*Europe Container Terminals*). Le terminal Altenwerder de Hambourg a suivi ce chemin neuf ans après, tandis que le port de Khalifa (*Abou Dabi*) a inauguré en 2012 le premier terminal semi-automatisé au Moyen-Orient. Une liste des terminaux (semi ou entièrement) automatisés au monde est publiée dans (Martín-Soberón et al. 2014). Un nouveau concept des terminaux automatisés est développé récemment, en particulier pour les ports limités en surface. Il consiste à construire une zone de stockage à deux étages en vue d'augmenter la capacité du terminal. Les étages sont reliés par un système de levage automatisé pour permettre un échange flexible de conteneurs entre les deux surfaces. Les grues de stockage seront placées uniquement au niveau du deuxième étage mais elles peuvent accéder facilement au premier. Des véhicules autonomes assureront la liaison entre les différentes zones du terminal et des grues de quai à triple levage seront distribuées sur les postes d'amarrages pour opérer sur les navires. Cette vision est originale et novatrice seulement la concrétisation est très compliquée en plus d'être coûteuse. En général, les terminaux automatisés demandent beaucoup de fonds et des systèmes informatiques très sophistiqués, ce qui décourage un bon nombre de ports de se lancer sur cette voie, en outre dans certains pays les syndicats seront des obstacles à de telles ambitions (automatiser signifie moins d'offre d'emploi).

Par ailleurs, il existe un autre type de plateforme logistique qu'on doit mentionner, à savoir, le port sec. C'est une infrastructure terrestre reliée par la route ou le rail à un port maritime, elle a un fonctionnement similaire à celui d'un port maritime comprenant les services douaniers (Oudani 2016). D'ailleurs, cette une solution logistique de très longue date et très répandue dans le monde. Le rôle d'un port sec est le transbordement des conteneurs ou de marchandises en vrac, mais il peut aussi inclure des zones de stockage (ou collecte de marchandises), des installations ferroviaires, des centres de réparation et de maintenance pour les transporteurs routiers ou ferrés. L'idée derrière ces centres de transbordement est de soulager les ports maritimes encombrés tout en accélérant les mouvements de conteneurs entre les navires et les réseaux de transport terrestre.

2.5. Etude de cas : le terminal multimodal du port du Havre

2.5.1. Port du Havre

Il fut créé en 1517 sur l'ordre du roi François 1ère, le port du Havre (Figure I.17) est leader en termes de trafic conteneurisé en France avec plus de 2,56 millions d'EVP (Equivalant Vingt Pieds) en 2015. Il est lié à des régions géographiques riches et denses en population (île de France, région lyonnaise), situé à l'embouchure d'une voie navigable à grand gabarit (la Seine) et connecté à un réseau ferroviaire parmi les meilleurs au monde en partie saturé et limité en capacité aux abords de la Région Parisienne ("HAROPA | Ports de Paris Seine Normandie" 2015). C'est l'un des rares ports qui ont la possibilité de recevoir les porte-conteneurs 24h/24h, 364 jours par an. En conséquence, il reçoit quotidiennement des navires dotés d'une grande capacité de chargement. D'après Vincent Malfère, le directeur général adjoint du GPMH (Grand Port Maritime du havre), le port du Havre est le premier port touché par les navires en

provenance de l'Asie et le dernier port, quand les navires repartent (Benghalia 2015). Il est également considéré comme un hub qui distribue les marchandises vers d'autres ports régionaux. Récemment, le port du Havre s'est allié aux ports de Rouen et de Paris pour constituer HAROPA (HAvre ROuen PAris).

Le port du Havre dispose de plusieurs terminaux dédiés au traitement de conteneurs, de voitures (RO-RO) et de produits en vrac (terminal minéralier, terminal pétrolier, terminal sucrier, etc.). Le trafic conteneurisé est celui qui présente le plus grand potentiel de croissance et qui apporte le plus de bénéfices au port. Les terminaux à conteneurs du Havre sont :

- Terminaux nord : Quais de l'Atlantique, Amériques, Europe.
- Port 2000 : Terminal de France (TDF), Terminal de la Porte océane (TPO), Terminaux de Normandie associés à Mediterranean Shipping Company (TNMSC).
- Terminal multimodal.

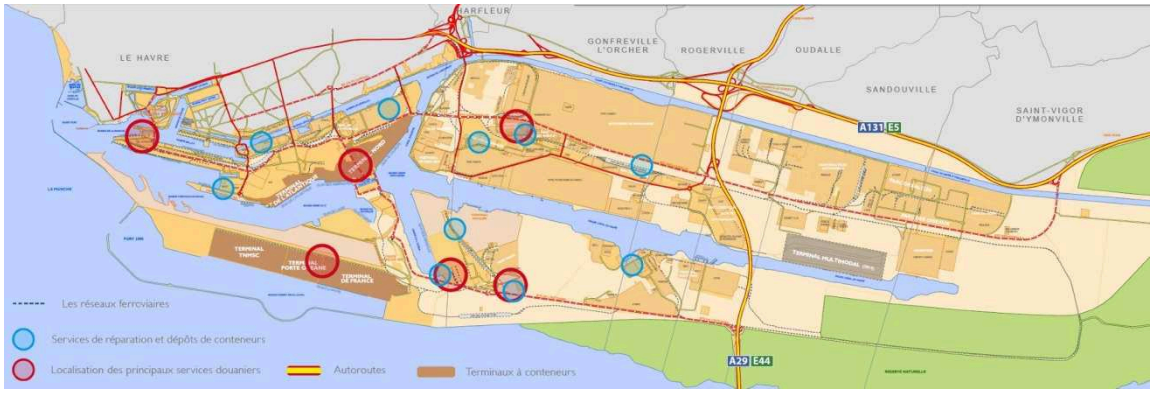


Figure I.17 Port du Havre

De nos jours, les plateformes portuaires cherchent à massifier leurs capacités de projection de conteneurs vers et à partir de leurs réseaux hinterland, en misant sur les modes ferroviaires et fluviales, afin d'absorber efficacement un volume quasi croissant de conteneurs livré par voie maritime. En plus, l'Union Européenne et ses Etats membres encouragent les modes les plus respectueux de l'environnement dans le cadre d'une stratégie qui vise l'amélioration de l'efficience énergétique et la diminution d'émissions de gaz à effet de serre (Energy 2006). En cohérence avec cette vision stratégique du transport, le GPMH (Grand Port Maritime du Havre) projette d'accroître sa part de massification, très inférieure actuellement à celle de ses grands concurrents nord européens (ports allant du Havre à Hambourg), voir figure I.18 (source : ("Modal Share of Freight Transport to and from EU Ports - Think Tank" 2015)). A cet effet, le GPMH a mis en service un terminal multimodal permettant la collecte et la distribution de boîtes sur ses différents terminaux maritimes. Ce nouveau terminal a plusieurs avantages, entre autres, il limite l'utilisation intensif du routier, représente un lieu de transbordement de conteneurs imports ferroviaires pour la formation de trains de grandes lignes complets et offre une connexion fluviale pour les terminaux maritimes qui n'intègrent pas dès l'origine le mode fluvial (Port 2000 : TDF, TPO et TNMSC). Ces atouts majeurs vont permettre au GPMH d'atteindre ses objectifs tracés et d'ouvrir de réelles opportunités.

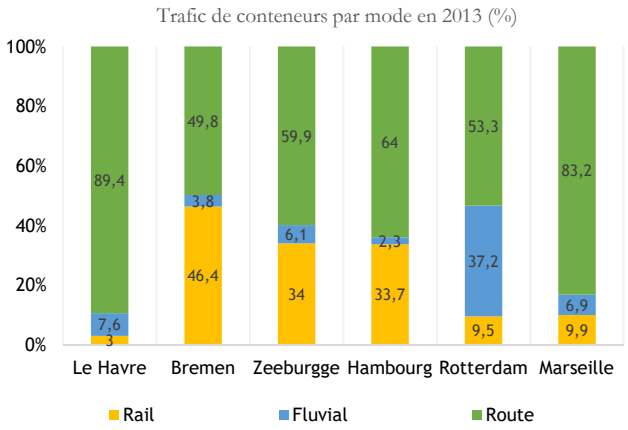


Figure I.18 Part modal dans les ports allant du Havre à Hambourg et Marseille

2.5.2. Terminal multimodal

Le terminal multimodal (TMM) est une plateforme de massification liée à deux interfaces (terrestre et fluviale). Il joue le rôle de point de concentration entre les terminaux maritimes du port du Havre et son réseau hinterland massifié. Chaque conteneur entrant ou sortant du port du Havre par un mode massifié passera obligatoirement par le TMM. Un système de navettes ferroviaires assure la distribution des conteneurs exports sur les terminaux maritimes et la collecte des conteneurs imports à destination du TMM. Ce système de transfert est considéré comme un facteur clé pour la compétitivité du GPMH (Benghalia 2015). Cette nouvelle plateforme est conçue pour traiter 200,000 conteneurs par an. La figure I.19 compare l'ancien et l'actuel système logistique du port du Havre. Pour plus de détails, veuillez se référer à (Leriche et al. 2015) et (Oudani 2016).

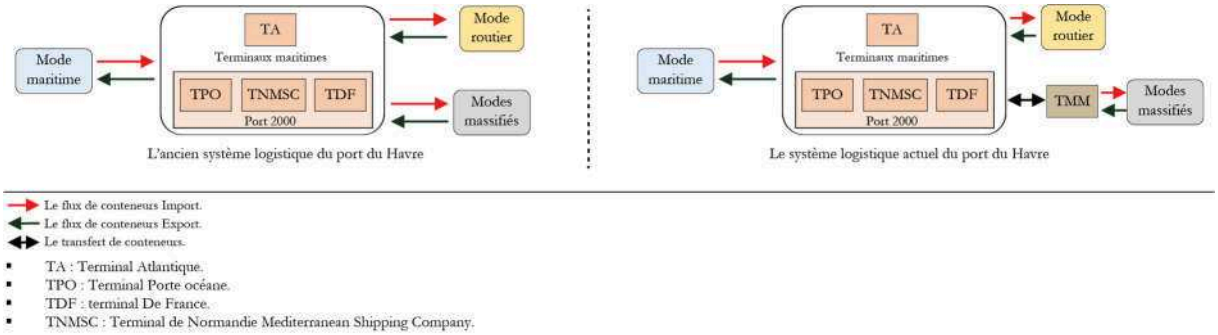
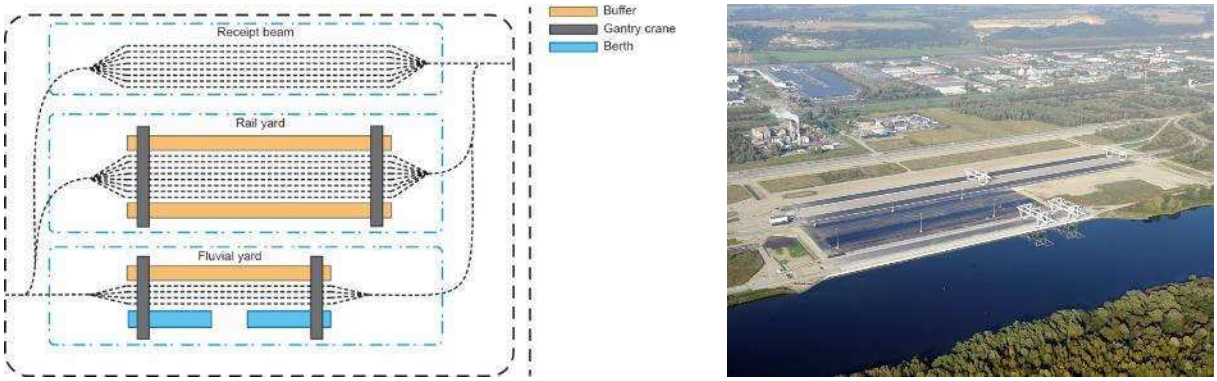


Figure I.19 L'ancien et l'actuel système logistique du port du Havre

Le TMM est composé de trois zones (Figure I.20) : un faisceau de réception, une cour ferroviaire et une cour fluviale. Tout d'abord, le faisceau de réception est une zone équipée de 8 voies ferrées entièrement électrifiées destinées à diverses utilisations : permettre aux trains de grandes lignes (TGL) de s'y rendre directement, redistribuer les navettes ferroviaires qui ne peuvent pas accéder directement à la cour ferroviaire ou à la cour fluviale (aucune voie n'est disponible) et trier les navettes, etc. La cour ferroviaire est une zone préparée pour servir les TGL et les navettes ferroviaires, elle contient 8 voies ferrées et deux portiques permettant la mise à terre de 1000 EVP. Enfin, la cour fluviale est le point de réception et d'expédition de conteneurs par barges. Elle est constituée de 4 voies ferrées pour recevoir les navettes ferroviaires, de deux postes d'amarrages pour les barges et de deux portiques de manutention enjambant un buffer d'une capacité de 700 EVP.



Description du TMM

Vue aérienne sur le TMM

Figure I.20 Le terminal multimodal (TMM)

L'objectif du TMM est de favoriser le transport massifié de conteneurs via les trains de grandes lignes (TGL) et les barges sur l'axe Seine (Benghalia et al. 2013). Cependant, il est confronté à deux problèmes. D'une part, le dimensionnement des navettes ferroviaires, d'autre part, l'optimisation de l'utilisation des ressources. Le premier problème consiste à trouver un compromis acceptable entre le nombre optimum de coupons que doit contenir une navette ferroviaire et le taux de remplissage minimum. Par exemple, avant de quitter le TMM, la navette ferroviaire doit atteindre un taux de remplissage fixé. Le second problème, concerne l'optimisation des déplacements des ressources et surtout la minimisation des déplacements improductifs et des allers-retours des navettes.

A l'arrivée au faisceau de réception, le TGL est dételé de sa locomotive de lignes, qui quitte aussitôt le TMM. Après, un locotracteur prend en charge les wagons et les transfère à la cour ferroviaire (Figure I.21). Une fois installé sur la voie ferrée, le locotracteur est dételé et retourne au faisceau de réception. Ensuite, les deux portiques ferroviaires commencent à décharger le TGL, en choisissant toujours le conteneur le plus proche. Le conteneur déchargé est déposé, soit sur sa navette ferroviaire de destination, soit dans le buffer (dans le cas où sa navette de destination n'est pas encore arrivée au TMM). Dès que l'opération de déchargement est terminée, les portiques ferroviaires rechargent le TGL depuis les navettes ou bien depuis le buffer par des conteneurs import. Après la fin du chargement, le TGL est amené au faisceau de réception, s'attèle à sa locomotive de ligne et quitte le TMM.

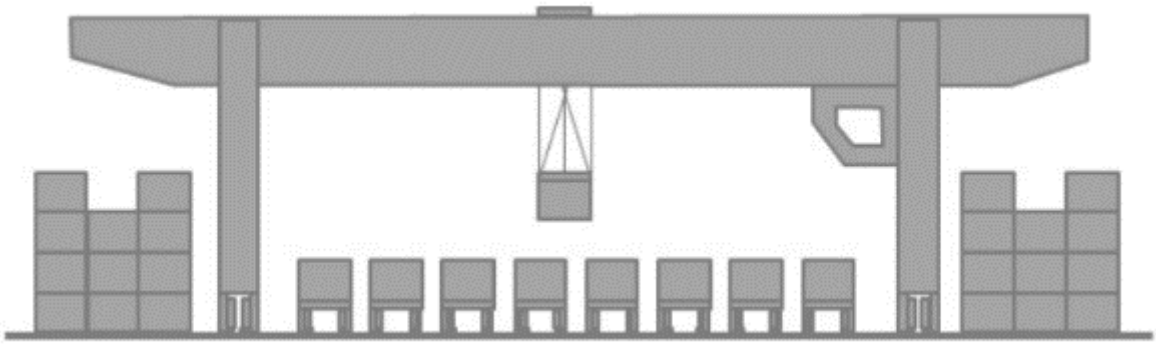


Figure I.21 La cour ferroviaire (source : (Oudani 2016))

La première étape du processus de réception et d'expédition par barges est la demande d'un poste d'amarrage et l'attente de l'autorisation pour s'amarrer (Figure I.22). Une fois l'autorisation d'accès au TMM accordée, la barge se rapproche et saisit le poste d'amarrage.

Pendant l'amarrage, le planificateur établit un plan d'opérations et l'envoie aux portiques. Ce plan d'opérations est soumis à quelques contraintes : la stabilité de la barge, le non-croisement des portiques, le conteneur le plus léger doit être en haut de la pile, un conteneur 40 EVP peut être déposé sur deux conteneurs 20 EVP, mais pas l'inverse, etc. Ensuite, le portique fluvial alloué à cette barge enchaîne séquentiellement l'exécution de deux opérations : le déchargement de conteneurs export et le chargement de conteneurs import. Au moment où la barge reçoit tous ses conteneurs import, elle quitte le TMM et libère le poste d'amarrage.

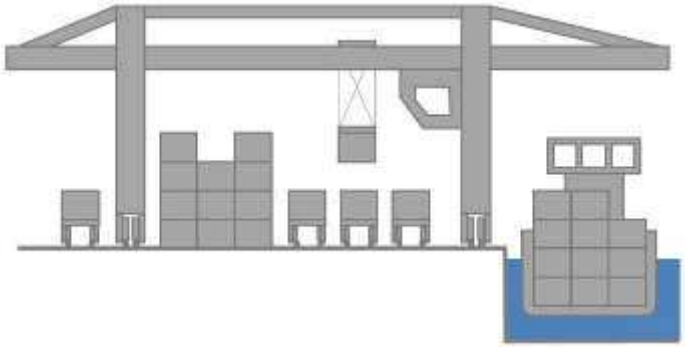


Figure I.22 La cour fluvial (source : (Oudani 2016))

Le transport intra-portuaire de conteneurs au port du Havre est assuré par des navettes ferroviaires, qui représentent un facteur-clé pour sa compétitivité. Plusieurs navettes sont déployées dans les divers terminaux du GPMH, en prenant en considération, le nombre de conteneurs à distribuer et à collecter depuis le TMM. La navette import collecte les conteneurs à l'intérieur des terminaux maritimes et les achemine vers le TMM, tandis que la navette export ramasse les conteneurs déchargés depuis les TGL et les barges à destination des navires.

2.6. Niveaux de planification et indicateurs de performance

2.6.1. Niveaux de planification

Les décisions liées à la gestion des différents sous-systèmes présentés préalablement sont réparties en plusieurs niveaux de planification distincts. Ces niveaux englobent l'ensemble des problèmes relatifs à la disposition physique du terminal (zones et équipements), à la gestion de ressources, à l'ordonnancement de tâches à exécuter et par quels équipements, aux stratégies de contrôle et de gestion et à la gestion des évènements susceptibles de perturber le fonctionnement des opérations. En outre, chaque niveau de planification est identifié par son dégrée de complexité et de détails, et par son horizon temporel (longévité d'une décision), par exemple, les décisions concernant le design du terminal s'étendent sur plusieurs années. Il est important de préciser que les niveaux de planification sont étroitement liés les uns aux autres, en effet, les choix pris au niveau supérieur influencent ceux du niveau au-dessus et vice-versa.

Günther et Kim (Günther and Kim 2006), ont distingué trois niveaux de planifications, tout d'abord, le niveau traitant les problèmes du design du terminal (zones et équipements), ensuite le niveau opérationnel, enfin les décisions en temps réel. Quant à Dubreuil (Dubreuil 2008), il a identifié quatre niveaux. Bien qu'il ait gardé le premier et le dernier niveaux proposés par Günther et Kim (Günther and Kim 2006), il a associé les décisions à moyen terme situées

dans le deuxième niveau de Günther et Kim (Günther and Kim 2006) a un autre niveau, le niveau tactique. Böse (Böse 2011) a proposé une autre classification en trois niveaux. Premièrement, le niveau supérieur contient les décisions de contrôle des opérations du terminal, qui sont eux aussi divisées en trois sous-niveaux : niveau planification à court terme, niveau planification à moyen terme et niveau planification à long terme. En niveau intermédiaire, les problèmes du choix des équipements et de l'aménagement des zones sont répertoriés. Le niveau inférieur inclut les problèmes du design (position géographique, largeur, longueur, le mur du quai) et des connexions externes du terminal, *i.e.,* liaisons aux modes de transport de conteneurs. Dans les travaux de (Schütt 2011), les décisions de planification sont scindées en quatre phases classées par le niveau de détails disponibles. En premier lieu, la phase de pré-planning où la quantité d'informations sur le terminal est très faible, consiste à déterminer le flux de conteneurs qui sera traité annuellement. En second lieu, la phase de la structuration physique du terminal selon le flux déterminé. En troisième lieu, la phase de l'aménagement des zones et des types d'équipement à déployer est caractérisée par un niveau de détails moyen. En dernier lieu, la phase de démarrage où les stratégies de fonctionnement du terminal sont élaborées (niveau de détails élevés). Dans cette sous-section, nous avons adopté la classification de Dubreuil (Dubreuil 2008) avec quelques modifications pour mieux clarifier les niveaux de planification du terminal à conteneurs.

Le niveau stratégique : regroupe les décisions à long terme qui portent sur l'organisation physique du terminal à conteneurs. Ces décisions presque irréversibles sont un compromis entre le budget de construction disponible et la qualité de service souhaitée. Capter des gros volumes de conteneurs nécessite des interfaces larges et des équipements de manutention qui assurent rapidement leurs opérations, en plus, éviter les files d'attentes, en particulier celles des navires, dépend du nombre des postes d'amarrages que comptent les quais du terminal. Tout retard de livraison de conteneurs aux navires prolonge leurs temps à quai, cela aura des répercussions graves sur la compétitivité du terminal (la compétitivité du terminal dépend des opérations portuaires). Le temps c'est de l'argent, ainsi le terminal doit se munir de ressources selon les investissements alloués, qu'elles lui permettront de réaliser des gains en respectant les délais de livraison des conteneurs, que ce soit aujourd'hui ou demain. Les décisions stratégiques sont :

- Localisation (emplacement géographique) : cette décision est directement liée au type de terminal à construire, soit c'est un terminal maritime soit c'est un terminal fluvial soit c'est un terminal terrestre. L'objectif est de trouver un emplacement qui minimisera les coûts de transport vers les marchés à desservir, par exemple, un terminal fluvial doit être implanté à l'embouchure d'une voie navigable à grand gabarit.

- Nombre de quais : déterminer le nombre de quais optimal permettant d'éviter ou de réduire les files d'attentes des navires. Plus le nombre de quais augmente, moins il y a de demandes de navire en attente, ainsi diminuer les temps de séjour des navires. Toutefois, cela entraîne une augmentation des coûts d'exploitation et du budget, et un taux d'utilisation faible (le terminal se doit d'exploiter au mieux ses ressources pour les rentabiliser). D'ailleurs, le choix du nombre de quais doit

prendre en considération les variations futures des volumes de conteneurs, de la capacité des navires et de leurs tailles.

- Nombre de grues de quais : un quai est caractérisé par le nombre de grues de quai qui y sont déployés. L'objectif est de déterminer le nombre de grues à poster tout au long de chaque quai de manière à limiter les risques d'interférence. Le choix du nombre est très important car les grues sont les équipements les plus dispendieux, alors comme dans le cas du point précédent, le nombre de grues de quai doit permettre au terminal de faire face aux variations futures. Le rendement des quais s'accroît en fonction du nombre de grues installées, mais cela peut avoir le fait inverse puisque le risque d'interférence entre les grues s'amplifie, en plus, étant donné que chaque grue est servie par une flotte de véhicules internes, la congestion des quais peut émerger fréquemment.

- Disposition de la zone de stockage/système de transport interne : il s'avère très difficile de traiter séparément ces deux décisions, vu qu'elles sont étroitement liées. Steenken et al. (Steenken et al. 2004), identifient trois facteurs qui régissent le choix d'équipement de transport/stockage et le design de la cour : l'espace, économique et historique. Le premier facteur est très crucial dans les régions où l'espace est restreint. Alors, une organisation en blocs enjambés par des ponts roulants permettra une meilleure utilisation de l'espace avec une forte densité de conteneurs. Opter pour l'automatisation des opérations de transport (AGV) et de stockage (A-RMG) est favorable pour les régions ayant une main-d'œuvre trop coûteuse. Le facteur historique est tenu en compte lors de la rénovation des terminaux. D'ailleurs, un quatrième facteur doit être ajouté : le facteur social. Dans certains pays les syndicats peuvent faire obstacles à l'automatisation des opérations, sous prétexte qu'automatiser réduit les offres d'emploi au sein des terminaux. L'objectif est de choisir les systèmes permettant d'aborder rapidement les flux de conteneurs reçus par les interfaces du terminal, particulièrement via le côté maritime, et d'éviter l'arrêt des grues « temps morts ». Ces deux points sont en quelques sortes contradictoires, c'est-à-dire, éviter l'arrêt des grues nécessite un grand nombre de véhicules ce qui peut ralentir la circulation des conteneurs (congestion).

- Connexions aux modes hinterland : ce point a été déjà discuté dans les sous-sections 1.2 et 2.1. En bref, le choix doit se porter sur les modes les plus avantageux à l'égard des intérêts économiques du terminal sans oublier l'aspect environnemental.

- Automatisation des opérations : l'automatisation est caractérisée par un degré : élevé, moyen, faible ou nul. Il existe des terminaux entièrement automatisés où tous les équipements sont autonomes et guidés par des systèmes de contrôle informatisés. D'autres terminaux n'ont qu'une partie qui est automatisée (dit terminaux semi-automatisés), dans la plupart de cas, la zone de stockage, et il y a les terminaux conventionnels. Comme il a été mentionné auparavant l'automatisation est adéquate aux régions ayant une main-d'œuvre chère. De plus,

pour rentabiliser les investissements en équipements automatisés, le terminal doit traiter un volume de conteneurs très important.

- Systèmes de contrôle : maintenant que l'infrastructure du terminal est connue, il reste à déterminer les systèmes de contrôle des opérations et les systèmes d'aide à la décision. Ces systèmes gèrent, ordonnent, planifient les opérations de manutention de conteneurs en se basant sur des politiques d'optimisations avancées et sur des stratégies de fonctionnement. D'ailleurs, ils sont soutenus par des appareils technologiques, tels que, les capteurs, GPS, les transmetteurs, etc. Le choix des systèmes de contrôle prend en considération les décisions concernant les types d'équipement et le degré d'automatisation.

- Gestion de risque : consiste à définir des précautions (méthode de gestion de risques) pour faire face à d'éventuels dangers ou aléas. Les risques sont une nuisance aux opérations du terminal, allant jusqu'à même interrompre certains de ses activités. Cette décision vise à assurer une bonne gouvernance des opérations du terminal. De plus, le risque ne touche pas seulement les activités portuaires mais aussi le personnel. Dans des ports, les autorités organisent des visites guidées sur le terrain pour les SAMU (service d'aide médicale urgente) et les sapeurs-pompiers.

Le niveau tactique : englobe les décisions à moyen terme (quelques journées ouvrables) qui concernent l'allocation des ressources précieuses du terminal (quai et grue de quais) et les stratégies de fonctionnement. L'objectif en commun des décisions c'est d'arriver à une aisance opérationnelle permettant d'éviter les délais d'attente et les retards (particulièrement en heures de pointe) qui sont des périodes sans génération de revenus pour les terminaux ni pour les transporteurs, en outre, d'assurer un équilibrage entre le niveau service souhaité et les dépenses du terminal. La planification tactique accorde une attention particulière aux processus de réception de navires, effectivement, les préparatifs commencent deux ou trois jours avant l'arrivée du navire. Le terminal doit répartir un nombre suffisant de grues sur le poste d'amarrage alloué au navire et d'engager suffisamment de véhicules internes pour assurer les transferts de conteneurs entre les quais et les piles, en plus d'arranger la zone de stockage selon les besoins du navire. Donc, dès son arrivée au quai, le terminal est prêt à le recevoir. La planification tactique est caractérisée par un niveau de détails moyen. Les décisions tactiques sont :

- Allocation de quais aux navires : réserver un espace au navire en prenant en considération sa taille et son tirant d'eau, mais aussi les notifications des navires arrivant prochainement. L'objectif est d'affecter les navires aux bons quais et au bon moment, *i.e.,* choisir un quai disponible qui peut recevoir le navire. De ce fait trois contraintes doivent être respectées : (1) un quai qui sera disponible à l'arrivée du navire pour éviter les interférences (interférence égale temps perdu) ; (2) un quai qui sera en mesure d'accueillir le navire, *i.e.,* qui a une longueur, un tirant d'eau et une distance de sécurité convenable, toutefois un petit navire amarré à un grand quai est inappropriée ; (3) un quai qui permet de minimiser les déplacements

des véhicules de transport. En d'autres termes, un quai est une ressource précieuse, le terminal doit la partager entre les navires de façon adéquate.

- Allocation de grues de quai aux navires : l'objectif de cette décision est de déployer un nombre de grues sur le poste d'amarrage alloué au navire, capable de décharger et charger les conteneurs dans les délais requis. D'ailleurs, le navire a plusieurs baies contenant un ensemble de piles de conteneurs, alors le planificateur doit déterminer une séquence d'opérations qui indique l'ordre dans lequel les baies seront opérées par les grues de façon à minimiser les interférences et le temps des opérations. Pour la création d'une séquence d'opérations le planificateur prend en compte : le plan de chargement du navire, le nombre de grues disponibles, la quantité de conteneurs à manutentionner et leurs emplacements au sein du terminal, le nombre de véhicules internes disponibles, les contraintes de non-croisement, les conteneurs qui seront manutentionnés dans les prochains terminaux, etc.

- Planification de chargement : consiste à développer un plan de chargement qui garantit une efficience opérationnelle du terminal et aux différents arrêts qui seront visités par le navire. Le plan de chargement doit satisfaire plusieurs contraintes à savoir : (1) minimisation des manutentions improductives (remaniements) ; (2) stabilité du navire, en effet les conteneurs les plus pesants doivent être en fond du navire et les plus légers en haut. Cela pour ne pas mettre le navire en situation de danger et éviter qu'un conteneur très lourd écrase ceux qui sont au-dessous. La stabilité du navire est une contrainte forte, alors les conteneurs de diverses destinations peuvent être mélangées en dépit des remaniements dans les prochains arrêts ; (3) , un conteneur 40 pieds peut être déposé sur deux conteneurs 20 pieds, mais non l'inverse ; (4) les conteneurs réfrigérés soient placés près d'une source d'énergie ; (5) les conteneurs de matières dangereuses sont restreints à certaines cales, en plus il faut respecter l'incompatibilité et la distance entre les produits dangereux. Ces trois derniers points sont largement abordés dans la littérature.

- Transport interne : dispatcher les véhicules de transport interne sur les différentes zones du terminal de manière à assurer une circulation fluide de conteneurs entre ses deux interfaces, en se basant sur le nombre de transports qui doit être réalisée. En plus, de réserver un nombre suffisant aux grues de quais en priorité. Il est entendu par suffisant que le nombre de véhicule déployé minimise la durée des opérations, tout en évitant les situations indésirables. En fait, c'est un équilibrage entre le seuil des dépenses et la rapidité des opérations de transport.

- Planification de stockage : concerne les stratégies qui définissent l'emplacement des conteneurs dans la zone de stockage. Plus les conteneurs sont loin de leurs modes de transport de sortie, plus le trajet parcouru par les véhicules est long. En conséquence, augmenter la durée des opérations et prolonger les séjours des modes de transports. D'ailleurs, une grande distance entre la pile et le navire entraîne la possibilité d'ajouter plus de véhicules, ce qui peut amplifier la

probabilité de congestion, en conséquence ralentir le mouvement de conteneurs. Un autre point important est la hauteur des piles. Mettre plusieurs conteneurs les uns sur les autres permet de réduire l'espace de stockage ainsi avoir une densité forte de conteneurs, en revanche la probabilité des remaniements sera grande (remaniements prolongent la durée d'extraction d'un conteneur). Les conteneurs peuvent être triés selon divers critères : import/export, compagnie maritime, date de livraison la plus proche, mode de transport de sortie, une combinaison de critères, etc. En général, le but des stratégies adoptées est de minimiser les déplacements des équipements de stockage et à accélérer les opérations de transport. Comme le plan de chargement, le stockage de conteneurs est assujetti à certaines contraintes à savoir : éviter les interférences/croisements des équipements de stockage (la disposition du terminal peut rendre cette contrainte obsolète), minimiser les remaniements, positionner le conteneur le plus léger en haut de la pile, un conteneur 40 pieds peut être déposé sur deux conteneurs 20 pieds mais non l'inverse, positionner les conteneurs réfrigérés près d'une source d'énergie, respecter l'incompatibilité et la distance entre les conteneurs de matières dangereuses (règles de ségrégation), etc.

Le niveau opérationnel : vise l'organisation des opérations de déchargement et chargement des navires d'une part, d'autre part la répartition et l'ordonnancement de tâches de transport et de stockage, selon l'ordre d'arrivée des modes de transport, en particulier les navires. Les tâches sont assignées aux équipements disponibles les plus proches. Par exemple, choisir les équipements situés près de la position où le conteneur est entreposé. Comme pour les autres niveaux, le but est de minimiser le temps de séjour de la clientèle au terminal tout en maximisant les bénéfices. La planification opérationnelle s'étend sur plusieurs quelques heures avec un niveau de détails élevées. Les décisions opérationnelles sont :

- Ordonnancement des opérations de déchargement et chargement des navires : déterminer l'ordre dans lequel les conteneurs seront manutentionnés (à décharger et charger). Puisque les navires peuvent être déchargés et chargés simultanément, trois contraintes doivent être respectées : (1) le déchargement précède le chargement ; (2) au déchargement le pont avant la cale ; (3) au chargement c'est l'inverse.

- Ordonnancement des opérations transport interne : affecter les ordres de transport de conteneurs aux véhicules. Il existe deux stratégies : l'affectation d'une flotte de véhicules à une grue ou la mise en commun des véhicules aux services de toutes les grues. La première stratégie concerne particulièrement les grues de quai mais elle peut causer un taux d'utilisation faible de véhicules, contrairement à la deuxième. En plus, la deuxième diminue les déplacements à vide (déplacement de véhicules sans chargement) mais elle est beaucoup plus complexe à planifier. La première stratégie est favorable pour les terminaux utilisant les AGV, tandis que la deuxième est adaptée aux autres systèmes de transport (Steenken et al. 2004). L'objectif de cette décision est de minimiser les mouvements à vide des véhicules.

Un mouvement à vide se produit quand un véhicule livre son conteneur mais il ne reçoit pas un autre en retour.

- Déploiement des équipements de manutention dans la cour : vise à optimiser les déplacements des équipements de stockage. Assigner à chaque équipement des tâches situées soit à proximité de lui soit dans des piles assez proches les uns aux autres de façon à limiter les allers retour, *i.e.,* minimiser le temps de mise en route. D'ailleurs, les remaniements à faire doivent être pris en considération lors du déploiement des équipements.

- Réception des modes de transport interne/allocation de ressources : préparer l'arrivée des modes transportant les conteneurs à l'intérieur du territoire : terrestre et fluvial. L'objectif de cette décision est de placer les modes sur une position qui permet d'accélérer les opérations.

- Planification de livraison de conteneurs : cette décision est similaire à la planification de chargement, à la différence qu'elle est à court terme. Effectivement, les modes massifiés ont une capacité très inférieure à celle du navire et les opérations de déchargement et chargement sont beaucoup moins complexes. C'est pourquoi, cette décision est au niveau opérationnel. Les conteneurs doivent être placés sur le train de grandes lignes en tenant compte de leurs destinations, en effet, pour faciliter les opérations de déchargement aux prochaines stations du train. En ce qui concerne la barge, mise à part les conteneurs réfrigérés vu qu'elle ne les transporte pas, elle est soumise aux autres contraintes des navires.

- Réception des navires : concerne les opérations d'accostage et d'amarrage.

Le niveau temps réel : les terminaux à conteneurs sont des systèmes hautement dynamiques susceptibles d'être perturbés par des évènements imprévus dont le comportement est difficilement prévisible, autrement dit, hautement stochastiques. Cela ne permet pas une planification préalablement détaillée des activités de transport et de manutention, par conséquent le contrôle en temps réel des activités logistiques est d'une importance capitale. Les décisions ou les problèmes à ce niveau doivent être résolus dans un laps de temps très court, en pratique généralement en quelques secondes. Les décisions en temps réel sont :

- Routage des véhicules de transport interne : assigner les tâches aux véhicules de transport de manière à minimiser leurs déplacements (distance parcouru et transport à vide).

- Entreposage de conteneurs : affecter une position aux conteneurs de telle sorte que les déplacements des équipements et les remaniements soient minimisés.

- Gestion des évènements imprévus : habituellement déclenché par des événements qui nécessitent un traitement immédiat. A titre d'exemple, recevoir un navire en situation de danger qui n'était pas censé faire escale au terminal. A cet effet, le terminal doit revoir ces stratégies tactiques et les adapter à cette situation.

2.6.2. Indicateurs de performance

Les indicateurs de performance sont des informations pertinentes qui mesurent le succès des activités critiques d'une organisation (Figure I.23). C'est un moyen d'évaluation et de comparaison objective des terminaux à conteneurs (Kemme 2013b). D'ailleurs, quelques travaux de recherche les utilisent pour prouver que leurs méthodes et modèles de simulation développés sont conformes à la réalité du système étudié. Des dizaines d'indicateurs classifiés en catégories sont proposés par des experts pour classer et évaluer la conception des terminaux à conteneurs et la performance de leurs opérations, à savoir, UNCTAD (*United Nations Conference on Trade and Development*) [1], Thomas et Monie (Thomas and Monie 2000), etc. Cette sous-section présente brièvement les indicateurs les plus utilisés en se basant sur les classifications de Esmer (Esmer 2008) et de Kemme (Kemme 2013b).

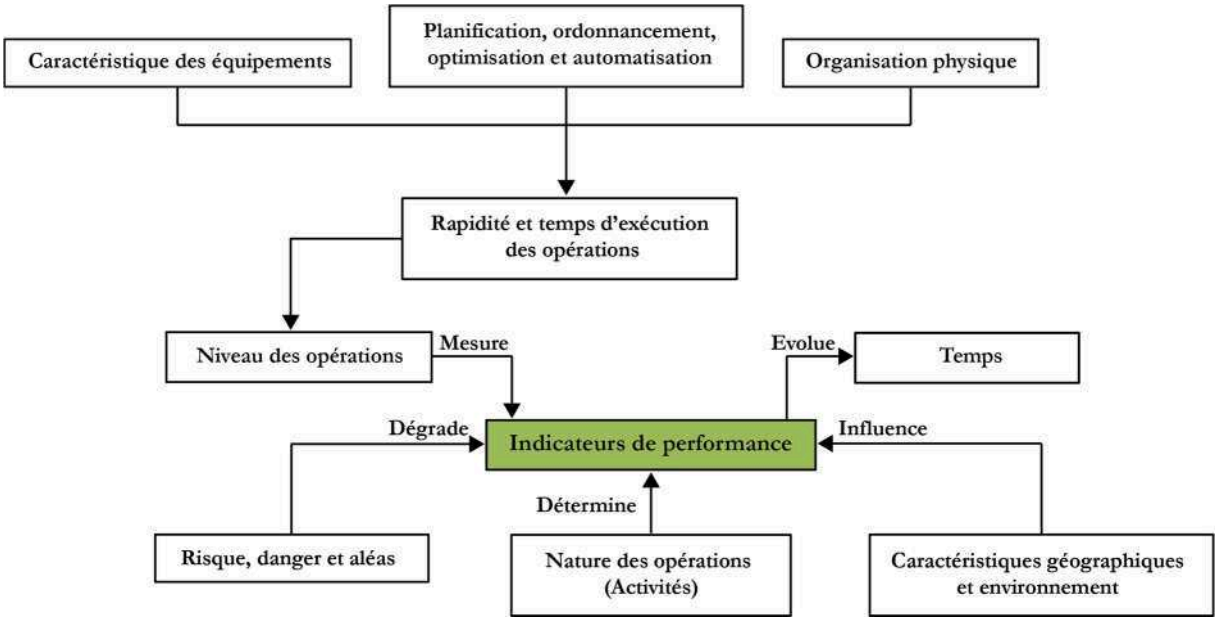


Figure I.23 Schéma des indicateurs de performance

Les indicateurs du design : donnent une idée sur la capacité du terminal et la qualité des équipements choisis. En effet, un terminal qui traite une très grande quantité de conteneurs (dizaines de millions d'EVP), reçoit des navires à forte capacité, a forcément des équipements à la pointe de la technologie. Ces indicateurs sont utilisés pour classer les terminaux (généralement les ports maritimes) au niveau mondial. Les indicateurs du design sont :

- Capacité de manutention des conteneurs (EVP/an) : c'est le nombre de conteneurs que le terminal peut traiter théoriquement par an. Il est estimé selon la capacité de l'interface maritime (dimensions des navires à revoir), la capacité de stockage, la capacité de l'interface hinterland et les caractéristiques des équipements choisis.

- Capacité de stockage (EVP) : c'est le nombre de conteneurs que la cour du terminal peut supporter. C'est le produit du nombre de rangées par le nombre de baies par la hauteur maximale des piles par le nombre de blocs.

Mesures de production : indiquent de diverses manières la quantité de conteneurs traversant le terminal par unité de temps. En plus, il permet aux intéressés de constater les

1. unctad.org/

efforts fournis pour acheminer les conteneurs de bout en bout (nombre de déplacements et nombre de mouvements). Ces indicateurs sont exprimés en mouvements de conteneur/unité de temps, par exemple, EVP/an.

- Débit maritime : le nombre de conteneurs chargés et déchargés sur les navires porte-conteneurs.
- Débit de transfert entre les quais et la cour : la quantité de conteneurs échangés entre la cour et les quais.
- Débit de la zone de stockage : la somme de mouvements qui a été réalisée à la zone de stockage (extraction/insertion de conteneurs).
- Débit hinterland : mesure le trafic de conteneurs entrant et sortant par un mode de transport interne.

Mesures de productivité : calculent la productivité des ressources et des équipements du terminal. C'est le nombre de conteneurs qui ont été manipulés par chaque équipement ou bien qui ont traversé via chaque ressource (quai, blocs, etc.) par unité de temps. Les mesures de productivité sont particulièrement importantes pour l'exploitant du terminal, car elles lui donnent une idée sur la rentabilité de ses investissements. Il existe des mesures de productivité de base que les exploitants doivent calculer, bien qu'ils puissent inclure d'autres. L'unité utilisée pour mesurer ces indicateurs est : nombre de conteneurs/équipement ou ressource/unité de temps. Les mesures de productivité sont :

- Productivité des quais par dimensions de navires (*ship productivity*) : c'est un rapport entre le nombre de navires qui a fait escale au terminal et le flux de conteneurs entrant et sortant (chargés et déchargés sur ces navires). Cette mesure permet aux exploitants de juger l'importance des investissements par rapport à la capacité des navires reçus.
- Productivité des quais : le nombre de conteneurs reçus par chaque poste d'amarrage par unité de temps.
- Productivité du terminal : exprime le rapport entre la production du terminal et ses zones opérationnelles.
- Productivité des équipements : mesure la productivité de chaque type d'équipement du terminal. Elle peut être exprimée par plusieurs indicateurs.
- Productivité du personnel : permet d'évaluer et de surveiller le travail de la main d'œuvres.

Mesures d'utilisation : c'est un rapport d'état sur l'activité des équipements et des ressources du terminal. Elle représente la durée de travail (le temps écoulé depuis le début des manutentions jusqu'à la fin) de chaque ressource, en particulier celle des équipements, de façon

à déceler facilement les points de faiblesse du système d'exploitation et des stratégies de fonctionnement. Les mesures d'utilisation sont :

- Utilisation des quais : reflète le taux d'occupation de chaque quai par rapport au temps total disponible (la durée de travail par journée ouvrable).
- Utilisation de la zone de stockage : c'est la quantité de conteneurs stockée à chaque bloc par rapport à sa capacité maximale.
- Utilisation de la guérite : le temps que prennent les opérations d'entrée/sortie des camions.
- Utilisation des équipements : contient trois mesures. (1) le taux d'activité est le rapport du temps durant lequel l'équipement a été occupé et le temps de service, (2) le taux d'inactivité (l'équipement a été en repos), (3) le taux d'attente représente le temps durant lequel l'équipement est en attente pour éviter un risque ou pour récupérer/livrer un conteneur.

Mesures de service : ce sont les indicateurs les plus significatifs aux yeux des compagnies maritimes, *i.e.*, la satisfaction du client est liée étroitement à ces indicateurs. Elles permettent d'exprimer explicitement la rapidité de services offerts aux modes de transport. Les mesures de service sont :

- Temps de séjour du navire : c'est la somme du temps d'attente, du temps d'opérations et du temps d'accostage/amarrage. Le temps d'attente doit être aussi proche que possible du zéro.
- Temps de séjour du train : c'est la somme du temps d'attente, du temps d'opérations, du temps d'attelage/dételage et du temps de triage de conteneurs.
- Temps de séjour de la barge : similaire à celui du navire.
- Temps de séjour du camion : la durée des opérations de chargement et déchargement, à cela s'ajoute le temps écoulé à la guérite.

Mesures de coût : permet aux dirigeants du terminal de garder l'œil sur les dépenses. L'importance de ces mesures réside dans l'équilibrage entre la qualité de service souhaitée et le seuil des dépenses prévu. Elles jouent le rôle d'une alarme.

- Coût par conteneur : coût demandé pour acheminer un conteneur à son mode de transport de sortie.
- Coût des équipements : coût d'exploitation des équipements : énergie, réparation et entretien.
- Coût du personnel/de la main d'œuvres.

Bien évidement il existe d'autres indicateurs de performance qui sont plus spécifiques à certains terminaux, à titre d'exemple, le taux de remplissage de navettes ferroviaires qui assurent le transport intra-portuaire de conteneurs (port du Havre).

3. Revue de littérature sur les travaux connexes

La littérature scientifique des terminaux à conteneurs regorge de travaux de synthèse qui situent le lecteur par rapport aux avancées académiques réalisées et illustrent l'évolution des terminaux au fil du temps. Pour avoir une vue plus détaillée sur le fonctionnement des terminaux à conteneurs, le lecteur est invité à se référer à (Meersmans and Dekker 2001), (Vis and De Koster 2003), (Steenken et al. 2004), (Günther and Kim 2005), (Kim and Günther 2006), (Günther and Kim 2006), (Henesey 2006), (Dubreuil 2008), (Stahlbock and Voß 2008a), (Brinkmann 2011), (Kemme 2013), (Alderton and Saieva 2013), (Burns 2014), (Najib 2014), (Benghalia 2015) et (Oudani 2016). Les problèmes de planification des opérations sont analysés minutieusement dans (Henesey 2006), (Dubreuil 2008) et (Böse 2011). Pour un aperçu sur les problèmes d'allocation des quais et d'ordonnancement des opérations sur les navires, voir (Ak 2008), (Theofanis et al. 2009), (Bierwirth and Meisel 2010), (Bierwirth and Meisel 2015) et (Carlo et al. 2015). Un aperçu de littérature sur les problèmes liés à la gestion des zones de stockage et le transport interne de conteneurs est donné dans (Kefi 2008), (Stahlbock and Voβ 2008b), (Kemme 2011), (Kemme 2013a), (Zhen et al. 2013), (Lehnfeld and Knust 2014), (Carlo et al. 2014a), (Carlo et al. 2014b), (Vis 2006), (Golden et al. 2008) et (Fazlollahtabar and Saidi-Mehrabad 2013). Un état de l'art concernant la gestion des trains et le transbordement rail-rail de conteneurs est présenté dans (Boysen et al. 2013), (Kellner et al. 2012) et (Oudani 2016). Quant à Mei (Mei 2005), Mei (Mei 2008), Cai et Huo (Cai and Huo 2009) et Angeloudis et Bell (Angeloudis and Bell 2011), ils ont passé en revue les travaux de simulation-modélisation des terminaux à conteneurs.

Dans cette thèse, nous nous focalisons sur la simulation des terminaux à conteneurs, la gestion des opérations de manutention, et la gestion d'interférence et l'ordonnancement des portiques de manutention. Les sous-sections suivantes présentent une revue de littérature sur ces points.

3.1. Modélisation et simulation des terminaux à conteneurs

La modélisation est une représentation concrète ou conceptuelle facilitant la compréhension et l'analyse d'un système caractérisé par son aspect complexe et dynamique. Diverses techniques de modélisation ont été utilisées pour passer d'une description informelle à une spécification formelle d'un système donné (modélisation orientée objet, modélisation à base d'agents, réseau de Pétri, les automates cellulaires, équations différentielles, etc.). D'un autre côté, la simulation du modèle conçu est une étape essentielle pour prouver sa capacité à refléter le comportement réel du système étudié et avoir une vision de jugement sur son fonctionnement. En effet, la simulation accorde aux utilisateurs la possibilité d'apercevoir la réaction du modèle développé à une action donnée et d'évaluer l'impact de l'action sur la performance du système étudié.

Yun et Choi (Yun and Choi 1999), ont développé une simulation orientée objet pour analyser la performance du terminal à conteneurs de Pusan, Korea. Bielli et al. (Bielli et al. 2006), ont élaboré un modèle orienté objet pour simuler l'ensemble des opérations de manutention du terminal à conteneurs de Casablanca. L'objectif de ce travail est d'offrir un outil d'aide à la décision pour tester différentes stratégies d'exploitation. Les auteurs testent aussi la capacité du modèle implémenté à reproduire le fonctionnement réel du terminal en question dans le but de valider le modèle et de le calibrer. Cartenì et Luca (Cartenì and Luca 2012), ont proposé différents modèles microscopiques de simulation à événements discrets pour un terminal à conteneurs. Ces modèles partagent la même architecture logique, mais ils se diffèrent par les approches suivies pour estimer la durée des activités de manutention. La validation a été effectuée en analysant les indicateurs locaux et globaux de chaque modèle. Enfin les auteurs ont comparé leurs modèles dans le but de mettre l'accent sur la meilleure approche à adopter pour simuler les activités de manutention et avec quel niveau de détails. Clausen et al. (Clausen et al. 2012), ont introduit un outil de simulation paramétrable qui permet d'un côté, la simulation du flux informationnel et physique d'un terminal à conteneurs, d'un autre côté, la planification des opérations de manutention. Dans l'article de Bruzzone et Longo (Bruzzone and Longo 2013), les auteurs ont exposé un ensemble de simulateurs avec environnement virtuel tridimensionnel utilisé comme outil de formation dans le terminal à conteneurs de Gioia Tauro, Italie. Dans les travaux de (Benghalia 2015), l'auteur a proposé une simulation via l'outil Flexsim pour comparer trois modes de transfert de conteneurs (optimisé, massifié et planifié) entre les terminaux maritimes du port du Havre et le terminal multimodal en vue de déterminer le mode le moins coûteux.

Henesey (Henesey 2006), a utilisé une simulation multi-agents pour évaluer le niveau de service d'un terminal à conteneurs et pour expérimenter de nouvelles stratégies d'exploitation. L'auteur a interviewé des experts pour s'assurer que son modèle de simulation est suffisamment détaillé, crédible et valide. Sun et al. (Sun et al. 2012), ont créé une plateforme multi-agents de simulation générale appelée MicroPort, qui vise à évaluer la capacité opérationnelle et l'efficacité des différentes conceptions des terminaux à conteneurs maritimes. La structure de MicroPort comprend trois couches : (1) la couche Fonctions contient des outils de base pour supporter les couches supérieures ; (2) la couche Applications est gérée par un système multi-agents qui représente le système d'opérations et assure les décisions tactiques et opérationnelles ; (3) la couche Extensions qui joue le rôle d'interface avec les utilisateurs. Egalement, Najib (Najib 2014), a conçu une plateforme de simulation du terminal TDF (Terminal de France) du port du Havre basée sur le paradigme agents (Najib et al. 2012). La conception du système a été pilotée par les cas d'utilisations pour le classifier en quatre sous-systèmes. De plus, le système est équipé par un mécanisme de ciblage de conteneurs à risques basé sur un système expert (Najib et al. 2013). Leriche et al. (Leriche et al. 2015), ont mené une étude prospective pour examiner l'intérêt du nouveau schéma logistique du port du Havre en développant un modèle de simulation à base d'agents. Garro et al. (Garro et al. 2015), ont étudié le problème de routage des chariots cavaliers dans un terminal à conteneur à travers une simulation à base d'agents, afin de déterminer une séquence de tâches qui optimise les

déplacements des chariots cavaliers pendant les opérations de manutention sur les navires porte-conteneurs.

Les réseaux de Petri sont aussi employés dans la modélisation des opérations des terminaux à conteneurs. Liu et Ioannou (Liu and Ioannou 2002), ont adapté les réseaux de Pétri pour analyser l'impact des AGV sur la performance d'un terminal automatisé. Dans le cas de Maione et Ottomanelli (Maione and Ottomanelli 2005), les réseaux de Petri ont servi pour décrire les séquences d'activités des sous-systèmes d'opérations sous format d'un cycle. Quant à Gudelj et al. (Gudelj et al. 2010), ils les ont utilisé pour représenter les opérations de chargement et déchargement de navires.

3.2. Gestion des opérations de manutention

Ottjes et al. (Ottjes et al. 2007), ont conçu un modèle à base de fonctions élémentaires (Transfer, Transport, Stacking) pour comparer trois formes d'organisation de transport de conteneurs inter-terminal au sein du terminal Maasvlakte du port de Rotterdam. Dubreuil (Dubreuil 2008), a présenté une étude en deux étapes. Dans la première étape, l'auteur décrit informellement l'acheminement du conteneur à travers la chaîne logistique ainsi que les différents acteurs impliqués. Dans la seconde étape, il analyse de façon formelle le déroulement des opérations de manutention d'un terminal à conteneurs en utilisant l'outil de simulation Arena. Yin et al. (Yin et al. 2011), ont introduit un système multi-agents distribué basé sur les algorithmes génétiques pour planifier et ordonnancer les opérations d'un terminal à conteneurs. Dans leur modèle, quatre agents négocient et coopèrent pour aboutir à un ordonnancement efficace des opérations de manutention et à un horaire d'allocation des ressources pour minimiser les files d'attente. Feng et al. (Feng et al. 2015), ont développé une approche basée sur des agents médiateurs pour planifier l'arrivée et le départ des barges ainsi que les opérations de manutention sur plusieurs terminaux à conteneurs. Les auteurs ont utilisé une étude de cas pour évaluer la performance de leur approche et pour prouver qu'elle permet une meilleure planification des opérations fluviales.

3.3. Ordonnancement des grues de manutention

Au niveau de la littérature, le problème d'ordonnancement de grues est largement abordé via des modèles mathématiques basés sur des contraintes de non-croisement (Ng 2005), (Zhu and Lim 2006), (Lim et al. 2007), (Lee et al. 2008), (Bierwirth and Meisel 2009) et (Lee and Chen 2010), néanmoins peu d'attention a été accordée aux portiques ferroviaires. Une revue de ces travaux est présentée dans (Bierwirth and Meisel 2010) et (Bierwirth and Meisel 2015). Par ailleurs, pour gérer et ordonnancer les portiques ferroviaires au niveau des zones d'opérations, deux problèmes doivent être considérés : le problème d'interférence et le problème de blocage des portiques. Dans (Boysen et al. 2010), les auteurs ont utilisé la programmation dynamique pour déterminer les zones sans risque d'interférence pour les portiques durant les opérations de manutention de conteneurs dans une cour ferroviaire, qui incluent un système d'échange de conteneurs entre les zones d'opérations de portiques pour éviter les situation de blocage.

Comme nous avons illustré dans la sous-section 3.1, la simulation est un outil très utilisé dans la littérature des terminaux à conteneurs. Cependant, les travaux abordant les problèmes d'interférence et de blocage des portiques en utilisant des modèles de simulation sont rares. Fotuhi et al. (Fotuhi et al. 2013) ont adopté une simple contrainte pour gérer les interférences de grues durant la simulation des opérations, en plus les situations d'attente qui pourraient se produire entre la tâche de récupération et la tâche de dépôt du conteneur ne sont pas évitées, ce qui peut être fait pour gagner du temps. Jusqu'à présent, Zhang et Hammad (Zhang and Hammad 2011) sont les seuls auteurs qui ont étudié minutieusement les problèmes d'interférence et de blocage avec un modèle de simulation, mais pour les grues opérant dans les chantiers de construction.

4. Apport et conclusion

Dans ce document nous proposons un modèle orienté distribution de charge de planification sur trois agents qui orchestrent le déroulement de la simulation du terminal multimodal du port du Havre (Chapitre III). Cette distribution est motivée par la pluralité des opérations à gérer et par l'ensemble des décisions à prendre. De plus, notre modèle est divisé en deux sous-systèmes en se basant sur les relations des agents et leurs rôles en vue de mettre en œuvre un modèle de simulation modulaire et flexible.

En ce qui concerne le problème d'interférence, la majorité des travaux proposent seulement des modèles mathématiques déterministes avec des paramètres fixes (vitesse des équipements, durée des opérations, fréquence d'arrivée des modes de transport, etc.). Mais, il est très rare que ces valeurs soient connues avec certitude, alors un modèle de simulation stochastique doit être utilisé. De plus, sans variations de valeurs des paramètres, un seul scénario est évalué même si le modèle est exécuté plusieurs fois (réplications). En outre, quand l'objet d'étude a un comportement non-linéaire soumis à plusieurs contraintes et avec des paramètres incertains, la définition du modèle mathématique lui-même devient une tâche difficile (Borshchev 2013). La simulation à base d'agents est une approche alternative pour surmonter les limites des modèles mathématiques (Cartenì and Luca 2012). D'ailleurs, selon Henesey (Henesey 2006), les systèmes multi-agents sont une approche prometteuse pour simuler et appréhender la complexité des terminaux à conteneurs. De ce fait, nous avons utilisé le couplage Optimisation-Simulation à base d'agents pour étudier l'aspect stochastique du problème d'ordonnancement des portiques fluviaux. De plus, vu le manque des travaux qui utilisent les systèmes multi-agents pour résoudre les problèmes d'interférence et de blocage des portiques, nous avons développé deux stratégies de non-croisement basée sur la coopération-collaboration entre agents. Le but de ces stratégies est de diminuer au maximum les délais d'attente et d'améliorer la productivité des portiques.

Avant d'aborder les solutions proposées, il est important de bien comprendre et de saisir l'intérêt de la modélisation et de la simulation à base d'agents dans la résolution de problèmes. Le chapitre suivant va fournir un état de l'art sur la modélisation/simulation des systèmes et sur les systèmes multi-agents.

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description détaillée des terminaux à conteneurs et nous avons montré leur importance et le soutien stratégique qu'ils portent aux autres intervenants de la chaîne logistique. En conclusion, les terminaux à conteneurs sont des systèmes très dynamiques caractérisés par une forte dépendance entre les différents sous-systèmes d'opérations. Ces sous-systèmes doivent être gérés de manière à éviter les goulots d'étranglement et ainsi assurer un acheminement fluide du flux de conteneurs.

Chapitre II

Concepts de base, outils et méthodes de conception

Sommaire

1. Modélisation 58
1.1. Introduction 58
1.2. Définitions 60
1.2.1. Système complexe 60
1.2.2. Modèle 61
1.2.3. Paradigme 62
1.2.4. Langage de modélisation 63
1.2.5. Niveau d'abstraction 63
1.3. Construction d'un modèle 64
1.4. Types de modèles et outils de conception 65
1.4.1. Modèles mathématiques 65
1.4.2. Modèles orientés objet et la modélisation des processus métiers 65
1.4.3. Modèles à base d'agents 67
1.4.4. Modèles à base d'automate 68
1.4.5. Modèles de simulation 68
2. Simulation 69
2.1. Introduction 69
2.2. Objectifs et avantages 70
2.3. L'approche optimisation-simulation 71
2.4. De l'abstraction à la concrétisation : l'implémentation 73
2.4.1. Approches de simulation 74
2.4.2. Simulateur 75
2.5. Vérification, validation et calibrage du modèle de simulation 77
2.5.1. Vérification 78
2.5.2. Validation 79
3. Système multi-agents 79
3.1. Introduction 79
3.2. Définitions et types 80
3.3. Spécification et organisation 82
3.4. Interactions 84
3.5. Système multi-agents et les terminaux à conteneurs : intérêts et analogies 85
4. Apport et conclusion 87

La modélisation est un acte indispensable à la vie quotidienne à travers lequel s'exprime une vision des faits de façon plutôt formelle. Elle est considérée avant tout comme un art axé sur l'expertise où la créativité joue un rôle significatif (Truong-Meyer 2009). En effet, il ne suffit pas de passer des heures à compulser chaque ouvrage ou publication fourni sur le sujet pour s'approprier l'essentiel du savoir afin de mettre au point un modèle. Mais il est nécessaire de laisser parler son imagination tout en s'inspirant de son expérience dans la matière, *i.e.*, un processus d'apprentissage. Un modèle est souvent un mélange de connaissances (concrètes ou abstraites) et d'hypothèses qui se manifestent généralement sous forme de relations mathématiques (équations, formules, contraintes, …) ou logiques (règles, organigrammes, …) en vue d'étudier selon le niveau de détail approprié les causes et les conséquences d'un phénomène, le comportement d'un système et la faisabilité des solutions apportées aux divers problèmes à résoudre. L'objet d'étude peut être : soit c'est une entité ou fait qui évolue dans le monde réel, soit c'est un système en phase de construction, soit ce n'est encore qu'un projet sur papier, soit ce n'est qu'un phénomène observé.

Par ailleurs, appuyer les hypothèses et les solutions qui constituent un modèle passe, soit par des expérimentations réelles (concrétiser réellement le modèle), soit par des simulations (expérimentations virtuelles). La plupart des systèmes réels étudiés sont trop complexes pour permettre aux intéressés de tester leurs hypothèses et solutions (Sterman 2000), en plus, leurs composants sont hautement liés entre eux. Alors, il est difficile de constater et d'étudier de manière isolée le comportement de chaque composant vis-à-vis des solutions conçues. Toutefois, même s'il est possible de réaliser ces expérimentations, les coûts et le temps sont considérablement élevés. C'est pourquoi dans le domaine scientifique et industriel, la simulation est largement employée pour étudier approximativement l'impact d'une action donnée (nouvelle stratégie, règles, …) sur la performance du système en entier ou seulement sur une partie. En fait, la simulation de modèles n'est rien d'autre qu'une expérience à bas prix réalisée à l'aide d'ordinateurs qui sont de plus en plus rapide et puissant en calcul. D'un autre côté, le choix de l'approche et du niveau de détail est crucial pour le développement d'un modèle de simulation. Ce choix prend en considération la nature du système à simuler et l'objectif de conception (le but à atteindre). Par exemple, une approche avec un niveau d'abstraction élevé est plus convenable pour étudier l'aspect stratégique d'un système. La phase finale de chaque projet de modélisation consiste à tester et réviser le modèle, soit par des experts, soit à l'aide de méthodes fiables. Cette dernière phase est très importante car elle permet de prouver que le modèle est digne de confiance.

Ce chapitre essaye d'apporter un éclairage sur la modélisation et la simulation des systèmes complexes. Le reste de ce chapitre est organisé comme suit. La première section commence par une mise en évidence de certaines notions relatives à la terminologie de la modélisation, ensuite elle présente brièvement comment construire un modèle, enfin, elle expose quelque types de modèles et présente les méthodes et les approches de modélisation utilisées dans diverses disciplines scientifiques. Quant à la deuxième section, elle débute par une introduction à la simulation, ensuite elle se focalise sur les techniques de simulation existantes dans la littérature et sur les outils d'implémentation, de vérification, de validation et

de calibrage de modèles. La troisième section, introduit l'objet de cette thèse les systèmes multi-agents et explique l'engouement pour ce type d'approche. La dernière section situe les travaux réalisés par rapport à la littérature et met fin au chapitre.

Pour plus de détails sur la simulation et la modélisation, le lecteur peut se référer à (Law 1991) (Drogoul 1993), (Wooldridge and Jennings 1995), (Ferber and Perrot 1995), (Adam 2000), (Sterman 2000) (Hunt 2003), (Kroll and Kruchten 2003), (Kruchten 2004), (Cervenka and Trencansky 2004), (Calvez 2007) (Gaud 2007), (Treuil et al. 2008), (Wooldridge 2009), (Singh 2009), (Morvan 2009), (Siebert 2011), (Borshchev 2013), (Sayama 2015) et (Foures 2015).

1. Modélisation

1.1. Introduction

La modélisation (Figure II.1) est une activité de longue date utilisée par une grande communauté scientifique pluridisciplinaire pour construire des modèles physiques ou abstraits. En effet, c'est l'une des deux principaux piliers de la démarche scientifique. En conséquence, plusieurs pratiques et approches de modélisation se sont développées au fil des années. Ces pratiques et approches se différent en vocabulaire de base (agents, objets, automates, …) et en caractéristiques (niveau d'abstraction, degré de complexité, …) mais elles ont plusieurs points en commun, à savoir, elles facilitent l'étude et la compréhension des comportements complexes d'un côté, de l'autre côté, elle relient diverses disciplines scientifiques entre elles, *i.e.,* la modélisation met en place un dispositif interdisciplinaire de dialogue qui facilite les échanges entre scientifiques pour atteindre un objectif en commun, puisque les intentions et les pensées de chacun d'eux sont expliquées de manière compréhensible.

La dynamique des comportements complexes est le produit des interactions entre plusieurs entités de nature variée évoluant dans un niveau plus bas (Treuil et al. 2008). Déceler le rôle de chaque entité pour mieux comprendre le fonctionnement du système, en plus de capturer les phénomènes résultants des actions produites par ces entités met le modélisateur face à un défi audacieux. Surtout, si un taux d'abstraction règne sur certaines activités clés de l'organisme considéré. D'ailleurs, la plupart des systèmes comptent pas mal de niveaux d'organisation construits autour de multiples processus hétérogènes. Par exemple, une entreprise est organisée en hiérarchie (direction, administration, chef de projet, équipe de développement, ouvrier, *i.e.*, niveaux d'organisation), où chaque regroupement se dévoue à des tâches spécifiques centrées sur un des métiers de l'entreprise (processus hétérogènes). De ce fait, étudier le système comme un tout cohérent ou analyser juste un de ses processus en prenant en compte le haut degré d'imbrication entre les différents niveaux liés par un flux activités, d'informations et d'interactions entre acteurs est un pari perdu d'avance sans une démarche de raisonnement scientifique. Autrement dit, la modélisation n'est pas une tâche aisée, et arriver aux résultats souhaitables exige une feuille de route. Dans cette optique, le modélisateur doit définir sa propre feuille de route, appelée aussi « méthodologie », pour aller d'abord à une description informelle et ensuite converger vers une spécification formelle du système. Une

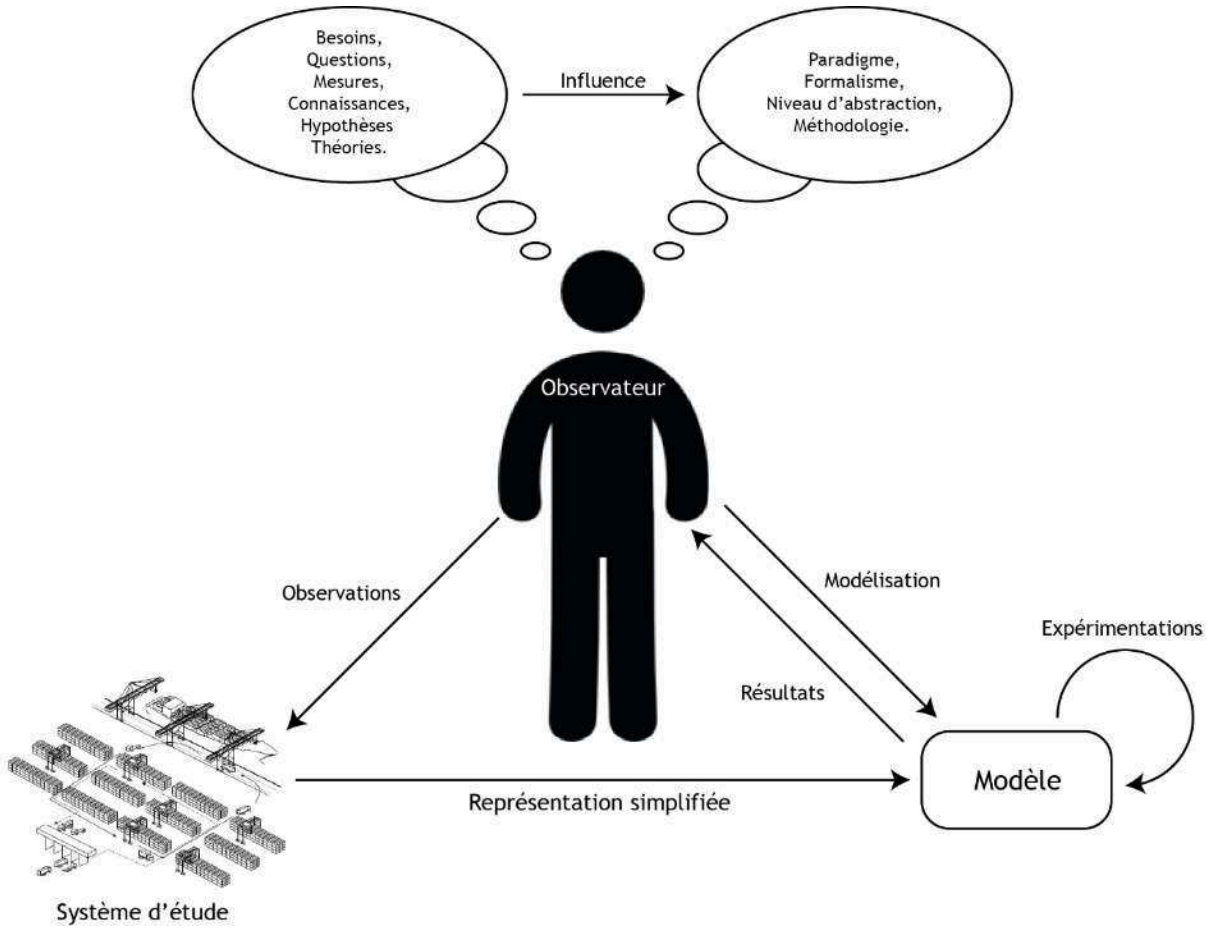


Figure II.1. Modélisation (source : (Siebert 2011))

méthodologie est un enchaînement d'étapes de développement qui commence par une description des processus métiers, de l'interdépendance entre les acteurs et de l'organisation du système étudié, et qui se termine par une représentation claire et logique sous forme de modèles mathématiques ou graphique (ou une combinaison) de l'ensemble du système. Cependant, adopter une méthodologie n'implique pas forcément qu'on peut parcourir rapidement les phases de développement d'un modèle. Parfois, le modélisateur ne dispose que d'une vision relative (incomplète) sur le système étudié sous prétexte du secret professionnel, industriel, … (confidentialité pour éviter la compétitivité) ou bien pour des raisons de sécurité. Ce manque de connaissances joue en défaveur du modélisateur et l'oblige à recourir à l'abstraction pour mettre en œuvre un modèle cohérent (moins il y a de détails, plus le niveau d'abstersion sera élevé). Dans d'autres situations, la complexité du système ne permet pas au modèle de reproduire tout mais juste certains aspects (exemple : le cerveau humain).

Par ailleurs, scientifique comme ingénieur (modélisateurs), passent énormément de temps, des jours voire des mois, devant des outils de conception de modèles abstraits, physiques, etc. Alors, des modules (des morceaux de modèles prêtent à l'emploi) issus de longues années de recherches, de retours d'expérience et d'une concrétisation des connaissances des experts, sont intégrées à l'environnement de modélisation de quelques outils existant sur le marché. Ces modules sont souvent taillés selon des besoins ou des fonctionnalités génériques nécessaires au développement du modèle, mais elles peuvent aussi répondre à des besoins plus spécifiques. De ce fait, le modélisateur n'a qu'à connecter des modules en ajoutant

les parties restantes pour construire son modèle. D'ailleurs, d'autres outils de modélisation automatisent la production de modèles, c'est-à-dire, le modélisateur supervise juste le passage d'une étape de modélisation à l'autre et laisse l'outil s'occuper du processus de conception (le modélisateur n'intervient qu'en cas d'échec). D'autre part, l'implémentation ou la concrétisation du modèle est vue aussi comme une tâche laborieuse. Pour réduire le temps que prend cette tâche, les avancées techniques et technologiques d'aujourd'hui proposent des mécanismes de génération de code à partir du modèle et des appareils d'impression tridimensionnelle pour concrétiser réellement un modèle physique (les imprimantes 3D).

Epstein (Epstein 2008) a résumé les objectifs de la modélisation d'un système en seize points (ces points ne sont pas triés) : (1) aide la communauté scientifique à comprendre l'évolution des systèmes, (2) guide la collecte de données, (3) met en avant le cœur du système, (4) suggère des analogies, (5) déniche des nouvelles questions, (6) encourage le raisonnement scientifique, (7) limite le champ de recherche de solutions, (8) identifie les incertitudes de base, (9) guide la conception des solutions pertinentes aux problèmes posés en temps réel, (10) démontre les compromis du système, (11) teste la robustesse des solutions vis-à-vis des perturbations, (12) expose l'incompatibilité entre connaissances et données disponibles, (13) aide à développer l'expertise et le savoir-faire, (14) met en place un dispositif de dialogue, (15) sensibilise le grand public, (16) révèle la nature réelle du système, *i.e.,* un système peut apparaître à première vue simple (respectivement, complexe) mais en réalité il est complexe (respectivement, simple).

1.2. Définitions

Il convient tout d'abord avant d'aller plus loin dans ce chapitre d'expliquer les notions de base mentionnées toute au long de ce manuscrit, qui appartiennent à la terminologie de la modélisation. Quelques notions ont été déjà abordées dans les sections précédentes mais de manière abrégée (système, modèle, …), cette sous-section détaille chaque notion.

1.2.1. Système complexe

Étymologiquement, le mot « complexe » trouve son origine dans le mot latin « cum plexus » qui signifie « tissé ensemble ; que l'on ne peut dissocier sans détruire ». Un système complexe fait référence à un ensemble d'éléments, d'individus et/ou d'organisations ayant des comportements dynamiquement non-linéaires, où on ne peut étudier une partie sans une considération aux autres. Pour éclaircir cette notion, il faut d'abord assimiler la signification du mot *« système »,* c'est quoi un système ?

« *A system is defined to be a collection of entities, e.g., people or machines that act and interact together toward the accomplishment of some logical end* », c'est de cette manière que Schmidt et Taylor (Schmidt and Taylor 1970), sculptent leur vision du système. Ce qu'on doit retenir de cette définition, c'est qu'un système désigne une collection d'éléments en interaction qui forment l'objet d'étude ou d'intérêt, et qui coexistent dans un environnement réel ou virtuel. La perception à l'égard d'un système est bornée par les objectifs de l'étude (les aspects du

système qu'on veut étudier) et par le niveau d'abstraction (le niveau de détail à prendre en compte). Dans la littérature, les systèmes sont deux types : discret ou continu. Un système discret change d'état selon des évènements espacés dans le temps. A contrario, un système continu est caractérisé par un état qui varie continuellement dans le temps. En réalité, peu de systèmes sont entièrement discrets ou entièrement continus, alors les systèmes sont généralement classés selon le type de changement d'état qui prédomine Law (Law 1991), par exemple, une banque est un système discret, une ville est un système continu. L'état d'un système est défini par les propriétés qui le caractérisent à un moment donné, par exemple pour une banque : le nombre de clients à la banque, la disponibilité des guichetiers, taille de la file d'attente, etc.

Pourquoi qualifie-t-on un système de complexe ? Lorsqu'un système comporte des composants caractérisés par un haut degré d'imbrication, d'autonomie et d'interaction, et de comportements stochastiques difficilement prévisibles, avec des processus hétérogènes, on le désigne comme complexe. Aussi, un système est dit complexe si son évolution dans le temps n'est pas prédictible directement par calcul autrement que par l'expérience ou la simulation. Quant aux mathématiques, la complexité d'un système se traduit par l'impossibilité de modéliser le système par des équations prédictives solvables ("Système complexe", Wikipédia 2017). Un bon nombre de systèmes complexes donnent lieu à de multiples phénomènes émergeants issus des rétroactions des composants du système. Dans la littérature relative aux systèmes complexes, le terme « émergence » est ambigu sans définition universelle, voir (Morvan 2009, p. 5).

1.2.2. Modèle

Un modèle est une représentation simplifiée d'un phénomène observé, crée par un observateur. Il existe plusieurs définitions d'un modèle dans la littérature scientifique, mais celle de Marvin L. Minsky (Minsky 1968) est citée dans de nombreux travaux : « *To an observer B, an object A∗ is a model of an object A to the extent that B can use A∗ to anwer questions that interest him about A* ». D'après cette définition, un modèle n'est qu'une construction abstraite qui permet à l'observateur de répondre à certaines questions à propos du système observé, appelé aussi système de référence (Treuil et al. 2008), d'autre part, de manipuler facilement certains de ses éléments. La représentation simplifiée est fondée sur des mesures, des connaissances, des hypothèses et/ou des théories et il est généralement exprimé en respectant les spécifications d'un langage de modélisation. Morvan (Morvan 2009), résume l'utilité d'un modèle en trois mots : description, explication et prédiction.

La vision de l'observateur est circonscrite par un niveau d'abstraction qui désigne l'échelle spatio-temporelle qui sera adopté pour élaborer le modèle du système de référence (Siebert 2011), en plus, le modèle est généralement associé à une partie de la réalité de ce dernier (un système peut avoir plusieurs modèles, où chacun d'eux reproduit certains aspects). Ensuite, cette partie de la réalité (représentation simplifiée) est formulée dans un langage ou un cadre de modélisation dont le choix dépend de deux critères selon Treuil et al. (Treuil et al.

2008) : la discipline scientifique considérée (informatique, mathématique, ..) et l'objectif derrière le modèle. Enfin, l'expérimentation du modèle (représentation simplifiée) est guidée par l'ambition d'obtenir des réponses aux questions posées lors de l'observation, par exemple, le nombre optimal d'ATM que la banque doit installer pour réduire les files d'attente des clients ?

La construction d'un modèle est soumise à des règles de modélisation définies par un modèle générique, appelé « méta-modèle ». Un méta-modèle décrit la structure (les concepts ainsi que leurs relations) qu'un modèle écrit selon un formalisme (un langage ou une méthode de modélisation) doit respecter. Un modèle dit valide si et seulement s'il respecte la syntaxe du méta-modèle (d'un groupe de méta-modèles), *i.e.,* les concepts et leurs propriétés ainsi que la nature des relations existant entre eux. D'ailleurs, la définition d'un modèle repose sur un ou plusieurs méta-modèles, par exemple, chaque composant du modèle suit un méta-modèle particulier. En bref, un méta-modèle est un modèle de modèles (Miller and Mukerji 2003). Cette notion est apparue avec UML en génie logiciel, aujourd'hui elle est adoptée dans d'autres domaines : l'intelligence artificielle, la programmation objet, etc., pour définir les concepts : classe, objet, attributs, relations, …. Pour éviter une régression infinie (ex : méta-méta-modèle, méta-méta-méta-modèle, …), le (méta-) méta-modèle se décrit lui-même, il est donc méta-réflexif.

Dans la littérature les modèles sont classifiés en deux catégories : modèle statique et modèle dynamique. Un modèle statique fait référence aux modèles qui n'évoluent pas dans le temps, *i.e.,* c'est juste une représentation du système de référence à un instant donné, à titre d'exemple, une carte routière, maquette, image, etc. Tandis que, dans le modèle dynamique la dimension temporelle est intégrée pour prédire ou apercevoir l'évolution du système de référence selon certaines actions ou conditions. Par ailleurs, les modèles dynamiques, on parle ici des modèles abstrait, sont traduits en langage machine soit à l'aide d'un langage de programmation soit à l'aide d'un outil de simulation. En général, la façon par laquelle le modèle sera implémenté est étroitement liée à la nature des résultats désirés par l'observateur/modélisateur : résultats visuel et/ou numérique. Le modèle dynamique peut être déterministe ou stochastique. Dans le premier cas, le modèle contient seulement des variables avec des valeurs fixes. Inversement, dans le deuxième cas, le modèle est basé sur des variables aléatoires et sur des lois de probabilité. Cette classe de modèles, non seulement elle représente au mieux le fonctionnement du système réel, puisque aucun système n'a un comportement déterministe, mais aussi elle donne naissance à des résultats avec de multiples valeurs. Quant à la première classe (modèle déterministe), elle est souvent conçue pour tirer des conclusions naïves sur le comportement du système réel.

1.2.3. Paradigme

Le paradigme est la nature de concepts qui formalisent le modèle et la logique qui dirige la vision du modélisateur (Siebert 2011). D'après Kuhn (Kuhn 1970), le paradigme est une tradition scientifique, particulière et cohérente, qui est née suite à des années de pratiques

scientifiques largement acceptées. Les paradigmes changent en fonction des connaissances et de l'émergence de nouvelles bonnes pratiques. Il existe un nombre important de paradigmes de modélisation, notamment, le paradigme systémique où chaque entité est vue comme un système, le paradigme objet dans lequel le système est modélisé par des objets, des classes, relations, etc., le paradigme agent qui stipule que toute entité autonome est un agent en interaction au sein d'un environnement, ou encore les réseaux de Pétri. En programmation informatique, le paradigme est l'essence d'un langage de programmation, à titre d'exemple, en programmation orientée objet (POO), le programme est une collection d'instances de classes, appelé aussi objets, C++, Java, etc. Aujourd'hui, on parle de la programmation orientée agent (POA), mais elle est encore au berceau.

1.2.4. Langage de modélisation

Afin de dresser un modèle respectant les règles syntaxiques imposées par un ou plusieurs méta-modèles, il est nécessaire d'utiliser un langage de modélisation, appelé aussi formalisme (un formalisme peut être un langage ou une méthode de modélisation). Un langage de modélisation regroupe les concepts, leurs relations et les méta-modèles qui régissent l'utilisation d'un paradigme, par exemple, UML pour la modélisation orientée objet. Ce type de formalisme est un pont qui relie le modèle à la génération automatique de son code. Un langage de modélisation peut être graphique ou textuel (voir aussi la sous-section 1.4).

- Langage graphique : un ensemble de diagrammes qui peuvent être interconnectés. Chaque diagramme est associé à un nom et comporte des symboles qui représentent les concepts, des associations ou liaisons qui représentent les relations, et des annotations pour exprimer les contraintes, les multiplicités d'une liaison, les rôles, …

- Langage textuel : un formalisme standardisé qui utilise typiquement des mots-clés, des annotations et des expressions accompagnés de paramètres pour faciliter l'interprétation de la signification des composants du modèle par les ordinateurs et les êtres humains.

1.2.5. Niveau d'abstraction

Le niveau d'abstraction est déterminé selon le degré de complexité à prendre en compte, la disponibilité des informations sur le système et les résultats attendus. Le premier point désigne le niveau de compréhension sur lequel le modèle est fondé. Certains aspects de l'objet de l'étude peuvent être négligés pour réduire le temps de calcul (simplification) et/ou parce que l'impact de ces aspects est trop faible (alléger le modèle). Par exemple, on néglige le fortement des roues sur la route ainsi que la résistance de l'air pour calculer la vitesse finale d'une voiture au bas d'une pente. Ou bien, car il est trop difficile voire même impossible de comprendre comment exactement fonctionne un système (ex : cerveau humain). Par ailleurs, il est souvent difficile d'avoir des données exhaustives sur certains processus clés du système, alors le modélisateur estime ces données à partir de l'observation. Morvan (Morvan 2009), distingue trois niveaux de connaissance selon l'échelle d'observation : micro-connaissances relative au

niveau microscopique du système où les informations sont exhaustives, macro-connaissances lié au niveau macroscopique où les données sont lacunaires, et méso-connaissances est l'intermédiaire entre le microscopique et le macroscopique. Enfin, le troisième point concerne les métadonnées que le modélisateur veut obtenir comme sortie (date de début et de fin, temps d'activité et d'inactivité, temps d'attente, coût et durée des opérations, résultats visuel, …) et la précision des résultats, *i.e.*, plus on monte en niveau d'abstraction, plus la précision diminue.

En fait, ces trois points sont en causalité réciproque, ignorer certains aspects du système influence la précision des données de sortie du modèle, de même, avoir des résultats approximatifs est dû à un manque de connaissances détaillées du domaine étudié, en sus, des données vagues sur une partie du système oblige le modélisateur à la considérer comme une seule unité solide même si elle est constituée d'un ensemble d'éléments en interrelations. En bref, un modèle macroscopique offre une vision générale sur l'objet d'étude, alors qu'un modèle microscopique permet d'apercevoir la dynamique de chaque composant.

1.3. Construction d'un modèle

La construction d'un modèle stable et robuste est une suite d'étapes qui commence par la définition des besoins et des objectifs, et se termine par la concrétisation et l'exploitation du modèle. Ce processus est itératif, car lors de l'implémentation du modèle, on peut remarquer que certaines mesures, connaissances, hypothèses et/ou théories retenues dans la première étape sont erronées. Alors, ce processus est répété jusqu'à l'obtention d'un modèle satisfaisant (Morvan 2009). La construction d'un modèle suit généralement une méthodologie ou une méthode de développement qui aide le modélisateur à répondre aux questions basiques connues sous l'acronyme « QQOQCCP » (ces questions ne sont pas triées par ordre) :

- Quoi ? : définir les questions, les problèmes, les besoins, les objectifs, les connaissances, … de l'étude.
- Qui ? : définir les acteurs, les entités, les responsables, … de l'acte.
- Quand ? : définir les durées, les dates, le temps, … des faits.
- Où ? : définir les lieux, les emplacements, les endroits, … des faits.
- Comment ? : définir, les moyens matériels et techniques, les actions, les évènements, les procédures, conditions, … manière d'agir.
- Combien ? : définir les quantités, le nombre, … les mesures.
- Pourquoi ? : définir les causes, les effets, les facteurs déclenchant, … les raisons.

Ces questions sont résumées en une seule phrase : « *qui a fait quoi, où, quand, comment et pourquoi ?* ».

Mettre au point un modèle relève du sens pratique mais également du sens créatif du modélisateur. Bien que ces deux sens s'influencent entre eux, ils se développent d'un travail à l'autre, mais il faut aussi les enrichir avec le savoir-faire des autres, *i.e.*, passer en revue les ouvrages scientifiques et techniques pour chercher de nouvelles idées et des sources d'inspiration à son modèle. Drogoul et al. (Drogoul et al. 2003), ont exposé une méthodologie orientée rôle pour construire un modèle à base d'agents. Tout d'abord, le thématicien joue le rôle de l'observateur qui définit le contexte et les données basiques du modèle, ensuite le modélisateur qui formalise les données et les informations collectées par le thématicien, enfin l'informaticien qui concrétise le modèle. Dans (Bresciani et al. 2004), les auteurs ont introduit une méthodologie structurée en phases, nommé Tropos, pour développer des logiciels orientés agent. Quant à Garro and Russo (Garro and Russo 2010), ont proposé une méthodologie axée sur l'expertise pour la modélisation et la simulation à base d'agents. Un autre cadre méthodologique est présenté dans (Fortino and Russo 2012). En génie logiciel, il y a plusieurs méthodes pour créer un modèle, y compris, le cycle en V, le modèle en cascade, RUP (*Rational Unified Process*), ….

Vu qu'il existe une variété de points de vue, diverses façons d'exprimer ses intentions et ses pensées, et une multitude de possibilités pour construire un modèle, la sous-section suivante présente les types de modèles les plus utilisés dans l'étude des systèmes complexes.

1.4. Types de modèles et outils de conception

1.4.1. Modèles mathématiques

La plupart des systèmes peuvent être traduits en modèles mathématiques. Un modèle mathématique est un ensemble d'équations et de contraintes. L'utilisation de ces modèles est très répondue en science de la nature, en informatique, en sociologie et en économie, pour résoudre les problèmes d'optimisation, de planification et d'ordonnancement. Seulement, ce type de modèle s'avère très limité face aux systèmes où l'interaction, l'incertitude et les phénomènes émergents jouent un rôle essentiel et fondamental dans leurs évolutions, alors un couplage avec un modèle de simulation devient une nécessité. Il existe deux types de modèle mathématique :

- *Modèle analytique* : un modèle théorique développé seulement sur papier.
- *Modèle numérique* : un modèle mathématique implémenté sur un solveur pour obtenir des résultats numériques.

1.4.2. Modèles orientés objet et la modélisation des processus métiers

Ces modèles sont très utilisés en gestion de projet pour le développement de logiciels et des systèmes d'information, pour la modélisation des activités clés, et pour la conception de bases de données relationnelles. Ils s'articulent autour des processus métiers couplés aux flux informationnels et de données d'une organisation, pour mettre en avant les règles et les contraintes qui régissent chaque activité, les relations : acteur-acteur, entité-entité, acteur-entité

et la sémantique de données. Dans ces modèles, la dynamique d'un système correspond aux envois de messages entre entités qui déclenchent l'exécution d'un processus. D'ailleurs, l'avantage de ces modèles résident dans trois points : (1) des notations graphiques simples pour en saisir facilement le sens par tout public ; (2) très grande diffusion aussi bien dans le milieu académique qu'industriel (Conan 2016) ; (3) très sollicité par les développeurs pour générer automatiquement le code source de leurs programmes. Pour construire ce type de modèle, il existe divers formalismes adaptés à des besoins spécifiques ou génériques.

Pour la modélisation des processus métiers, on trouve :

- BPEL (*Business Process Execution Language*) : connu aussi sous l'acronyme BPEL4WS (*Business Process Execution Language For Web Serrvices*), est un langage standardisé par l'organisme OASIS (*Organization for the Advancement of Structured Information Standards*). Il est basé sur XML et les services web pour spécifier les actions au sein des processus métiers.

- BPMN (*Business Process Modeling Notation*) : une méthode développé au début par l'entreprise BPMI (*Business Process Management Initiative*) et standardisé ensuite par de l'OMG (*Object Management Group*). Elle est utilisée pour décrire les d'activités et les procédures d'un processus métiers.

- XPDL (*XML Process Definition Language*) : un langage standardisé par le WfMC (*Workflow Management Coalition*) pour faire passer les processus métiers d'un outil de modélisation à un autre, *i.e.*, un format supporté par plusieurs outils de modélisation des processus métiers.

Pour la modélisation des besoins et objectifs, on cite :

- GO-BPMN (*Goal Oriented Business Process Modelling Notation*) : basé sur le BPMN pour structurer le processus métier en plusieurs objectifs (Najib 2014).

- GPMN (*Goal Process Modeling Notation*) : semblable au précèdent.

- *AND/OR graph* : directement emprunté à des méthodes de réduction de problèmes en intelligence artificielle (Cooper et al. 2006). Utilisé pour la capture des besoins fonctionnels d'une entreprise.

- SIG (*Softgoal Interdependency Graph*) : un graphique conçu pour spécifier les interdépendances entre les besoins non-fonctionnels d'une entreprise (Chung et al. 2012).

Pour la conception de systèmes et de logiciels, il y a :

- Merise : une méthode d'analyse, de conception et de gestion de projet informatique, mais plus particulièrement pour le développement des bases de données relationnelles.

- SSADM *(Structured Systems Analysis And Design Method)* : une méthode pour la réalisation des systèmes d'information, développée spécialement pour le *Central Computer and Telecommunications Agency* en Royaume-Uni.

- UML (*Unified Modeling Language*) : un langage de modélisation orienté objet à base de pictogrammes destiné à plusieurs usages. Il permet de décrire l'aspect statique et dynamique de l'objet de l'étude, en d'autres termes, il offre une vision assez complète. Il est vu comme un langage de modélisation normalisé. L'UML est à présent un standard de l'OMG. Les diagrammes UML utilisés dans ce travail sont :

  - Diagramme de cas d'utilisation : ce diagramme scinde les besoins fonctionnels du système étudié en un ensemble d'unités cohérentes, et permet d'exprimer explicitement les relations qui existent entre ces unités cohérentes (les fonctionnalités principales) et les acteurs qui les exécutent.

  - Diagramme de classes : décrit la structure d'un système sous format de classes reliées entre eux et qui sont caractérisées par des attributs et des méthodes.

  - Diagramme d'activité : représente graphiquement les flux de travail et les actions des activités par ordre chronologique. Le diagramme d'activité est destiné à modéliser les processus informatiques et organisationnels, et le flux global de contrôle et de traitement.

- MDA (Model Driven Architecture) : une démarche de modélisation et de conception de logiciels, crée pour favoriser la génération du code source des applications.

1.4.3. Modèles à base d'agents

Un modèle à base d'agents est composé d'un ensemble d'entités ou acteurs modélisés sous format d'agents autonomes. Ces agents évoluent dans un ou plusieurs environnements, où ils peuvent agir ou apercevoir les changements qui s'y produisent. Chaque agent se distingue par son propre état qui fait partie de l'état global du système, en outre, il est contrôlé par des règles externes ou internes à l'agent. D'ailleurs, cette approche sied parfaitement aux systèmes à haut degré de complexité. En effet, d'une part, son principal atout est qu'elle met en évidence les interactions des entités composant le système étudié et offre une vision structurée à deux niveaux de représentation : le niveau microscopique (l'aspect individuel) et le niveau macroscopique (l'aspect collectif), *i.e.*, une description naturelle ressemblante à la réalité. D'autre part, l'implémentation facile et la flexibilité du modèle conçu. L'évolution du système selon ce modèle est la résultante des actions produites par les agents, leurs réactions vis-à-vis des changements de l'environnement dans lequel ils sont localisés et des interactions entre agents (Calvez 2007). Les outils utilisés pour modéliser avec les agents sont :

- MAML (*Multi-agents Modeling Language*) : est un langage de modélisation textuel proposé par Gulyás (Gulyás et al. 1999).

- AUML (*Agent UML*)/AORML (Agent Object Relationship Modeling Language) : ce sont des extensions d'UML dédiées à la modélisation des agents.

- AML (*Agent Modeling Langage*) : un langage semi-formel pour agents dérivé d'UML 2.0. AML est langage adopté dans ce manuscrit, nous nous sommes appuyés sur les diagrammes AML suivants :

    - Diagramme social : pour définir les objectifs, les rôles, les ressources et les relations sociales des agents.

    - Diagramme d'agents : le même principe du diagramme de classes. Cependant, à la place d'attributs, on dit propriétés, et à la place de méthodes, on dit comportements.

- ML4MS (*Modeling Languages For Multiagent Systems*) : est une langage graphique formalisé développé par Huget (Huget 2005).

1.4.4. Modèles à base d'automate

Un automate est une entité qui sert à reproduire la dynamique des systèmes ou de corps animés. L'automate peut être utilisé pour réaliser une séquence d'actions prédéterminées sous format d'état fini, par exemple, distributeur automatique, dans ce cas, l'automate est modélisé par un réseau de Pétri. D'un autre côté, l'automate peut être une grille composée de cellules, où l'état d'une cellule dépend de l'état de son voisinage, en vue d'étudier un système continu. On trouve ce genre de modèle dans plusieurs champs d'application : la biologie, les mathématiques discrètes, l'informatique théorique, la physique, les sciences humaines, etc. La plupart des modèles à base d'automates sont caractérisés par un niveau d'abstraction élevé.

1.4.5. Modèles de simulation

L'arrivée des ordinateurs a bouleversé les concepts de modélisation et de simulation, l'évaluation numérique des modèles mathématiques devient possible (Singh 2009). Ce modèle est conçu pour décrire, imiter et/ou prédire l'évolution de l'objet de l'étude. Un modèle de simulation peut être à base d'agents ou orienté objet, et peut être combiné à des modèles mathématiques, de plus, son exécution n'est que du calcul logique (mathématique). Ce type de modèle est l'objectif de cette thèse et il est détaillé dans les prochaines sections et chapitres. Durant les dernières décennies, ces modèles ont gagné en importance dans de nombreuses disciplines scientifiques, à cause de l'évolution des ordinateurs et de l'émergence de nouvelles approches tant au niveau technique qu'ergonomique.

2. Simulation

2.1. Introduction

La simulation est la concrétisation de la représentation simplifiée du système de référence (voir, sous-section 1.2.2), que l'on désire observer ou étudier sa réaction face des actions ou des perturbations, pour induire ou évaluer approximativement leurs impacts sur la performance du système réel. Une expérimentation réelle peut s'avérer impossible pour des raisons éthiques, économiques ou simplement techniques, par exemple, valider des suppositions par des expériences peut être très coûteux en termes de temps et d'argent. Alors, la communauté scientifique a recours à la simulation pour vérifier que ce qui est théoriquement valide est réellement applicable et à priori aura les effets souhaités. Ainsi, elle a énormément contribué à l'avancée de la recherche, en plus d'être sollicitée dans beaucoup de projets industriels. La simulation permet d'évoluer le modèle par unité de temps et de déterminer son état à chaque valeur du temps, voir Figure II.2. On peut représenter le temps d'exécution par l'axe des abscisses et le changement d'états par l'axe des ordonnées (Siebert 2011).

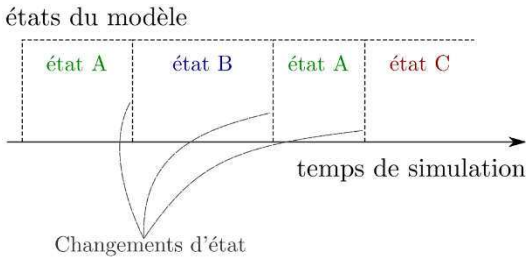


Figure II.2 Représentation de la simulation (source : (Siebert 2011))

La simulation a été utilisée bien avant la naissance des ordinateurs, à cette époque il y avait des modèles physiques dynamiques, appelés maquettes, qui simulait le déroulement du phénomène observé (la simulation des phénomènes naturels). On nomme cette approche, l'approche analogique. Quant à la simulation informatique, dite approche stochastique, elle est apparue en même temps que l'intelligence artificielle suite à des besoins militaires pendant la Deuxième Guerre mondiale, particulièrement en vue d'améliorer l'entraînement des forces aériennes. Cette deuxième approche a pris de l'ampleur après l'arrivée et la disponibilité accrue des ordinateurs, qui offrent une puissance de calcul de plus en plus croissante, à tel point que dans certains domaines scientifiques cette pratique a remplacé l'expérimentation réelle. Certains considèrent que la simulation est à un modèle dynamique ce que l'expérimentation est à un système réel (Shannon 1998), mais d'autres la voient comme une partie intégrante de l'activité de modélisation. Bien qu'il y ait deux approches, aujourd'hui, dans beaucoup d'esprits le terme simulation ne fait référence qu'à « la simulation informatique ». De ce fait, la définition de la simulation proposée par Treuil et al. (Treuil et al. 2008) sera adoptée dans ce manuscrit : « *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* ».

L'émulation est un terme très proche de la simulation, qui vise à imiter pas à pas un système d'une manière déterministe, c'est-à-dire singer le système. Dans l'émulation, les variables d'état du modèle sont connues et ont une valeur qui correspond à la réalité du système de référence. Même si on peut considérer que l'émulation est un cas particulier de la simulation, ces termes ne doivent pas être confondus. L'émulation a pour vocation la représentation d'un scénario unique celui du système de référence, tandis que la simulation permet d'évaluer un ensemble de scénarios imaginés ou réels.

2.2. Objectifs et avantages

En général, la simulation est vue comme un outil d'aide à la décision utilisée à plusieurs fins. Entre autres, elle sert à évaluer les solutions apportées aux problèmes constatés lors de l'observation du système réel et de valider ces solutions en plus des théories et des hypothèses pour les appliquer. Aussi, elle permet de démontrer leur potentiel aux dirigeants (ou au grand public) à travers une représentation tri-multi-dimensionnel animée (animation en 2D/3D) qui permet de rendre le modèle plus crédible, *i.e.*, « une image vaut mille mots » est la meilleure façon pour visualiser les processus du modèle simulé. De plus, la simulation est un outil de confiance pour prévoir ou prédire le comportement de l'objet de l'étude en explorant le maximum de scénarios possibles sous différents paramètres. En effet, les paramètres d'entrées et les scénarios de simulation influencent l'évolution et le comportement du modèle simulé, alors pour chaque paramétrage du modèle on aura un nouveau comportement. En outre, la simulation est un bon moyen pour comprendre un phénomène, en expliquer les causes et en savoir les conséquences, et aussi pour enrichir les connaissances par de nouvelles théories, *i.e.*, par voie de simulation, on peut élaborer d'autres théories (Drogoul 1993).

Ces différents usages et objectifs ont fait de la simulation un outil pluridisciplinaire indispensable à la résolution de problèmes. Law (Law 1991), identifie huit problèmes pour lesquels la simulation s'est révélée être un outil très utile et puissant :

- La conception et l'analyse des systèmes de production,
- L'évaluation des exigences matérielles et logicielles d'un système informatique,
- L'évaluation d'un nouveau système ou une nouvelle tactique militaire,
- La définition des politiques de triage pour un système d'inventaire,
- La conception des systèmes de communication,
- La conception et l'évaluation des infrastructures de transport,
- La conception et l'évaluation des organismes de services de santé et sociaux,
- L'analyse des systèmes financiers ou économiques.

Bien que les modèles mathématiques (numériques) écrits par exemple sous *Excel* ou *Matlab* connaissent un grand succès dans divers domaines d'application, ils sont limités face aux problèmes à grande échelle même si on peut les renforcer par des scripts codés en un langage de programmation (C, C++, …). Dans ces modèles, les données de sorties sont calculées à partir des entrées à l'aide de formules simples ou complexes. En revanche, quand le système a un comportement non-linaire plus ou moins incertain, soumis à des contraintes spatio-temporelles et à des réactions de cause à effet pouvant donner naissance à des phénomènes émergents, en plus d'un état défini par des variables qui s'influencent, la définition du modèle mathématique lui-même devient une tâche difficile, en conséquence avoir une solution exacte aux problèmes peut être impossible. Prenons l'exemple de l'heuristique colonie de fourmis citée dans l'introduction générale, le comportement du système est facilement modélisé par des équations et des formules, mais quand on veut introduire par exemple, la collaboration entre fourmis, les communications entre fourmis, les caractéristiques des fourmis, les mécanismes de défense et de protection, des obstacles sur des chemins, les hiérarchies/niveaux, les caractéristiques environnementales, les données climatiques, …, le modèle mathématique ne peut pas couvrir tous ses aspects, ce qui explique en partie l'engouement dont a bénéficié la simulation numérique (Drogoul 1993). Le modèle de simulation permet d'obtenir l'état futur du système à partir de l'état actuel du système à l'aide d'un ensemble de règles pré définies. Selon Borshchev (Borshchev 2013), les avantages de la simulation sont :

- Trouve des solutions à des problèmes très complexes, là où d'autres méthodes échouent,
- Le modèle de simulation est un système modulaire,
- Calcule à chaque instant l'état du système,
- Représente l'environnement réel du système d'étude,
- L'animation en 2D/3D du comportement du système,
- Enrichit le modèle par des histogrammes ou d'autres représentations graphiques des données de sorties,
- Les modèles de simulation sont plus convaincants qu'un autre type de modèles.

2.3. L'approche optimisation-simulation

L'optimisation consiste à déterminer la ou les solutions qui optimisent certains critères en respectant un ensemble de contraintes (Oudani 2016). Elle est utilisée dans plusieurs autres disciplines : l'informatique, la recherche opérationnelle, l'économie, etc. L'optimisation offre différentes méthodes de résolution de problèmes mais l'enjeu est de choisir celle qui mène vers des solutions optimales en un temps raisonnable. L'efficacité d'une méthode dépend de

l'algorithme développé et du type de problème à résoudre. Dans la littérature, deux grandes familles sont identifiée : les méthodes exactes et les méthodes -méta-heuristiques.

Méthodes exactes : ou dite méthodes complètes, est une méthode qui garantit la complétude de la résolution d'un problème donnée en arrivant à la solution optimale. Cependant, elle est limitée au cas des problèmes de petite taille, en effet, plus le problème est complexe plus le temps d'exécution devient inacceptable. Exemple : l'algorithme Branch and Bound (Zhu and Lim 2006), la méthode de coupes planes, la méthode Branch and Cut (Alsoufi et al. 2016), la méthode de la génération de colonnes, …

Méthodes heuristiques : ou dite méthodes approchées, sont des méthodes qui perdent en complétude pour gagner en efficacité et en temps d'exécution. L'utilisation de cette famille s'avère particulièrement très intéressante dans le cas des problèmes de grande taille. Les solutions obtenues par les méta-heuristiques sont qualifiées de réalisables ou de satisfaisantes, *i.e.*, elles ne sont pas optimales. Les méta-heuristiques les plus connues sont : les algorithmes génétiques (Oudani et al. 2014), les algorithmes de colonies de fourmis (Lajjam et al. 2014), la recherche avec tabou (Lim et al. 2004), les algorithmes à évolution différentielle (Şahin and Kuvvetli 2016), l'algorithme de recherche en faisceau (Kim et al. 2004), Particle Swarm Optimization (Han et al. 2015), le recuit simulé (Zhu and Lim 2006), etc. Oudani (Oudani 2016) utilise les méthodes heuristiques pour résoudre les problèmes d'ordonnancement des trains/navettes sur la zone ferroviaire, d'affectation des trains/navettes aux voies ferrées et de planification des portiques ferroviaires.

Les algorithmes d'optimisation ont largement fait leur preuve dans le domaine de la recherche logistique. En particulier, dans la planification et l'ordonnancement des opérations portuaires (Daganzo 1989), (Bierwirth and Meisel 2010), (Bierwirth and Meisel 2015) et (Carlo et al. 2015), de stockage (Kemme 2011), (Lehnfeld and Knust 2014) et (Carlo et al. 2014a), et de transport interne (Vis 2006), (Golden et al. 2008), (Fazlollahtabar and Saidi-Mehrabad 2013) et (Carlo et al. 2014b).

En ce qui concerne l'approche optimisation-simulation, elle est connue sous différents noms au sein de la communauté scientifique : l'optimisation basée sur la simulation, l'optimisation stochastique, l'optimisation par simulation, black-box optimisation, le couplage optimisation-simulation,… Pour plus de détail sur ce couplage, le lecteur peut se référer à (Fu 1994), (Carson and Maria 1997), (Fu 2001) et (Amaran et al. 2014). Selon Morvan (Morvan 2009), le couplage entre les modèles mathématiques et les autres approches de résolution de problèmes est une voie de recherche pertinente (Figure II.3). L'approche optimisation-simulation consiste à évaluer dans un modèle dynamique exécutable, les meilleures solutions trouvées par l'optimisation. L'optimisation permet d'arriver à des solutions optimales ou meilleures en un temps raisonnable, mais en général, sans prendre en compte les incertitudes et les perturbations qui caractérisent un bon nombre de systèmes complexes. La simulation est couplée au modèle mathématique ou à une heuristique afin de tester l'efficacité et la robustesse de chaque solution sous différents scénarios. La fonction objective est construite autour des

données clés de la simulation qui doivent être minimisées ou maximisées. Les données clés sont des données de sortie (valeurs) qui témoignent de l'efficacité de la solution. Autrement dit, des indicateurs à base desquels les solutions sont comparées. Par exemple, si la fonction objectif cherche à minimiser le temps d'exécution d'une opération, la solution ayant la valeur la plus petite est la meilleure et les paramètres à partir desquels cette solution a été générée sont les optimaux, et vice-versa. Pour obtenir la bonne configuration du couplage, le modèle doit être lancé plusieurs fois pour explorer l'espace de chaque paramètre (les valeurs possibles).

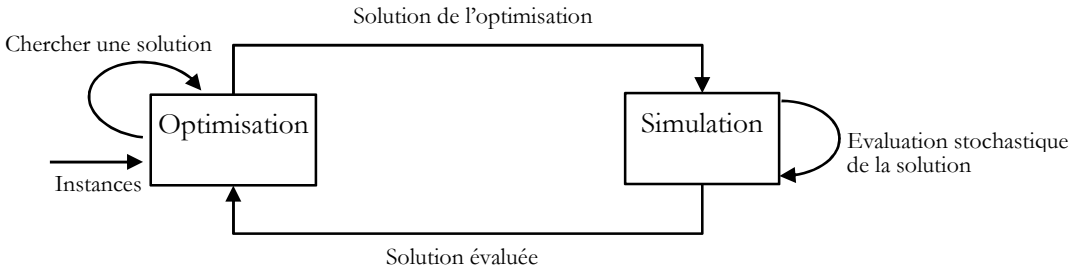


Figure II.3 L'approche optimisation-simulation

2.4. De l'abstraction à la concrétisation : l'implémentation

La simulation est l'environnement où les modèles numériques prennent vie, là où on aperçoit visuellement le comportement du modèle, les bienfaits des solutions développées et les défauts à corriger. Le modèle doit être implémenté soigneusement avant de passer à la simulation. L'implémentation, c'est la traduction du modèle écrit sur un document vers un langage de programmation. Par la suite, il est nécessaire d'alimenter le modèle par des paramètres et des données d'entrées afin de l'expérimenter et de collecter les données de sortie (données textuelles et visuelles). Ces données seront utilisées pendant le processus de vérification et de validation. Enfin, se prononcer sur la crédibilité du modèle en vue de savoir si on peut faire confiance à ses résultats. Si tel est le cas, il est alors possible d'utiliser le modèle de simulation comme une représentation valide du système réel, ainsi tester de nouvelles solutions avant de les appliquer en réalité. Par contre, si le modèle est erroné ou invalide, il faut alors recommencer le processus de modélisation jusqu'à l'obtention d'un modèle valide.

Construire un modèle de simulation commence tout d'abord par le choix de l'approche, c'est-à-dire dans quelle forme le modèle sera implémenté. Ensuite, le développement de la simulation se fait, soit à l'aide d'un simulateur soit par l'utilisation d'un langage de programmation, *i.e.*, coder son propre simulateur. La première méthode est très avantageuse, car il permet aux développeurs de gagner en temps et en coût, mais également d'améliorer la qualité de leurs simulations. En effet, le simulateur est une boîte très riche en outils et en bonne pratique de développement, conçu par des experts, cependant il faut apprendre à l'utiliser en plus d'être une boîte noire. Quant à la deuxième méthode, consiste à coder de A à Z la simulation en un langage de programmation. Cette méthode demande beaucoup de temps et d'effort, néanmoins la simulation sera plus maniable et souple sans être restreinte par les contraintes d'utilisation que certains simulateurs imposent. L'approche simulation, la méthode d'implémentation et le format des résultats ne sont évidemment pas sans effet sur le processus

de modélisation, vu qu'ils influencent, par exemple, le choix du paradigme, le niveau d'abstraction, le formalisme, etc.

L'implémentation est une succession d'étapes récursives pour concrétiser plus finement la logique interne et les relations du modèle, en plus pour mettre le point sur les connaissances qui n'ont pas été prises en compte au début de la modélisation pour les rajouter après. Par ailleurs, le modèle est rarement implémenté tel qu'il est sur papier, soit parce que le simulateur n'adhère pas à certains concepts utilisés dans le modèle, soit à cause du langage d'implémentation imposé par l'environnement de travail (chaque environnement de travail a ses propres formalismes). L'enchaînement des étapes depuis la définition de besoins, passant par la conception (modèle conceptuel) jusqu'à l'implémentation (modèle opérationnel) est appelé « lignée de modèles » (Treuil et al. 2008), car à chaque étape, un modèle est construit.

2.4.1. Approches de simulation

Aujourd'hui, il existe trois approches : la simulation basée sur la dynamique des systèmes (ou simulation continue), la simulation à évènements directs et la simulation à base d'agents. Chacune agit dans un ou plusieurs niveaux d'abstraction, en plus, elles se diffèrent aussi en langage et en concepts de construction de modèles. L'approche par la dynamique des systèmes est utilisée pour les systèmes caractérisés par un haut niveau d'abstraction, par exemple, en économie et en science sociale. Pour la simulation à évènements directs, elle permet de développer un modèle de simulation à un niveau moyen d'abstraction. Pour ce qui est de l'approche à base d'agents, elle varie entre le niveau élevé de détail où chaque agent représente un seul individu ou une seule entité et le niveau bas de détails où les agents sont des organisations, par exemple, des entreprises, des dépôts, etc. Le choix de l'approche doit se baser aussi sur l'objectif fixé par le modélisateur. Parfois, chaque partie du modèle conceptuel est implémentée à l'aide d'une approche, dans ce cas, le modèle de simulation qui en résulte est un modèle multi-approches. La Figure II.4 présente une comparaison des trois approches.

Simulation à évènements directs : introduite en 1961 par l'ingénieur chez IBM Geoffrey. La simulation d'événements discrets consiste à représenter un système tel qu'il évolue dans le temps, durant lequel les variables d'état changent instantanément suite à l'arrivée d'un ou de plusieurs événements, autrement le système reste stable. Donc un événement est défini comme une occurrence instantanée qui change l'état du système. Dans cette approche le système est considéré comme une séquence d'opérations exécutée par des entités. Les concepts utilisés sont : source, état, condition, boucle, file d'attente, fin, diagramme d'activités.

Dynamique des systèmes : le système simulé évolue au cours du temps, simulation continue, contrairement à l'approche précédente. Cette méthode a été créée au milieu des années 1950 par le professeur Jay Forrester ("Jay Wright Forrester", Wikipédia 2017), ce dernier s'inspire des lois de circuit électrique en physique pour construire un modèle de simulation. Initialement développée pour aider les dirigeants d'entreprise à améliorer leur compréhension des processus industriels, de nos jours elle est utilisée pour l'analyse et la

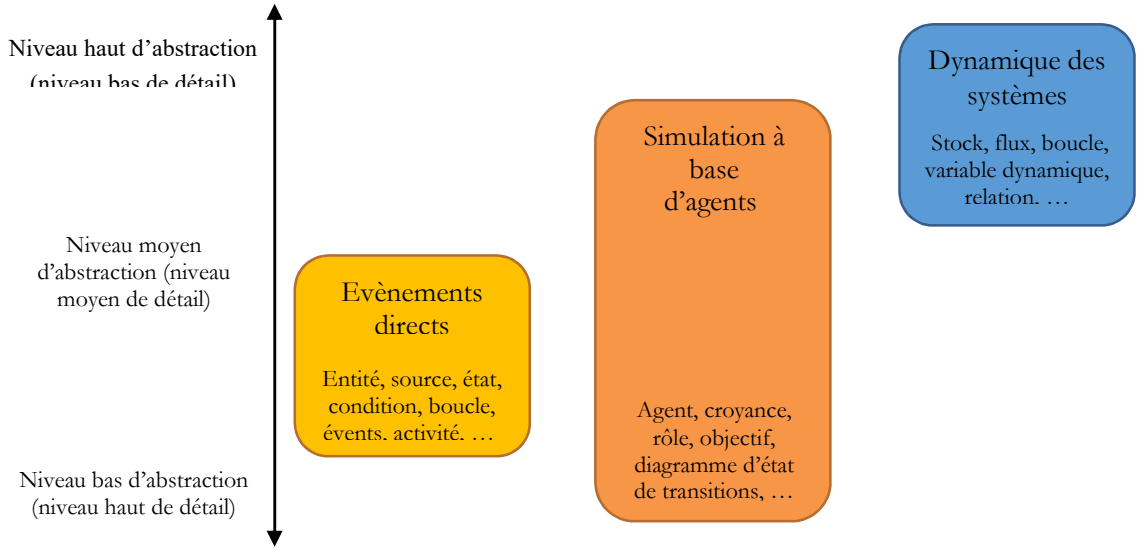


Figure II.4 Les approches de simulation (source : (Borshchev 2013))

conception des politiques de ventes, d'achats, etc. Le modèle est formé par des composants (stocks) liés par des relations circulaires, entrelacées ou déterminées par le temps. Chaque composant est un ensemble d'entités vu comme une unité solide.

Simulation à base d'agents : elle est assez jeune par rapport aux deux autres approches. Son but est d'approfondir les connaissances sur le système simulé en représentant les aspects qui ne sont pas pris en compte par les approches traditionnelles. L'attrait de la simulation à base d'agents est dû aussi à l'évolution rapide des ordinateurs et aux succès qu'a connus la modélisation orientée objet. La troisième section aborde plus en détail cette approche.

2.4.2. Simulateur

Le simulateur est un logiciel de simulation codé dans un langage de programmation de manière à faciliter l'opération d'implémentation du modèle. Il est composé de modules ou de blocs de contrôle qui peut être glissé et déposé (*drag and drop*) rapidement sur l'environnement de travail (du logiciel). Les modules et les blocs sont regroupés par librairie, où chacune est orientée vers un type d'application, par exemple, logistique, santé, industrie, etc., en plus de fournir à l'utilisateur des fonctionnalités générales prête à l'emploi (des fonctionnalités utilisées dans la plupart des simulations, ex : ajout, suppression, déplacement, envoie de message, gestion des événements, …). D'ailleurs, le simulateur offre une assistance durant la création du modèle. D'autres fonctionnalités externes peuvent être ajoutées à la panoplie de modules composant le simulateur, tel que des modules d'optimisation, de base de données, ou d'autres librairies pour des besoins plus spécifiques.

Opter pour un simulateur ou bien pour un autre dépend de ce qui le distingue par rapport aux autres. Law (Law 1991), identifie six critères à considérer lors du choix du simulateur et nous avons ajouté un septième :

- Capacités générales : proposer un environnement de travail clair et des modules facilement utilisables. Permettre une implémentation flexible du modèle, quel que soit son degré de complexité tout en minimisant le temps et les coûts. Offrir de

bons outils de débogage et assurer une exécution rapide du modèle, même si le modèle est complexe, le temps d'exécution doit être acceptable.

- Configurations matérielles et logiciels requise : la plupart des simulateurs sont disponibles seulement pour le système d'exploitation Windows, rares ceux qui ont des versions compatibles avec tout type de système. Normalement, les simulateurs ont besoin d'un minimum de ressources (RAM et CPU), plus il y a de ressources, plus l'exécution du modèle sera rapide, en outre le simulateur est lui-même un modèle exécutable volumineux.

- Qualité d'animation et objets de représentation graphique : à chaque élément clé du modèle, une icône ou un objet animé (en 2D ou 3D) doit lui être associé, pour le distinguer facilement. Aussi, aujourd'hui la visualisation en 3D avec plusieurs angles de prise de vue est devenue très importante, car il rend le modèle plus réaliste.

- Lois de probabilité : la génération des nombres aléatoires est essentielle pour un modèle de simulation, d'un côté, elle permet d'avoir des résultats différents à chaque réplication, d'un autre côté, beaucoup de systèmes réels sont de nature stochastique.

- Exposition des sorties : les logiciels de simulation doivent proposer une variété de graphiques pour exposer de diverses façons les données de sortie (les statistiques). A savoir, les histogrammes, les camemberts, les diagrammes chronologiques, les représentations en trois dimensions, les bulles, tableaux, etc.

- Service client et documentation : la société qui a créé le simulateur doit organiser périodiquement des formations pour leurs clients, et les informer à chaque mise à jour. La documentation est fondamentale pour manipuler n'importe quel logiciel. Alors, il est nécessaire qu'elle soit suffisamment détaillée et soutenue par plusieurs exemples pratiques.

- Approches de simulation : mettre en place un modèle basé sur plusieurs approches de simulation est une idée ingénieuse, cependant, à notre connaissance le seul simulateur multi-approche est Anylogic. La majorité des simulateurs supportent la simulation à évènements discrets.

Il existe des dizaines de simulateurs sur le marché, adaptés à plusieurs domaines d'application ou secteurs industriels, parmi eux, on trouve :

- AnyLogic : est un simulateur multi-approches développé en JAVA. C'est le logiciel que nous avons utilisé.

- Flexsim : est un logiciel de simulation à événements discrets, où le codage du modèle se fait en C++ ou en un langage de script, appelé FlexScript. Il offre des modules pour la simulation des ateliers de production, des terminaux portuaires, des hôpitaux, etc…

- Arena : est un simulateur à événements discrets qui utilise le langage de simulation SIMAN pour décrire le système sous format de modules de contrôles. Il supporte certaines technologies de Microsoft, tel que, Visual Basic, Microsoft Visio, Excel, Access et ActiveX.

- Simio : est un outil de simulation orientée objet.

- Witness : est une plateforme de simulation à événements discrets.

2.5. Vérification, validation et calibrage du modèle de simulation

Le processus de vérification et de validation d'un modèle de simulation est une étape nécessaire dont l'objectif est de s'assurer que le modèle est raisonnable, correctement mis en œuvre et reflète le comportement réel du système étudié, de plus, il permet aux exploitants de faire confiance aux résultats des solutions proposées. Dans l'ingénierie des systèmes (modélisation, simulation, …), bien qu'il existe une nuance sémantique entre ces deux notions (vérification et validation), elles sont souvent confondues et passent à tort pour synonymes. Les activités de vérification d'un modèle de simulation servent à prouver que le processus d'implémentation s'est bien déroulé et que les exigences/besoins sont représentées sans défauts. Tandis que, les activités de validation visent à prouver que les objectifs tracés au début sont atteints, que les sorties du modèle sont fiables et que la représentation simplifiée est crédible. En bref, la vérification s'intéresse à la représentation (*front-end : la partie visible de l'iceberg*) et la validation tourne autour du contenu (*back-end : la partie cachée de l'iceberg*). D'ailleurs, habituellement la vérification précède la validation, *i.e.*, on ne peut pas valider avant de vérifier. D'un autre côté, la vérification et la validation peuvent avoir lieu à la fin de n'importe quelle phase du cycle de développement, en plus, la définition de ces deux notions est régulièrement sujette à discussion (Foures 2015). Par exemple, en génie logiciel la validation fait référence à la conformité du produit final avec les besoins du client.

Un modèle cache certainement des erreurs, en sus, il est parfois difficile de déceler exactement où ils se situent. En effet, les modèles de simulation à grande échelle sont de plus en plus complexes, alors même le débogage du code devient une longue et fastidieuse tâche. Dire qu'un modèle est valide est donc discutable. Néanmoins, on doit toujours se rappeler la citation très connue de George Box ("George Box, Wikipédia" 2016) : « *all models are wrong but some are useful* ». De ce fait, une autre notion s'est ajoutée pour évaluer la validé d'un modèle, « la crédibilité ». La crédibilité désigne le degré de confiance accordé aux résultats fournis par le modèle, c'est-à-dire, jusqu'à quel point on est convaincu que les sorties sont exactes. La définition du degré de confiance est tributaire du domaine d'application, par exemple, dans une discipline scientifique, on peut dire que le modèle est valide si est seulement si la crédibilité de ses résultats dépasse 90%, alors que dans d'autres disciplines, on précise que le degré de confiance est de 95%. Aussi, on peut définir une marge d'erreur au-dessus de laquelle le modèle de simulation devient invalide, par exemple, l'erreur du modèle ne doit pas dépasser les 10%.

Après la validation, les paramètres du modèle de simulation doivent être calibrés pour arriver aux meilleurs résultats. Le calibrage consiste donc à trouver les valeurs optimales en explorant l'espace de chaque paramètre. D'ailleurs, un paramétrage erroné du modèle peut conduire à l'apparition de mauvais comportements. Il existe trois cas selon (Calvez 2007). Dans le premier cas, le modélisateur n'a aucune idée sur le choix des valeurs à cause d'un manque d'informations ou bien ces informations sont inexistantes, alors les valeurs seront estimées à partir de l'observation du système réel. Dans le deuxième cas, les valeurs que peuvent prendre un ou plusieurs paramètres sont plus ou moins précises, car les connaissances sont insuffisantes. Dans le troisième cas, l'espace de chaque valeur est connu à partir des données et des connaissances collectées. Ainsi, extraire les bonnes valeurs sera plus facile.

2.5.1. Vérification

Définition : *« Confirmation par examen et collecte d'évidences objectives que les exigences à partir desquelles un "produit final" est construit, codé, ou assemblé, sont satisfaites »* (Foures 2015).

La vérification du modèle de simulation se fait à l'aide des méthodes suivantes (cette liste n'est pas exhaustive) :

- Débogage du code : les erreurs syntaxiques ou certaines erreurs sémantiques au niveau du code sont rapidement détectées par le compilateur du simulateur ou du langage de programmation, en revanche les erreurs qui peuvent émerger durant l'exécution ne sont pas évidentes aux yeux du compilateur, i.e., le programme peut attribuer une valeur nulle à une variable sans faire attention, ce qui génère une erreur quand cette variable est exploitée. Alors, l'opération de débogage permet aux développeurs d'analyser le code pas-à-pas en affichant les valeurs des variables.

- Test : est une suite de tâches ayant pour objectif d'identifier les défaillances dans un modèle. Premièrement, le test de non-régression vise à vérifier que toute correction d'erreur n'a pas engendré d'autres. Deuxièmement, le test unitaire pour s'assurer que chaque composant du modèle opérationnel est bien défini selon les spécifications du modèle conceptuel. Troisièmement, le test d'intégration a pour but de prouver que le modèle fonctionne comme une unité cohérente.

- Visualisation 2D/3D : c'est une sorte de débogage de la représentation graphique du modèle. Vérifier si l'animation du modèle se déroule bien et que chaque composant est positionné au bon endroit.

- Fichier logs : c'est une autre manière pour débugger le code. Il permet de tracer l'enchaînement des actions durant l'exécution du modèle en fonction du temps, en vue de localiser tout dysfonctionnement. Aussi, il permet d'enregistrer l'historique des valeurs de chaque variable pour les comparer aux valeurs exactes issues de l'observation du système réel.

- Réplications : consiste à lancer le modèle de simulation plusieurs fois en changeant le réglage de paramètres pour constater la variation au niveau des résultats. On peut considérer cette méthode comme une méthode de validation.

2.5.2. Validation

Définition : *« Confirmation par examen et collecte d'évidences objectives que les exigences à partir desquelles un "produit final" ou l'agrégation de "produits finaux" fonctionne comme attendu par l'intéressé (modélisateur, concepteur, client, …) dans son environnement opérationnel »* (Foures 2015).

Quelque méthode de validation :

- Degré de confiance et taux d'erreur : calculer la différence entre les sorties du modèle de simulation et les valeurs affichées par le système réel.

- Mesure de la validité : sont des informations pertinentes qui mesurent le succès des activités critiques d'une organisation, par exemple, les indicateurs de performance. Pour chaque mesure observée, on fixe un domaine de validité, *i.e.*, intervalle de valeurs tolérées. Par la suite, on vérifie que les valeurs données par la simulation sont dans cet intervalle. On calcule ces valeurs soit à la fin de la simulation soit durant toute la simulation (à chaque instant). Voir la thèse de Morvan (Morvan 2009).

3. Système multi-agents

3.1. Introduction

La notion d'agent est tributaire du domaine d'étude, il peut faire référence à une entité artificielle aussi bien que matérielle. Il exhibe une attitude, qui peut être qualifiée d'autonome, à travers l'environnement (environnements) dans lequel (lesquels) il évolue. L'environnement de l'agent désigne l'espace spatio-temporel et les autres agents avec lesquels il cohabite pour former un système multi-agents (Drogoul 1993). L'agent communique avec son environnement via ses comportements pour atteindre l'objectif que le concepteur lui a tracé, tout comportement est régi par des règles et des contraintes. Dans la littérature, une définition unique et universelle de « l'agent » n'existe pas, vu qu'elle est liée au contexte et à la nature de l'application.

C'est en intelligence artificielle distribuée que le paradigme agent a fait ses premiers pas. Bien que, le terme « agent » a été consacré à l'étude des comportements sociaux d'être vivant, aujourd'hui il est très sollicité dans des champs d'application plus larges et variés, allant jusqu'à l'ingénierie de logiciels. En informatique, l'agent est vu comme une entité autonome programmée pour accomplir des tâches, soit individuellement, soit de manière collective, *i.e.*, coopérer et collaborer avec d'autres agents, d'où l'importance des systèmes multi-agents (SMA). Ces systèmes sont le confluent de plusieurs domaines : le génie logiciel (programmation), l'intelligence artificielle (l'aspect décisionnel de l'agent) et l'intelligence

artificielle distribuée (l'aspect collectif de l'agent, décentralisation de décision, systèmes répartis, …).

Un point très important est la différence entre le concept « agent » et le concept « objet ». Un objet, contrairement à un agent, est une entité passive non automne qui devient actif suite à l'invocation d'une de ses méthodes. En plus, il n'est pas capable de raisonner ni d'avoir une liberté d'action. Toutefois, la définition récente d'un objet le considère presque comme un agent réactif. Aujourd'hui, un objet peut analyser des demandes, prendre des décisions ou communiquer avec le monde extérieur. En revanche, même si on peut croire qu'un objet réactif et un agent ont des propriétés en commun, dans l'esprit scientifique, l'agent est de nature sociable alors que l'objet travaille en solitaire sans aucune perception de son environnement.

3.2. Définitions et types

Un agent est vu sous différents angles, dans le monde d'espionnage il désigne « un individu au service d'un État qui collecte des renseignements et des informations classifiées comme secrètes », en commerce il est défini comme « la personne agissant pour le compte d'une société auprès des clients », en informatique un agent peut être une entité artificielle aussi bien que physique. De ce fait, il est extrêmement difficile de définir le terme « agent » sans préciser le contexte.

Les chercheurs en informatique ont proposé une panoplie de définitions, mais celles des auteurs Wooldridge et Jennings (Wooldridge and Jennings 1995), et Ferber (Ferber 1995) sont les plus courantes dans la communauté scientifique francophone (Tounsi 2009). Selon les deux premiers auteurs, un agent dénote toute entité qui possède les propriétés suivantes :

- autonomie : un agent est capable d'opérer sans intervention directe d'un tiers (humains, autres agents, …), et il a une certaine liberté sur ses actions, ses choix, …, en plus d'avoir un contrôle sur son état interne (soi-même).

- capacité sociale : l'agent communique avec d'autres agents ou être vivants via des messages textuels ou vocaux, en bref, un langage de communication avec des règles bien définies.

- réactivité : l'agent perçoit son environnement grâce à ses comportements (capacité sensorielle), et réagit en un temps acceptable aux changements et aux évènements effectués dans celui-ci ou produits par d'autres agents.

- proactivité : l'agent n'est pas simplement réactif (réagir aux actions provoquées par son environnement), mais il est doté de comportements pour prendre des initiatives et atteindre ses objectifs.

Pour Ferber (Ferber 1995), un agent est une entité réelle (physique) ou virtuelle (logiciel) qui :

- « *agit dans un environnement,*

- *communique directement avec d'autres agents,*
- *est mue par un ensemble de tendances,*
- *possède des ressources propres et/ou collectives,*
- *est capable de percevoir son environnement, mais de manière limitée,*
- *ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune),*
- *possède des compétences et offre des services,*
- *peut éventuellement se reproduire,*
- *possède un comportement, tend à satisfaire ses objectifs en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit ».*

Les comportements sont un ensemble d'actions-réactions qu'un agent peut exécuter séquentiellement ou simultanément (Figure II.5). Ils lui permettent d'agir dans son environnement, de le modifier localement et de collecter des informations. En ce qui concerne la perception, elle aide l'agent à découvrir son entourage et à apercevoir les changements qui se produisent dans son environnement afin d'adapter son état interne. Quant à L'apprentissage

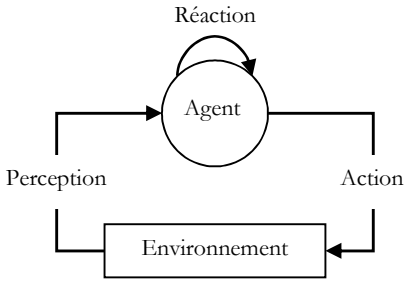


Figure II.5 Agent (source : (Siebert 2011))

et la prise de décisions sont deux modules pour acquérir de nouvelles compétences et pour choisir les bonnes actions à effectuer.

En dehors des définitions, la modélisation des agents au niveau la littérature scientifique ne prend pas systématiquement en compte la représentation théorique de l'agent, c'est-à-dire les propriétés qu'un agent doit posséder. Il existe des agents intelligents, dit « agents cognitifs », qui peuvent apprendre de leurs actions passées pour planifier leurs actions futures en fonction de leurs croyances. D'autres agents, se limitent seulement à des capacités de réaction simples, *i.e.*, *si situation alors action*. Le degré d'intelligence de l'agent est un sujet qui alimente les débats entre les chercheurs, vu que certains d'eux pensent qu'un « agent intelligent » n'est qu'un agent muni de capacités de réaction avancées. Les agents sont classifiés en trois types :

- Agent réactif : un agent doté d'un comportement simple régi par le principe *stimulus/réaction,* c'est-à-dire, qu'il ne réagit que si son environnement a effectué

une action. Il ne dispose que d'un raisonnement à bas niveau d'intelligence avec une base de connaissance limitée, en outre, il n'a aucune représentation (ou partielle) de son environnement. Ses actions sont représentées sous forme d'arborescence, ex : *si, sinon si, sinon si, ….* Il ne tient pas compte ni des actions passées ni des conséquences de ses actes. Cet agent simple d'esprit avec un comportement de type réflexe peut communiquer, coordonner et collaborer avec d'autres agents pour mener à bien des tâches individuelles ou coopératives.

- Agent cognitif : un agent qui, en plus d'être interactif, il est capable de raisonner de façon plus intelligente. Il est équipé d'une base très riche en connaissances et d'une représentation explicite de son environnement, ces deux atouts lui servent pour évaluer ses actions et pour prédire approximativement les évènements qui auront lieu dans un futur proche. Cet agent est conçu pour résoudre par lui-même certains problèmes et d'en tirer un savoir-faire pour enrichir sa base de connaissances. Le développement d'un agent cognitif est basé sur l'architecture BDI (*Belief-Desire-Intention*) de Bratman et al. (Bratman et al. 1988):
  - *Belief* : les croyances de l'agent sur lui-même, l'environnement (monde extérieur) et son entourage (les autres agents).
  - *Desire* : fait référence aux buts et aux motivations de l'agent.
  - *Intention* : représente les plans de l'agent.
- Agent hybride : un agent qui se situe entre l'agent réactif et l'agent cognitif, *i.e.*, un mélange entre le comportement réactif et le comportement cognitif.

3.3. Spécification et organisation

Dans son livre intitulé « *Les Systèmes multi-agents : vers une intelligence collective* » Ferber a suggéré une définition des systèmes multi-agents, qui est actuellement très répondue au milieu scientifique, plus spécifiquement au milieu francophone. De ce fait, dans cette thèse, nous considérons qu'un système multi-agents est un système constitué de :

- « *Un ensemble O d'éléments plongés dans un environnement E. E est un espace (spatiotemporel) ayant une métrique. Pour tout élément de O une position dans E peut lui être associée.*
- *Un ensemble d'agents A avec* $A \subseteq O$.
- *Un ensemble de relations R qui unissent des éléments (et donc des agents) entre eux.*
- *Un ensemble Op d'opérations permettant aux agents de A de percevoir, manipuler, produire, consommer et transformer des éléments de O.*
- *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* ».

Un système multi-agents est donc un système distribué, robuste et évolutif, constitué d'un ou de plusieurs organisations contenant des agents en interaction (un agent peut appartenir à

plusieurs organisations). Par nature, il offre une description structurée à deux niveaux (niveau individuel et niveau collectif), permettant une meilleure compréhension du comportement du système complexe. Selon Ferber (Ferber 1995, pp. 54-56), la création d'un système multi-agents passe par cinq étapes :

- Définir les états : quelles sont les propriétés (buts, rôles, connaissances, …) des agents et de l'environnement (noter que la conception de l'environnement précède celle des agents), comment chaque agent aperçoit l'environnement, quelle est la relation entre l'état interne et les perceptions externes de l'agent.

- Définir les actions : comment un agent peut-il agir, de quelle manière les agents synchronisent leurs interactions, de quelle façon l'environnement peut réagir vis-à-vis aux actions des agents, et vice-versa, quelles sont les tâches de chaque agent.

- Définir le contrôle : comment un agent peut-il apprendre, comment un agent raisonne, comment les agents s'organisent, comment les agents partagent les ressources en commun de l'environnement, comment le système multi-agents s'adapte au niveau individuel et collectif.

- Définir les relations : quelle est la hiérarchie du système, quelle est la nature des relations entre agents ou groupes d'agents (sous-système), par exemple, maître/esclave, collaboration, coopération, négociation.

- Définir les communications : quels types de messages les agents échangent entre eux, quelle est la syntaxe de chaque type, dans quel langage le message est codé, quel support est utilisé pour l'envoi de message.

L'environnement est un élément essentiel lors de la spécification d'un système multi-agents. C'est lui le médium des interactions entre les agents (Siebert 2011). Il a son propre état qui se modifie selon les actions produites par les agents qui y sont plongés, en outre, il possède un comportement pour réagir à ses actions. La définition de l'environnement repose sur quatre points (Russell and Norvig 1995) :

- Accessibilité : concerne la disponibilité des informations concernant l'état de l'environnement, est-ce que l'agent a le droit d'accéder à toutes informations ou juste une partie ?

- Déterminisme : une action exécutée peut provoquer plusieurs effets ou bien elle n'a qu'un seul effet.

- Dynamisme : dynamique (peut modifier son état interne indépendamment des agents) ou statique (son état change seulement quand un agent exécute une action).

- Continuité : un environnement est considéré comme discret si les perceptions et les actions sont un ensemble fini, inversement il est continu.

Pour mettre en place les éléments composant un système multi-agents, les développeurs utilisent généralement des plateformes orientées agent. Ces plateformes de programmation sont équipées de fonctions de base pour la spécification des agents et de l'environnement. Elles facilitent et réduisent le temps de développement des simulations aussi que les applications à base d'agents. De nombreuses plateformes existent sur le marché, parmi eux (pour d'autres plateformes le lecteur est prié de se référer à ("Système multi-agents", Wikipédia 2017)) :

- JADE (*Java Agent DEvelopment framework*) (Bellifemine et al. 2005) : est une plateforme basée sur Java et JADEX est une extension de JADE compatible avec l'architecture BDI (*Belief-Desire-Intention*).
- MadKit (*Multi-agents Developement kit*) (Gutknecht and Ferber 2000) : également, développée en Java comme JADE, mais elle propose une extension appelée « *TurtleKit* » pour la conception des simulations.
- CORMAS (*COmmon Resources Multi-agents System*) : est une plateforme de développement de systèmes multi-agents basée sur le langage de programmation orientée objet *SmallTalk*.
- Janus : est une plateforme pour le développement des simulations multi-niveaux.
- GAMA : est une plateforme proposant un environnement de modélisation à base d'agents spatialement explicite.
- Netlogo : est un environnement de modélisation et de programmation de systèmes multi-agents.

3.4. Interactions

Pour arriver à ses fins, l'agent a besoin d'interagir avec son environnement et les autres agents, c'est une capacité innée chez l'agent. En d'autres termes, un agent sans interaction n'est qu'une entité isolée dépourvue de caractéristiques adaptatives (Ferber 1995), ou simplement un objet doté de méthodes de traitement de données d'informations, etc. Une interaction est un mécanisme qui lie au moins deux agents. Dans la littérature, il existe plusieurs formes d'interaction, à savoir, la communication, la coordination, la coopération, la collaboration, la négociation et la compétition.

La communication : est le fait de transmettre des informations à autrui en vue d'établir une liaison. L'agent peut communiquer de façon directe ou indirecte. La méthode directe est la plus simple, elle consiste à envoyer un message via un support à un agent (*mode point à point*) ou plusieurs agents (*mode diffusion*). Le message doit être écrit selon un formalisme bien défini « langage de communication » et suivant une ontologie pour qu'il soit compris et ensuite interprété par le ou les destinataires. Le langage de communication est la manière dans laquelle le message est structuré (l'aspect syntaxe du message). De nos jours, KQML (*Knowledge Query and Manipulation Language*) et FIPA-ACL (*FIPA Agent Communication Language*) sont les deux langages les plus utilisés. Quant à l'ontologie, elle sert à définir les termes de base

employés par les agents (l'aspect sémantique du message). La deuxième méthode de communication est basée sur des signaux ou des traces laissées par les agents (par exemple, les phéromones déposés par les agents fourmis est une communication indirecte entre eux). L'agent dépose ces informations dans l'environnement pour qu'elles puissent être accessibles à tous les agents. Une sorte de message sans destinataire particulier. Toutes les autres formes d'interactions sont fondées sur la communication.

La coordination/collaboration/coopération : est le fait de synchroniser et d'harmoniser les actions des agents pour satisfaire un objectif commun ou individuel. Un agent en coordination peut délaisser ses propres objectifs pour maintenir la cohérence et la stabilité du système (Najib 2014). En général, la coordination dans un système multi-agents est assurée par des agents de haut niveau afin d'éviter l'émergence des situations indésirables. L'intérêt de collaboration réside dans le fait qu'un agent demande de l'aide à un agent plus compétent pour dépasser un problème devant lequel le premier agent n'avait pas les moyens requis pour le résoudre.

La négociation : est le fait de communiquer pour se mettre d'accord sur un point, *i.e.*, les agents négocient pour parvenir à un arrangement. Par exemple, l'agent acheteur négocie les conditions de vente avec l'agent vendeur afin de trouver un accord. Toutefois, s'il y a plusieurs acheteurs le vendeur choisit la meilleure offre, ce qui signifie la non-satisfaction chez les autres acheteurs.

La compétition : les agents entrent en conflits pour atteindre un but individuel, accéder à une ressource ou satisfaire un besoin personnel. Dans ce contexte, les agents sont en compétitivité pour maximiser leurs bénéfices. Certaines situations de conflits se résolvent par la négociation.

3.5. Système multi-agents et les terminaux à conteneurs : intérêts et analogies

La modélisation à base d'agents en interaction est la meilleure façon qui soit, pour mettre en évidence la dynamique et les niveaux d'organisation des systèmes complexes. D'une part, elle permet de décrire le système tel qu'il est en réalité, *i.e.*, une représentation qui intègre à la fois, le niveau microscopique (l'aspect individuel) et le niveau macroscopique (l'aspect collectif), en d'autres termes un modèle multi-agents est en fait un multi-modèles (Siebert 2011). Cependant, l'aspect collectif est rarement présenté explicitement dans les travaux relatifs à la modélisation multi-agents, car le comportement collectif résulte de l'ensemble d'actes effectués au niveau microscopique. Ce qui facilite la compréhension de la relation entre le comportement du système et les comportements individuels de ses composants. D'autre part, un modèle à base d'agents est un système modulaire, flexible et robuste. En effet, retirer un composant ne doit pas mettre en échec le modèle tout entier. D'ailleurs, selon Parunak (Parunak 1999), le système multi-agents sied à merveille aux systèmes qui possèdent les cinq propriétés suivantes : modulaire, décentralisé, évolutif, stochastique et complexe.

D'un autre côté, l'envie de concevoir des systèmes intelligents décentralisés (i.e., systèmes composés d'entités autonomes ayant des capacités décisionnelles, de jugement ou d'apprentissage) caractérisés par un haut degré d'imbrication, d'interactions et des réactions acteur-acteur et acteur-environnement, a poussé les chercheurs à investir beaucoup de temps pour développer et étendre le domaine des systèmes multi-agents. De nos jours, les systèmes multi-agents s'imposent comme un outil indispensable auprès des scientifiques et des ingénieurs pour appréhender la complexité des systèmes dynamiques et distribués, pour modéliser les systèmes à plusieurs niveaux d'abstraction et pour réaliser des simulations combinées à d'autres approches. En plus, la capacité de s'adapter et de s'auto-organiser pour résoudre des problèmes face auxquels les méthodes classiques échouent, les rendent plus attractifs. Ce qui les distingue complètement des systèmes conventionnels (systèmes distribués, systèmes orientés objet, dynamique des systèmes, …) est l'autonomie, la sociabilité et l'agilité des composants. Au niveau technique, l'agent est conçu comme un enchaînement de modules (perception, action et décision) exécutés soit séquentiellement soit simultanément, où chaque module a un rôle précis (Morvan 2009). Cette architecture modulaire améliore la robustesse du système et aide les développeurs dans la tâche d'implémentation.

Les systèmes multi-agents sont particulièrement adaptés pour la modélisation et la simulation des terminaux conteneurs, car il existe une forte analogie entre ces deux systèmes. En effet, comme on a expliqué dans le premier chapitre les terminaux à conteneurs sont :

- Modulaire : les terminaux sont composés de plusieurs sous-systèmes opérationnels liés entre eux par des flux informationnels ou physiques.
- Décentralisé/décisions : la gestion et l'exécution des tâches de manutention se font à travers la coordination/collaboration/communication entre les acteurs. En plus, la prise de décisions est basée sur l'apprentissage et le raisonnement.
- Autonome : chaque acteur est autonome et il possède ses propres objectifs et ressources en plus il est capable d'exécuter des opérations sans intervention directe d'un tiers.
- Evolutif : l'état du terminal à conteneurs change constamment à l'arrivée/sortie des modes de transport de conteneurs. Aussi, il change en raison des actions et des interactions des différents acteurs.
- Interactif : les acteurs du terminal s'auto-organisent, communiquent et s'entraident.
- Complexe/stochastique : le terminal est considéré comme un système complexe avec un grand nombre d'entités en interaction et beaucoup d'incertitudes.

Dans la littérature des terminaux à conteneurs, l'agent est généralement modélisé pour assurer les rôles les plus critiques dans les modèles de simulation des opérations de manutention, parmi lesquels celui de :

- Planificateur,
- Ordonnanceur,
- Fournisseur,
- Médiateur,
- Manutentionnaire,
- Engins de manutention,
- Mode de transport.

4. Apport et conclusion

Comme l'indique le titre de cette thèse « Modélisation à base d'agent d'un Terminal à Conteneurs », notre but est de développer un système de gestion à base d'agents pour simuler les opérations d'un terminal à conteneurs, en particulier le terminal multimodal du port du Havre. Nous nous sommes donc appuyés sur deux paradigmes, le paradigme agent et le paradigme objet, pour construire notre modèle. Du fait que les terminaux à conteneurs comptent deux types d'entités : les entités autonomes (modes de transport et engins de manutention) et les entités passives (voies, quai, zones, etc.). Pour modéliser, nous avons utilisé les langages AML et UML. Nous avons employé UML, et non pas par exemple le MDA, comme un des outils de conception de notre modèle de simulation, car nous ne visons pas la génération automatique de code. En outre, la raison la plus importante qui nous a poussés à choisir l'UML est que c'est un langage avec deux points de vue (la vue dynamique et la vue statique) via lesquels on peut modéliser l'aspect individuel et collectif des systèmes complexes. En ce qui concerne AML (ou AUML), il suit la logique d'UML en ajoutant d'autres diagrammes permettant la mise en exergue de l'aspect social des entités autonomes, ce qui n'est pas le cas des autres langages agent.

Le modèle construit est une combinaison de modèles, mais le paradigme agent prédomine :

- Un modèle orienté objet pour décrire l'organisation physique du système et les entités passives,
- Un modèle à base d'agents pour les entités autonomes (leurs comportements, leurs interactions, ..) et l'aspect collectif du système, et les automates à état fini pour modéliser les états des agents,
- Un modèle mathématique pour optimiser les déplacements des portiques de manutention.

Quant à la simulation, vu que notre modèle est un modèle à bas niveau d'abstraction basé sur un système multi-agents, nous avons utilisé la simulation à base d'agent, et la simulation à événements discrets car c'est la plus adaptée pour simuler les processus et les opérations.

Comme nous avons mentionné auparavant, avant de plonger dans la conception d'un système, il faut d'abord définir les phases qui vont guider ce processus. Nous avons passé en revue plusieurs méthodologies et nous nous sommes focalisés sur les démarches qui vont nous faciliter le développement du système de simulation (modèle de simulation) de notre cas d'étude. Donc, nous avons utilisé les démarches et les bonnes pratiques que nous avons jugées adéquates au développement d'un modèle de simulation pour un terminal à conteneurs, de plus nous avons défini une nouvelle manière pour modéliser les communications et la collaboration entre les agents. Le prochain chapitre présentera les démarches que nous avons adoptées pour créer le modèle de simulation du terminal multimodal.

Dans ce chapitre, nous avons montré l'intérêt de la modélisation et la simulation, et les avantages qu'offre le paradigme agent. Les modèles sont une partie intégrante de notre quotidien, mais on fait à peine attention à eux. Toute idée a besoin d'un modèle descriptif avant de franchir le pont qui relie le monde abstrait à la réalité. On peut donc affirmer que l'idée de modéliser est innée chez l'homme.

Deuxième Partie : Contributions

"... Plus le spectacle de magie est grands plus les petites illusions passent inaperçu ... "

Don Quichotte Doflamingo, One Piece

"… All models are wrong but some are useful …"

George Edward Pelham Box, Statistics for Experimenters, 1978

Chapitre III

Modèle de simulation à base d'agent pour le terminal multimodal

Sommaire

1. Aperçu sur la démarche de modélisation 91
2. Initialisation : définition du contexte et spécification des besoins 93
2.1. Structure et contexte 93
2.1.1. Organisation physique du TMM 94
2.1.2. Définition du contexte 96
2.2. Modélisation des besoins et des objectifs 97
2.3. Modèle primitif 100
2.4. Diagramme de cas d'utilisation 100
3. Analyse de cas d'utilisation 103
3.1. Fiche descriptive 104
3.2. Diagramme d'activité 108
3.3. Modèle de simulation générale 110
4. Conception du modèle multi-agents 111
4.1. Agentification 112
4.1.1. Comportements 116
4.1.2. Messages 119
4.2. Classification du système 122
4.2.1. Sous-système de contrôle 122
4.2.2. Sous-système de représentation 124
4.3. Modèle de simulation à base d'agents 125
4.3.1. Activités terrestres 126
4.3.2. Activités fluviales 128
4.3.3. Activités de transfert 128
5. Structure du modèle exécutable 129
5.1. Package : TMMResourceModel 129
5.2. Package : TMMControllerModel 131
5.3. Package : TMMAgentsModel 131
5.4. Les événements et les *listeners* 132
6. Discussion et conclusion 133

Ce chapitre présente le modèle de simulation à base d'agents du terminal multimodal du port du Havre et la démarche de modélisation utilisée pour le construire. La première section expose brièvement cette démarche. La deuxième section présente le contexte du système étudié (TMM) et décrit les besoins de la simulation. La troisième section s'intéresse à l'analyse des cas d'utilisation et à la description des activités du système. La quatrième section se focalise sur la conception et la classification du système de gestion des opérations. La cinquième section aborde l'organisation et le packaging du modèle de simulation. La dernière section résume ce chapitre.

1. Aperçu sur la démarche de modélisation

Mettre en place un modèle à base d'agents pour simuler le déroulement des opérations d'un système caractérisé par un aspect complexe et dynamique est une tâche laborieuse, qui nécessite la définition d'une série d'étapes de modélisation. A cet effet, nous avons adopté un processus de modélisation itératif constitué d'un ensemble d'étapes arrangées en plusieurs phases (l'initialisation, l'analyse, la conception et l'implémentation, voir Figure III.1). Les différentes phases de développement sont liées par une série de diagrammes qui permet d'exprimer de façon claire les éléments et les relations formant le modèle de simulation et de le raffiner au fur et à mesure pour à la fin arriver à une élaboration complète du modèle de simulation. Ces phases sont issues de plusieurs méthodologies et bonnes pratiques dans la littérature de la modélisation des systèmes, y compris, UP (*Unified Process*), Drogoul et al. (Drogoul et al. 2003), Tropos de (Bresciani et al. 2004), ELDAMeth de (Fortino and Russo 2012) et easyABMS de (Garro and Russo 2010). D'ailleurs, le passage en avant d'une phase à l'autre, également le retour en arrière au cas où certains points nécessaires à la phase en cours n'ont pas été bien définis, permet au modèle de gagner en complexité et en détail (le modèle final est un modèle à bas niveau d'abstraction).

La première phase (initialisation) : elle consiste tout d'abord à définir le contexte et à décrire l'organisation physique du système, c'est-à-dire, mettre en évidence les entités externes en relation avec le système, les composants internes du système et les acteurs internes agissant dans le système. Ensuite, à capturer et à scinder les processus métiers, et les besoins fonctionnels et non-fonctionnels du système dans un ensemble d'unités cohérentes, *i.e.*, les cas d'utilisation. Enfin, à exprimer explicitement les relations entre ces cas d'utilisation et les acteurs qui les exécutent.

La deuxième phase (analyse) : cette phase s'articule autour de la description textuelle de chaque cas d'utilisation en exposant les différents acteurs impliqués et la suite d'actions à exécuter. Ces actions sont ensuite présentées de façon formelle via le diagramme d'activités d'UML.

La troisième phase (conception) : elle concerne l'agentification du système. En effet, chaque acteur ayant un rôle dans le système est modélisé sous forme d'un agent, qui possède des comportements en automate à états finis ou cycliques, des connaissances, des objectifs et des ressources propres ou en commun avec d'autres agents. De plus, les interactions agent-

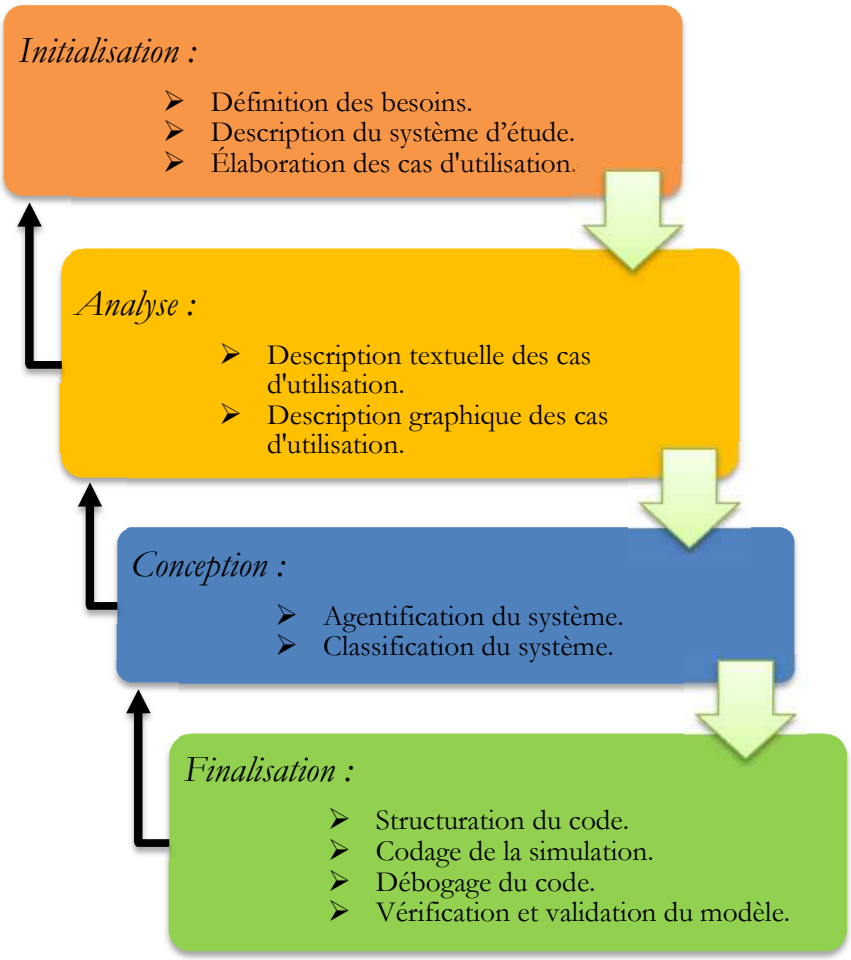


Figure III.1 Le processus de modélisation

agent et les influences agent-environnement sont aussi déterminées, tout en respectant la relation entre l'état interne et les perceptions externes de l'agent. La dernière étape dans cette phase est une structuration du système basée sur un regroupement fonctionnel cohérent. Nous avons distingué deux sous-systèmes : un système contenant les agents de contrôle et un système qui regroupe les agents représentant les équipements de manutention et les modes de transport.

La quatrième phase (finalisation) : cette dernière phase se focalise d'une part sur le packaging et le codage du modèle de simulation, et d'autre part sur la vérification et la validation pour prouver que le modèle reflète le comportement réel du système étudié.

D'un autre côté, ces phases de développement sont fondées sur deux types de diagrammes : les diagrammes statistiques et les diagrammes dynamiques. Le premier type permet de décrire le système à simuler et les buts à atteindre et aussi d'identifier les acteurs, les composants et la structure globale du système. Alors que le deuxième type se focalise sur les interactions entre les acteurs et les composants du système en mettant en évidence le comportement de chaque élément, en plus d'offrir une description à bas niveau d'abstraction. Par ailleurs, en vue d'avoir une conception cohérente du modèle avec le système réel, nous avons utilisé le paradigme agent pour les entités autonomes et le paradigme objet pour les entités passives. Ces entités sont décrites de façon formelle via les langages de modélisation UML et AML. Quant à la simulation du modèle, elle est basée sur deux approches : la

simulation à événements discrets et la simulation à base d'agents. Dans ce travail, la simulation est codée en langage JAVA sous l'outil Anylogic.

2. Initialisation : définition du contexte et spécification des besoins

Avant d'entamer l'analyse et la conception du modèle, il faut d'abord connaître le système étudié et préciser les objectifs à atteindre. Cette première phase est la base du processus de modélisation exposé dans la figure III.1. L'enjeu consiste en premier lieu à délimiter le champ d'étude et en second lieu à définir une vision approximative du produit final. En effet, au départ le modélisateur ne sait pas exactement quels aspects du système de référence va-t-il ignorer pour définir le niveau d'abstraction convenable au modèle à construire ni dans quel contexte le système évolue. Alors, il est essentiel de délimiter clairement le champ d'étude. Dans le deuxième point, il ne s'agit pas de concevoir une version exploitable du modèle, mais juste une version primitive qui donne une idée générale sur le fonctionnement du système. Notre vision du produit final est floue, car d'une part à ce stade on ne comprend pas parfaitement le fonctionnement de l'objet d'étude (on ne peut pas affirmer dès le départ que nos connaissances concernant le système de référence « le terminal multimodal » sont complètes et exactes), d'autre part, les connaissances existantes se raffinent et d'autres s'acquièrent au fur et à mesure des phases de développement enchaînées et des itérations réalisées (toutefois, il faut limiter les retours en arrière), en plus, les besoins et les objectifs sont susceptibles de changer durant ce processus. Les objectifs de cette phase sont :

- Décrire l'organisation physique du système.
- Définir le cadre du système.
- Capturer les besoins et les contraintes, et déterminer les risques.
- Identifier les cas d'utilisation et les acteurs clés.

Pour arriver à ces objectifs, nous nous sommes appuyés sur les diagrammes suivants :

- Diagramme de contexte : utilisé pour définir les frontières du terminal multimodal et les relations externes qu'on souhaite prendre en considération.
- Diagramme de classes : utilisé pour représenter les entités composant l'infrastructure du terminal multimodal et les associations qui les relient.
- Diagramme *AND/OR* : utilisé pour spécifier les besoins et liens entre eux.
- Diagramme de cas d'utilisation : utilisé pour indiquer précisément à quels besoins notre modèle de simulation devra répondre.

2.1. Structure et contexte

Cette sous-section est divisée en deux parties, la première aborde la description du terminal multimodal du port du havre, et la deuxième traite le contexte du terminal.

2.1.1. Organisation physique du TMM

Nous avons présenté une description détaillée du terminal multimodal dans le premier chapitre (section 4). Dans cette partie, nous allons l'enrichir par un diagramme de classe et par des tableaux qui exposent les composants qui n'ont pas été mentionnés explicitement. Notre cas d'étude comporte trois zones principales (rappel : le faisceau de réception, la cour ferroviaire et la cour fluviale) et une zone de stockage qui sépare les deux cours (cette zone n'est pas considérée dans la présente étude). Ces différentes zones sont liées par deux voies ferrées.

Le faisceau de réception contient (*Receive Beam*) :

- Six voies ferrées pour tous les trains de fret (train de grande ligne (TGL) et navette).
- Deux voies ferrées pour accueillir les trains de grandes lignes.
- Une voie de stationnement pour les wagons libres.
- Trois voies de stationnement pour les locomotives et locotracteurs.

La cour ferroviaire est composée de (*Rail Yard*) :

- Huit voies ferrées pour positionner des trains de fret.
- Une zone de stockage temporaire.
- Voies de mouvement pour les portiques ferroviaires.

La cour fluviale dispose de (*Fluvial Yard*) :

- Un quai qui contient deux postes d'amarrages.
- Trois voies ferrées pour positionner les navettes ferroviaires.
- Une zone de stockage temporaire.
- Voies de mouvement pour les portiques fluviaux.

A travers les lignes précédentes, les éléments de chaque zone ont été énumérés. Pour offrir une meilleure représentation, nous les avons modélisés à l'aide du diagramme de classes (Figure III.2). Les attributs et les méthodes des classes seront définis plus tard dans la cinquième section. D'après la figure III.2, on constate qu'il existe deux classes au top de la hiérarchie : « Area » et « Path », zone et chemin en anglais, respectivement, du fait que le terminal multimodal est un ensemble de zones qui contiennent plusieurs chemins. Les zones sont trois types : les zones où sont effectuées les opérations de dé/chargement de conteneurs (OperatingArea), la zone où sont réalisées les opérations de triage et de réception de trains (ReceiveBeam) et les

zones de stockages de conteneurs. Dans un terminal à conteneurs, une zone de stockages est répartie en blocs qu'on peut désigner comme des matrices tridimensionnelles, i.e., l'abscisse (x) est la ligne « Line », l'ordonné (y) est la pile « Stack » et la hauteur (z) est le niveau « Level » (voir le premier chapitre, section 3.2). En ce qui concerne les chemins, ils sont divisés en deux types : voies ferrées et voies de mouvement des portiques.

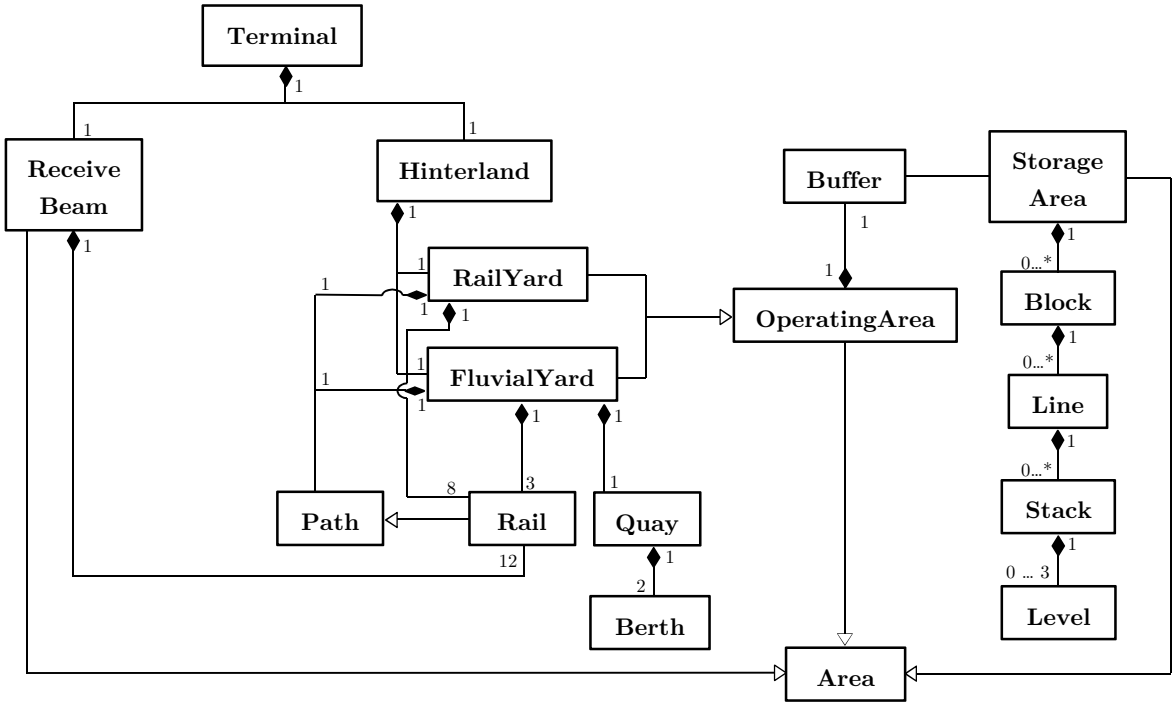


Figure III.2 Diagramme de classe - infrastructure

Chaque zone d'opérations est équipée par deux portiques enjambant toutes les voies ferrées pour effectuer les opérations de chargement et déchargement de conteneurs. Quant aux activités d'acheminement de wagons à l'intérieur du terminal, elles sont assurées par un locotracteur, tandis que le transfert de wagons vers les terminaux maritimes, et vice-versa, est le rôle des locomotives diésel. De plus, la dé/composition des trains (navettes et TGL) est assurée par des agents de manœuvres. Les tableaux suivants résument la composition du terminal multimodal.

Tableau III.1 Description du terminal multimodal

Faisceau de réception		Cour ferroviaire		Cour fluviale	
Voie ferrée électrifiée	8	Voie ferrée non-électrifiée	8	Voie ferrée non-électrifiée	3
Longueur de voie ferrée	1000 m	Longueur de voie ferrée	750 m	Longueur de voie ferrée	400 m
Voie de stationnement de wagons	1	Portique	2	Portique	2
Voie de stationnement de locomotive	3	Buffer	2	Quai	1
Locotracteur	1	Capacité	1000 EVP	Longueur de quai	400 m
Loco-diésel	2	Longueur	768,75 m	Poste d'amarrage	2
				Buffer	1
				Capacité	700 EVP
				Longueur	400 m
Le terminal multimodal		Voie ferrée entre les zones opérationnelles et le faisceau de réception			2
		Voie ferrée entre le TMM et les terminaux maritimes			2

Durée du trajet entre le TMM et les terminaux maritimes	60 min

Tableau III.2 Description des équipements utilisés dans le terminal multimodal

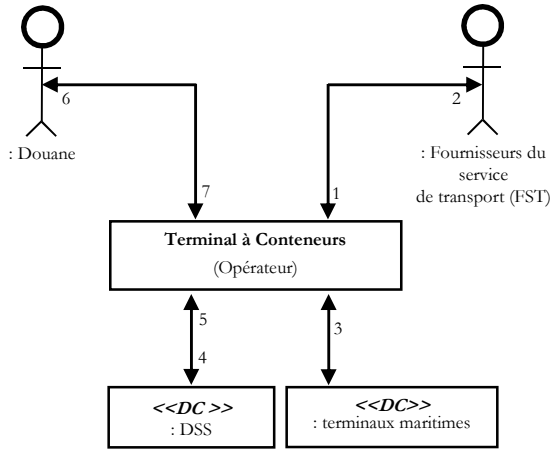
Portique		Train		Locomotive	
Vitesse	10 km/h	Vitesse	6 km/h	Vitesse	6 km/h
Temps pour récupérer ou déposer un conteneur	1 min	Longueur de wagon	20 m	Longueur	12,192 m
Distance de sécurité	24,384 m	Capacité de wagon	3 EVP		
		Longueur d'un train de grandes lignes	25 - 40 wagons		
		Longueur d'une navette	15 - 30 wagons		
		Temps de séjour maximal des navettes	90 min		
		Durée séparation/couplage de deux wagons	1 min		

2.1.2. Définition du contexte

Le diagramme de contexte est le point de départ pour comprendre le fonctionnement du cas d'étude. Il permet d'identifier l'environnement du système, de capturer les flux d'informations en amont et en aval, de déterminer les acteurs externes (ne font pas partie du système) et surtout de limiter le champ d'étude. En effet, il nous aide à répondre à la question : « *quels sont les acteurs externes et les domaines connexes avec lesquels le système est lié par un flux d'informations ?* ». A ce niveau, nous visons seulement à mettre en évidence les rôles et les responsabilités des entités externes vis-à-vis du système. Nous avons identifié deux acteurs externes : les douaniers et les fournisseurs de service de transport, et deux domaines connexes internes à l'organisme du système étudié (dans notre cas le port du Havre) : les terminaux maritimes et le système d'aide à la décision. La figure III.3 présente le diagramme de contexte.

L'opérateur du TMM prépare les opérations d'expédition et de réception de conteneurs selon les informations transmises par les fournisseurs du service de transport (fluviale et ferroviaire). Ces informations en amont du terminal décrivent en détail les conteneurs transportés (le contenu de chaque conteneur, sa date d'arrivée et de départ, ses caractéristiques, l'expéditeur, le destinataire, les modes de transport, etc.), afin de simplifier l'orientation du flux conteneurisé reçu. Parfois, certains expéditeurs formulent une fausse déclaration de conteneurs, en vue de dissimuler l'existence de marchandises illicites destinées à des activités illégales. Ainsi, pour cibler ces conteneurs à risques, un système d'aide à la décision alimente le système de gestion utilisé par l'opérateur du terminal multimodal par des Patterns (ensemble de caractéristiques partagées par les conteneurs qui peuvent contenir des matières indésirables regroupés en classes). Par la suite, les conteneurs ciblés seront acheminés vers la douane pour les inspecter. Les conteneurs saisis par la douane, c'est-à-dire, conteneurs frauduleux, enrichissent la base de données du système décisionnel par de nouveaux scénarios à risques, en conséquence, améliorer le système de ciblage. Les conteneurs exports reçus du côté hinterland sont acheminés vers les terminaux maritimes, inversement, les conteneurs imports sont déchargés des navettes puis chargés sur les modes de transport pour être évacués vers leur

destination hinterland. A la fin des opérations de réception et d'expédition de conteneurs, le terminal communique un rapport d'activités aux prestataires logistiques concernés. Ce rapport contient les plans de chargement des modes de transport, les conteneurs abandonnés (les conteneurs restants au terminal à cause d'un retard de service ou bien dû à un retard de livraison), les conteneurs inspectés, etc.



1. Informe le TC de l'arrivée du mode de transport, en fournissant la liste des conteneurs à charger ou/et à décharger.
2. Informe les FSTs de la date du départ du mode de transport.
3. Echange de conteneurs, échange d'informations.
4. Type du risque à gérer et nouveaux scénarios à risque.
5. Alimente le système par des « *Pattern* » des conteneurs frauduleux.
6. Conteneurs à inspecter.
7. Fournit des informations concernant l'état des conteneurs.

DC : Domaine Connexe
DSS : Système d'aide à la décision (Decision Support System)

Figure III.3 Diagramme de contexte

Quelques cas d'utilisation apparaissent à partir de cette vision globale sur le fonctionnement système, à titre d'exemple, « Gestion des entrées/sorties des modes de transport ». Aussi, à l'aide de ce diagramme on aperçoit, mais de façon macroscopique le côté dynamique « externe » du système. La figure III.4 donne plus de clarification sur l'environnement du système.

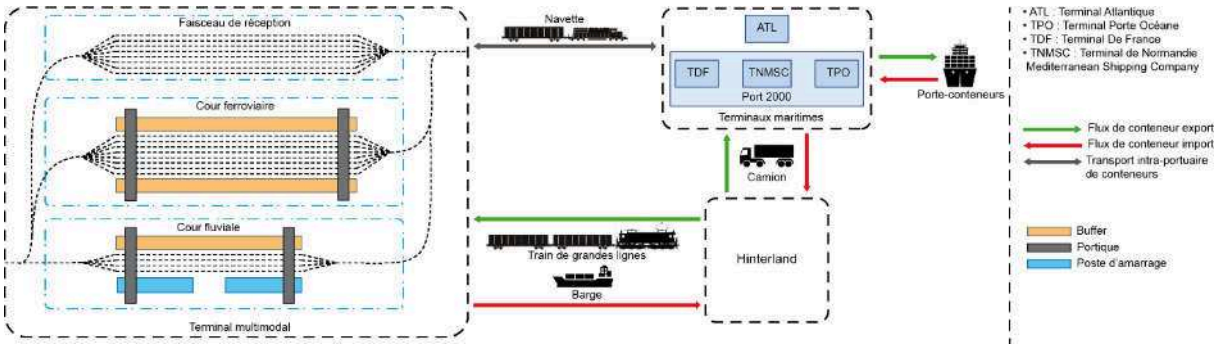


Figure III.4 Le TMM

2.2. Modélisation des besoins et des objectifs

La définition des besoins et des objectifs est la voie qui guide le processus de modélisation. A travers cette étape fondamentale, on exprime nos intentions par ordre d'importance. Quoique définir la liste des besoins et des objectifs est un exercice long et difficile qui accompagne les autres étapes de développement, puisque les points de vue et les avis peuvent changer à n'importe quel moment. Dans cette étape, nous essayons de clarifier les avantages de notre modèle de simulation, ses capacités et les problèmes à résoudre, en bref : à quelles fins le modèle de simulation sera créé ?

Le recueil des besoins a débuté par l'analyse de la littérature scientifique liée à la problématique de gestion des terminaux à conteneurs en vue d'apporter des solutions plus pertinentes et ingénieuses. Par ailleurs, les besoins peuvent être réels, par exemple, les

dirigeants du terminal veulent savoir le nombre de navettes ferroviaire à mettre en service. Concernant les objectifs, ils font référence aux aspects qui seront pris en compte, les opérations à simuler et les résultats attendus à la fin. Dans certains papiers scientifiques, les besoins sont considérés comme des objectifs (Bresciani et al. 2004) et (Cooper et al. 2006). D'ailleurs, les objectifs peuvent être décomposés en sous-objectifs, et ainsi de suite. Pour représenter les besoins et les objectifs, nous avons utilisé le diagramme AND/OR. Ce diagramme est basé sur la logique classique : ET/OU. Les liens ET (*AND-refinement links*), signifient que la satisfaction de tous les sous-objectifs situés au niveau inférieur est nécessaire pour satisfaire l'objectif principal. Tandis que, les OU (*OR-refinement links*) relient un objectif à un ensemble de sous-objectifs alternatifs, en d'autres termes, satisfaire l'un des sous-objectifs est suffisant pour satisfaire l'objectif principal. Pour plus de détail sur le diagramme AND/OR, veuillez se référer à (Cooper et al. 2006), où les auteurs présentent le méta-modèle à base duquel le diagramme est construit. Selon les spécifications fournies sur ce diagramme, nous avons exposé dans la figure III.5, les objectifs et les besoins de cette étude.

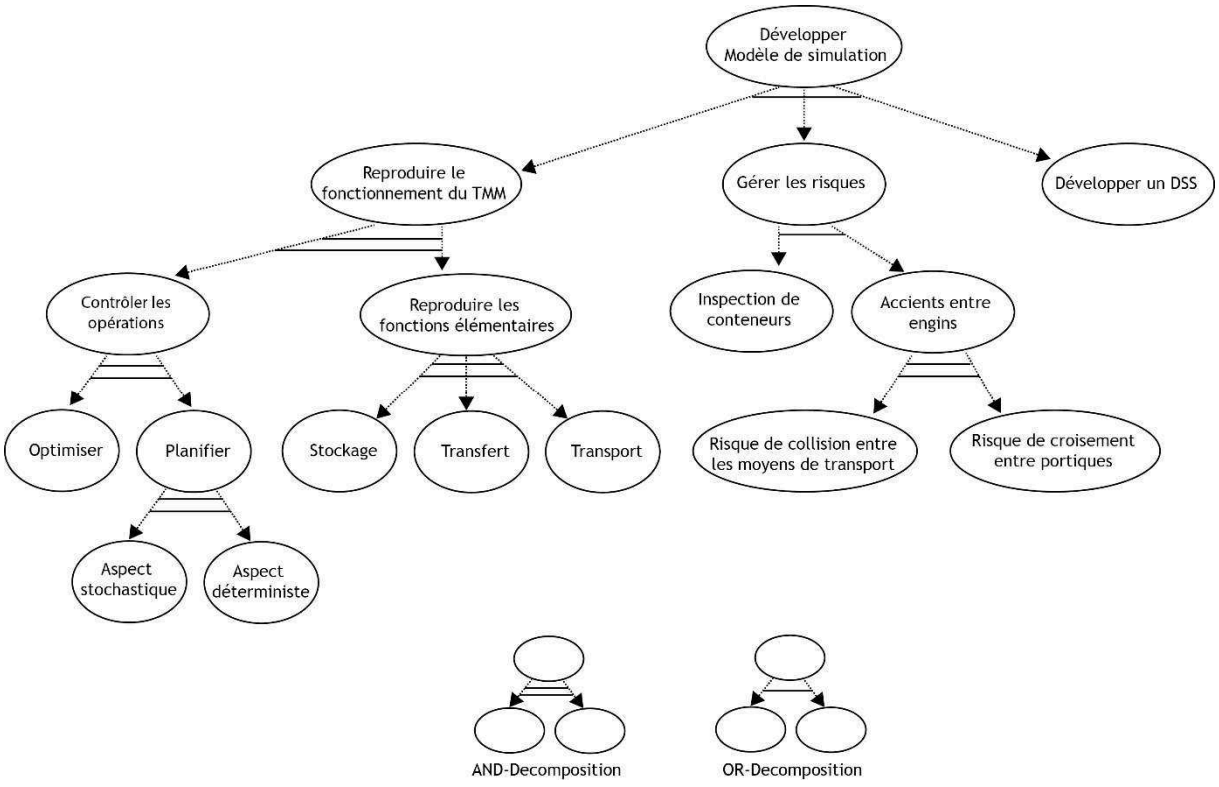


Figure III.5 Diagramme AND/OR - objectifs et besoins

Le but de cette thèse est le développement d'un système de gestion multi-agents pour simuler et améliorer les opérations du terminal multimodal. Ce système doit donc répondre à deux points importants : reproduire le fonctionnement du terminal et optimiser l'utilisation des ressources. Le premier point se focalise particulièrement sur l'ordonnancement des opérations de manutention, l'allocation de ressources, la gestion des engins mobiles et le transport de conteneurs dans le domaine portuaire. Le deuxième point concerne d'un côté, l'optimisation des déplacements des portiques ferroviaires et fluviaux, et surtout, la gestion de ces déplacements pour éviter les situations causant des temps improductifs, de l'autre côté la minimisation des allers retours vides des navettes ferroviaires.

Dans la littérature, nous avons remarqué que la plupart des travaux existants traitent seulement l'aspect déterministe du problème d'ordonnancement et d'attribution de tâches de manutention aux grues « *Crane Scheduling Problem* ». Aussi, nous n'avons pas trouvé d'articles qui se focalisent sur le problème de croisement entre les grues de manutention en utilisant les systèmes multi-agents. De ce fait, nous avons deux besoins : fournir une solution qui traite l'aspect stochastique du problème « *Crane Scheduling Problem* » et proposer une méthode à base d'agents pour le second problème.

L'évaluation de l'impact de l'inspection de conteneurs sur la performance du terminal et le développement d'un outil d'aide à la décision sont deux travaux que nous n'avons pas encore terminés (ils ne seront pas exposés dans ce document). Les objectifs fixés pour cette étude sont organisés par ordre d'importance comme suit :

- Reproduire le fonctionnement du TMM :
  - Reproduire les fonctions élémentaires :
    - Stockage de conteneurs.
    - Transfert de conteneurs.
    - Transport de conteneurs.
  - Contrôler les opérations de manutention :
    - Planification des opérations :
      - L'aspect déterministe.
      - L'aspect stochastique.
    - Optimisation des opérations.
- Gérer les risques :
  - Risques liés aux mouvements des engins :
    - Risque de croisement entre portiques.
    - Risque d'interférence entre les moyens de transport de conteneurs.
  - Inspection de conteneurs à risque.
- Développer un outil d'aide à la décision.

2.3. Modèle primitif

A travers ce modèle, nous exprimons l'image préliminaire qu'on avait à l'esprit sur le produit final, *i.e.*, comment nous avons imaginé le fonctionnement du modèle de simulation ? Il s'agit donc d'une première version du modèle de simulation. Dans la littérature, il n'existe pas de diagrammes formalisés à cet effet, toutefois dans (Ottjes et al. 2007), les auteurs proposent une technique simple basée sur les fonctions élémentaires (*Transfert, Transport* et *Stacking*) pour donner une idée générale sur le déroulement des opérations au sein d'un terminal à conteneurs. Nous avons utilisé cette technique pour présenter le modèle primitif, voir la figure III.6.

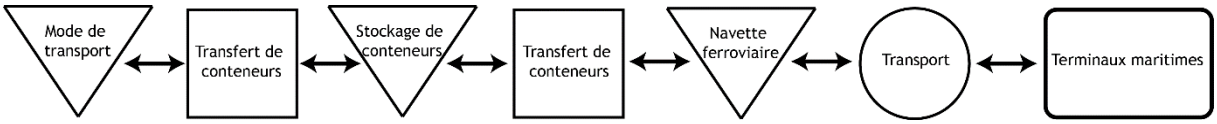


Figure III.6 Modèle primitif

Dans ce modèle nous représentons les opérations de transfert (chargement/déchargement) par un rectangle, les opérations de stockage par un triangle et les opérations de transport par un cercle. Les modes de transport sont modélisés eux aussi par un triangle, car on les considère comme un vecteur de stockage de conteneurs. Au niveau du terminal multimodal, les conteneurs arrivent par un mode de transport terrestre ou fluvial pour ensuite être acheminés aux terminaux maritimes par une navette ferroviaire, et vice-versa.

2.4. Diagramme de cas d'utilisation

L'élaboration de ce diagramme est basée premièrement sur l'identification des acteurs (équipements de manutention, modes de transport, autres acteurs), et deuxièmement sur la définition des principaux objectifs et besoins de la simulation, et des processus métiers du système étudié. En effet, à travers l'étape « *structure et contexte* », nous avons mis en avant les entités qui interagissent avec le système et les acteurs qui y agissent, tandis que l'étape « *modélisation des besoins et des objectifs* » nous a permis de spécifier les fonctionnalités et les contraintes qui constitueront le cœur de notre modèle. Cependant, les relations qui existent entre ces éléments ne sont pas encore identifiées. Le diagramme de cas d'utilisation permet de définir explicitement ces relations, en plus des interdépendances entre les fonctionnalités et aussi entre les rôles des acteurs. La figure III.7 illustre le diagramme de cas d'utilisation qui indique de manière générale le comportement de notre modèle.

En modélisation, le cas d'utilisation est l'élément pivot du développement des systèmes via lequel les objectifs et les besoins sont détaillés, raffinés et organisés. Un cas d'utilisation peut contenir des sous cas, où chaque sous cas peut être associé à un ou plusieurs acteurs. En d'autres termes, les acteurs peuvent coopérer ou/et collaborer pour gérer une fonctionnalité du modèle de simulation. Il existe deux relations stéréotypées entre cas d'utilisation : les relations « *include* » et les relations « *extends* ».

Dans l'inclusion « *include* », l'exécution du cas d'utilisation source (départ de la flèche) implique obligatoirement l'autre cas d'utilisation, dit cas interne. Nous avons spécifié une

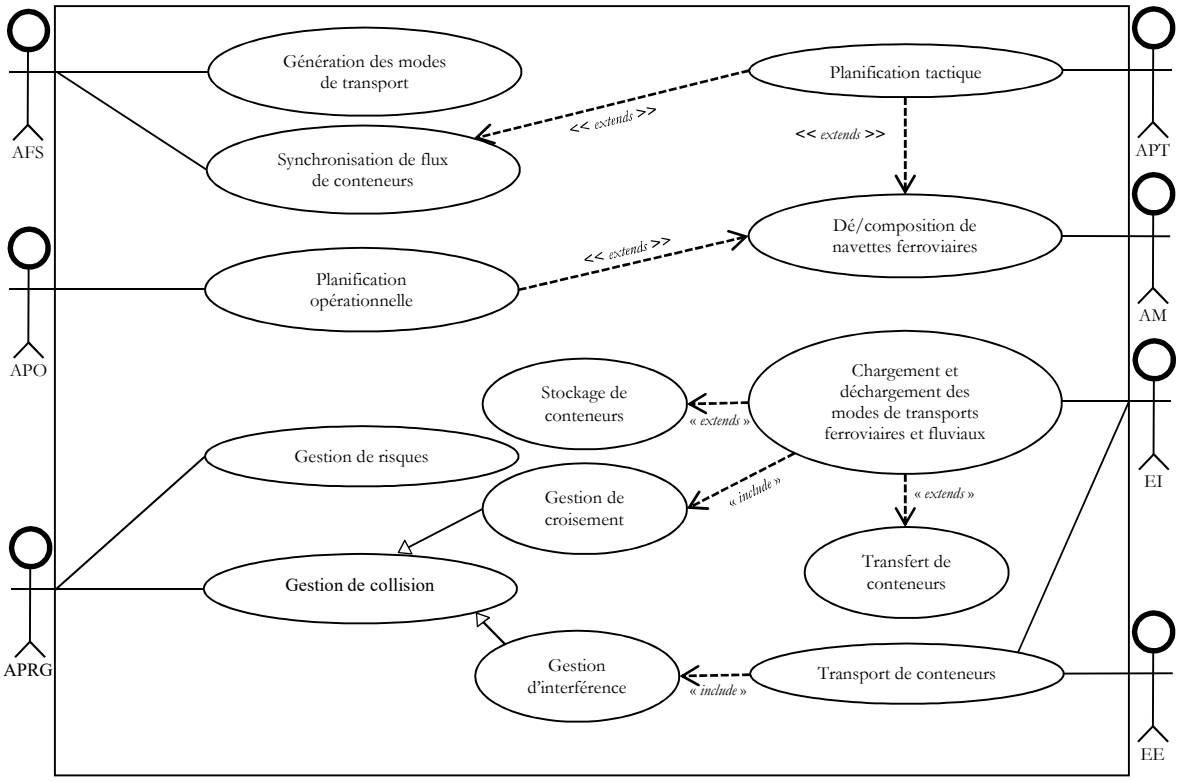


Figure III.7 Diagramme de cas d'utilisation globale

relation « *include* » entre « *Chargement et déchargement des modes de transports* » et « *Gestion de croisement* », car une contrainte de non-croisement spatiale (distance de sécurité) régit les déplacements des portiques lors des opérations de manutention de conteneurs. Egalement, pour assurer un transport sécurisé de conteneurs à l'intérieur du terminal, la voie qui lie le faisceau de réception aux zones opérationnelle est utilisée par un seul train à un moment donné pour éviter les interférences (les autres trains doivent attendre la libération de la voie).

Quant à l'extension « *extends* », elle indique que l'exécution du cas source peut éventuellement entraîner l'exécution de l'autre cas. Pour charger ou décharger un conteneur, on peut soit transférer directement le conteneur d'un mode vers l'autre, soit le stocker dans un buffer en attendant l'arrivée de son mode de transport de sortie (relation « *extends* »). Aussi, le processus de dé/composition d'une navette reçoit deux relations « *extends* », car il est ordonné (ou planifié) soit par l'agent APO soit par l'agent APT. Pour le cas d'utilisation « *Synchronisation de flux de conteneurs entrant/sortant* », c'est un processus géré par l'agent AFS en coopération avec l'agent APT.

La relation liant les cas « *Gestion de croisement* » et « *Gestion d'interférence* » à « *Gestion de collision* » est une relation d'héritage, qui signifie que le composant source (acteur ou cas d'utilisation) hérite le comportement et de tout ce qui caractérise le composant cible.

Les acteurs qui apparaissent dans le digramme sont :

- AFS : Agent Fournisseur de Services de transport.

- APT : Agent Planificateur Tactique.
- APO : Agent Planificateur Opérationnel.
- APRG : Agent Planificateur temps Réel et Gestion de risque.
- AM : Agent de Manœuvre.
- EI : Equipement Interne : les portiques, les locomotives et les navettes.
- EE : Equipement Externe : les TGL et les barges.

Le tableau suivant expose tous les cas et sous cas d'utilisation identifiés dans ce travail.

Tableau III.3 Tous les cas d'utilisation (et sous cas)

Planification opérationnelle	Gestion des entrées/sorties des modes de transport	Opérations de réception : d'un TGL, d'une barge ou d'une navette. Opérations de départ : d'un TGL, d'une barge ou d'une navette.
	Allocation/gestion de ressources	Allocation de voies ferrées : au faisceau de réception, à la cour ferroviaire ou à la cour fluviale. Positionnement de wagons : au faisceau de réception, à la cour ferroviaire ou à la cour fluviale. Allocation de postes d'amarrage aux barges. Allocation des unités de traction : locotracteur ou loco-diésel.
	Planification des opérations de manutention	Planification de dé/chargement des TGL. Planification de dé/chargement des barges. Planification de dé/chargement des navettes.
	Ordonnancement des opérations de manutention.	
	Attribution des tâches de manutention aux équipements	Attribution des tâches de dé/chargement des barges aux portiques fluviaux. Attribution des tâches de dé/chargement des TGL aux portiques ferroviaires. Attribution des tâches de dé/chargement des navettes aux portiques ferroviaires ou fluviaux.
Planification tactique	Déploiement des navettes ferroviaires. Ordonnancement des opérations de transport intra-portuaire de conteneurs. Allocation des voies de liaison entre le TMM et les terminaux maritimes. Synchronisation de flux de conteneurs entrant/sortant.	
Dé/composition de navettes ferroviaires	Triage de navettes. Assemblage des wagons. Attelage de locomotives aux wagons.	
Gestion de risques	Gestion de collision	Gestion de croisement entre portiques. Gestion d'interférence entre modes de transport.
	Ciblage de conteneurs à risque. Inspection de conteneurs à risque. Gestion de la base des cas à risques.	
Transport de conteneurs	Transport intra-portuaire de conteneurs. Transport intra-terminal de conteneurs.	

	Acheminement de conteneurs à destination et en provenance du port.	
Dé/chargement des modes de transport	Dé/chargement de trains	Transfert rail-rail de conteneurs (*transfert*). Transfert buffer-rail de conteneurs (*stockage*).
	Dé/chargement de barges	Transfert rail-barge de conteneurs (*transfert*). Transfert buffer-barge de conteneurs (*stockage*).
Génération des modes de transport	Génération du flux de conteneurs entrant par TGL. Génération du flux de conteneurs sortant par TGL. Génération du flux de conteneurs entrant par barges. Génération du flux de conteneurs sortant par barges.	

L'élaboration du diagramme de cas d'utilisation est le lien vers la prochaine phase. Le but de la deuxième phase est d'analyser chaque cas d'utilisation pour aller vers un niveau d'abstraction plus bas.

3. Analyse de cas d'utilisation

La première phase est liée aux questions « qui ? » et « quoi ? » *i.e.*, « la description du système réel » et « la spéciation des besoins et des objectifs », pour réaliser les diagrammes qui nous ont permis de découvrir les principales fonctionnalités de notre système : les cas d'utilisation. Dans cette deuxième phase, nous nous intéressons au « comment ? » *i.e.*, l'ensemble des actions/scénarios qui définissent le dialogue entre les acteurs. L'objectif ici est d'avoir une vue idéale sur la dynamique interne du modèle de simulation, pour aller ensuite vers une architecture plus détaillée et complète. Pour ce faire, chaque cas d'utilisation est décrit de manière non ambiguë. Un cas d'utilisation peut avoir plusieurs scénarios possibles, car habituellement on peut emprunter divers chemins pour atteindre un objectif spécifique. Alors, il faut définir clairement la séquence d'actions de tous les scénarios, ainsi que le passage d'un scénario vers l'autre. Par ailleurs, le modèle de simulation est une suite d'actions associées à des événements déclencheurs et exécutées selon un ordre précis, aussi que l'exécution de certaines actions est soumise à des contraintes d'utilisation de ressources, par exemple, la capacité de voies ferrées. Pour garantir une représentation pertinente de ces éléments, nous utilisons deux vues. Dans la première vue, le déroulement, les conditions et les contraintes de chaque cas d'utilisation sont décrits textuellement. Cette description textuelle est ensuite exprimée de façon orthogonale dans la seconde vue. A la fin de cette phase, le modèle primitif présenté préalablement est enrichi par les résultats obtenus à l'aide de ces deux vues.

Les objectifs de la phase d'analyse sont :

- Eclaircir les dépendances entre cas d'utilisation.
- Définir une base architecturale stable du modèle.
- Approfondir la compréhension du système.

Pour arriver à ces objectifs, nous avons utilisé :

- La fiche descriptive.

- Le diagramme d'activité.

3.1. Fiche descriptive

La fiche descriptive est un outil d'analyse textuelle qui permet de structurer en volets les informations et les éléments liés de près ou de loin à un cas d'utilisation. Elle sert à raconter le déroulement des différents scénarios d'exécution, mais elle ne doit contenir aucun jargon informatique pour être parfaitement lisible au public. Elle nous a aidés d'une part à situer les cas d'utilisation en mettant en évidence les événements déclencheurs et les conditions d'arrêts des scénarios possibles, d'autre part à découvrir d'autres cas d'utilisation à partir de cas non-homogènes. En effet, durant l'élaboration des fiches descriptives, on peut se rendre compte qu'il existe des parties redondantes (qui se répètent) dans plusieurs cas d'utilisation, alors il faut les extraire pour en déduire de nouveaux cas d'utilisation plus précis et ainsi obtenir un diagramme raffiné (pour chaque nouveau cas, une itération est réalisée sur le diagramme global). La fiche descriptive est composée de plusieurs volets (appelés aussi caractéristiques) mais elle n'a pas une mise en forme standardisée. On peut utiliser donc un document, un tableau ou des notations textuelles attachées au cas d'utilisation. Dans ce travail, le choix s'est porté sur les tableaux, voir Figure III.8. Les caractéristiques énumérées dans la figure III.8 ne sont pas exhaustives ; on peut écarter ou ajouter d'autres. D'un autre côté, vu qu'on ne peut pas mettre dans ce document toutes les fiches descriptives élaborées, nous allons nous contenter donc de présenter un résumé dans les prochains paragraphes.

Identifiant : concerne le nommage et l'attribution d'un identifiant à la fiche descriptive. Normalement, l'intitulé est celui du cas d'utilisation. Quant à l'identifiant, il indique l'ordre d'exécution et le nom du package, *i.e.*, nous avons regroupé les fiches descriptives par type d'activités (packages), et dans chaque groupe elles sont triées par ordre chronologique. Par exemple, « *Réception d'une navette, I.Shuttle_Activities* », signifie que la première activité vis-à-vis des navettes qui sera exécutée est la Réception.

- *Inland_Activities* : regroupe toute activité concernant les TGL : réception, allocation de ressources, planification des opérations, manutention et départ.
- *Fluvial_Activities* : regroupe toute activité concernant les barges.
- *Shuttle_Actvities* : regroupe toute activité concernant les navettes.
- *Risk_Activities* : contient les opérations de gestion de risques, sauf « *la gestion de croisement* » et « *la gestion d'interférence* », car elles sont intégrées dans les activités de dé/chargement de conteneurs et de transport, respectivement.

Commentaire : dans ce volet, on peut mettre une description succincte du cas d'utilisation, l'objectif, des explications, des remarques, la documentation, les problèmes non résolus et/ou d'autres informations supplémentaires tel que : la date de création, de mise à jour, etc.

Identifiant	*« intitulé, ordre.package »*
Commentaire	*« description du cas d'utilisation »*
Acteur principal	*« Acteur principal »*
Acteurs secondaires	*« Liste des acteurs secondaires »*
Pré-conditions	*« Liste des prés-conditions »*
Evènements déclencheurs	*« Liste des evènements déclencheurs »*
Evènements dé-bloqueurs	*« Liste des evènements dé-bloqueurs »*
Contraintes	*« Liste des contraintes »*
Post-conditions	*« Liste des post-conditions »*
Scénario nominal	*« Début »* *« 1. Action. Acteur »* *« 2. Action. Acteur »* *« 3.A. Action. Acteur »* *« 3.B. Action. Acteur »* *« 3.B.I. Action. Acteur »* *« 3.B.II. Action. Acteur »* .... *« Fin »*
Scénarios alternatifs	*« Scénario 1 : situation causant ce branchement »* *« Début »* ..... *« Fin »* *« Scénario 2 : situation causant ce branchement »* .....
Fin	*« Liste de toutes les situations d'arrêt possibles »*

Figure III.8 Fiche descriptive

Acteur principal/Acteurs secondaires : l'acteur principal est celui qui exécute, dirige, coordonne et/ou supervise le cas d'utilisation. C'est lui le responsable du bon déroulement des actions composant le cas d'utilisation. Contrairement à l'acteur secondaire, qui ne fait que suivre les ordres de l'acteur principal ou bien il participe à l'exécution d'une action. Par exemple, l'agent de manœuvre exécute l'action « décomposer un train », qui est ordonnée par l'agent APO, dans ce cas l'agent APO est l'acteur principal tandis que l'agent de manœuvre est le secondaire. Par ailleurs, pour un cas d'utilisation, il n'y a qu'un seul acteur principal, en revanche il peut être lié à un ou plusieurs acteurs secondaires. Dans la plupart des cas, l'acteur principal est l'un des trois agents planificateurs (les fiches descriptives relatives aux opérations de planification), alors que les engins mobiles, les agents de manœuvre (il y a un agent de manœuvre dans chaque zone du terminal multimodal) et l'agent AFS ont pratiquement un rôle secondaire, sauf pour les activités de manutention/transport de conteneurs, de décomposition de train et de génération de modes de transport, respectivement. Cette distribution de rôle va nous aider dans le processus de classification du système (voir la section suivante).

Préconditions : il s'agit des conditions d'entrée qui doivent être satisfaites avant le déclenchement d'un scénario. En effet, les conditions obligatoires pour que le cas d'utilisation puisse être lancé. Par exemple, pour commencer le dé/chargement d'un TGL, l'engin de traction de ce dernier doit être dételé. Les préconditions (respectivement les post-conditions), permettent de lier les cas d'utilisation les uns aux autres, *i.e.*, comme une liste chaînée. Puisque les post-conditions d'un cas d'utilisation peuvent être les préconditions d'un autre. Toutefois, les préconditions et les événements déclenchant le cas d'utilisation ne doivent pas être confondus, le premier fait référence à l'état du système et le deuxième à une action produite par une entité. Nous avons identifié les préconditions suivantes :

- Train est au sein du terminal : pour la planification des opérations de manutention.

- Locomotive est dételée et le train est sur la voie allouée : pour les opérations sur les trains.
- Navette est triée : pour les opérations sur les navettes.
- Barge est amarrée au poste d'amarrage : pour la planification des opérations de manutention.
- Train est en mouvement : pour la gestion d'interférence.
- Portiques de manutention sont désignés : pour l'attribution des tâches et les opérations de dé/chargement de conteneurs.
- Plan de chargement est établi : pour les opérations de dé/chargement de conteneurs.
- Conteneur est déchargé : pour le ciblage, l'inspection de conteneurs et la gestion de croisement entre portiques.
- Conteneur frauduleux est détecté : pour la gestion de la base des cas à risques.
- Opérations de manutention sont terminées : pour les opérations de départ et le transport intra-portuaire de conteneurs.

Evénements déclencheurs/dé-bloqueurs : l'action ou l'acte à l'origine du démarrage ou du déblocage de l'exécution du cas d'utilisation. Par nature, un processus est provoqué par une action produite par un acteur (ou plus) ou un composant (ou plus), toutefois son exécution peut être interrompue (mis en attente), si une condition interne (tester au cours de l'exécution) n'est pas vérifiée, mais dès qu'elle est satisfaite le processus est relancé (événement dé-bloqueur). D'ailleurs, plusieurs cas d'utilisation peuvent partager le même événement déclencheur ou dé-bloqueur. Les événements seront détaillés dans la cinquième section. Dans notre système :

- Les événements déclencheurs sont : l'arrivée d'un mode de transport (au terminal multimodal ou à une de ses zones), la fin d'une opération (dès que le déchargement se termine, le chargement commence), le départ d'une navette (transfert intra-portuaire), le ciblage d'un conteneur et le début d'une nouvelle journée ouvrable (pour planifier les allers-retours des navettes).
- Les événements dé-bloqueurs sont : la libération d'une ressource ou d'un engin de traction (voie ferrée, poste d'amarrage et locotracteur), et la satisfaction d'une contrainte forte (le non-respect d'une contrainte forte bloque le processus).

Contraintes : les contraintes sont des exigences à respecter durant l'exécution du cas d'utilisation, sinon une exception est levée (événement bloqueur). Elles sont définies afin d'éviter les risques opérationnels qui peuvent émerger (croisement, interférence, etc.) ou les retards de service. Parfois, une contrainte devient obsolète pour respecter une autre plus forte.

Par exemple, pour livrer à temps les conteneurs export, on autorise la navette à dépasser le temps de séjour permis (90 minutes). Les contraintes identifiées sont :

- Utilisation de voies : une voie ferrée ne peut être occupée que par un seul train.
- Distance de sécurité : les portiques doivent toujours laisser entre eux une distance supérieure ou égale à longueur de deux piles.
- Empilage de conteneurs : un conteneur 40 pieds peut être déposé sur deux conteneurs 20 pieds, et non l'inverse.
- Favoriser les navettes.
- Durée de manutention d'un conteneur est de trois minutes au maximum.
- Durée de séjour d'une navette est de 90 minutes au maximum.
- Choisir le plus court chemin.

Post-conditions : un résultat tangible qu'on vérifie après la fin de l'exécution d'un scénario pour s'assurer qu'il s'est bien déroulé et que l'objectif a été atteint. Aussi, les post-conditions définissent l'état dans lequel le système doit être après l'arrêt du cas d'utilisation. Dans ce travail, la majorité des préconditions énumérées en haut sont des post-conditions, et pour les vérifier nous avons utilisé l'animation 3D et le fichier logs de la simulation (fichier qui enregistre l'enchaînement des processus en fonction du temps, voir le prochain chapitre, section 1.6).

Scénario nominal : c'est l'enchaînement des actions souhaitées, en d'autres termes, le scénario idéal. Le scénario est une suite logique d'instructions écrites en langage normal avec un style simple et factuel. Généralement, le texte ne doit pas contenir des tests. En plus, il n'y a pas de règles pour exprimer un scénario, alors nous avons formulé quelques recommandations en vue d'en faciliter la lecture et l'organisation :

- Le scénario commence par le mot « Début » et se termine par « Fin ».
- Les actions sont numérotées de 1 à N.
- Pour les actions qui seront exécutées en parallèle, une autre numérotation est ajoutée après la (ou les) première(s) (par exemple, de 1.A à 1.N), et ainsi de suite (comme une liste à plusieurs niveaux), voir Figure III.8.
- A la fin de chaque action (instruction), nous indiquons l'acteur qu'il l'exécute.

Scénarios alternatifs : il s'agit des scénarios liés à des situations peu probables, particulières ou exceptionnelles. Ce sont des variations du comportement normal, mais orientées vers le même objectif. Cependant, ils ne figurent pas dans toutes les fiches descriptives de notre système. Nous avons fixé deux scénarios alternatifs pour le cas « *Allocation de voies*

ferrées à une navette ». Normalement, la navette transporte à la fois des conteneurs pour les TGL et des conteneurs pour les barges, appelée navette mixte. De ce fait, elle se rend directement sur le faisceau de réception pour être distribuée sur les deux cours du terminal multimodal (*scénario nominal*). Cependant, il arrive parfois que la navette achemine seulement soit des conteneurs pour les TGL soit pour les barges. Dans ce cas, la navette se dirige directement vers la zone opérationnelle à laquelle les conteneurs sont destinés, c'est-à-dire, soit vers la cour ferroviaire (*scénario alternatif 1*), soit vers la cour fluviale (*scénario alternatif 2*).

Fin : il sert à lister toutes les situations d'arrêt possibles que ce soit des situations normales ou exceptionnelles (exception levée). Par exemple, la navette quitte le terminal dès l'expiration de son délai de séjour même s'il n'a pas reçu la totalité de ses conteneurs exports, vu que certains conteneurs qui y sont déjà chargés vont arriver en retard.

3.2. Diagramme d'activité

Décrire les actions d'un scénario par ordre chronologique à l'aide d'un texte est une représentation incomplète, car l'aspect visuel n'est pas présent. En plus, les structures de contrôle n'apparaissent pas dans le texte pour ne pas l'alourdir, or ce sont des éléments essentiels à la description des processus. Donc l'angle de vue qu'offre l'affiche descriptive est insuffisant pour apercevoir nettement le cours des actions. Pour ces raisons, nous avons utilisé le diagramme d'activité d'UML pour consolider et traduire en organigramme les descriptions textuelles. Ce diagramme comportemental nous a permis également d'améliorer cette vue en ajoutant à la représentation graphique, la synchronisation des flots d'actions ainsi que les événements dé-bloqueurs, voir Figure III.9.

Le diagramme d'activité met particulièrement l'accent sur le flot de contrôle et de traitement, pour décrire le comportement d'un composant du système, d'une fonctionnalité, d'un flux de travail, etc. Grâce à ce diagramme, nous exprimons ici les activités du système étudié selon l'image et les connaissances recueillies et construites à partir de trois sources : la documentation fournie sur le système, la littérature et la visualisation du comportement réel des terminaux à conteneurs. Une activité est un flot d'exécution modélisé par des actions (nœuds simples) reliées par des nœuds de contrôles (test, fusion, union, bifurcation, début et fin) et des arcs (appelé aussi transitions). Dans cette étude, nous considérons qu'une action est le plus petit traitement qu'un acteur puisse exécuter, par exemple : allouer une voie ferrée, atteler un engin de traction aux wagons, déplacer les wagons vers la cour fluviale, amarrer une barge, empiler un conteneur, etc. D'ailleurs, l'action peut être associée à des paramètres (vitesse, distance de sécurité, etc.) et alimentée par des données d'entrée (liste de voies, liste de conteneurs à manutentionner, etc.). De même, on peut passer des paramètres et des données d'entrée à une activité. D'un autre côté, le passage d'une action vers une autre (transition) est provoqué soit par l'arrivée d'un message (un ordre, une notification, une réponse, …), soit par un événement, soit dès que l'action source est achevée.

La figure III.9, montre un des diagrammes d'activité élaborés dans ce travail. Il représente le flot d'exécution de deux cas d'utilisation : l'allocation de voies ferrées et le positionnement

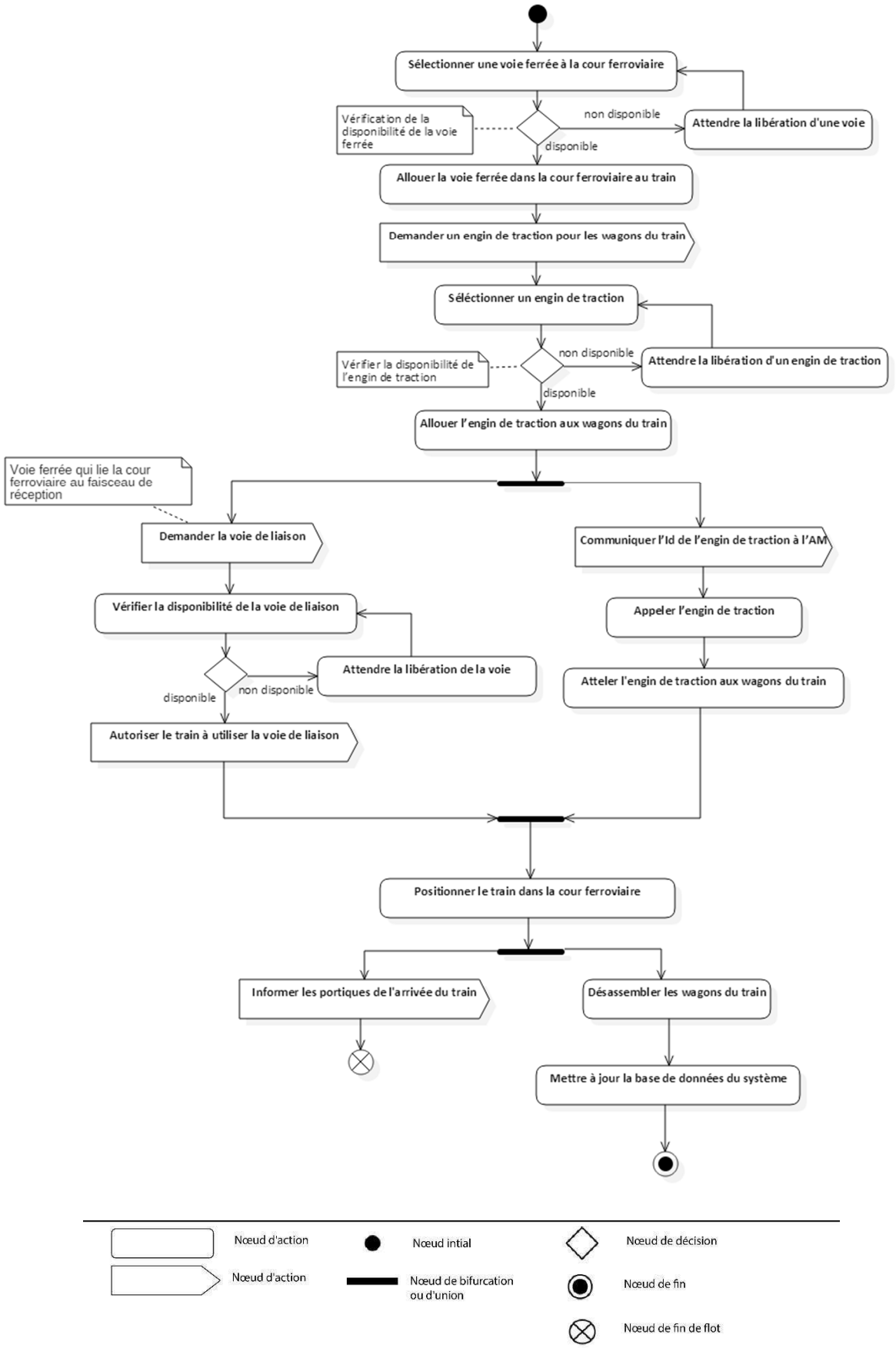


Figure III.9. Diagramme d'activité : l'allocation de voies ferrées et le positionnement de wagons sur la cour ferroviaire

de wagons des trains à la cour ferroviaire (nous allons donner un résumé des autres activités dans la prochaine section). Dans cette figure, on constate que l'enchaînement d'actions

présentés est plus intelligible. Cela permet au lecteur de mieux comprendre le déroulement du cas d'utilisation. Par ailleurs, à travers ce diagramme on peut facilement faire la différence entre les actions exécutées parallèlement et séquentiellement. De plus, contrairement à la fiche descriptive, il permet de modéliser la synchronisation des flots multiples, c'est-à-dire, pour qu'une action puisse être déclenché (positionner le train à la cour ferroviaire), il faut que toutes les actions qui précèdent s'achèvent (atteler l'engin de traction aux wagons du train et autoriser le train à utiliser la voie de liaison). Egalement, à l'aide de ce diagramme, nous arrivons à mettre en évidence les actions exécutées en boucle, par exemple, dans l'activité de dé/chargement d'un mode de transport, certaines actions sont répétées (se déplacer, ramasser, déposer, retirer et empiler) jusqu'à ce que les portiques terminent la manutention de tous les conteneurs qui figurent dans leurs plans d'opérations.

Cependant, le diagramme d'activité a quelques points faibles :

- On voit clairement le comportement du système, mais pas le comportement individuel de chaque entité ; on est dans un niveau d'abstraction macroscopique ou plutôt mésoscopique.
- Les interactions entre les entités du système ne sont pas présentées explicitement.
- Modéliser l'état des acteurs est impossible via ce diagramme.

Pour traiter ces points, nous avons utilisé d'autres diagrammes qui seront introduits dans la prochaine section.

3.3. Modèle de simulation générale

Le but de cette étape est d'exposer l'architecture de base du modèle de simulation que nous avons élaboré, voir Figure III.10. Par ailleurs, les résultats obtenus de ces deux dernières étapes nous permettent dès maintenant de créer un modèle exécutable. Cependant, nous visons la conception d'un système multi-agents pour simuler les opérations du terminal multimodal. Alors, il faut une autre étape de développement pour définir les agents, leurs comportements, les interactions entre eux, etc.

Dans la figure III.10, le séquencement des activités clés qui contrôlent le déroulement de la simulation est illustré. Ce modèle est inspiré des travaux de Dubreuil (Dubreuil 2008) qui modélise le terminal à conteneurs sous forme d'une suite de files d'attente. Dans notre modèle, une activité peut avoir une ressource à allouer et une file d'attente qui contient, au cas où cette ressource est occupée, l'ensemble des acteurs qui attendent sa libération pour l'exploiter. Après l'arrivée du moyen de transport de conteneurs au terminal, le processus de réception et d'allocation de ressource est déclenché, ce processus a pour objectif de gérer les entrées des moyens de transport et de leur assigner une position dans le terminal. Ensuite, le transporteur de conteneurs (barge, navette ou train de grande ligne), est acheminé vers sa position au sein du terminal (quai, voie ferrée), où un équipement de manutention (portique fluvial ou ferroviaire) est chargé d'exécuter les opérations demandées selon le plan établi par le

planificateur (planification, ordonnancement et attribution de tâches de manutention, et manutention de conteneurs). Une fois les opérations achevées, le moyen de transport concerné quitte le terminal. Si c'est une navette, les conteneurs sont transportés vers les terminaux maritimes, autrement ils sont transportés vers leur destination hinterland. La prochaine phase concerne l'agentification et la hiérarchisation des agents du système.

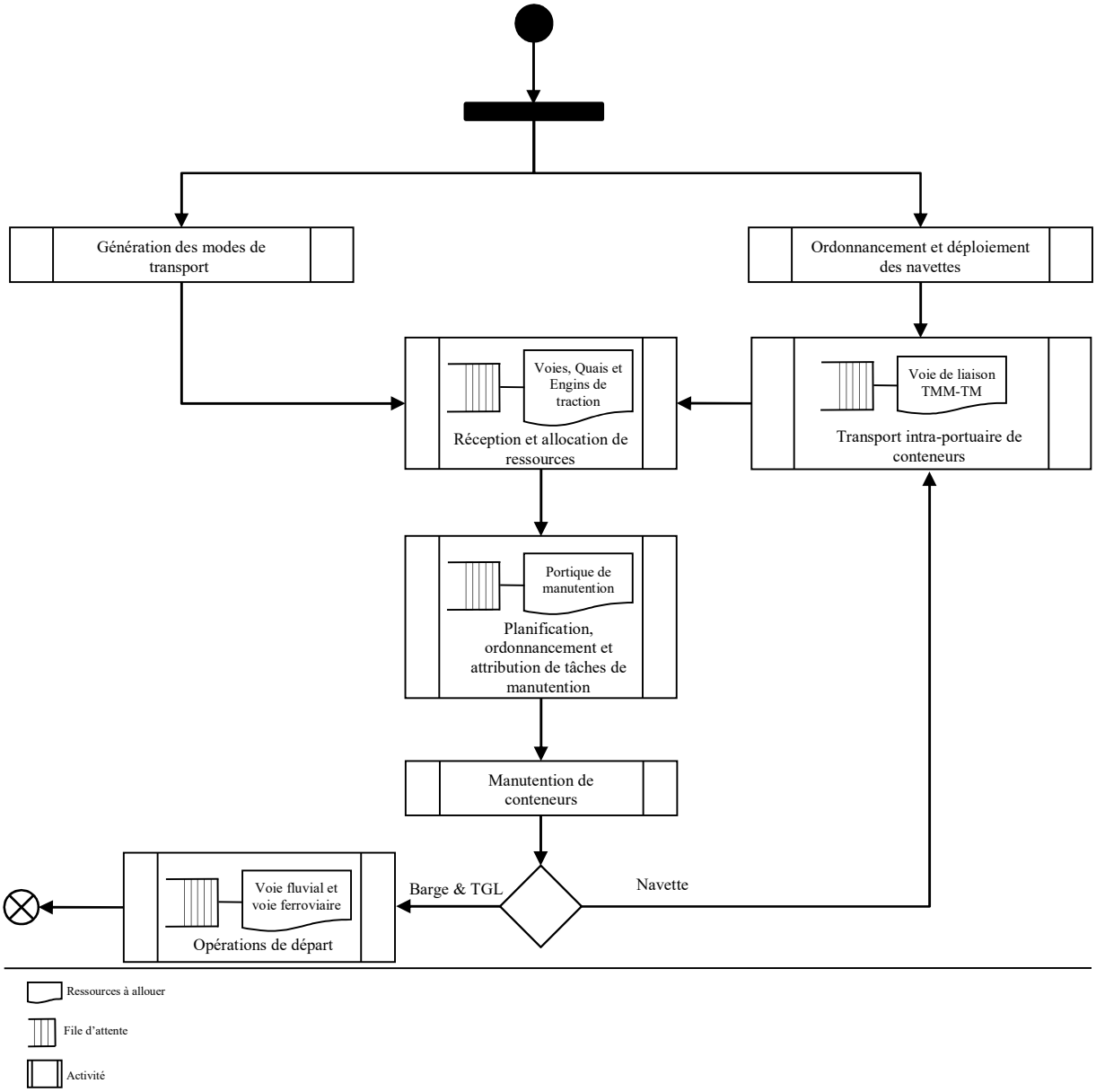


Figure III.10 Modèle de simulation générale

4. Conception du modèle multi-agents

Dans cette phase, l'idée est d'aller vers une description plus détaillée du système en termes d'agent, en d'autres mots, avoir une vision microscopique agentifiée (niveau d'abstraction faible). Dans la phase précédente, nous avons mis le point sur le comportement du système (niveau d'abstraction moyen), ici l'objectif est de définir le comportement individuel de chaque acteur ainsi que ses relations avec son entourage (les autres acteurs et l'environnement). D'ailleurs, à partir de ces relations on déduit la nature des liens et des interactions qui relient en particulier les acteurs. La représentation formelle de ces entités

autonomes est alors réalisée à l'aide de diagrammes spécifiques définis dans le langage AML (c'est-à-dire, les traduire dans le paradigme agent). En ce qui concerne les ressources, les messages et les files d'attente, elles sont considérées comme des entités passives modélisées dans le paradigme objet (voir la prochaine section). La classification est l'étape qui suit l'agentification, son but est de diviser de manière cohérente le système en sous-systèmes en se basant sur la cohésion et la compatibilité entre agents. En plus, elle permet de réduire la complexité du modèle. La dernière étape de cette phase est un raffinement/amélioration du modèle préalablement établi (voir section 3.3) avec les résultats des travaux réalisés durant les deux dernières étapes.

Pour arriver aux objectifs de cette phase, nous avons utilisé les diagrammes suivants :

- Diagramme de collaboration : utilisés pour montrer les comportements individuels, et comment les agents communiquent entre eux et dans quel ordre.
- Diagramme séquence : semblable au précèdent, à la différence que l'aspect temporel, les actions alternatives et les boucles sont présentés explicitement.
- Diagramme social : utilisé pour représenter les relations entre les agents, leurs rôles et les ressources qu'ils exploitent.
- Diagramme d'agents : semblable au diagramme de classes.

4.1. Agentification

Cette première étape concerne les entités actives formant notre système, à savoir, les acteurs réels évoluant (agent de manœuvre et matériels de manutention) ou séjournant dans le terminal multimodal (les modes de transport) et les acteurs abstraits (ne sont pas présent physiquement) ayant un rôle soit de gestion soit de planification. Chacun de ces acteurs est traduit en un agent doté de plusieurs comportements et capacités pour répondre à ses besoins (interactions, objectifs, etc.) et pour gérer ses ressources propres et/ou collectives.

Le diagramme de communication d'UML permet de décrire les interactions des entités, cependant les comportements et les états des entités ne sont pas exposés. A cet effet, nous avons défini une nouvelle représentation, voir Figures III.11 - III.15. Cette représentation est inspirée du diagramme d'analyse ECB, qui propose trois stéréotypes de modélisation : *Entity* (les données de l'application), *Control* (la cinématique de l'application) et *Boundary* (l'interface de l'application). Comme il est indiqué dans la figure III.11, nous avons gardé les deux premiers stéréotypes et nous avons changé le dernier par « *Behavior* », car les comportements sont les interfaces via lesquels l'agent interagisse et perçoit son environnement. En outre, le stéréotype *Entity* ne fait pas seulement référence aux données, mais aussi aux ressources (voies, quai, …).

Le méta-modèle qui régit l'utilisation de ces stéréotypes (*ECB-Agent*) est illustré dans la figure III.12. Le diagramme résultant de ce méta-modèle est appelé « *diagramme de collaboration agent* ». Dans ce travail les stéréotypes sont définis comme suit :

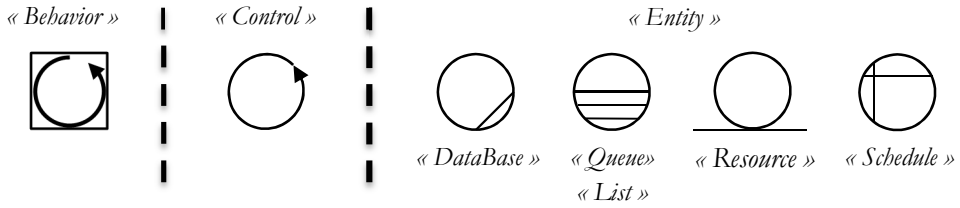


Figure III.11 Les stéréotypes ECB-agent

- *Entity* : utiliser pour représenter avec un cercle les ressources, les plans d'opérations, les files d'attente, les listes et/ou les bases de données. Chaque cercle d'un type d'entité se différencie par un motif. Les entités sont manipulées par des classes contrôle et peuvent être associées à d'autres entités. En plus, elles ne comportent que des attributs et les méthodes permettent d'accéder à ces attributs.

- *Control* : regroupe les traitements, les actions et la logique qui contrôlent les comportements de l'agent. En effet, un comportement est un ensemble d'actions/traitement exécutées selon la logique de l'agent pour manipuler une entité (*Control* est le pont qui relie le *Behavior à Entity*). De ce fait, les classes contrôles symbolisées par un arc fermé avec flèche peuvent être associées à tous les stéréotypes (y compris *Control*).

- *Behavior* : via lequel l'agent alimente les actions par des paramètres et des informations collectées. Il est seulement en association avec des classes contrôles et peut se composer de plusieurs comportements (sous-comportements). Il est représenté par un arc non fermé avec flèche, le tout encadré par un rectangle.

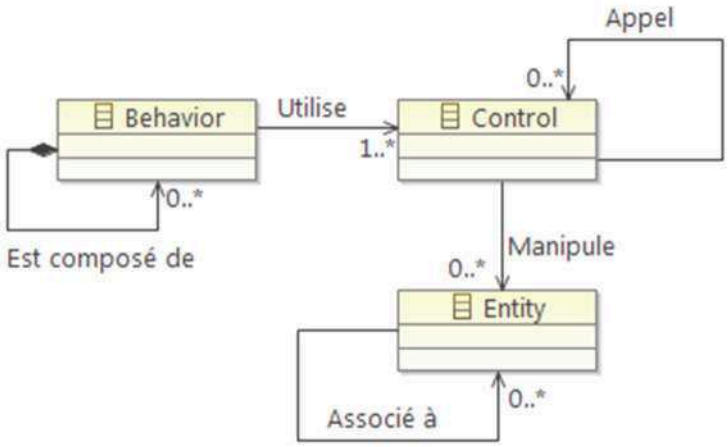


Figure III.12 Méta-modèle des stéréotypes ECB-Agent

Pour définir les comportements nous avons procédé tout d'abord à la mise en exergue des différents états, actions-réactions et transitions qui caractérisent le fonctionnement de l'agent, *i.e.*, comment l'agent est censé évoluer et interagir dans son contexte. Les interactions de l'agent sont considérées comme des actions, y compris, les communications via des messages et les communications indirectes (dans ce travail, nous avons utilisé les phéromones comme un support de communication indirecte entre portiques, ce point sera détaillé dans le prochain chapitre). Ensuite, nous avons déterminé les actions liées à chaque état, ainsi que leur ordre

d'exécution. Les actions en cours d'exécution à un moment donné par un agent permettent de connaître l'état dans lequel il est. Les transitions identifiées sont soit implicites soit explicites. Une transition implicite est le passage d'une action achevée vers une nouvelle action à l'intérieur du même état. Par exemple, le passage de l'action « *déterminer la position du conteneur* » vers « *ramasser le conteneur* », dans l'état « *déchargement* » du comportement « *manutention* » de l'agent portique, est une transition implicite. Tandis qu'une transition explicite indique un changement d'état (également de comportement), elle est déclenchée soit par un événement, soit par l'arrivée d'un message, soit par une condition (quand la condition devient vraie), soit par l'expiration d'un délai d'attente (après que la durée spécifiée est écoulée). Le changement d'état ou de comportement est géré par une classe *Control* appelée « *BehaviorController* ». En ce qui concerne les capacités, elles sont liées aux rôles et aux objectifs de chaque agent. A titre d'exemple, l'agent portique a la capacité « *détection de croisement* » pour éviter le risque de collision avec les autres portiques durant les opérations de manutention de conteneurs, aussi, les agents planificateurs (APT, APO et APRG) disposent de capacités décisionnelles pour gérer les ressources du terminal.

La Figure III.13, montre le diagramme qui décrit les interactions et la collaboration durant le processus d'allocation d'une voie ferrée (cette section expose juste comment nous avons élaboré un diagramme de collaboration/séquence agent et les résultats obtenus. Dans la dernière partie de cette section, nous allons donner un résumé des diagrammes élaborés et dans le prochain chapitre, nous exposerons un autre diagramme). Chaque agent possède une instance de la classe « *BehaviorController* ». Cette classe est essentielle pour le fonctionnement des agents de notre système, car c'est elle qui contient la définition de toutes les transitions explicites possibles. L'envoi et la réception de message est un autre point très important pour notre système. Pour l'envoi, les agents se basent sur un format uniforme pour faciliter la communication entre eux. Tout d'abord, le contenu typé (une requête, une réponse ou bien autres choses) qui indique l'objet du message est créé (demande d'une voie, voie allouée, demande de poste d'amarrage, etc.). Ensuite, l'agent utilise l'entité « *Message* » pour encapsuler le contenu en y spécifiant le type. Enfin, l'ajout de l'adresse du destinataire qui est répertoriée dans la liste « *AgentsDirectory* » (cette liste est gérée par l'agent APO). Pour ce qui est de la réception, le message est analysé pour connaître le type et le contenu, puis pour déterminer quelle action sera exécutée suite au message reçu (*BehaviorController*). A la fin de chaque activité, l'agent APO doit mettre à jour la base de données du système. Par exemple, après l'opération d'allocation de voies, l'APO doit insérer dans la base de données : l'identifiant de la voie allouée, la date et l'agent bénéficiaire, et quand il sera libéré, l'APO doit ajouter la date de libération et la durée d'exploitation de la voie.

Il existe deux comportements qui indiquent l'inactivité d'un agent : « *Staying In* » (pour les modes de transport) et « *Standing By* » (pour les autres agents). Un agent passe en inactif quand il a terminé sa tâche ou bien quand il est en attente d'un message ou d'un événement débloqueur. Dans l'exemple présenté du diagramme de collaboration, le passage d'un état vers l'autre dans le même comportement peut apparaître flou. Dans le comportement « *Sending* », il

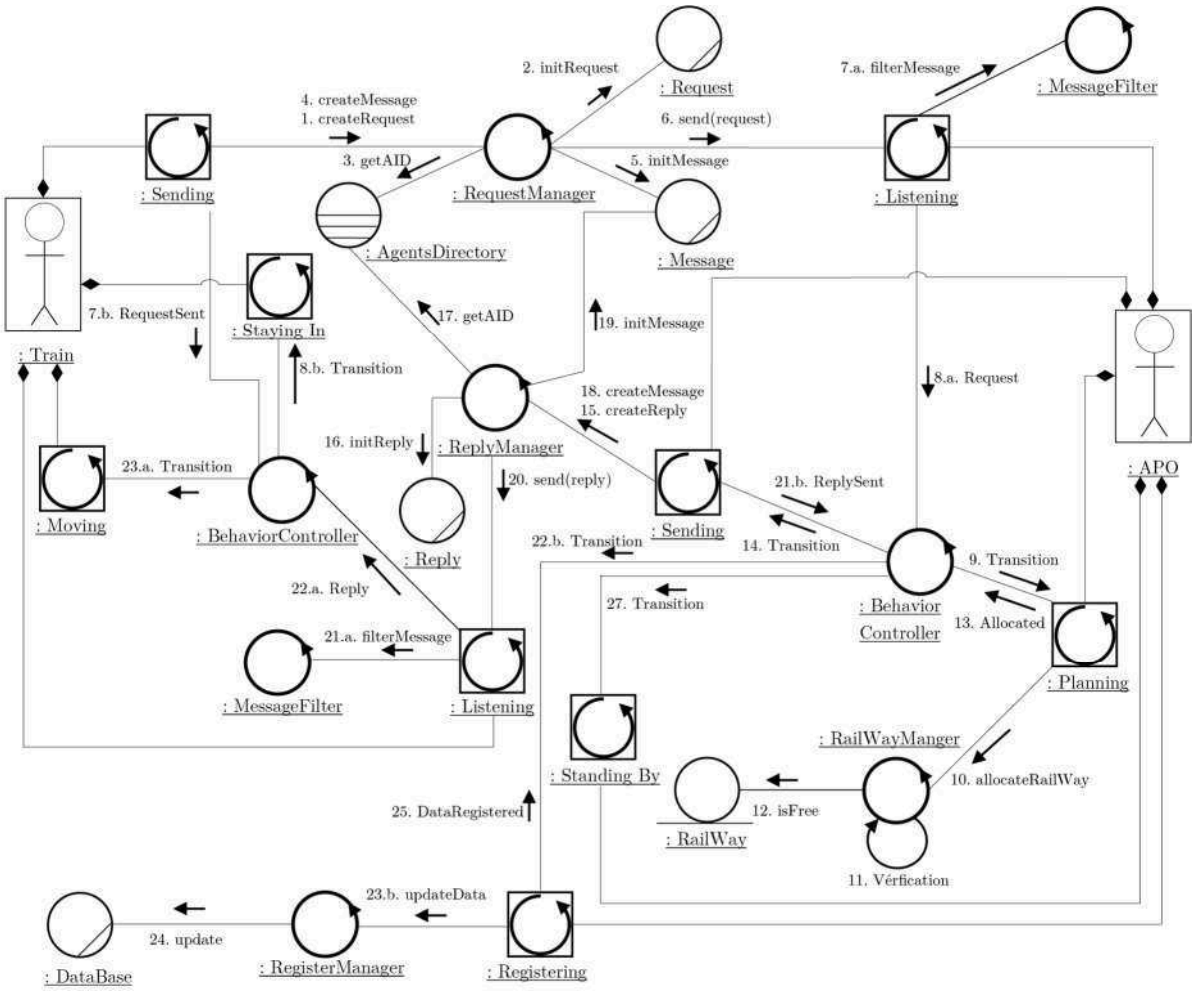


Figure III.13 Diagramme de collaboration agent : allocation de voies ferrées au train

y a deux états : état préparation de message et l'état envoie de message. Dans d'autres comportements, on peut représenter de façon plus claire ce changement d'état. Par exemple, au niveau du comportement « *Planning* » de l'agent APO (voir Figure III.13), on peut mettre l'état lié aux actions d'ordonnancement des opérations de manutention (*scheduling*), en ajoutant la classe « *HandlingManager* » à côté de la classe « *RailWayManager* », et la reliée au comportement « *Planning* », ensuite spécifier les actions qui caractérisent cette association et enfin ajouter la ou les transitions liant les deux états : *allocating* et *scheduling* (voir Figure III.14). Dans la figure III.13, nous avons représenté seulement l'état « *allocating »,* car l'objet du diagramme est l'allocation d'une ressource.

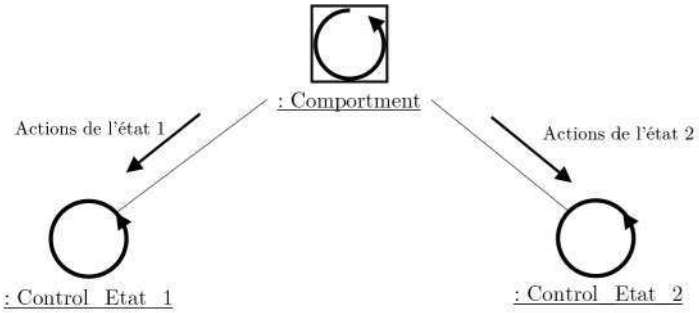


Figure III.14 Représentation de deux états d'un comportement

Par ailleurs, illustrer le déroulement d'un cas d'utilisation caractérisé par un énorme flux d'interactions et d'actions entre plusieurs agents nécessite parfois l'élaboration de deux ou trois

diagrammes de collaboration, pour assurer une bonne représentation (éviter l'encombrement, *i.e.*, trop d'informations tuent l'information). Par contre, pour certains cas, nous n'avons pas utilisé ce diagramme (nous nous sommes limités juste au diagramme d'activité), car ils sont exécutés par un seul agent, à titre d'exemple, « *Génération du flux de conteneurs* » assurée par l'agent AFS.

Comme on peut le constater, ce diagramme privilège l'organisation spatiale des agents participants à la collaboration, exhibe les différents comportements impliqués et montre l'ordre d'exécution des actions. Seulement, il a quelques points faibles :

- La notion du temps est exprimée de façon implicite à l'aide de la numérotation des actions.
- Les structures de contrôle : conditions, boucles, etc., ne peuvent pas être représentées. L'action « *verification* » dans la figure précédente, implique normalement deux cas : voie disponible et voie occupée (voir l'action « *sélectionner une voie ferrée à la cour ferroviaire* » dans le diagramme d'activité, figure III.9). Le premier cas est celui qui est représenté tandis que l'autre est absent.
- Distinguer le message et sa réponse n'est pas évident, *i.e.*, une *request* et son *reply*.
- Plus il y a de composants dans le diagramme plus la compréhension devient difficile.

Par conséquent, la vue obtenue via ce diagramme est incomplète. Pour améliorer cette vue, nous avons utilisé le diagramme de séquence en suivant la logique du méta-modèle « *ECB-agent* », voir Figure III.15. Le diagramme de séquence donne une vue orthogonale nettement plus riche où l'aspect temporel et les structures de contrôles sont naturellement présents (le deuxième cas de l'action « *verification* »). D'ailleurs, on peut aussi enrichir la description par les événements déclencheurs/dé-bloqueurs. Quand la ressource demandée est occupée, le demandeur (dans ce cas le train) est mis dans une file d'attente associée à la ressource. Une fois que l'occupant libère la ressource, un événement dé-bloqueur est déclenché pour informer l'agent APO (*railWayReleased*). Ce dernier rend la ressource à nouveau disponible au premier demandeur de la liste (réallocation).

Les deux diagrammes présentés sont nécessaires pour avoir une image complète du comportement individuel des agents et aussi du comportement du système de simulation. En effet, on ne peut pas se passer d'un diagramme ou remplacer l'un par l'autre, c'est-à-dire, que le diagramme de collaboration et de séquence sont complémentaires. Les deux sous-sections suivantes mettront le focus sur les comportements identifiés et les communications directes par messages entre les agents, respectivement.

4.1.1. Comportements

Un agent possède habituellement plusieurs comportements, où chaque comportement est dirigé vers une activité particulière qui contribue à la réalisation des objectifs de l'agent. Un

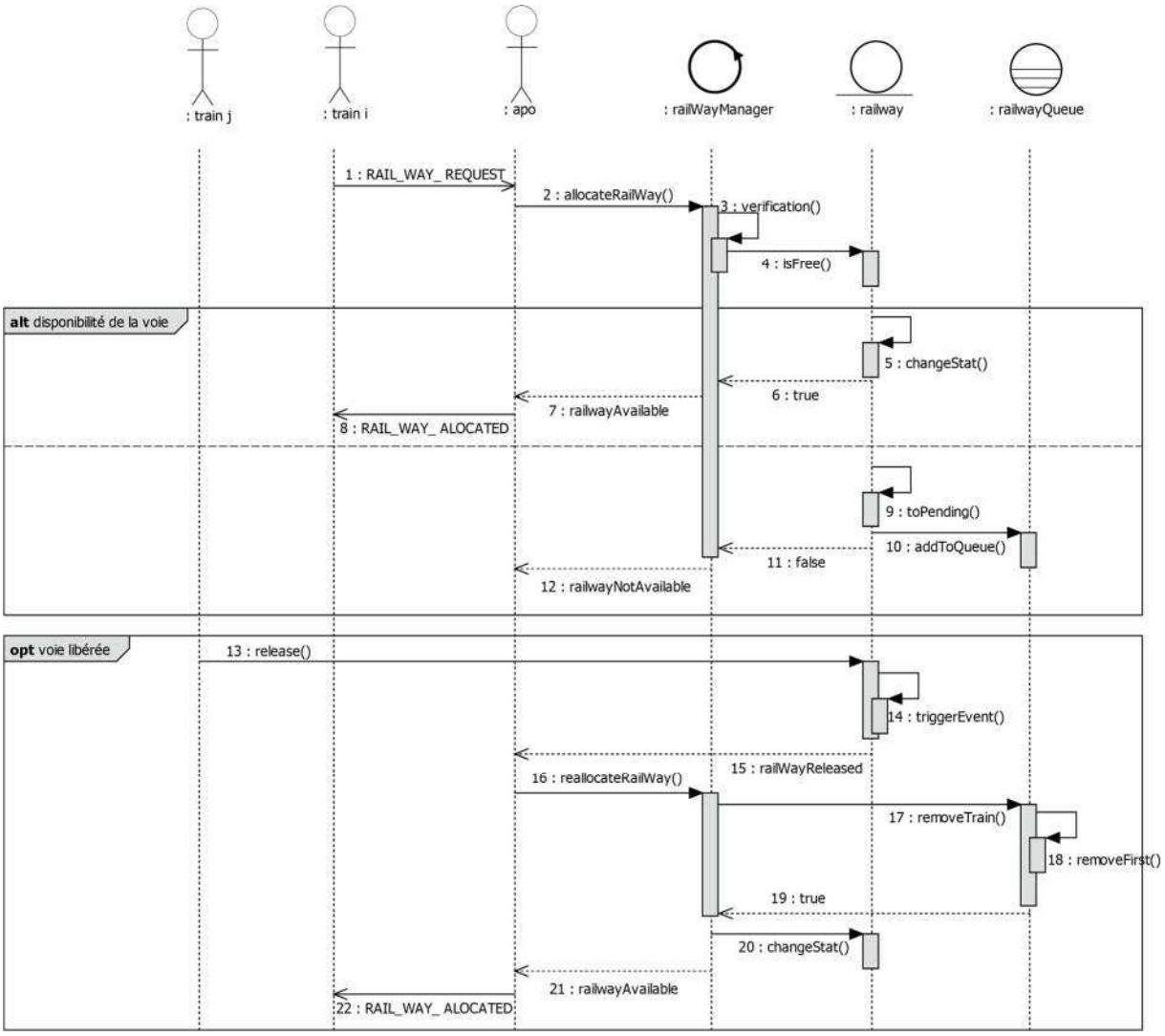


Figure III.15 Diagramme de séquence agent : allocation de voies ferrées au train

comportement est un élément continu (cyclique) ou exécuté périodiquement (automate à états finis) en réponse aux transitions déclenchées par des événements, des messages ou des conditions. La classe « *BehaviorController* » utilise ces transitions pour orienter l'agent vers son prochain comportement, également son prochain état, en d'autres termes nous avons décrit dans cette classe le processus de changement d'état de l'agent selon les transitions. Les comportements des agents de notre modèle de simulation sont :

- Ecoute (*Listening*) : réception des messages envoyés par les autres agents (tous les agents). Il est le seul comportement cyclique, car on ne sait pas à quel moment exact l'agent va recevoir un message, alors l'agent doit être toujours en écoute des messages. De plus, ce comportement est exécuté en parallèle avec l'automate à états finis qui regroupe les autres comportements (voir Figure III.16).

- Envoie (*Sending*) : émission d'un message à un ou plusieurs agents (tous les agents). Ce qui caractérise ce comportement est qu'il est lié à tous les autres comportements. Puisqu'à n'importe quel moment l'agent peut envoyer un message.

- En attente (*Staying In ou Standing By*) : en attente d'un nouveau message, la fin d'une opération ou bien un événement (tous les agents). Ce comportement est le point de stabilité de l'automate à état fini de l'agent, c'est-à-dire, que l'exécution de l'automate s'arrête pour un moment à ce comportement en plus d'être le point de relancement (déclenchement d'une transition), ce qui permet à l'automate de s'exécuter en boucle.

- Déplacement (*Moving*) : déplacement d'un point d'origine vers une destination (les agents représentant les engins mobiles). Ce comportement est soumis à une contrainte de déplacement, liée au type de l'agent. Pour l'agent portique, c'est la contrainte de non-croisement (d'interférence), et pour les modes de transport, c'est la contrainte de collision.

- Manutention (*Handling*) : pour la manipulation des agents qu'on peut qualifier d'entités passives : les conteneurs et les wagons. Ce comportement est utilisé par les portiques pour décharger et charger les modes de transport et par les agents de manœuvre pour décomposer et composer les trains. En plus, les états composant ce comportement sont exécutés en boucle jusqu'à la réalisation de la tâche confiée à l'agent. En effet, l'activité de dé/chargement et dé/composition sont un ensemble d'actions répétées.

- Planification (*Planning*) : comportement de l'agent APO, pour gérer l'arrivée et départ des modes de transport, allouer les ressources, ordonnancer les opérations de manutention de conteneurs et attribuer les ordres de manutention. Les états du comportement « *Planification* » sont rarement exécutés de façon séquentielle, car par exemple, l'activité d'allocation n'est pas nécessairement suivie par l'activité d'ordonnancement.

- Archivage (*Registring*) : il est aussi un comportement de l'agent APO, pour insérer et mettre à jour les données issues du déroulement des opérations dans la base du système. L'APO peut récolter ces données à l'aide du comportement « *Ecoute* ».

- Organisation (*Organizing*) : l'agent APT est doté de ce comportement pour organiser le transport intra-portuaire de conteneurs en évitant les allers-retours vides des navettes et aussi pour les (navettes) déployer sur les terminaux du port du Havre.

- Génération (*Generating*) : comportement utilisé par l'agent AFS pour générer les modes de transport au début de chaque journée ouvrable, par conséquent il est utilisé une seule fois par jour par l'agent AFS.

- Vérification et pilotage (*Verification et Piloting*) : comportements destinés à être utilisés par l'agent APRG pour gérer les situations à risque, mais malheureusement ils ne sont pas bien développés dans ce travail (ils entrent dans nos perspectives).

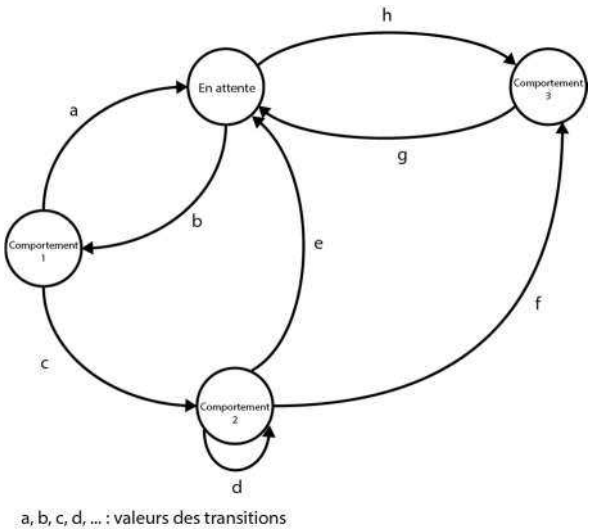


Figure III.16 Exemple d'un comportement à états finis

Le tableau suivant liste les états de chaque comportement :

Tableau III.4 Comportements et leurs états

Comportement	Etats	Comportement	Etats
Ecoute	• Réception. • Traitement.	Envoie	• Préparation. • Emission
En attente	• Blocage (*attendre un message ou un événement dé-bloqueur*). • Repos.	Archivage	• Préparation (*préparer la requête qui contient les données à insérer*). • Insertion
Déplacement	• Pré-mouvement (*vérifier des contraintes de déplacement*). • En mouvement. • Amarrage (*seulement pour la barge*)	Planification	• Préparation *(identifier les modes de transport et déterminer leurs besoins*). • Allocation. • Ordonnancement.
Organisation	• Ordonnancement (*planifier les allers-retours des navettes*). • Déploiement. • Synchronisation (*synchroniser les flux de conteneurs avec l'AFS*)	Génération	• Initialisation (*création de conteneurs*). • Création (*création des modes de transport*). • Insertion (*Introduire les modes de transport dans le modèle de simulation*)
Manutention (portique)	• Empilement (*mettre un conteneur dans un buffer*). • Dépilement (*prendre un conteneur d'un buffer*). • Chargement • Déchargement.	Manutention (agent de manœuvre)	• Assemblage (*lier les wagons les uns aux autres et puis à la locomotive*). • Désassemblage (*dételer la locomotive et décomposer le train*)

4.1.2. Messages

Les messages sont le support de communication et de collaboration entre les différents agents du système. Ils servent principalement à organiser et synchroniser les opérations composant le modèle de simulation (manutention, allocation, planification, génération de flux de conteneurs, etc.). En effet, un message peut déclencher une opération (ex. : les opérations de réception d'un train commencent suite à la réception du message « *ACCESS_LANE_REQUEST* ») ou signaler la fin d'une autre (ex. : *TRACTION_UNIT_DECOUPLED* informe

l'agent récepteur que l'unité de traction a été dételée). Dans ce travail, les messages sont divisés en quatre classes selon leurs contenues :

- REQUEST : envoyer pour demander un service, une ressource ou une information. Ce type de message est destiné soit à l'agent APO soit à l'agent APT et se termine toujours par le mot « REQUEST ».
- RELY : une réponse adressée aux agents ayant formulé une demande pour obtenir des données ou pour avoir l'accès à une ressource auprès des agents qui contrôlent ou gèrent l'entité voulue.
- ORDER : un ordre d'exécution envoyé par l'agent APO ou APT aux équipements internes ou à l'agent de manœuvre. L'intitulé de type de messages commence par un verbe à l'impératif et indique l'opération à exécuter.
- INFORM : pour transmettre une information utile à un agent. Par exemple, une autorisation, la fin d'une opération ou une liste de conteneurs.

Cette classification améliore la communication entre les agents en facilitant la compréhension du contenu du message ainsi que son traitement. Le tableau suivant détaille chaque classe de messages.

Tableau III.5 La classification des messages

Type	Intitulé	Emetteur	Récepteur	Objet	Quand
REQUEST	ACCESS_LANE_REQUEST	Train	APO	Demander la voie d'accès du terminal. Cette voie mène à l'entrée et aussi elle permet aux trains de quitter le terminal	Le train veut entrer ou quitter le terminal
	HANDLING_SERVICE_REQUEST	Agent de manœuvre	APO	Préparer les opérations de manutention de conteneurs transportés par le train	La locomotive de ligne du train est dételée au faisceau de réception
	MAIN_RAIL_REQUEST	Agent de manœuvre	APO	Demander la voie qui lie le faisceau de réception aux zones d'opérations (cour ferroviaire ou fluviale)	La locomotive diésel est attelée au train au faisceau de réception
	LEAVING_RAIL_REQUEST	Train	APO	Demander la voie qui mène à la sortie du terminal	Le train est prêt à quitter le terminal
	LINK_LANE_REQUEST	Navette	APT	Demander la voie qui lie le terminal aux terminaux maritimes	La navette veut se diriger vers un terminal
	BERTH_REQUEST	Barge	APO	Demander un poste d'amarrage	La barge arrive au terminal
	LEAVE_REQUEST	Barge	APO	Demander à quitter le terminal	La barge veut quitter le terminal
	ABANDONED_CONTAINER_REQUEST	APT	APO	Demander la liste de conteneurs abandonnés dans les buffers de la cour ferroviaire et fluviale	A la fin de la journée ouvrable

RELY	ACCESS_LANE_ALLOCATED	APO	Train	La voie d'accès est allouée au train demandeur	L'APO reçoit : ACCESS_LANE_REQUEST
	LEAVING_RAIL_ALLOCATED	APO	Train	La voie menant à la sortie est allouée au train demandeur	L'APO reçoit : LEAVING_RAIL_REQUEST
	LINK_LANE_ALLOCATED	APT	Navette	La voie liant les terminaux est allouée à la navette demandeur	L'APT reçoit : LINK_LANE_REQUEST
	BERTH_ALLOCATED	APO	Barge	Le poste d'amarrage est alloué à la barge demandeur	L'APO reçoit : BERTH_REQUEST
	BARGE_LEAVE_AUTHORIZED	APO	Barge	La barge est autorisée à quitter le terminal	L'APO reçoit : LEAVE_REQUEST
	ABANDONED_CONTAINER_REPLY	APO	APT	La liste de conteneurs abandonnés	L'APO reçoit : ABANDONED_CONTAINER_REQUEST
ORDER	DECOUPLE_TRAIN_TRACTION_UNIT	APO/APT	Agent de manœuvre	Ordonner le dételage de la locomotive du train	Le train arrive à sa destination
	DEASSEMBLE_TRAIN_WAGONS	APO/APT	Agent de manœuvre	Ordonner la séparation des wagons du train	Le train arrive à une zone d'opérations
	COUPLE_TRACTION_UNIT_TO_TRAIN	APO/APT	Agent de manœuvre	Ordonner l'attelage de la locomotive au train	Le train doit se déplacer vers destination
	ASSEMBLE_TRAIN_WAGONS	APO/APT	Agent de manœuvre	Ordonner l'assemblage des wagons du train	La manutention de conteneurs est terminée
	MOVE_TO_RECEIVE_BEAM_RAIL	APO	Locomotive	Appeler la locomotive pour se présenter au faisceau de réception	Le train doit être acheminé vers une zone d'opérations
	MOVE_TO_YARD_RAIL	APO	Locomotive	Appeler la locomotive pour se présenter à une zone d'opérations	Le train doit quitter la zone d'opérations (après la fin de la manutention)
	MOVE_TO_EXIT	APO	Locomotive	Appeler la locomotive de ligne pour rejoindre son TGL	Le TGL arrive à la zone électrifiée pour quitter le terminal
	START_HANDLING_OPERATION	APO	Portique	Commencer les opérations de manutention de conteneurs	Le mode de transport est prêt pour être opéré
INFORM	TRAIN_ACCESS_AUTHORIZED	APO	Train	Le train est autorisé à entrer au terminal	Le train arrive au terminal
	MOVE_TO_YARD_AUTHORIZED	APO	Train	Le train est autorisé à se déplacer vers une zone d'opérations	La voie liant les zones du terminal est allouée au train

MOVE_TO_EXIT_AUTHORIZED	APO	TGL	Le train est autorisé à se déplacer vers la sortie pour quitter le terminal	La voie menant à la zone électrifiée est allouée au TGL
TRACTION_UNIT_COUPLED	Agent de manœuvre	Locomotive	La locomotive est attelée	L'agent de manœuvre termine l'opération
TRACTION_UNIT_DECOUPLED	Agent de manœuvre	Locomotive	La locomotive est dételée	L'agent de manœuvre termine l'opération
TRAIN_HANDLING_PLAN_DESIGNED	APO	Portique	Le plan de chargement et de déchargement du train est établi	L'APO alloue une voie à une zone d'opération au train
BARGE_HANDLING_PLAN_DESIGNED	APO	Portique	Le plan de chargement et de déchargement de la barge est établi	La barge est amarrée au quai
DAY_TO_DAY_SHUTTLE_LIST	APT	APO	La liste de conteneurs arrivant par navette au terminal durant la journée ouvrable	Au début de la journée ouvrable
DAY_TO_DAY_TGL_LIST	AFS	APO	La liste de conteneurs arrivant par TGL au terminal durant la journée ouvrable	Au début de la journée ouvrable
DAY_TO_DAY_BARGE_LIST	AFS	APO	La liste de conteneurs arrivant par barge au terminal durant la journée ouvrable	Au début de la journée ouvrable
DAY_TO_DAY_CONTAINER_LIST	AFS	APT	La liste de conteneurs arrivant au terminal durant la journée ouvrable	Au début de la journée ouvrable
ABANDONED_CONTAINER_LIST	APT	AFS	La liste de conteneurs abandonnés	A la fin de la journée ouvrable

4.2. Classification du système

Diviser pour mieux régner est la devise de la classification. Elle consiste à répartir de manière cohérente les agents du système étudié sur des sous-systèmes en se basant sur les relations agent-agent et les cas d'utilisation déjà définis. Cela permet de réduire la complexité du modèle, d'avoir un système modulaire et de faciliter le processus d'implémentation. De plus, une bonne structuration d'un modèle rend plus clair son fonctionnement. Nous avons distingué deux sous-systèmes : le sous-système de contrôle (niveau supérieur) et le sous-système de représentation (niveau inférieur).

4.2.1. Sous-système de contrôle

Ce système regroupe les activités liées à l'affectation de ressources, au contrôle des opérations de manutention, au déploiement d'équipements, à la gestion de risque et à la génération du flux de conteneurs entrant ou sortant du TMM. Cette charge de travail est partagée sur quatre agents de contrôle : l'agent APO qui prend des décisions de planification à court terme, l'agent APT qui prend des décisions de planification à moyen terme, l'agent APRG

qui gère les événements imprévus et les risques liés aux conteneurs et l'agent AFS qui planifie l'arrivée et le départ des modes de transport externe (trains et barges). Cette distribution est motivée par la pluralité des opérations à gérer et par l'ensemble des décisions à prendre. Le fonctionnement de l'agent APRG n'est pas bien détaillé dans ce travail (il entre dans nos perspectives). Les rôles des autres agents ainsi que les relations existantes entre eux et les ressources qu'ils utilisent sont décrites avec AML dans la figure III.17 :

- L'agent planificateur opérationnel (APO) : l'APO gère les opérations au sein du TMM (allocation, stockage, de transfert, de transport, d'arrivée et de départ, etc.), diffuse les ordres de manutention ou de transport sur les équipements internes, communique les coordonnées d'un agent à tous autres agents intéressés, reçoit en temps réel des informations fournies par les autres agents sur le déroulement de la simulation et archive les métadonnées des opérations exécutées dans un entrepôt de données (date début et fin, type, durée, coût, distance parcourue, taux d'occupation des ressources, nombre de conteneurs livrés en retard, etc.). En bref, cet agent est le cœur du modèle de simulation. D'un autre côté, durant la planification des opérations de manutention de conteneurs, l'APO favorise les navettes afin de minimiser leurs séjours dans le TMM.

- L'agent planificateur tactique (APT) : au début de chaque journée de travail, le planificateur tactique reçoit la liste de conteneurs entrants et sortants du TMM de la part de l'agent fournisseur de services de transport (*DAY_TO_DAY_ CONTAINER_LIST*). Par la suite, il détermine le nombre de navettes à déployer dans les terminaux pour assurer le transfert intra-portuaire de conteneurs, en se basant sur, les terminaux d'origine et de destination des conteneurs, la date d'arrivée des conteneurs exports au TMM, la date de départ des conteneurs exports vers les terminaux maritimes, la durée de séjours autorisée des navettes et le nombre minimum et maximum de wagons par navette. Dans cette étude, nous supposons que les conteneurs imports arriveront à temps au TMM. En fin de journée, l'APT communique une liste de conteneurs abandonnés dans les buffers du TMM à l'agent fournisseur de services de transport (*ABANDONED_ CONTAINER_LIST*), pour synchroniser le flux de conteneurs du prochain jour ouvrable. Les navettes déployées sont enregistrées dans un fichier XML.

- Agent Fournisseur de Services de transport (AFS) : il représente l'ensemble des acteurs du transport ferroviaires et fluviaux assurant l'acheminement de conteneurs à destination et en provenance du port du Havre. Au début de chaque jour ouvrable, le AFS crée les TGL et les barges en fonction du flux de conteneurs généré préalablement selon les données d'entrées (nombre de conteneurs traités par jour, pourcentage de conteneurs ferroviaires et fluviaux, pourcentage import et export, pourcentage TEU et FEU, et le nombre minimum et maximum de wagons par TGL), et aussi en prenant en compte les conteneurs restant sur les buffers le jour ouvrable précédent. Le jeu de données généré (TGL et Barges) est enregistré dans un fichier XML pour alimenter le modèle de simulation.

- Agent Planificateur temps Réel et Gestion de risque (APRG) : cet agent sera chargé de superviser le déroulement des opérations, de contrôler l'état et le contenu des conteneurs, de cibler les conteneurs illicites et de valider les positions des conteneurs transport des matières dangereuses dans les buffers (le respect des règles de ségrégation). Mais son rôle le plus important sera de coopérer avec les autres agents pour gérer et surpasser les situations critiques. Par exemple, lors d'un incident (incendie, explosion) le planificateur temps réel coopère avec le planificateur opérationnel pour gérer les déplacements des engins mobiles (modes de transport et équipements de manutention) afin d'éviter les pertes matérielles, et informe le planificateur tactique sur la gravité de la situation (zones touchées, disponibilité des voies, possibilité de recevoir d'autres navettes, l'état des navettes ferroviaires qui séjournent au TMM, etc.), pour que ce dernier réorganise le transfert de conteneurs entre le TMM et les terminaux maritimes.

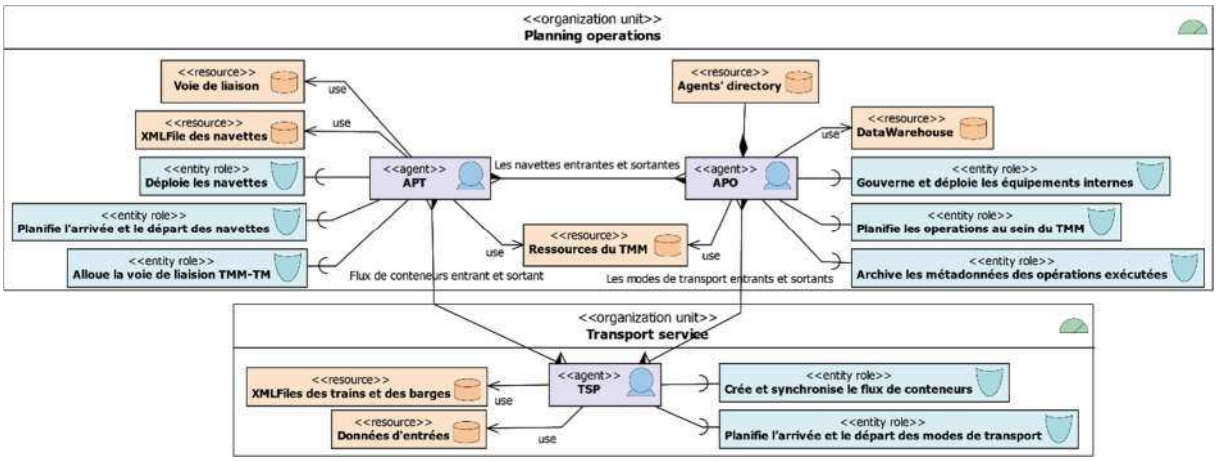


Figure III.17 Le modèle social du sous-système de contrôle

4.2.2. Sous-système de représentation

Ce système englobe les agents représentant les entités réelles existantes ou séjournant dans le TMM, *i.e.* les engins de manutention et les moyens de transport. Le but de ce sous-système est de reproduire les opérations de transfert, de transport et de stockage, d'une part, d'autre part de fournir les données statistiques nécessaires pour valider le modèle conçu et pour analyser l'impact des différentes stratégies sur le déroulement des opérations de manutention. Les agents évoluant dans le sous-système de représentation sont de quatre types : engin de traction, vecteur de transport, agent de manœuvre et portique, voir Figure III.18.

Les portiques :

- Agent portique ferroviaire : assure le chargement et déchargement de conteneurs au niveau de la cour ferroviaire.

- Agent portique fluvial : se charge de la manutention des conteneurs au niveau de la cour fluviale.

Les vecteurs de transport :

- Agent navette : transporte les conteneurs import au TMM et les conteneurs exports aux terminaux maritimes.

- Agent train de grandes lignes : achemine les conteneurs export vers le TMM et les conteneurs imports vers l'hinterland par rail.

- Agent barge : achemine les conteneurs export vers le TMM et les conteneurs imports vers l'hinterland par voie navigable.

Les engins de traction :

- Agent locomotive de ligne : dirige et déplace les wagons de l'agent train de grandes lignes.

- Agent locomotive interne : dirige et déplace les wagons à l'intérieur du TMM, et aussi entre le TMM et les terminaux maritimes (TM).

Agent de manœuvre : compose et décompose les trains de grandes lignes et les navettes, il y a un agent de manœuvre dans chaque zone du terminal multimodal :

- Agent de manœuvre faisceau de réception.

- Agent de manœuvre cour ferroviaire.

- Agent de manœuvre cour fluviale.

La figure III.18 présente les relations existantes entre tous les agents du modèle.

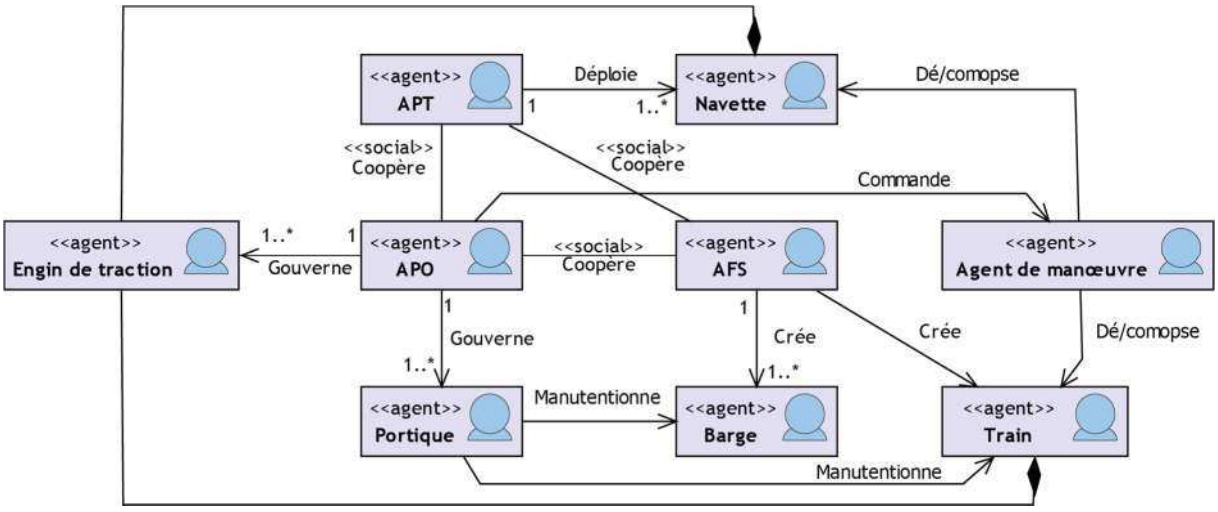


Figure III.18 Diagramme d'agents du modèle de simulation

4.3. Modèle de simulation à base d'agents

Dans les deux étapes précédentes, nous nous sommes concentrés sur la spécification des agents d'une part, c'est-à-dire leurs comportements, leurs états, leurs rôles et les ressources qu'ils exploitent, ainsi que comment ils passent d'un état/comportement vers l'autre et comment ils interagissent pour exécuter une activité et réaliser leurs objectifs. D'autre part, nous avons décomposé le système en niveaux, *i.e.*, niveau supérieur (le sous-système de contrôle) et le

niveau inférieur (sous-système de représentation). Seulement, nous n'avons pas encore présenté le déroulement de la simulation du point de vue agent.

Dans la Figure III.10, nous avons exposé un modèle qui décrit le séquencement des activités de la simulation, mais sans faire référence aux agents. Maintenant, il faut raffiner et améliorer ce modèle en s'appuyant sur les travaux réalisés dans cette phase (Tableau III.5 et les Figures III.13 - III.18) pour avoir une vue complète du modèle de simulation développé (le produit final), *i.e.*, le modèle qui sera implémenté sous le logiciel de simulation Anylogic, voir Figure III.19. Comme nous l'avons mentionné préalablement, notre modèle est orienté distribution de charge de planification sur trois agents (APO, APT et AFS). Ce sont eux qui pilotent et gèrent le déroulement des processus de la simulation. Dans la représentation finale du modèle de simulation, on distingue facilement les deux sous-systèmes identifiés (les agents du niveau inférieur évoluent dans le contexte d'un agent du niveau supérieur) et le flux de travail de chaque agent, en plus des flux parallèles (qui peuvent s'exécuter en même temps ; les flux qui appartiennent à deux contextes différents) et des flux dépendants (le début d'un flux est lié à la fin d'un autre).

Les activités de notre modèle sont regroupées par packages (voir section 3.1) : *Inland_Activities* (activités terrestres), *Fluvial_Activities* (activités fluviales) et *Shuttle_ Actvities* (activités de transfert). Les trois sous-sections suivantes détaillent ces activités pour bien expliquer le déroulement de la simulation.

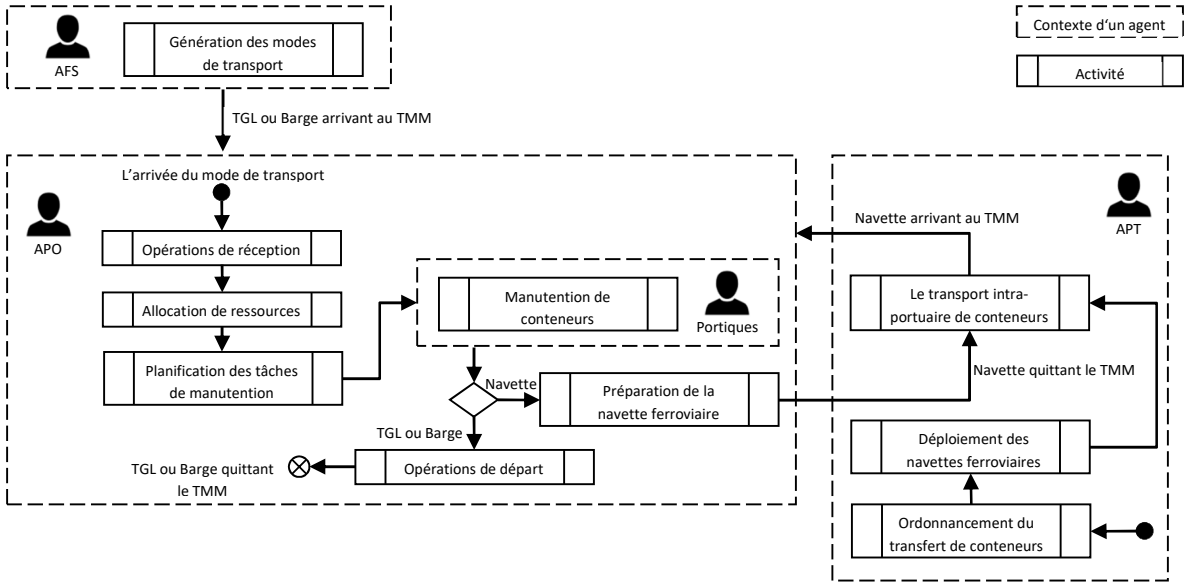


Figure III.19 Modèle de simulation à base d'agents

4.3.1. Activités terrestres

Avant d'arriver au TMM le train doit demander la voie d'accès à l'APO (*ACCESS_ LANE_ REQUEST*), cette voie mène à l'entrée du terminal. Dès que le train saisit la voie, l'APO entame les préparatifs d'accueil à travers une séquence d'opérations divisée en deux phases. En premier lieu, les opérations de réception. D'abord, l'APO attribue un identifiant au mode de transport, puis détermine ses besoins (conteneurs à décharger et conteneurs à charger) et enfin l'ajoute à son annuaire (*agentType@id*). En second lieu, l'allocation de ressources. L'ordre des

opérations exécutées à cette phase varie selon le type du moyen de transport (TGL ou Navette), et la disponibilité des ressources. Pour un TGL, l'APO lui assigne deux voies ferrées (une au faisceau de réception et l'autre à la cour ferroviaire) et un locotracteur. Pour une navette mixte, l'APO lui affecte une voie à chaque zone. Tandis que pour une navette homogène (transporte seulement des conteneurs destinés à une seule zone), l'APO lui réserve seulement une voie à sa zone cible. Cependant, au cas où, toutes les voies concernées seraient occupées, le mode de transport est mis en attente jusqu'à la libération d'une voie. L'APO termine cette phase par l'envoi d'une autorisation (*TRAIN_ ACCESS_AUTHORIZED*) d'accès qui indique au mode de transport à quelle voie il doit s'y rendre.

Lorsqu'un TGL arrive au faisceau de réception, sa locomotive de ligne est dételée (*DECOUPLE_TRAIN_TRACTION_UNIT*) et l'engin de traction alloué se dépêche (*MOVE_ TO_RECEIVE_BEAM_RAIL*) vers la voie où le TGL est installé. L'APO ordonne ensuite à l'agent de manœuvre d'atteler l'engin de traction aux wagons du TGL (*COUPLE_TRACTION_UNIT_TO_TRAIN*). Pour le cas de la navette mixte, elle est décomposée en deux navettes homogènes, une sera transférée à la zone ferroviaire et l'autre à la zone fluviale, de plus une des deux navettes sera attelée à la locomotive de la navette d'origine (*DEASSEMBLE_TRAIN_WAGONS*). Quand l'agent de manœuvre du faisceau de réception termine les tâches de dé/composition sur un train, il demande à l'APO d'établir le plan de dé/chargement (*HANDLING_SERVICE_REQUEST*) du train et de lui réserver la voie liant les zones (*MAIN_RAIL_ REQUEST*). Une fois la voie est allouée, le train est acheminé à sa destination (*MOVE_TO_YARD_ AUTHORIZED*). Quant aux navettes homogènes, elles arrivent directement sur la cour ferroviaire ou fluviale.

L'APO prépare le plan d'opération pour chaque train avant qu'il arrive à sa zone d'opérations cible. Le plan d'opérations comporte trois volets, à savoir, l'ordre de priorité du vecteur de transport (les navettes sont prioritaires), et les conteneurs à décharger et à charger. L'ordre de priorité est lié au type du vecteur de transport et à sa date de départ (servir le vecteur de transport ayant la date de départ la plus proche). Le plan préparé est envoyé ensuite aux portiques (*TRAIN_HANDLING_PLAN_DESIGNED*). Généralement, une navette collecte les conteneurs destinés à être livrés sur son terminal maritime de destination en favorisant ceux qui ont une date de livraison urgente tant qu'il y a une position vacante et quitte le TMM dès l'expiration de son délai de séjour, même s'il y a d'autres conteneurs à transférer (dans cette étude, nous utilisons le mode planifié décrit dans (Benghalia 2015), pour servir les navettes). Tandis que les TGL arrivent tôt le matin et quittent le TMM au moment où ils reçoivent la totalité de leurs conteneurs en import.

Les opérations de manutention débutent après l'arrivée et la décomposition du train. L'engin de traction détaillée retourne aussitôt au faisceau de réception. Les portiques exécutent les tâches de manutention en choisissant toujours les plus prioritaires. D'ailleurs, les déplacements des deux portiques sont assujettis aux contraintes de non-croisement (voir le chapitre suivant). Une fois les opérations de manutention achevées ou bien quand le temps de séjour d'une navette est écoulé, l'APO exécute la dernière phase, les opérations de départ. Il

commence par demander à la l'agent de manœuvre de la zone d'assembler le train (*ASSEMBLE_TRAIN_WAGONS*), puis il appelle un engin de traction (*MOVE_TO_YARD _RAIL*), soit pour aider les wagons du TGL à atteindre le point électrifié de la cour ferroviaire où leur locomotive de ligne les attend, soit pour transférer la navette (les wagons de la navette) vers son terminal maritime. La navette homogène est recomposée avant de se diriger vers son terminal maritime cible. Conjointement à ces opérations, l'APO archive l'historique de l'ensemble des actions exécutées (allocation, manutention, transport …).

4.3.2. Activités fluviales

Les préparatifs d'accueil de la barge débutent avec la réception du message « *BERTH_REQUEST* : demande d'un poste d'amarrage ». La première phase est la même que celle des trains. Dans la seconde phase, l'APO répond à la demande de la barge (*BERTH_ALLOCATED*) et lui indique à quel endroit du quai elle doit s'amarrer (le quai du TMM compte deux postes d'amarrages). Pendant l'amarrage, le planificateur établit un plan d'opérations et l'envoie aux portiques (*BARGE_HANDLING_PLAN_DESIGNED*). Ce plan d'opérations est soumis à quelques contraintes : la stabilité de la barge, le non-croisement des portiques et un conteneur 40 EVP peut être déposé sur deux conteneurs 20 EVP, mais pas l'inverse. Les portiques fluviaux enchaînent séquentiellement le déchargement de conteneurs export et le chargement de conteneurs import (*i.e.*, la barge doit être déchargé d'abord, pour ensuite être chargé). Au moment où la barge reçoit tous ses conteneurs import, elle demande à l'APO l'autorisation de quitter le TMM (*LEAVE_REQUEST*). Une fois l'autorisation accordée (*BARGE_LEAVE_AUTHORIZED*), la barge libère le poste d'amarrage et l'APO archive l'historique de l'ensemble des actions exécutées.

4.3.3. Activités de transfert

Le transfert intra-portuaire de conteneurs est orchestré par l'APT et assuré par des navettes ferroviaires. L'APT déploie le nombre suffisant de navettes dans les terminaux maritimes en prenant en considération, le nombre de conteneurs à distribuer et à collecter depuis le TMM. Le processus de transfert de conteneurs débute, au moment où une navette se prépare à acheminer les conteneurs vers leur destination, en demandant une voie qui lie son terminal maritime et le TMM à l'APT (*LINK_LANE_ REQUEST*). Ce dernier vérifie sa disponibilité pour autoriser la navette à l'utiliser (*LINK_LANE_ ALLOCATED*). Ensuite, la navette se dirige vers son terminal cible. Au maximum, une navette fait deux voyages par jour entre le TMM et son terminal maritime. Chaque navette quittant le TMM doit respecter un seuil de remplissage. Dans le cas contraire, elle cherche les conteneurs qui lui restent pour satisfaire cette condition, soit dans la cour ferroviaire soit dans la cour fluviale. En revanche, si la date de livraison de conteneurs est urgente, le seuil de remplissage est ignoré.

La prochaine section s'intéresse au processus d'implémentation du modèle de simulation du TMM. Elle met particulièrement l'accent sur la politique adoptée pour organiser les agents, les classes et les interfaces utilisées pour concevoir le modèle exécutable (modèle conceptuel traduit dans un langage de programmation).

5. Structure du modèle exécutable

La dernière phase du processus de modélisation concerne trois points : (1) l'architecture du modèle exécutable ; (2) la vérification de l'implémentation pour s'assurer que le modèle est exempt d'erreurs sémantiques et logiques ; (3) validation du modèle pour prouver que le modèle reflète le comportement réel du système étudié. Cette section se focalise seulement sur le premier point, les deux autres points sont présentés dans le prochain chapitre.

Au cours des phases précédentes, nous avons défini les éléments composant le modèle de simulation (entités et agents), le comportement individuel des agents et le fonctionnement de la simulation. L'objectif de cette section est de montrer comment le modèle conceptuel est implémenté en termes de composant (ici nous n'abordons pas la question du codage du modèle sous Anylogic, cela est exposé dans le prochain chapitre). La figure III.20 présente les trois principaux packages qui constituent le package central (*TMMSimulationApplication*). Cette organisation est inspirée des travaux de (Bielli, et al. 2006), en plus elle suit la logique du diagramme ECB-Agent (voir, Figure III.12). Les packages *TMMResourceModel, TMMControllerModel,* et *TMMAgentsModel* représentent le fondement, la logique, et la cinématique et le comportement du modèle, respectivement. Chacun de ces packages contient des sous-packages et ainsi de suite. Outre ces package, le *TMMSimulationApplication* inclut aussi la classe *Main* qui initialise les paramètres, construit l'environnement (l'infrastructure, les objets animés et la représentation graphique des agents) et lance les agents de la simulation, *i.e.*, donner vie au modèle de simulation. Les prochaines sous-sections détaillent la structure des principaux packages.

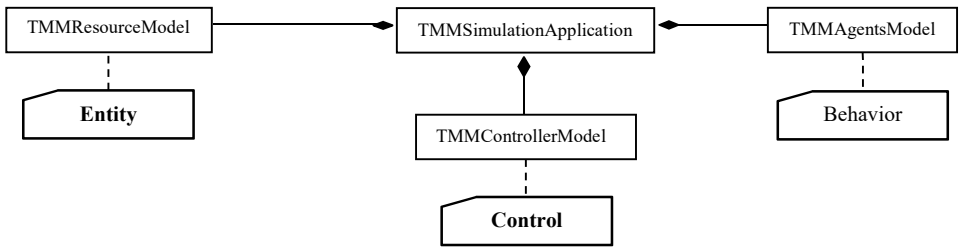


Figure III.20 L'architecture du modèle exécutable

5.1. Package : TMMResourceModel

Ce package contient toutes les classes représentant les entités passives immobiles (Figure III.21), à savoir, l'infrastructure du TMM (voir, Figure III.2), les messages (Figure III.22) et la classe *Operation*. Ces deux dernières entités sont dans le package *EntitiesModel*.

Des ressources telles que, voie ferrée et poste d'amarrage (Figure III.2) doivent déclencher un évènement « *libération* » dès qu'elles sont à nouveau disponibles et leur propre liste d'attente n'est pas vide. Pour cela la ressource doit utiliser la classe Event appropriée (*RailWayEvent* ou *BerthEvent*, voir la section 5.4). L'Event « *libération* » permet à l'APO de réallouer la ressource au premier demandeur de la liste, et aussi il sert à le mettre au courant de l'état des ressources.

Selon les bonnes pratiques de la programmation, une classe qui ne sera pas directement instanciée doit être considérée comme étant abstraite. Une classe abstraite joue le rôle d'une interface pour les classes qui en héritent. Dans la figure III.22, un objet de type « *Message* » doit contenir obligatoirement un autre objet, son contenu, seulement le type de ce contenu se diffère d'un message à un autre (*Request, Inform, Order et Relpy*). Pour uniformiser le contenu des messages, nous avons défini la classe abstraite « *SerializableContent* » comme superclasse de tout type de contenu (relation d'héritage). Cette classe contient les attributs et les méthodes qui peuvent être appelées par un objet d'une classe fille. Il existe d'autres classes abstraites dans notre modèle, à savoir, *Area* et *OperatingArea* (Figure III.2).

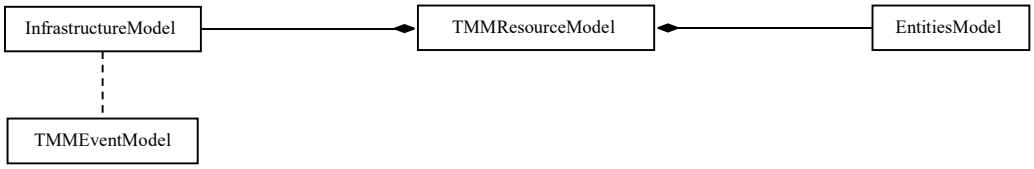


Figure III.21 Le package *TMMResourceModel*

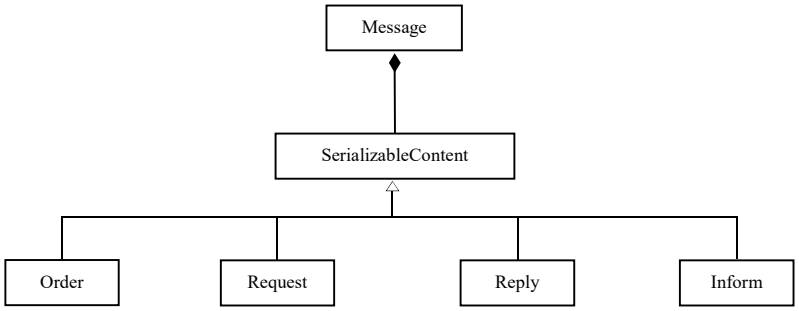


Figure III.22 Les classes message et contenu

La classe *Operation* est l'outil utilisé par l'APO pour archiver les données de simulation, en effet ses attributs sont les métadonnées qui caractérisent les opérations exécutées. Les principaux attributs et méthodes des classes composant le package *TMMResourceModel* sont exposés dans le tableau III.6.

Tableau III.6 Les principaux attributs et méthodes des classes composant le package *TMMResourceModel*

Composant	Attributs	Méthodes
InfrastructureModel	• id : identifiant de la ressource. • Stat : état de la ressource. • usedBy : l'entité occupante ressource. • confineDate : date d'attribution de la ressource. • releaseDate : date de libération de la ressource. • queue : file d'attente. • history : historique d'utilisation.	• Getters et Setters.
Les entités messages	• id : identifiant du message. • date : date d'envoi. • content : contenu. • contentType : type du contenu. • sender : émetteur. • receiver : récepteur. • history : historique des messages.	• Getters et Setters.

Operation	• id : identifiant de l'opération. • type : type de l'opération. • executedBy : l'agent exécutant l'opération. • executedOn : l'entité manipulée. • location : l'endroit de l'opération. • additionalData : données supplémentaires. • startDate : date de début. • endDate : date de fin.	• Getters et Setters.

5.2. Package : TMMControllerModel

La logique de la simulation est définie dans les classes *Control*. Ces classes englobent les stratégies d'allocation de ressource, de gestion des entrées/sorties, de planification des opérations, de stockage de conteneurs et de gestion d'interférence, et aussi la gestion de l'état interne des agents et la manipulation des données de simulation.

La classe *EntityManager* contient les méthodes SCRUD (les opérations d'ajout (C), de lecture (R), de modification (U), de suppression (D) et de recherche (S)) et les méthodes de traitement de données (trie, filtrage, …). La classe *HandlingManager* concerne la planification des opérations de manutention de conteneurs, les opérations de dé/composition de trains et les opérations de manutention de conteneurs. Quant à la classe *ResourceManager*, elle inclut les méthodes liées à la gestion des ressources et des équipements de manutention. Les classes *Manager*, *EntityManager* et *ResourceManager* sont des classes abstraites. Le contenu de ce package est décrit dans la figure III.23.

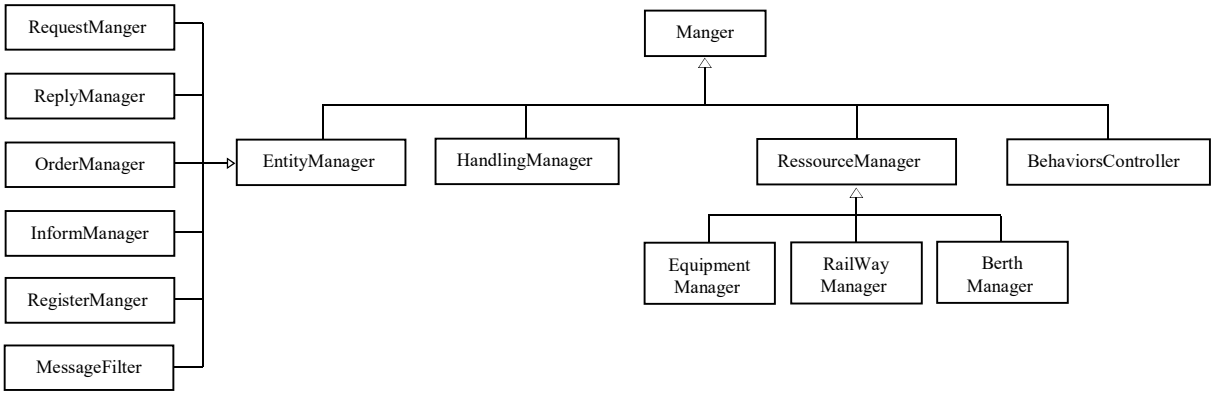


Figure III.23 Le package *TMMControllerModel*

5.3. Package : TMMAgentsModel

Dans les figures III.17 et III.18, nous avons présenté les associations liant les agents de notre système, ici nous montrons comment ces agents sont organisés dans leurs packages. Comme pour les classes, il y a des agents abstraits, c'est-à-dire des types d'agents (ou classes agents) qui ne sont pas physiquement présents dans la simulation (on ne peut pas instancier une classe agent abstraite). En effet, ils sont une sorte d'interface ou d'enveloppe pour différencier les agents. Dans notre système, il y a des agents de type *Planner*, *Manager* ou *Equipement*, aussi il y a plusieurs types d'équipements : les engins de tractions (*TractionUnit*), les engins de manutention (*HandlingUnit*), et les modes de transport (*TransportUnit*), de plus, il existe deux modes de transport la barge et le train. Chacun de ces types est représenté par une classe agent

abstraite, voir Figure III.24. Par ailleurs, les entités passives amovibles sont considérées comme des agents mais ils héritent de la classe *RemovableUnit*, à savoir, les conteneurs et les wagons.

D'un autre côté, les agents planificateurs APO et APT doivent être à l'écoute des événements déclenchés par les ressources qu'ils gèrent, de ce fait ils implémentent les interfaces *Listener* nécessaires (voir, la section 5.4). Les engins de traction sont des ressources placées sous la responsabilité de l'APO, alors comme les autres ressources, ils sont liés à la classe Event adéquate. Comme nous avons expliqué dans la section précédente, le début de certaines opérations dépend de l'arrivée d'un mode de transport ou d'un engin de traction. En effet, ces agents informent les intéressés de leur arrivée en utilsant l'Event « *arrived* ». Les classes d'agents composant ce package (*TMMAgentsModel*) sont exposés dans la figure III.24.

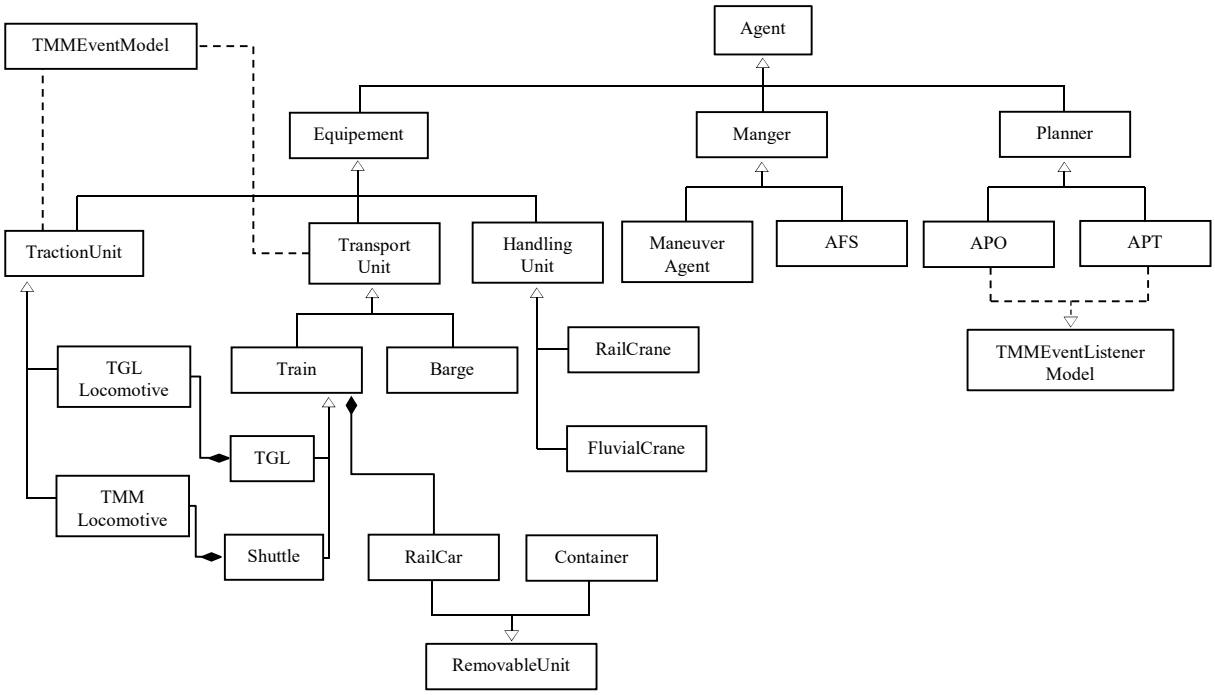


Figure III.24 Le package *TMMAgentsModel*

5.4. Les événements et les *listeners*

Dans la première phase (section 2), nous avons abordé la question des événements. Les événements sont les actions à l'origine du démarrage ou du déblocage de l'exécution d'un processus. Chaque événement est associé à un *listener*, en fait, comme pour un message, l'événement a un émetteur et un ou plusieurs récepteurs (*listener*). En programmation, le déclenchement d'un évènement se fait par l'invocation de la méthode adaptée à l'événement dans le *listener*. D'abord, un objet de la classe Event en question est instancié puis passé comme paramètre à la méthode qui contient les actions à exécuter. Par exemple, *railWayReleased (RailWayEvent e) {action 1; action 2; ...}*. Noter que dans l'objet Event, nous définissons tous les éléments nécessaires à la méthode. Les événements du modèle de simulation, le package *TMMEventModel* et le package *TMMEventListenerModel* sont décrits dans le tableau III.7, la figure III.25 et la figure III.26, respectivement.

Tableau III.7 Les Events du modèle de simulation

Event	Description de l'Event	Entité déclenchant l'Event
trainArrived	Le train est arrivé à sa destination.	Train
bargeArrived	La barge est arrivée à sa destination.	Barge
tractionUnitArrived	L'unité de traction est arrivée à sa destination	Unité de traction
railWayReleased	La voie ferrée est libérée.	Voie ferrée
tractionUnitReleased	L'unité de traction est libérée.	Unité de traction
berthReleased	Le poste d'amarrage est libéré.	Poste d'amarrage
trainHandlingOperationPerformed	Les opérations de manutention de conteneurs sur le train sont terminées.	Portique
bargeHandlingOperationPerformed	Les opérations de manutention de conteneurs sur la barge sont terminées.	Portique

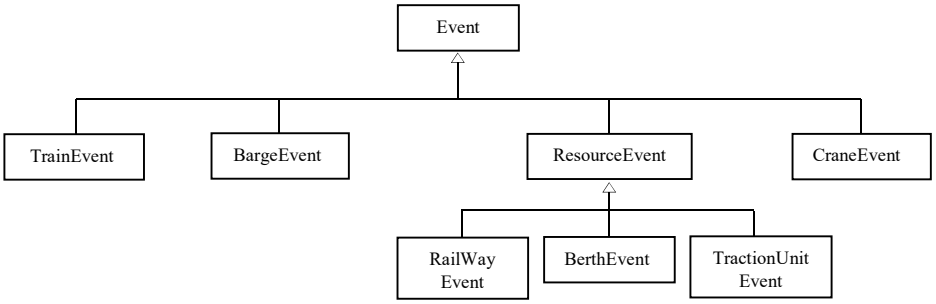


Figure III.25 Le package *TMMEventModel*

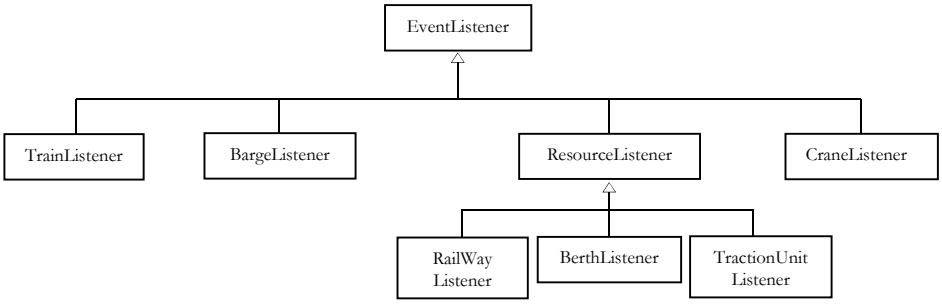


Figure III.26 Le package *TMMEventListenerModel*

6. Discussion et conclusion

Nous avons essayé à travers les phases de modélisation présentées de développer un modèle de simulation robuste à la fois au niveau individuel (agent) et collectif (sous-système), qui sera facilement implémenté peu importe la plateforme de simulation choisie. Ces phases permettent d'aller à une description macroscopique du système pour ensuite converger vers une description microscopique claire et solide du modèle (la représentation simplifiée du système de référence). De plus, ces phases sont hautement liées par une série de diagrammes. En effet, les diagrammes élaborés dans une phase sont la passerelle vers la phase suivante, pour à la fin arriver à une élaboration complète du modèle de simulation. Ce modèle est piloté par trois agents qui contrôlent et orchestrent la totalité des processus clés de la simulation. Ces agents

interagissent et coopèrent pour atteindre leurs objectifs, cependant ils n'ont pas de capacités cognitives. De ce fait, nous visons dans nos prochains travaux d'améliorer l'efficacité et la qualité de notre système en intégrant des capacités d'apprentissage et de raisonnement intelligent dans ces agents de contrôle.

De plus, il reste à : (1) évaluer l'impact de l'inspection de conteneurs à risques et de la gestion des conteneurs comportant des matières dangereuses, sur l'activité de transfert intra-portuaire de conteneurs et à (2) développer un outil d'aide à la décision. Le modèle de simulation développé ici peut être considéré comme la base d'un outil d'aide à la décision, puisque la simulation permet d'évaluer, de tester et de valider les solutions apportées à un problème donné. Cependant, notre but est de développer un outil qui offrira aux utilisateurs un niveau élevé de flexibilité pour se prononcer sur le niveau approprié de détails et le type d'installations et d'équipement qu'ils aimeraient étudier via la simulation des activités portuaires, en d'autres termes introduire le niveau de planification stratégique dans notre modèle. En ce qui concerne le premier point, l'objectif est de déterminer à quel niveau (pourcentage) l'inspection de conteneurs aura un effet négatif sur les activités de transfert (dégrader la performance du système).

Dans ce chapitre, nous avons présenté des nouveaux concepts pour modéliser les communications et la collaboration entre les agents en mettant en évidence leurs comportements, leurs états et les transitions qui les relient. En plus nous avons proposé une organisation pertinente du modèle de simulation qui facilite et accélère le processus d'implémentation. Enfin, le modèle final est une combinaison de modèles informatiques, mais le paradigme agent prédomine, il contient :

- Des modèles objet pour les entités passives,
- Des modèles à base d'agents pour les entités autonomes (leurs comportements, leurs interactions, ...) et l'aspect collectif du système,
- Des comportements modélisés via des automates à états finis,

Le prochain chapitre s'intéresse à l'ordonnancement des portiques de manutention dans la cour ferroviaire et fluviale.

Chapitre IV

Ordonnancement des portiques de manutention dans les zones d'opérations

Sommaire

1. Gestion d'interférence et de blocage des portiques à la cour ferroviaire 136
1.1. Introduction 136
1.2. Architecture proposée pour la cour ferroviaire 137
1.2.1. Zones et délimiteurs 137
1.2.2. Buffers d'échanges 140
1.2.3. Formulation mathématique de l'architecture proposée 141
1.3. Déroulement des opérations de manutention 141
1.4. Approche I : la stratégie à base d'agents 143
1.4.1. Contrainte de mouvement 143
1.4.2. Etape I : sectionner le prochain job 144
1.4.3. Etape II : choisir la position cible 145
1.4.4. Etape III : vérification de la contrainte de mouvement 146
1.4.5. Etape IV : Ajustement des zones 151
1.5. Approche II : la stratégie à base d'heuristique 152
1.5.1. Construction de la solution 152
1.5.2. Couplage entre la simulation à base d'agents et l'algorithme 154
1.6. Implémentation de modèles et validation 155
1.6.1. Anylogic et le processus d'implémentation des modèles 155
1.6.2. Le jeu de données des modèles 157
1.6.3. Vérification des modèles 158
1.6.4. Formule de validation des stratégies 159
1.7. Résultats des simulations et comparaison des modèles 160
1.7.1. Paramètres de simulation 160
1.7.2. Nombre de réplications et le calibrage des paramètres de la stratégie à base d'heuristique 161
1.7.3. Résultats des simulations 162
1.7.4. Comparaison et discussion 165
2. Ordonnancement des opérations à la cour fluviale 167
2.1. Rappel : le modèle de simulation de la cour fluviale 169
2.2. Couplage Optimisation-Simulation 169
2.3. Implémentation et résultats 171
3. Conclusion 173

Ce chapitre se focalise sur l'ordonnancement des portiques de manutention dans les deux cours du terminal multimodal du port du Havre. Pour la cour ferroviaire, nous avons conçu deux solutions basées sur une nouvelle architecture de la zone de travail des portiques (section 1). Pour la cour fluviale, nous avons utilisé le couplage optimisation-simulation (section 2). La dernière section conclut et présente les perceptives de ce travail.

1. Gestion d'interférence et de blocage des portiques à la cour ferroviaire

1.1. Introduction

Le terminal multimodal est équipé d'une zone de transbordement rail-rail, où les mouvements de conteneurs entre les trains sont assurés par des portiques ferroviaires enjambant toutes les voies ferrées. Il existe deux problèmes fondamentaux au niveau des zones de transbordement rail-rail : le problème d'interférence et le problème de blocage des portiques (voir Figure IV.1). Ces problèmes ont été expliqués dans le chapitre I, sous-section 2.3.3.

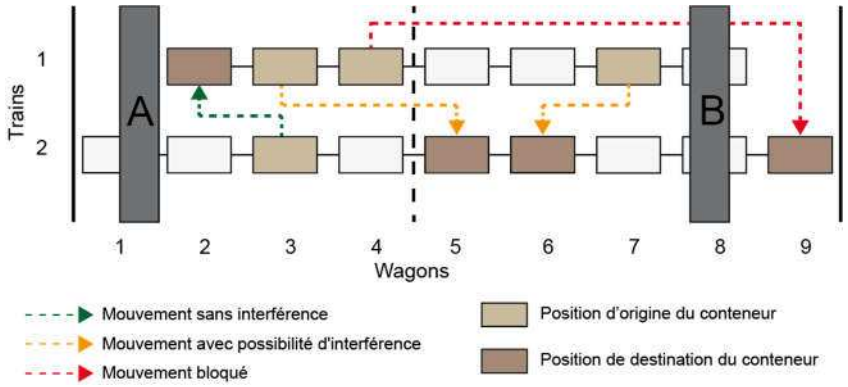


Figure IV.1 Les mouvements des grues de manutention

Dans la politique actuelle du TMM, la zone de travail est divisée en deux zones d'opérations, équipée chacune par un portique. Le principal inconvénient de cette configuration est qu'elle augmente la probabilité d'occurrence des situations d'interférence. En effet, lorsque la position d'origine et la position de destination du conteneur se retrouvent dans deux zones différentes, les deux portiques risquent de se rapprocher l'un de l'autre, alors un portique doit attendre que l'autre termine sa tâche si cela entraînait une situation d'interférence. Par ailleurs, dans le TMM, ce sont les chariots à prise par le haut avec mat télescopique (*reachstackers*) qui assurent l'échange de conteneurs entre les zones d'opérations de la cour ferroviaire pour éviter les situations de blocage. Un *reachstacker* prend le conteneur à déplacer puis il se dirige vers l'autre zone pour l'empiler dans la position qui lui a été assignée dans le buffer. Ensuite, le portique concerné emmène le conteneur au train auquel il est destiné. Cette série d'actions est une double manutention du conteneur réalisée par deux différents types d'équipements. Quand un *reachstacker* est en train de lever ou de déposer un conteneur, les deux portiques gardent un espacement de sécurité avec lui jusqu'à ce qu'il termine son travail, car des interférences pourraient se produire. Cette solution a plusieurs désavantages :

- Augmente le temps d'attente total des portiques (des temps additionnels pour éviter les interférences entre les portiques et les *reachstacker*).
- Augmente la durée de séjour des trains.

- Mobilise des ressources supplémentaires (*reachstacker* et leur conducteur).
- Augmente les coûts des opérations (coûts de manutention et d'équipement) et la consommation d'énergie.

En ce qui concerne la gestion d'interférence de portiques dans la cour ferroviaire du TMM, Leriche et al. (Leriche et al. 2015) ont proposé trois règles de manutention de conteneurs avec une contrainte de sécurité (distance de sécurité). La première règle est appelée « *left-to-left rule* », elle stipule que le portique gauche (réciproquement, droit) commence par ramasser les conteneurs les plus à gauche (réciproquement, à droite) et de les mettre ensuite sur les wagons vides les plus à gauche (réciproquement, à droite). La deuxième règle (*less-distance-rule*) consiste à choisir le conteneur le plus proche dans les deux directions et puis le mettre à la position la plus proche. Quant à la troisième règle, *less-distance-without-comeback,* elle suit la logique de la deuxième, mais les portiques se déplacent dans une direction fixe (de gauche vers droite ou bien de droite vers gauche) et quand ils arrivent au milieu ils prennent la direction inverse. Néanmoins, ces règles provoquent une baisse de productivité, car ils donnent lieu à plusieurs situations d'attente ce qui prolonge le temps de séjour des trains.

Pour remédier à ces inconvénients, nous proposons deux approches qui utilisent une nouvelle architecture des zones d'opérations. La première approche est une solution orientée-agent, tandis que la deuxième est une approche à base d'heuristique. L'objectif de ces deux approches est de minimiser le temps d'attente des portiques, d'accélérer les opérations de manutention sur les trains et d'améliorer la productivité des portiques.

Le reste de cette section est organisé comme suit. La deuxième partie expose la nouvelle configuration de la cour ferroviaire. La troisième partie se focalise sur la modélisation du déroulement des opérations de manutention. La quatrième et la cinquième partie sont consacrées à la description détaillée des deux approches conçues pour gérer les interférences et le blocage des portiques. La sixième partie aborde l'implémentation et la validation des modèles développées. La septième partie affiche et discute les résultats obtenus et montre l'efficacité des solutions proposées. Le travail présenté dans cette section a été réalisé en collaboration avec (Oudani 2016).

1.2. Architecture proposée pour la cour ferroviaire

1.2.1. Zones et délimiteurs

Nous avons divisé la zone de travail des portiques ferroviaires en plusieurs zones, où chaque zone est un espace dédié à un portique. Une zone est dotée de plusieurs caractéristiques, déterminée par la position d'un ou deux délimiteurs et joue un rôle bien précis. La diversité des zones du système aide les portiques à choisir la tâche de manutention de manière à minimiser les situations d'interférence. Dans notre système, les zones sont deux types : les zones dynamiques et les zones de taille fixe. La figure IV.2 donne une vue d'ensemble sur la nouvelle architecture proposée pour la cour ferroviaire.

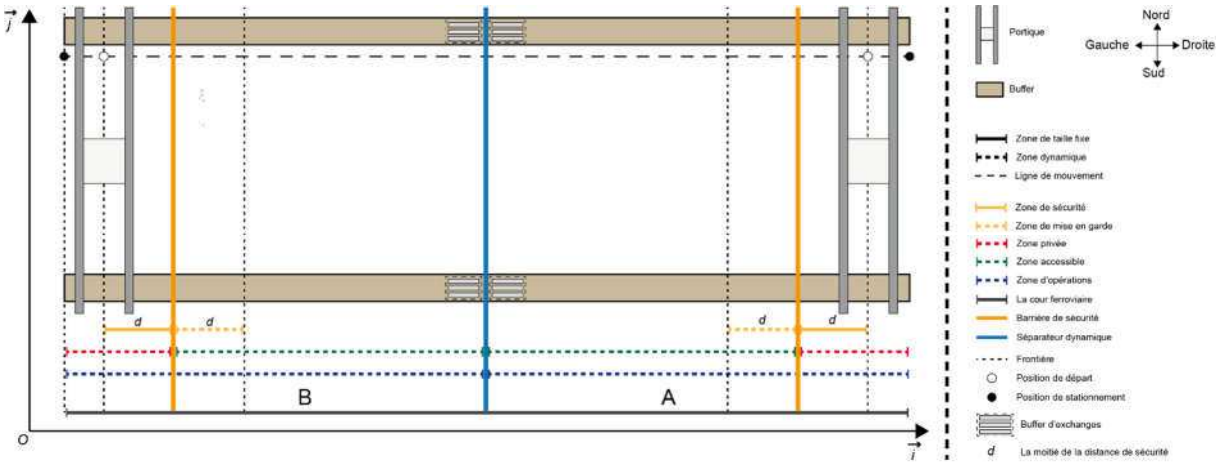


Figure IV.2 Les zones de la cour ferroviaire

Les zones dynamiques sont caractérisées par une longueur variable dans le temps et par une largeur toujours constante (la largeur est le côté perpendiculaire de la zone). La cour ferroviaire est divisée en deux zones d'opérations dynamiques, séparées par le délimiteur nommé « séparateur dynamique » (la ligne en bleu dans la figure IV.2). La zone d'opérations à droite est réservée au portique A, tandis que celle à gauche est attribuée au portique B. La longueur de ces deux zones est liée au mouvement du séparateur, en effet, lorsqu'il est déplacé horizontalement au niveau d'un repère (OIJ) du schéma présenté ci-dessous, la taille d'une zone d'opérations est agrandie et celle de l'autre est réduite. Cette dynamique est un élément fondamental pour le fonctionnement des deux approches de gestion d'interférences et de blocage des portiques exposées dans les sections 4 et 5. Le séparateur est une ressource critique manipulée à un instant t par un seul et unique portique. En cas de besoin du séparateur, une demande est adressée à l'agent planificateur opérationnel (figure IV.3). Ce dernier répond à cette demande selon l'état actuel du séparateur, soit par une acceptation s'il est libre soit par une attente dans le cas contraire et une fois libéré l'APO contacte le portique en question pour voir s'il en a encore besoin.

Par ailleurs, pour indiquer aux deux portiques jusqu'à quelle position leurs zones d'opérations pourraient être élargies, on divise chaque zone d'opérations en zone accessible pour les deux et en zone privée pour l'un et inaccessible pour l'autre. En d'autres termes, un portique peut évoluer dans la zone accessible de l'autre à condition de repositionner le séparateur dynamique, en revanche le portique ne pénètre jamais sur le territoire privé de l'autre, vu que le séparateur ne peut être positionné que dans la zone définie par l'union des deux zones accessibles (une contrainte forte). La dimension de la zone accessible est déterminée par deux délimiteurs : la barrière de sécurité (en orange sur le schéma ci-dessus) et le séparateur dynamique, et celle de la zone privée est délimitée seulement par la barrière de sécurité. La barrière de sécurité d'un portique ne dépasse jamais le séparateur dynamique. Par conséquent, la zone accessible pourrait avoir une valeur nulle, au cas où, sa barrière de sécurité et le séparateur dynamique sont superposés, par contre la zone privée est strictement non-nulle.

Chaque zone privée inclut une zone de sécurité et chaque zone accessible dispose d'une zone de mise en garde. Une zone de sécurité est une zone de taille fixe, sa longueur est toujours égale à la distance d (cette distance représente la moitié de la distance de sécurité entre les deux

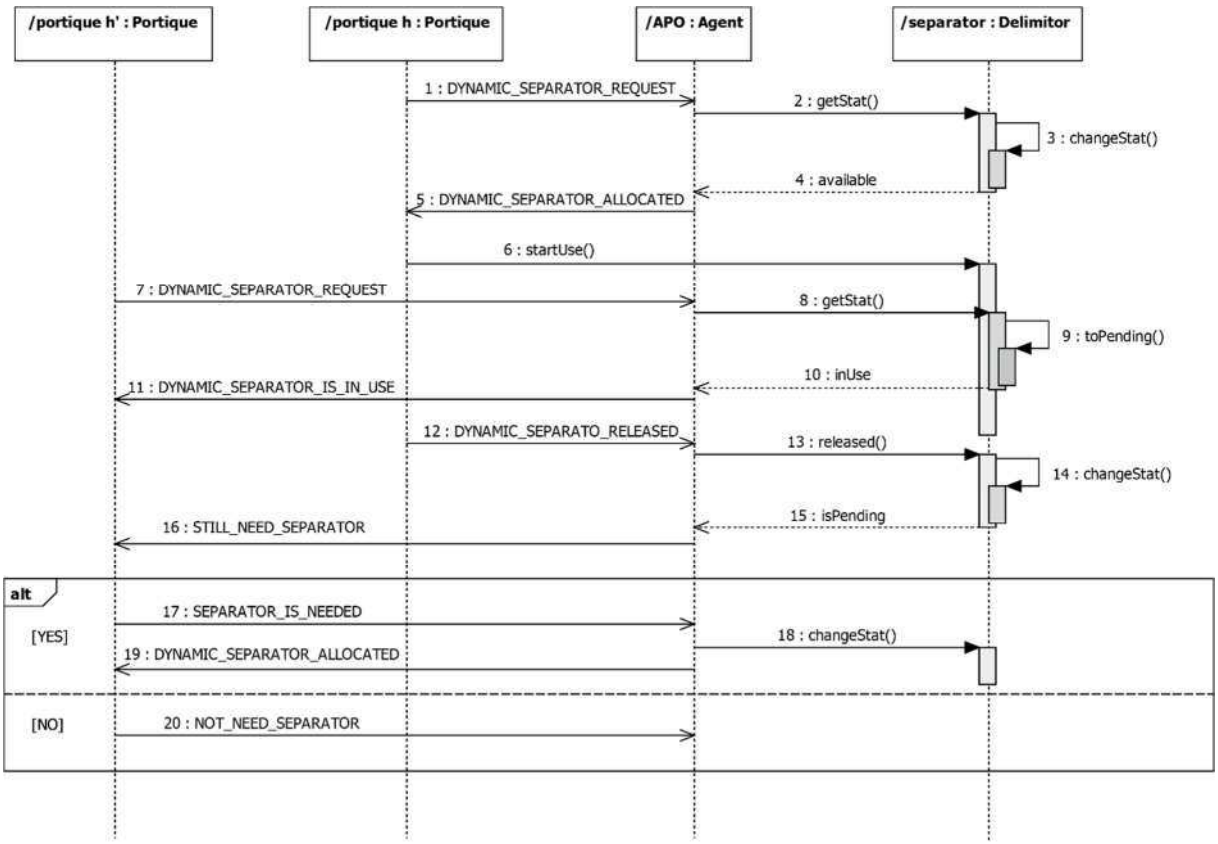


Figure IV.3 L'allocation du séparateur dynamique

portiques). Elle est située à la frontière de la zone privée délimitée par la barrière de sécurité et son emplacement suit le mouvement du portique auquel elle est attachée. De plus, elle lui indique la distance minimum qu'il doit garder avec le séparateur dynamique. D'une part, la zone de mise en garde hérite les caractéristiques de la zone accessible et partage le même délimiteur de la zone de sécurité, cependant sa longueur ne dépasse jamais la distance d. Son rôle est de maintenir le respect de la contrainte à laquelle le séparateur est soumis. Autrement dit, un portique ne se déplace jamais vers une position située dans la zone de mise en garde de l'autre, mais il peut y positionner sa barrière de sécurité et le séparateur dynamique. Exemple illustratif (figure IV.4) : le portique A veut se déplacer vers une position située à la zone de mise en garde du portique B. Tout d'abord, le séparateur dynamique est placé à une distance d de cette position et il en va de même pour sa barrière de sécurité. La situation engendrée est la suivante : le séparateur dynamique dépasse la barrière de sécurité du portique B et les deux zones de sécurité s'intersectent. Or une telle situation cause un non-respect de la distance de sécurité. En bref, les zones de sécurité et les zones de mise en garde servent à indiquer aux portiques les positions où ils peuvent aller sans risque de croisement. Le tableau IV.1 montre les principales différences entre les zones de notre système.

Tableau IV.1 Différences entre les zones du système

Zone	Size	Location	Rôle
Zone d'opérations	Dynamique	Fixe	Indiquer au portique sa propre zone.
Zone accessible	Dynamique	Fixe	Indiquer aux portiques où ils peuvent effectuer leurs prochains mouvements.
Zone privée	Dynamique	Fixe	Indiquer à son portique un espace sans interférence.
Zone de mise en garde	Dynamique	Dynamique	Indiquer au portique une zone avec possibilité d'interférence.

Zone de sécurité	Fixe	Dynamique	Indiquer au portique la distance minimale qu'il doit garder avec le séparateur dynamique.

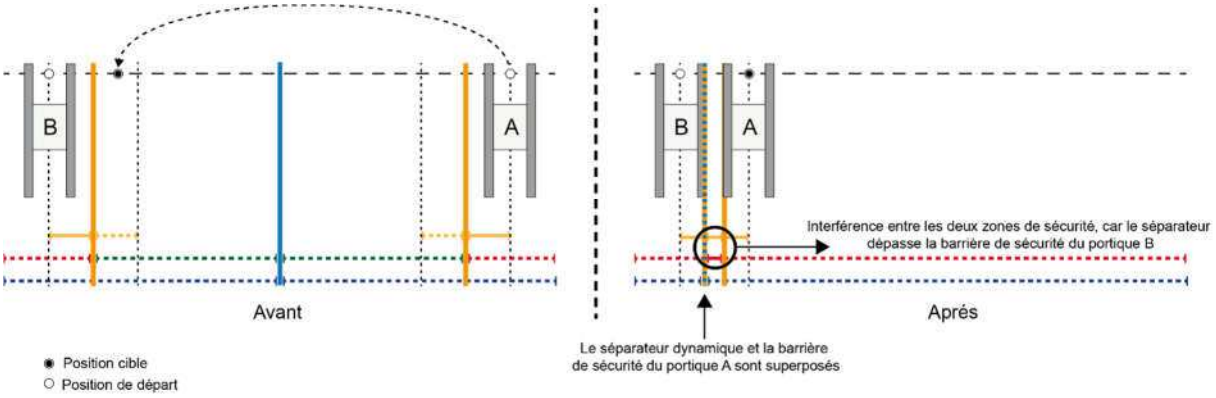


Figure IV.4 L'exemple illustratif

1.2.2. Buffers d'échanges

Les deux buffers (nord et sud) diminuent le risque d'arrêt des portiques en accumulant temporairement les conteneurs exports et imports destinés à des moyens de transport non disponibles à la cour ferroviaire pendant les opérations de manutention. Ils sont divisés en deux parties identiques qui comportent un ensemble de piles, où chaque pile est caractérisée par trois indices qui définissent son emplacement, à savoir, *k* (identifiant du buffer), *l* (identifiant de la ligne), *m* (identifiant de la colonne). Ces parties sont situées dans des zones d'opérations différentes et gardent toujours leurs dimensions d'initialisation (dimensions initiales des zones d'opérations avant tout changement). De plus, pour éliminer l'utilisation des *reachstackers*, également les temps d'attente additionnels et les coûts supplémentaires liés aux *reachstackers* (énergie et coûts d'exploitation), nous distinguons au niveau de chaque partie trois piles qui sont verticalement alignées et adjacentes au séparateur dynamique (à l'état d'initialisation), comme des buffers d'échanges. Ces buffers sont utilisés par les portiques pour faciliter le transfert de conteneurs d'une zone d'opérations à l'autre lorsque le mouvement d'un portique est bloqué par l'autre (voir la ligne rouge dans la Figure IV.1). Pour résoudre ce problème (voir la ligne pointillée verte, dans la figure IV.5), le portique en situation de blocage prend le conteneur, le dépose dans un buffer d'échanges de l'autre portique, ensuite il lui demande (le

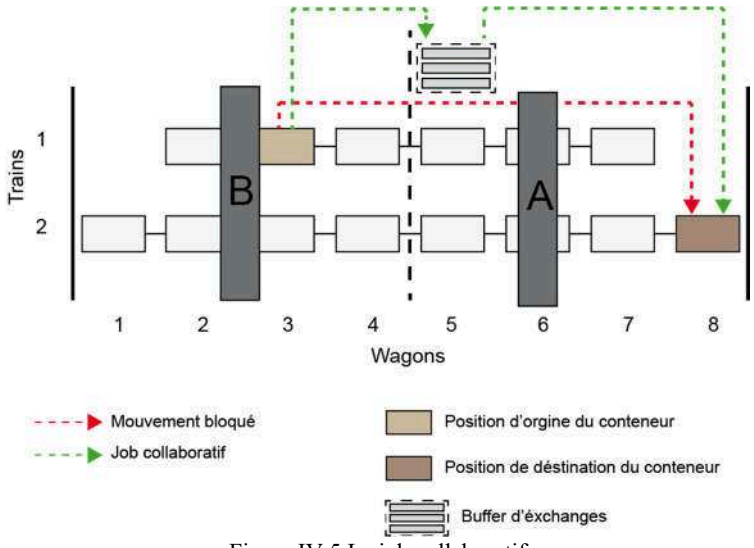


Figure IV.5 Le job collaboratif

portique bloqué envoie une demande à l'autre portique) de déplacer le conteneur à sa position finale. Cette série d'actions est appelée « un job collaboratif ». Avec cette solution les *reachstackers* ne seront plus nécessaires pour assurer l'échange de conteneurs entre les deux zones d'opérations, les portiques le feront eux-mêmes (voir section 4, situation 4).

1.2.3. Formulation mathématique de l'architecture proposée

Pour mieux décrire l'architecture du système, voici une formulation mathématique :

Soit Z^*, Z_A, Z_B et S, qui représentent respectivement la cour ferroviaire, les deux zones d'opérations qui la composent et le séparateur dynamique. De plus, chaque zone est constituée d'un ensemble de points.

$$Z^* = \bigcup_{i=0}^{n} P(x_i, y_i), tel\ que\ x, y \in R_+^2\ et\ n \in N$$
$$Z^* = Z_A \cup Z_B\ , tel\ que\ Z_A \cap Z_B = \{S\}\ (1)$$

Soit Z_h^+, Z_h^-, Z_h^s, $Z_h^{s\prime}$et D_h désignant respectivement la zone accessible, la zone privée, la zone de sécurité, la zone de mise en garde et la barrière de sécurité d'une zone d'opérations.

$$Z_h = Z_h^+ \cup Z_h^-, tel\ que\ Z_h^+ \cap Z_h^- = \{D_h\}, h \in \{A, B\}\ (2)$$
$$Z_h^s \in Z_h^-\ , longueur_{\ Z_h^s} = d\ (3)$$
$$Z_h^{s'} \in Z_h^+\ , 0 \leq longueur_{\ Z_h^{s'}} \leq d\ (4)$$
$$S \in \bigcup_{h \in \{A,B\}} Z_h^+\ (5)$$
$$P_{D_B} \leq P_S \leq P_{D_A}\ (6)$$

Enfin, chaque bloc d'échanges est représenté par :

$$be_{(q,r)} = \bigcup_{i=1}^{3} S_i^{(k,l,m)}\ , tel\ que \begin{cases} q \in \{nord, sud\}, r \in \{droite, gauche\} \\ k, l, m \in \mathbb{N}^{*3} \wedge m = constant \end{cases}$$

Les expressions de (1) à (4) sont appelées contraintes de zones, et (5) et (6) sont des contraintes de délimiteurs.

1.3. Déroulement des opérations de manutention

Avant d'entamer la description des deux approches de gestion, nous allons présenter d'abord le déroulement des opérations de manutention de conteneurs. En d'autres termes, comment les deux portiques déchargent et chargent les trains ?

La planification des opérations de manutention d'un train est effectuée par l'APO durant le déplacement du train à la cour ferroviaire. Le plan préparé est ensuite envoyé au portique principal (*TRAIN_ HANDLING_PLAN_DESIGNED*), qui l'ajoute à la liste des conteneurs à

manutentionner triée par ordre de priorité (cette liste est utilisée par les deux portiques). Lorsque le train arrive à la cour ferroviaire (*trainArrived*), l'APO ordonne aux portiques de commencer les opérations de déchargement et de chargement (*START_HANDLING_OPERATION*). D'ailleurs, pour minimiser la durée des opérations les trains peuvent être chargés et déchargés simultanément. Le déroulement de ces opérations est modélisé à l'aide du diagramme de collaboration agent exposé dans la Figure IV.6.

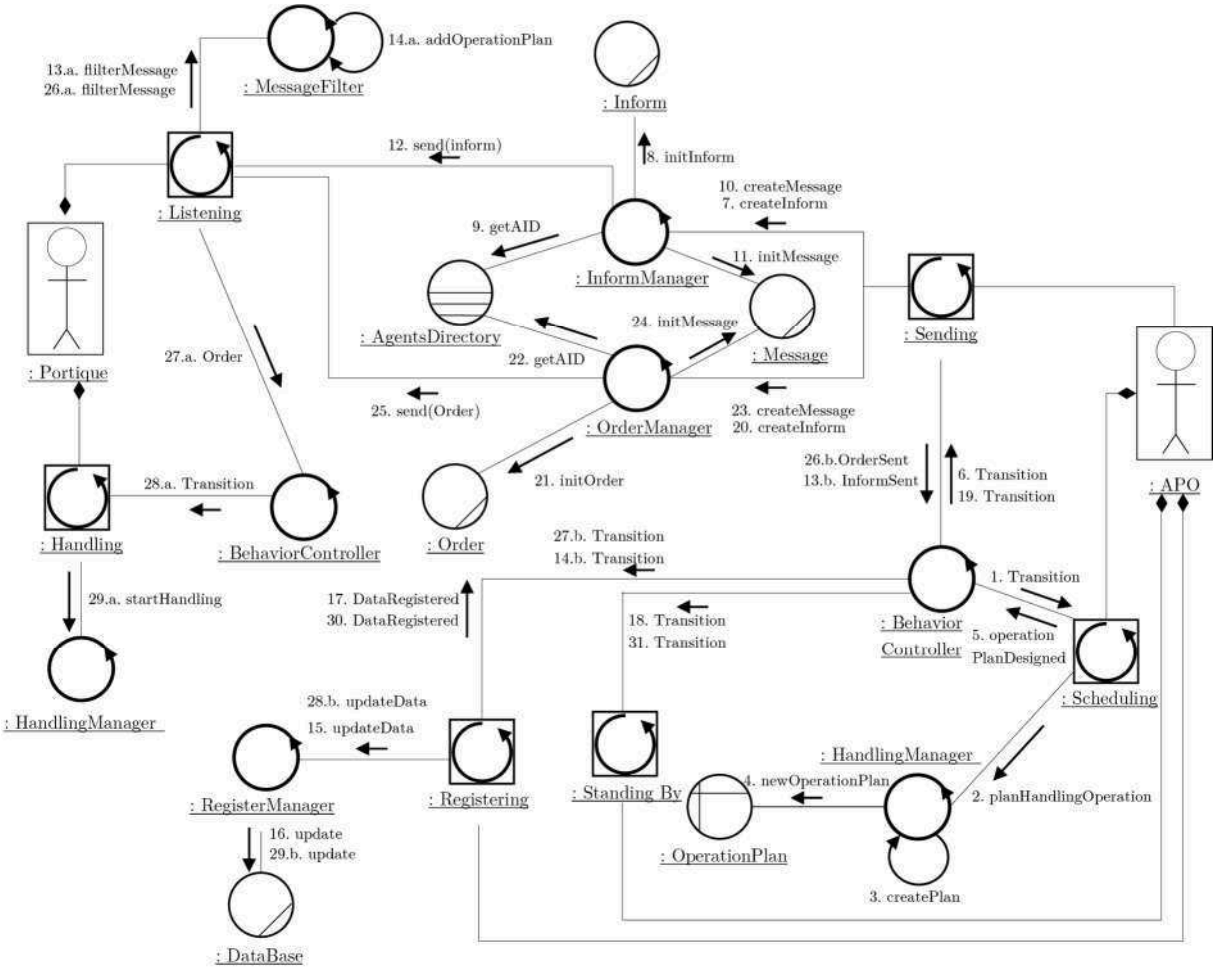


Figure IV.6 Le diagramme de collaboration agent : planification et déroulement des opérations de manutention

Pour manutentionner un conteneur le portique effectue diverses actions. Tout d'abord, le portique lance son chariot motorisé réglé par rapport à la taille du conteneur à manutentionner. Ensuite, le chariot motorisé enchaîne deux mouvements. Premièrement, le mouvement de direction (l'axe $\vec{y}$), où il se déplace sur les bras du portique jusqu'à ce qu'il soit au-dessus du conteneur. Deuxièmement, le mouvement de levage (l'axe $\vec{z}$), pour récupérer le conteneur en question. Une fois le conteneur récupéré, le chariot se déplace de façon croissante et verticale à l'axe $\vec{z}$, puis recule suivant l'axe $\vec{y}$ pour déposer le conteneur soit sur un wagon soit dans une pile. Les déplacements des deux portiques (l'axe $\vec{x}$), sont assujettis aux règles de la stratégie de non-croisement choisie (voir sections 4 et 5). Dans les deux stratégies le comportement des portiques est régi par la dynamique des zones. Quand un portique n'a pas d'autres tâches à exécuter, il retourne à sa position de stationnement.

1.4. Approche I : la stratégie à base d'agents

Dans cette stratégie, le comportement des portiques est modélisé sous format de situations-actions, qui permet à chaque portique d'adapter la zone de travail à ses besoins pour marquer son territoire privé d'une part, d'autre part de remettre à plus tard l'exécution d'une tâche s'il est dans l'incapacité de l'atteindre pour diminuer au maximum les temps d'attente. La stratégie comprend également un processus de coopération et de collaboration pour accomplir des jobs spécifiques et réduire les situations de blocage. Toutefois, dans certaines situations d'impasse (les deux portiques sont bloqués), un autre agent intervient pour débloquer les portiques.

1.4.1. Contrainte de mouvement

Avant tout déplacement, chaque portique réorganise sa zone d'opérations en respectant les contraintes qui régissent les composants du système. Ces contraintes sont représentées par une seule contrainte appelée « contrainte de mouvement » :

$$P_{c_{portique_h}}, P_{p_{portique_h}} \in Z_h^- \backslash Z_h^s \ , tel\ que\ h\ \in \{A, B\}\ (7)$$

- $P_{c_{portique_h}}$: Position de départ du portique *h*. La position, où se situe le portique avant de commencer une nouvelle opération de manutention, appartient toujours à la zone définie par l'espace entre sa zone privée et de sa zone de sécurité, *i.e.* $P_{c_{portique_h}} \in (Z_h^- \backslash Z_h^s)$.

- $P_{p_{portique_h}}$: Position cible du portique *h*. La position où le portique récupérera ou bien déposera son prochain conteneur potentiel.

Cette contrainte est définie selon la position cible du portique, et oblige le portique à s'assurer que sa position cible peut être incluse dans la zone définie par l'espace entre sa zone privée et de sa zone de sécurité, sinon passer à la tâche suivante. La position de départ du portique satisfait déjà la contrainte, voir Figures IV.2 et IV.4.

La vérification de la contrainte de mouvement et la manipulation de la zone de travail se font via le processus de gestion décrit dans la figure IV.7. Ce processus est une ressource critique qui doit être utilisée exclusivement par un seul portique à un moment donné, *i.e.*, chacun à son tour. Car les portiques ne doivent pas manipuler les zones en même temps afin d'éviter le dysfonctionnement de la stratégie (problème d'exclusion mutuelle). En effet, un portique est implémenté comme un *thread* et lorsque plusieurs *threads* sont lancés, l'accès aux ressources communes doit être contrôlé (la zone de travail).

Contrôler l'accès aux ressources est essentiel pour développer un modèle de simulation robuste qui fonctionne quel que soit l'entrelacement de l'exécution des *threads*. La figure IV.8 montre comment l'accès aux ressources est géré. Lorsqu'un *thread* (un portique) entre dans le bloc, il verrouille l'accès au processus de gestion et l'autre portique ne peut l'utiliser jusqu'à ce

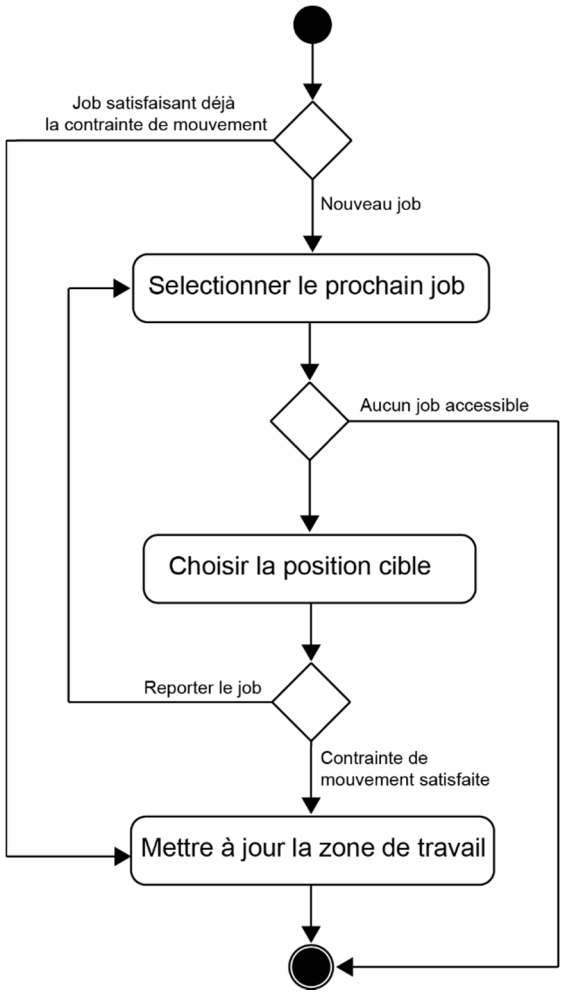


Figure IV.7 Le processus de gestion

que l'accès soit déverrouillé, *i.e.*, quand le *thread* termine l'exécution du processus. Ce processus compte quatre étapes détaillées dans les sous-sections suivantes.

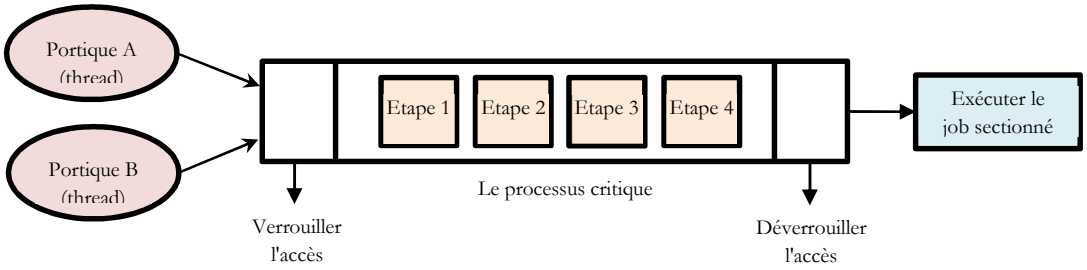


Figure IV.8 Le contrôle d'accès aux ressources communes

1.4.2. Etape I : sectionner le prochain job

Les trains sont garés à la cour ferroviaire de manière à avoir presque le même nombre de conteneurs dans les deux zones d'opérations en vue d'équilibrer le mieux possible la charge de travail entre les deux portiques. Les portiques déterminent le prochain conteneur à manutentionner et son nouvel emplacement en suivant trois règles :

(1). Chaque portique enchaîne l'exécution des tâches de manutention en favorisant le déchargement et le chargement du train prioritaire.

(2). Choisir le conteneur le plus proche avec la date de livraison la plus urgente et le mettre à l'emplacement le plus proche. Notez que tous les conteneurs à décharger et à charger sont dans une liste commune. La question qui se pose ici est pourquoi chaque portique n'a pas sa propre liste de jobs ? Un portique peut terminer sa charge de travail avant l'autre, alors il doit encore travailler pour accélérer les opérations sur les trains. Donc, la liste de jobs du portique actif (qui a encore des jobs à effectuer) devient une liste commune. Par conséquent, dès le début, il n'y a qu'une seule liste de jobs pour les deux portiques, mais ils doivent suivre les trois règles.

(3). Opérer d'abord au niveau de sa zone d'opérations, puis chercher dans l'autre zone, au cas où, il n'y aurait pas conteneurs à traiter ou de position vacante.

1.4.3. Etape II : choisir la position cible

La position cible du portique est utilisée pour déterminer les nouveaux emplacements et les dimensions de tous les composants concernés de notre système (voir, STEP IV), avant chaque déplacement de conteneur. Cette position dépend du conteneur choisi et de la direction qui sera prise pour le manutentionner (gauche vers droite ou bien droite vers gauche). De ce fait, deux cas sont distingués : (1) la position d'origine du conteneur se situe entre sa position de destination et la barrière de sécurité du portique, *i.e.*, $P_{déstination} < P_{orgine} < P_{D_h}$ (voir, figure IV.9) ; (2) la position de destination du conteneur se situe entre sa position d'origine et la barrière de sécurité du portique, *i.e.*, $P_{orgine} < P_{déstination} < P_{D_h}$ (voir, figure IV.10). Il faut noter que la distance séparant la future destination du portique et sa barrière de sécurité est toujours égale à sa zone de sécurité.

Dans le premier cas, le portique prend la position d'origine du conteneur comme position cible et l'utilise pour vérifier la contrainte de mouvement. Si le déplacement est autorisé, les zones seront adaptées pour saisir le conteneur (voir le côté gauche de la figure IV.9). Dans cette situation, la direction de la grue A est de gauche à droit, tandis que la direction de la grue B est de droite à gauche. Ensuite, le portique redimensionne ses zones selon la position de destination du conteneur sans vérifier la contrainte de mouvement (voir le côté droit de la figure IV.9), car elle est déjà couverte par la zone privée définie pour saisir le conteneur (voir la ligne pointillée rouge dans la figure IV.9 et aussi situation 2 au-dessous).

Dans le deuxième cas, le portique examine le respect de la position de destination du conteneur vis à vis de la contrainte de mouvements avant de se déplacer vers la position d'origine du conteneur. Si la contrainte est satisfaite, le portique exécute le job (la grue A se déplace de droite à gauche tandis que la grue B se déplace dans le sens inverse). Lorsqu'un portique soulève un conteneur, il doit le porter à son nouvel emplacement. Cependant, selon cette stratégie la tâche de récupération du conteneur (position d'origine) peut être autorisée, mais il est possible que la position de destination du conteneur ne soit pas conforme à la contrainte de mouvement, car l'autre grue pourrait se rapprocher ou la dépasser. Ainsi, si le portique effectue la première tâche du job (récupération), il doit attendre jusqu'à ce que la

deuxième tâche (dépôt) soit accessible. C'est pourquoi le portique doit s'assurer de la faisabilité de chaque tâche avant de commencer la manutention, en vue de minimiser au maximum les délais d'attente. Notez que dans ce cas, la zone de travail sera réorganisée une seule fois durant l'exécution du job, contrairement au premier cas où cela se fait deux fois.

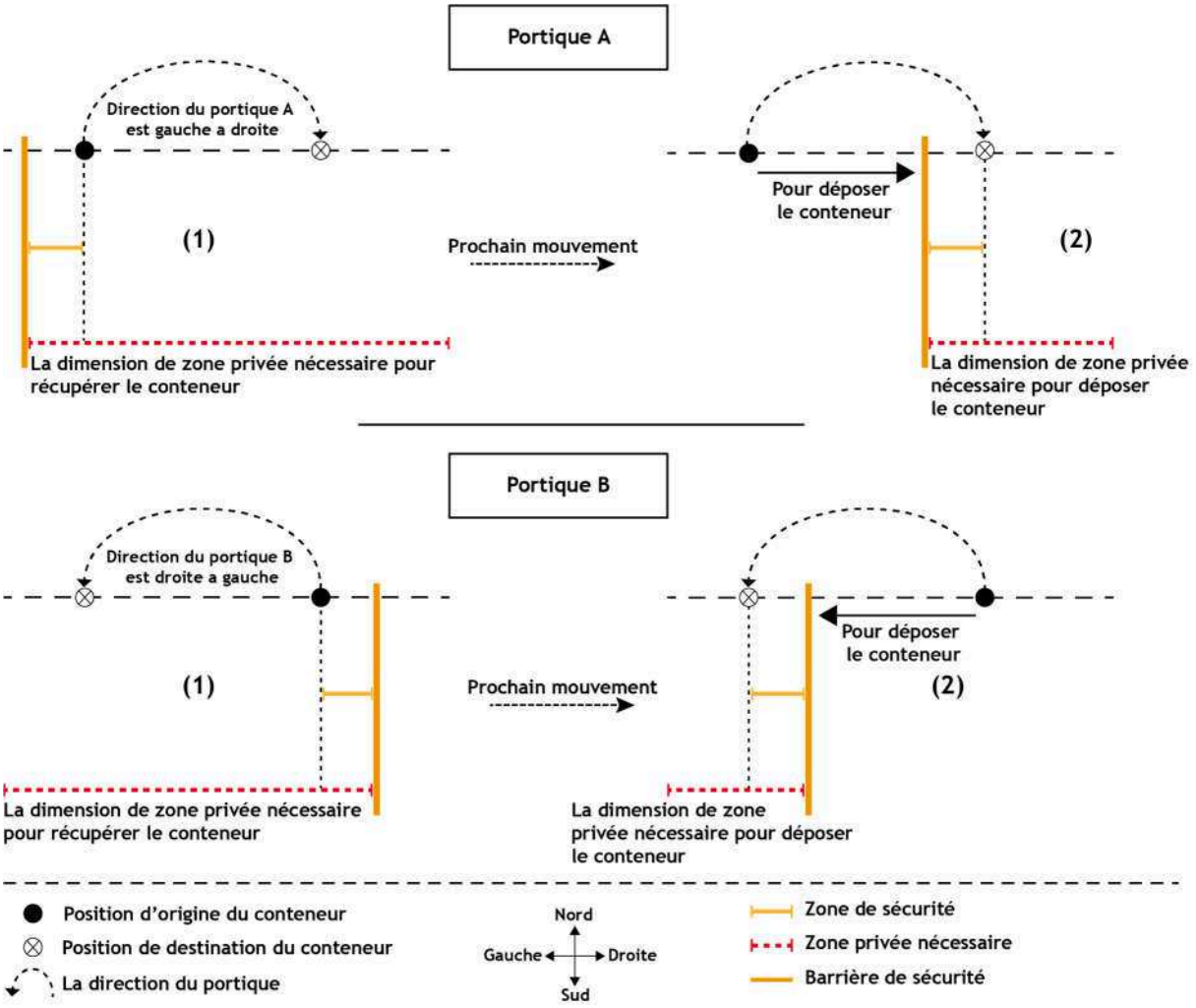


Figure IV.9 Le premier cas

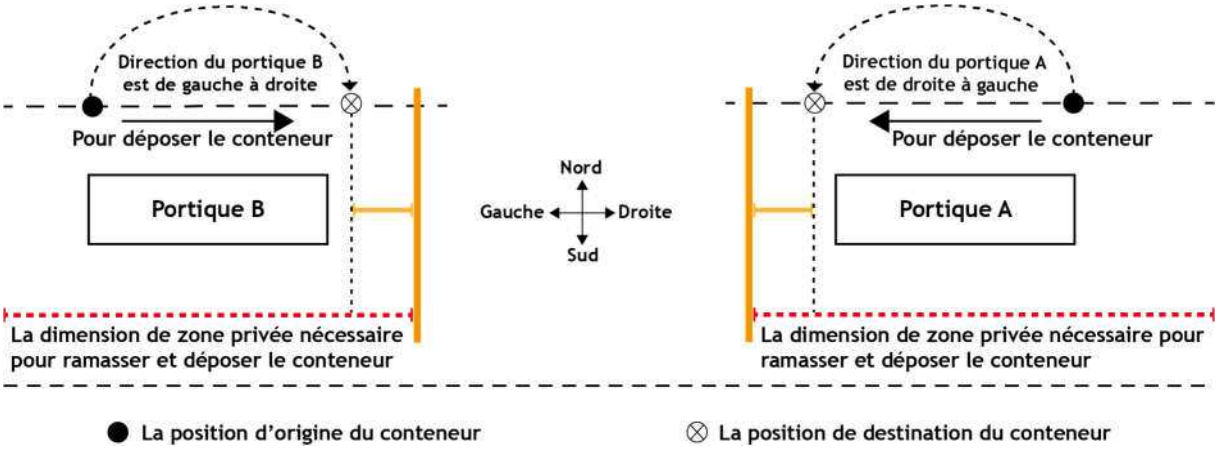


Figure IV.10 Le deuxième cas

1.4.4. Etape III : vérification de la contrainte de mouvement

Cette étape met en avant, l'ensemble des situations possibles ainsi que les actions appropriées visant à maintenir le respect de la contrainte qui régit les mouvements des

portiques. En d'autres termes, elle décrit sous format situations-actions le code de conduite des portiques. Nous utilisons les notations suivantes pour la description des situations :

- $h\ et\ h'$: deux indices, où $h, h' \in \{A, B\}$. N.B : si $h = A$, alors $h' = B$.
- P_i : position d'une l'entité i.
- P_c : position de départ du portique h.
- P_p : position cible du portique h.
- $g : C \rightarrow boolean$: renvoie un booléen, true si le portique a le droit d'utiliser le séparateur dynamique, false sinon.
- $distance : P, P' \rightarrow D$: renvoie la distance entre deux points.
- $op : Portique_h \rightarrow task$: renvoie la tâche qui sera effectuée par le portique h.
- $atInit : Z \rightarrow Z_{t0}$: renvoie la dimension d'initialisation de la zone Z.
- J : liste de tâche commune entre les deux portiques.

Situation 1. Le portique veut se déplacer vers une position située soit au niveau de sa zone accessible, soit au niveau de sa zone de sécurité.

Formulation	$\boldsymbol{P_c \in Z_h^- \backslash Z_h^s \wedge (P_p \in Z_h^+ \vee P_p \in Z_h^s)}$	
	Description	**Détails et Actions**
Cas 1.	$P_p \in Z_h^+$ $\wedge\, distance(P_p, P_S) \geq d$	La position cible respecte la contrainte de mouvements (la distance entre elle et le séparateur dynamique est supérieure ou égale à d). Le portique repositionne sa barrière de sécurité pour pouvoir se déplacer. On note d'ailleurs la présence d'un cas particulier, lorsque la $distance(P_p, P_S) = d$, la zone accessible du portique aura une valeur nulle ($Z_h^+ = \emptyset$ et $Z_h^- = Z_h$) et les deux délimiteurs (S, D_h) seront superposés.
Cas 2.	$P_p \in Z_h^s$ $\wedge\, distance(P_p, P_S) \geq d$	La position cible appartient à la zone de sécurité du portique. Nous avons déjà mentionné que le portique doit toujours garder une distance supérieure ou égale à d avec sa barrière de sécurité. Donc, pour autoriser le déplacement du portique, seulement un repositionnement de sa barrière de sécurité est nécessaire.
Cas 3.	$distance(P_p, P_S) < d$ $\wedge\, (width_{Z_{h'}^s} = d \vee$	La position cible du portique ne respecte pas la contrainte de mouvements, en effet la distance entre elle et le séparateur dynamique est inférieure à d, en conséquence, un repositionnement du

	$distance\left(P_p, P_{D_{h'}}\right) \geq d)$ $\wedge\, g(portique_h) = true$	séparateur est nécessaire pour se soumettre à la contrainte. Cette action est possible vu que la contrainte à laquelle le séparateur est soumis sera respectée. De plus, le séparateur est libre et il est attribué au $portique_h$. Par ailleurs, lorsque la $distance\left(P_p, P_{D_{h'}}\right) = d$, les deux zones de sécurité seront juxtaposées après le repositionnement du séparateur, c.-à-d., les trois délimiteurs seront superposés.
Cas 4.	$distance(P_p, P_S) < d$ $\wedge\, (Z_{h'}^{s'} = \emptyset \vee$ $distance\left(P_p, P_{D_{h'}}\right) < d\,)$	Non seulement cette position ne respecte pas la contrainte de mouvements, mais aussi le portique ne peut pas repositionner le séparateur dynamique. En effet, autoriser cette action entraînera une intersection des deux zones de sécurité (Z_h^s et $Z_{h'}^s$), or cela engendrera une situation de croisement. Alors, le portique remet à plus tard la tâche et passe à une autre.

Situation 2.

Formulation	$\boldsymbol{P_c \in Z_h^- \backslash Z_h^s \wedge P_p \in Z_h^- \backslash Z_h^s}$
Description et Actions	Le portique veut se déplacer vers une position située au niveau de la zone définie par l'espace entre sa zone privée et de sa zone de sécurité. Dans cette situation, le portique peut se déplacer sans risque de croisement. Autrement dit, la contrainte de mouvement est déjà satisfaite.

Situation 3.

Formulation	$\boldsymbol{P_c \in Z_h^- \backslash Z_h^s \wedge P_p \in Z_{h'}^+ \backslash Z_{h'}^{s'} \wedge g(portique_h) = true}$
Description et Actions	Le portique veut se déplacer vers l'autre zone d'opérations $Z_{h'}$. Plus précisément, dans la zone définie par la différence entre la zone accessible et la zone de mise en garde. Evidemment, cette position ne vérifie pas la contrainte de mouvements. Alors, le repositionnement du séparateur est obligatoire, d'autant plus qu'il est possible ($Z_{h'}^+ \backslash Z_{h'}^{s'} \neq \emptyset$). Le portique a le droit de manipuler le séparateur.

Situation 4. Le portique veut se déplacer vers une position au niveau d'une zone qui lui est inaccessible (la zone privée et la zone de mise en garde de l'autre portique).

Formulation	$\boldsymbol{P_c \in Z_h^- \backslash Z_h^s \wedge (P_p \in Z_{h'}^{s'} \vee P_p \in Z_{h'}^-)}$	
	Description	**Description et Actions**
Cas 1.	$P_p \in atInit\ (Z_h)$	D'habitude, cette position appartient à la zone d'opérations du portique. Seulement, elle ne l'est plus. Un repositionnement du séparateur par l'autre portique est à l'origine de ce changement. De plus, cette situation n'est que temporaire. Dans ce cas, le portique passe à une autre tâche en

		attendant le retour de sa zone d'opérations à son état normal ($Z_h = Z_{h'}$).
Cas 2.	$P_p \notin atInit\ (Z_h) \wedge op(portique_h) = toDropOff \wedge distance\ \left(P_{be_{h'}}, P_{D_{h'}}\right) \geq d \wedge g(portique_h) = true$	Le portique a pour but de déplacer un conteneur. Par contre, il est dans l'incapacité de le faire (zones inaccessibles). A cet égard, la clé de ce problème s'articule autour des blocs d'échanges. Autrement dit, le portique déplacera le conteneur vers une position temporaire au niveau des blocs d'échanges situés à l'autre zone d'opérations. Ensuite, passer la main à l'autre portique et le laisser s'en occuper. Par conséquent, la position cible du portique va prendre une autre valeur, celle des blocs d'échanges. On note que le séparateur est disponible et que la distance entre la position cible du portique et la barrière de sécurité de l'autre est supérieure ou égale à *d*. Il arrive parfois qu'un conteneur destiné à un wagon situé au niveau d'une zone qui n'est jamais accessible au portique, quelle que soit la configuration des zones. En effet, tous conteneurs ou wagons situés à l'extrémité (voir position de stationnement, Figure IV.2) de la zone d'opérations d'un portique ne pourront jamais être accessibles à l'autre. De ce fait, la collaboration entre portiques constitue une solution pertinente pour remédier à cette impasse. Ce processus de collaboration entre portiques est exécuté seulement si : (1) L'autre portique (portique *h'*) opère toujours entre la position d'origine et de destination du conteneur. En d'autres termes, le portique *h* va essayer de réaliser entièrement le job, car il se peut que la position de destination du conteneur soit temporairement inaccessible. Alors, le portique *h* met à plus tard le job et passe à un autre (pour minimiser la double manutention du conteneur). Cependant, si après plusieurs tentatives (5 fois), la position de destination est encore inaccessible, le portique *h* demandera l'aide du portique *h'*. (2) Ou, le conteneur a une date de livraison urgente.
Cas 3.	$P_p \notin atInit\ (Z_h) \wedge op(portique_h) = toDropOff \wedge (Z_{h'}^{s'} = \emptyset \vee$	Contrairement au cas précédent, le portique ne peut accéder aux blocs d'échanges, vu qu'il y aura un risque de croisement (les blocs d'échanges

	$distance\ \left(P_{be_{h'}}, P_{D_{h'}}\right) < d)$	appartiennent à la zone privée ou bien à la zone de mise en garde de l'autre), voir *situation 1. Cas 4.*
Cas 4.	$P_p \notin atInit\ (Z_h) \wedge op(portique_h) = toPickUp$	Le portique veut récupérer un conteneur mais ce n'est pas possible, voir *Cas 2.* Pour avoir ce conteneur, il contacte l'autre portique, pour qu'il le déplace vers les blocs d'échanges (les blocs du portique demandeurs). En attendant la réponse de l'autre, il passe à une autre tâche. La réponse à sa requête sera soit une acceptation d'aide soit une renonciation au conteneur. La première réponse signifie que le conteneur sera rapproché pour qu'il lui soit accessible, tandis que la deuxième indique que l'autre portique s'en chargera, c.-à-d., qu'il a trouvé une position libre au niveau de sa zone d'opérations pour le déposer.

Comme expliqué ci-dessus, un job collaboratif aide les portiques à éviter autant que possible les situations de blocage/d'impasse (à l'exception de la situation de l'impasse dans laquelle les deux grues ne peuvent pas bouger, voir la situation 6 ci-dessous). Chaque tâche de ce job est exécutée par un portique différent. La priorité des jobs collaboratifs est liée à la date de livraison du conteneur :

- Le conteneur a une date de livraison urgente : le job collaboratif devient alors une priorité pour les portiques, mais tout job en cours doit être terminé en premier. En outre, lorsqu'un portique termine son job alors que l'autre est en train de terminer le sien, le portique doit attendre la fin du job en cours. Avant de commencer, le portique qui exécutera la tâche de dépôt (la deuxième tâche du job) doit se déplacer vers une position non bloquante pour l'autre, et près du buffer qui va recevoir le conteneur (une position non bloquante est la position qui est exactement à *2d* du buffer). Cette position permet à l'autre portique d'effectuer la tâche de récupération (la première tâche du job) sans être bloquée pendant le processus. Dès que le portique se déplace vers sa position non bloquante, l'autre commence le job collaboratif pour ramener le conteneur au buffer d'échanges. En outre, la zone de travail doit être réorganisée en fonction des positions cibles des portiques (voir STEP IV). Ces directives visent à éviter des situations improductives supplémentaires et à accomplir le job plus rapidement.

- Sinon, le job collaboratif est inséré comme un job normal dans une position appropriée dans la liste commune, juste après tous les conteneurs avec une date de livraison urgente.

Situation 5.

Formulation	$g(portique_h) = false$
Description et Actions	Le déplacement du portique nécessite la manipulation du séparateur dynamique. Seulement, il est occupé. Donc le portique passe à une autre tâche en attendant la libération du séparateur.

Situation 6.

Formulation	$op(portique_h) = null \wedge J \neq \emptyset$
Description et Actions	Le portique a d'autres job à exécuter, seulement aucun d'entre eux ne respecte la contrainte de mouvements. Alors, le portique reste immobile (s'il est dans l'autre d'opération, il retourne à sa propre zone), informe l'APO et attend que l'autre s'éloigne. En revanche, si les deux portiques tombent dans le même cas, l'APO intervient pour débloquer la situation. Cette situation de blocage mutuel des portiques apparaît lorsque chaque portique veut déposer un conteneur derrière l'autre en même temps. En outre, chaque portique ne peut pas placer le conteneur dans le buffer d'échanges de l'autre afin de demander de l'aide (voir situation 4, cas 2 et 3). La simulation nous a montré que cette situation est la seule situation de blocage mutuel qui peut se produire, en plus d'avoir une très faible occurrence (au-dessous de 1%). L'agent médiateur débloque cette solution en utilisant la politique FIFO, c'est-à-dire que le premier portique dans la situation de blocage doit être le premier portique hors de cette situation de blocage. Le médiateur a un champ de vision plus large que tous les portiques, il ordonne au dernier portique en situation de blocage de passer à sa position non bloquante, puis le premier portique se déplace et commence son job, et quand il finit, il s'éloigne pour permettre à l'autre d'accomplir le sien. Néanmoins, si une situation inattendue de blocage mutuel se produit pendant que le modèle est en cours d'exécution et que seule la solution décrite est implémentée, la stratégie ne fonctionnera pas correctement. Par conséquent, une solution générale doit être définie à ce problème. La solution générale est de savoir quel portique peut se déplacer afin de débloquer l'autre sans traverser les frontières de la cour ferroviaire. D'abord, le médiateur vérifie si le dernier portique peut aller au-delà de la position cible du premier portique. Sinon, c'est le premier portique qui doit aller au-delà de la position cible de l'autre.

1.4.5. Etape IV : Ajustement des zones

La dernière étape du processus synchronisé est l'ajustement des zones aux besoins du portique. Pour appliquer des changements aux zones composant sa zone d'opérations, le portique détermine la nouvelle position de sa barrière de sécurité par rapport à sa position cible ($P_{D_h} = P_{p_{portique_h}} \pm d$), après il déduit la dimension de chaque zone. Tandis que, pour élargir ou bien réduire une zone d'opérations, le portique calcule le nouvel emplacement du séparateur dynamique en se basant sur sa position cible ($P_S = P_{p_{portique_h}} \pm d$), ensuite les éléments concernés par ce changement seront ajustés.

1.5. Approche II : la stratégie à base d'heuristique

Cette deuxième stratégie est inspirée de l'algorithme de colonie de fourmis pour trouver la meilleure solution (séquence des jobs) qui minimise les temps et les mouvements improductifs des portiques, *i.e.*, les situations d'interférence et de blocage. L'algorithme de colonie de fourmis appartient à la famille des méta-heuristiques générant des populations de solutions. Une solution est un chemin de nœuds liés par des arêtes étiquetées par une valeur, qui est construite progressivement. Ainsi, toutes les solutions forment un graphe pondéré. Dans notre système, les jobs sont les nœuds et les arêtes représentent la durée qui sépare le début de deux jobs qui se suivent (i.*e., date de début de job i - la date de début du job précédent*). Deux nœuds supplémentaires sont ajoutés pour marquer le début et la fin d'une solution. Quant aux portiques, ils sont modélisés par des agents fourmis qui communiquent indirectement via des traces appelées « phéromones » dispersées dans leur environnement. Les phéromones sont utilisées pour déterminer l'ordre dans lequel les conteneurs seront manutentionnés.

Cette stratégie est lancée plusieurs fois en vue de parcourir le plus de chemins possible (solutions). A chaque itération (c'est-à-dire, lancé de simulation), une liste de jobs à exécuter est préparée et la liste de phéromones de chaque conteneur est initialisée soit par les valeurs de l'itération précédente soit par une valeur de départ (pour la première itération). En effet, la liste de phéromones d'un conteneur indique tous les conteneurs ayant été exécutés après lui au cours de toutes les itérations précédentes. Les agents fourmis (les portiques) sont au départ placés dans une position aléatoire dans leurs zones d'opérations. De plus, chacun d'eux choisit son prochain job selon la quantité de phéromone déposée et la visibilité du job vis-à-vis du portique. En effet, le conteneur (un job est la manutention d'un conteneur) le plus proche du portique et qui a la valeur de phéromone la plus élevée est celui qui aura le plus de chance d'être choisi.

Par ailleurs, le processus de sélection de job et ainsi la manipulation des zones et des éléments composant la structure de la zone de travail est une ressource critique (voir la section 4.1) qui doit être exploitée uniquement par un seul agent fourmi à n'importe quel moment. Ce processus comporte trois étapes : (1) la définition de la liste des jobs réalisables ; (2) sélection d'un job ; (3) l'ajustement des zones. La dernière étape est identique à celle de la première stratégie (étape 4) et la position cible du portique est choisie selon l'étape 2. D'ailleurs, les deux agents fourmis coopèrent et collaborent (voir la situation 4), et quand ils sont dans une situation de blocage mutuel, l'agent APO intervient comme illustré dans la situation 6.

1.5.1. Construction de la solution

Etape I : la définition de la liste des jobs réalisables : l'agent fourmi choisit un job parmi les jobs qui n'ont pas été exécutés et qui se trouvent en dehors (les deux tâches du job) de la zone privée et la zone de mise en garde de l'autre fourmi. La liste des jobs réalisables est définie par les contraintes suivantes :

$$(P_{c_{portique_h}}, P_{p_{portique_h}}) \notin \left(Z_{h'}^{-} \cup Z_{h'}^{s'}\right), tel\ que\ h, h' \in \{A, B\} \quad (8)$$

$$g(crane_h) = true \quad (9)$$

La contrainte (9) est obligatoire pour les jobs ayant besoin du séparateur. Si les deux contraintes sont vérifiées, le job est ajouté à la liste. Cependant, tout conteneur avec une date de livraison très urgente est prioritaire. Ainsi, les conteneurs urgents sont choisis sans passer par la deuxième étape. La fourmi qui va exécuter le job urgent oblige l'autre à s'éloigner si elle est trop proche. Toutefois, si les deux fourmis sont dans la même situation, la fourmi avec le conteneur le plus urgent sera prioritaire. Lorsqu'une fourmi n'a pas de jobs réalisables ou a terminé sa charge de travail, elle revient à sa position de stationnement et reste immobile jusqu'à ce qu'un job soit accessible.

Etape II : sélection d'un job : l'agent fourmi sélectionne son prochain job en utilisant la formule suivante :

$$P_i(t) = \arg max_{u \in J_i^k} \frac{(\tau_{iu}(t))^{\alpha}(\eta_{iu}(t))^{\beta}}{\sum_{m \in J_i^k}(\tau_{lm}(t))^{\alpha}(\eta_{lm}(t))^{\beta}} \; if \; q \leq q_0 \quad (10)$$

q_0 est un paramètre dans l'intervalle [0,1] et il est fixé aléatoirement au début de la simulation, et q est une valeur entre 0 et 1 gérée à chaque appel à la formule 10. Si $q \leq q_0$, le job avec la probabilité la plus élevée est choisi, sinon un job est pris aléatoirement de liste des jobs réalisables. La visibilité $\eta_{iu}(t)$ du job est calculée à l'aide de :

$$\eta_{ij}^{c}(t) = \frac{\gamma_j^c}{T_{ij}}, tel \; que \; \gamma_j^c \in [1,3] \; (11)$$

La valeur du paramètre γ_j^c varie selon la zone dans laquelle se trouve le conteneur et où il sera déposé. Les valeurs possibles de γ_j^c sont affichées dans le tableau IV.2. Plus le travail est éloigné de la zone privée de la grue, plus sa visibilité diminue. Cela permet au portique de gauche et au portique de droite de manipuler les conteneurs les plus à gauche et les plus à droite, respectivement. $\tau_{iu}(t)$ est la valeur de phéromone du job, *i.e.*, son intensité par rapport au job précédant. Cette valeur est mise à jour à la fin de chaque itération avec la quantité $\Delta\tau_{ij}^{c}(t)$ calculée avec les résultats obtenus. Cette quantité sera déposée par chaque fourmi sur les conteneurs qu'elle a manutentionnés et elle est déterminée par la formule suivante :

$$\Delta\tau_{ij}^{c}(t) = \frac{q_1}{L^c} + \frac{q_2}{A^c} + \frac{q_3}{S} + \frac{q_4}{D} \quad (12)$$

Tel que :

- L^c *:* la durée de travail du portique c.
- A^c : le temps d'attente du portique c.
- S: la durée de travail totale des deux portiques ($L^c + L^{c\prime}$).
- D: la différence de la charge de travail des portiques.
- $q_i / \; i \in \{1,2,3,4\}$: coefficient dans l'intervalle [0, 1].

La nouvelle quantité de phéromone est ajoutée à l'ancienne valeur en utilisant l'équation (11). ρ est le facteur d'évaporation.

$$\tau_{ij}^{c}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}^{c}(t) + \Delta\tau_{ij}^{c}(t) \quad (13)$$

Tableau IV.2. Les valeurs du paramètre γ_j^c

$P_{p_{portique_h}}$ \ $P_{c_{portique_h}}$	Z_h^-	Z_h^+	$Z_{h'}^+$
Z_h^-	3	2.75	1.75
Z_h^+	2.5	2.25	1.5
$Z_{h'}^+$	1.25	1.25	1

1.5.2. Couplage entre la simulation à base d'agents et l'algorithme

Cette sous-section montre comment l'algorithme a été intégré dans le modèle de simulation pour obtenir la meilleure solution, voir Figure IV.11.

Tout d'abord les valeurs des paramètres de l'algorithme sont initialisées. Ensuite, le modèle de simulation est alimenté par un jeu de données (voir la section suivante) pour être exécuté. Durant la simulation, les portiques passent d'un job à l'autre (formules (8) à (11)). Après la fin des opérations de manutentions de conteneurs (fin de l'itération), la quantité de phéromone à déposer est déterminée et l'ancienne valeur est mise à jour. Le nombre d'itérations

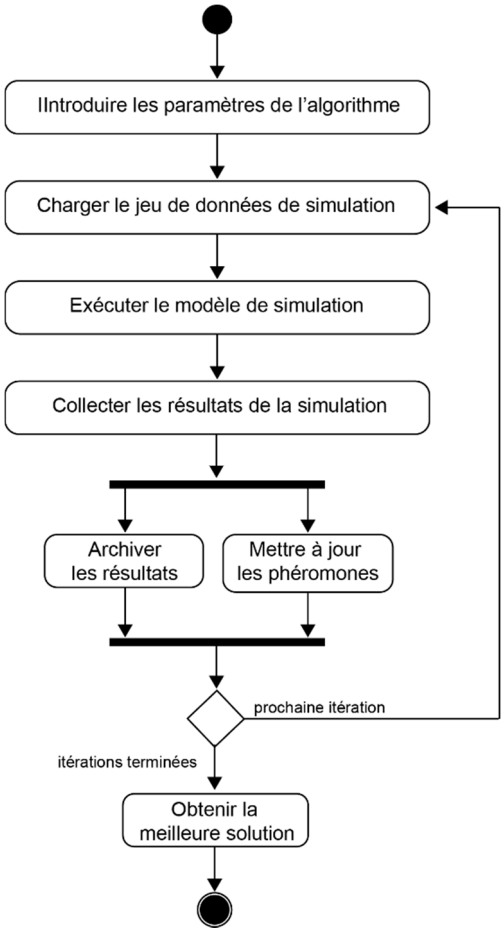


Figure IV.11 Couplage de la simulation et l'algorithme de colonie de fourmis

est fixé à 250. Enfin, la meilleure solution (itération) est celle qui affiche la durée de service minimale (la durée entre le début et la fin des opérations de manutention).

1.6. Implémentation de modèles et validation

1.6.1. Anylogic et le processus d'implémentation des modèles

La plateforme de simulation AnyLogic est utilisée pour mettre en place les différentes solutions proposées (Figure IV.12). AnyLogic est un simulateur multi-approches développé en JAVA, équipé d'une boîte à outils riche et facile à maitriser, adapté à plusieurs domaines d'application ou secteurs industriels (chaînes logistiques et approvisionnement, soins de santé, transport, marketing, etc.) et permet de combiner efficacement les diverses techniques de simulation (simulation à base d'agent, simulation à événements discrets et simulation continue). AnyLogic est utilisé aussi bien pour l'analyse, la collecte et la comparaison de résultats, que pour l'extension, la visualisation et l'expérimentation des modèles de simulations. D'ailleurs, il diminue considérablement le temps et le coût de développement des modèles, en plus, de les enrichir par d'autres packages externes développés dans un autre EDI JAVA (environnement de développement intégré). Les composants de cet outil simplifient le développement des modèles de simulation à base d'agents selon le niveau de détail souhaité. Ils sont classifiés en catégories :

- Objets de représentation : visualisation 2D/3D, objets 3D, éléments Space Markup, formes géométriques, cartes GIS, images CAD, graphique de données et interface graphique.
- Eléments de modélisation : diagramme d'activité et diagramme d'état de transition.
- Eléments de développement : Rail library, Process Modeling library, Pedestrian library, Agent library (création et destruction dynamiques, connexions et communication, mobilité et animation spatiale, etc..), System dynamics library, GIS API, et classes et interfaces JAVA.
- Objets de stockage : fichiers Excel et base de données.
- Expérimentations : Simulation, Compare runs, optimization (OptQuest, Monte Carlo) et parameters variation.

Nous avons commencé par développer les packages *TMMResourceModel*, *TMMEventModel* et *TMMEventListenerModel* (voir, chapitre III, section 5), sous format JAR en utilisant l'outil Eclipse, et nous les avons intégrés à notre environnement de développement. Ensuite, nous avons utilisé les éléments Space Markup, les formes géométriques et les objets 3D pour construire l'infrastructure et l'environnement du TMM (Figure III.2 et Figure IV.2, et Tableau III.1). Par la suite, nous avons implémenté les agents et leurs interactions, et la logique de la simulation (Figures III.13 - III.17, Figures IV.3 et IV.6) grâce à : Process Modeling library, Rail library, Agent library, diagrammes d'état de transition, et les classes et les interfaces

JAVA. Les deux stratégies sont implémentées dans la classe contrôle « *HandlingManager* ». Le tableau IV.3 montre la configuration et l'usage des blocs de contrôle d'Anylogic impliqués dans l'implémentation des modèles.

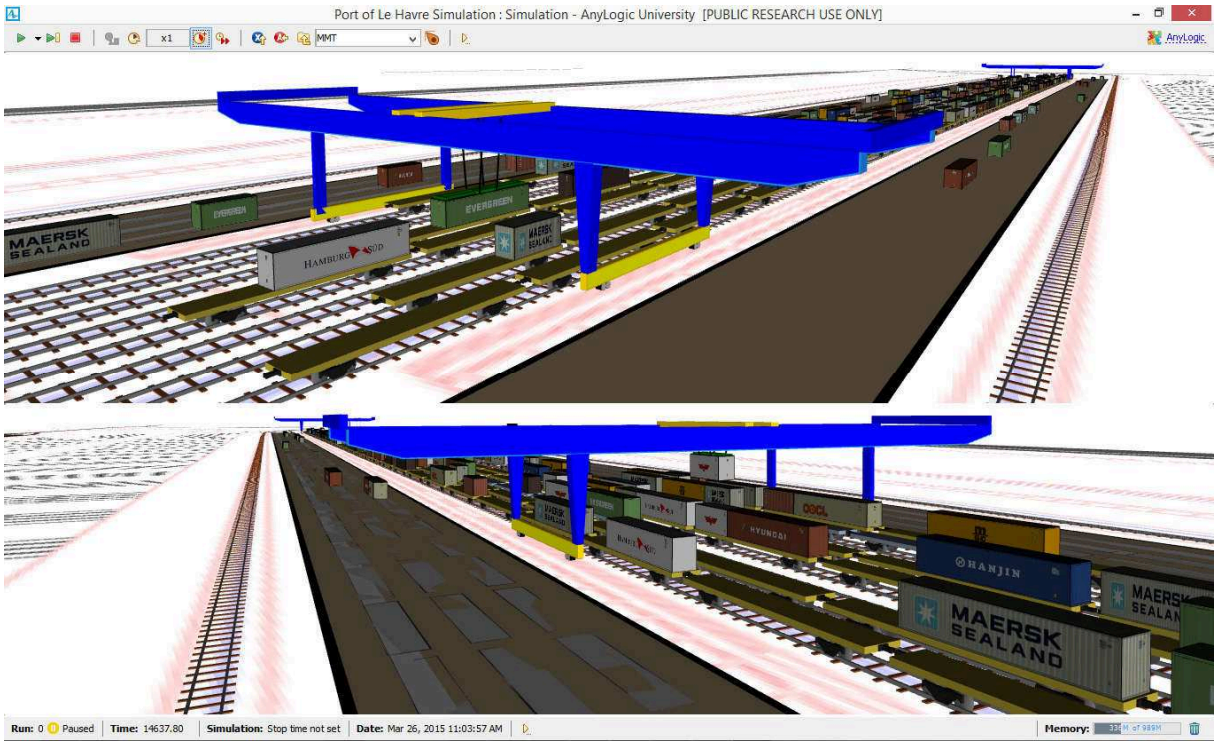


Figure IV.12 Capture d'écran de la simulation en 3D

Tableau IV.3 Les blocs de contrôle d'Anylogic impliqués dans l'implémentation des modèles

Blocs	Usage	Configuration
trainSource	Pour injecter les trains et les locomotives dans la simulation.	• Arrival defined by : rate. • # of cars (including loco) : le nombre de wagons du train plus la loco. • After creation : leave as a logical agent (will use TrainEnter later on). • Cruise speed : 6 km/h.
trainMoveTo	Pour déplacer les trains et les locomotives d'un point à un autre.	• Route is : calculated automatically from current to target track. • Target is : a given offset on a track. • Railway track : la voie allouée au train. • Start options : accelerate/decelerate to cruise speed. • Finish options : decelerate and stop.
trainEnter	Pour permettre aux trains et aux locomotives d'accéder à une zone du TMM.	• Entry point defined as : Position on track. • Position on track : la position sur la voie allouée au train.
trainExit	Pour permettre aux trains et aux locomotives de quitter une zone du TMM.	Exiting agents : are removed from space.
trainCouple	Pour dételer les locomotives.	
trainDecouple	Pour atteler les locomotives aux trains.	• Decouple : First cars • Number of cars to decouple : 1
trainDispose	Pour détruire les trains.	

delay 	Pour mettre en attente un train jusqu'à la fin d'une opération.	• Type : Until stopDelay() is called • Maximum capacity : true
queue 	Pour ajouter un train à une liste d'attente au cas où une ressource est temporairement indisponible.	Maximum capacity : true
hold 	Pour bloquer l'accès à une voie ferrée.	Mode : Manual (use block(), unblock())

1.6.2. Le jeu de données des modèles

Le tableau IV.4 expose les données d'entrée utilisées pour générer les conteneurs, pour créer les trains de grandes lignes (l'agent AFS) et pour déployer les navettes ferroviaires (l'agent APT). Ces données ont été recueillies à partir des documents fournis par l'autorité portuaire du Havre. La cour ferroviaire peut recevoir en moyenne 317 conteneurs par jour ($\bar{x}$) avec un écart type de 40 (s). Le TMM absorbe autant de conteneurs imports que d'exports, mais les conteneurs 40 pieds sont la majorité. Le nombre de trains de grandes lignes varie en fonction du flux de conteneurs reçus et évacués, si le nombre total de conteneurs imports (respectivement, exports) est supérieur à 160 par jour, le nombre de trains est de cinq, sinon il est de quatre. En outre, le nombre moyen de conteneurs transportés par train de grandes lignes est de 35 avec un écart type de 6, de plus les conteneurs sont distribués sur un nombre variable de wagons (25 à 40). En ce qui concerne les navettes ferroviaires, il n'y en a qu'une seule pour chaque terminal maritime, à l'exception du TDF qui peut avoir deux ou trois navettes (s'il y a un grand nombre de conteneurs à transporter), car le TDF est l'origine ou la destination de la moitié des conteneurs journaliers. La taille d'une navette est comprise entre 15 et 30 wagons. Le jeu de données généré pour cinq journées de travail est exposé dans les tableaux IV.5 et IV.6.

Tableau IV.4. Les données d'entrée

Conteneur		Origine/destination		Train	
Conteneur par jour	$\bar{x}$=317 and s=40	ATL	10 %	Nombre de TGL par jour	4 ou 5
20 pieds/40 pieds	40 %/60 %	TDF	50 %	Conteneurs par TGL	$\bar{x}$=35 and s=6
Import/Export	50 %/50 %	TPO	20 %	Taille d'un TGL	25 - 40 rail car
Début d'arrivée de l'export	7:00 h	TNMSC	20 %	Taille d'une navette	15 - 30 rail car
Début d'arrivée de l'import	11:00 h	Total	100 %	Capacité de wagons	3 EVP
				Longueur d'un wagon	20 m

Tableau IV.5 Nombre de conteneurs et de TGL par jour

	Nombre de conteneurs	Import	Export	TGL
Jour 1	350	171	179	5
Jour 2	261	130	131	4
Jour 3	287	140	147	4
Jour 4	326	165	161	5
Jour 5	310	161	149	5

Tableau IV.6 Les navettes déployées par jour

	Id navette	Origine	Destination	Conteneurs transportés
Jour 1	Navette 1	MMT	TDF	0
	Navette 2	TDF	MMT	39
	Navette 3	ATL	MMT	17

	Navette 4	TPO	MMT	34
	Navette 5	TDF	MMT	47
	Navette 6	TNMSC	MMT	34
Jour 2	Navette 1	TDF	MMT	27
	Navette 2	ATL	MMT	13
	Navette 3	TPO	MMT	26
	Navette 4	TDF	MMT	38
	Navette 5	TNMSC	MMT	26
Jour 3	Navette 1	TDF	MMT	30
	Navette 2	ATL	MMT	14
	Navette 3	TPO	MMT	28
	Navette 4	TDF	MMT	40
	Navette 5	TNMSC	MMT	28
Jour 4	Navette 1	MMT	TDF	0
	Navette 2	TDF	MMT	35
	Navette 3	ATL	MMT	17
	Navette 4	TPO	MMT	33
	Navette 5	TDF	MMT	47
	Navette 6	TNMSC	MMT	33
Jour 5	Navette 1	MMT	TDF	0
	Navette 2	TDF	MMT	34
	Navette 3	ATL	MMT	16
	Navette 4	TPO	MMT	33
	Navette 5	TDF	MMT	45
	Navette 6	TNMSC	MMT	33

1.6.3. Vérification des modèles

La vérification des modèles est une étape nécessaire dont l'objectif est de s'assurer que les hypothèses et les modèles sont raisonnables, correctement mis en œuvre et reflètent le comportement réel du système étudié, de plus, elle permet aux exploitants de faire confiance aux résultats des approches proposées. Dans cette étude, nous avons procédé à deux types de vérification. En premier lieu, la vérification de l'implémentation des modèles est faite grâce à trois outils : le débuggeur d'Anylogic, la visualisation 3D (figure IV.12), et les fichiers logs. Ces fichiers logs nous permettent de tracer l'enchaînement des actions durant l'exécution des modèles en fonction du temps, en vue de localiser tout dysfonctionnement au niveau du système. En deuxième lieu la vérification de la logique des simulations a été réalisée en comparant les indicateurs de performances organisationnelles réelles avec ceux de la simulation. Les indicateurs de performance sont des informations pertinentes pour mesurer le succès des activités critiques d'une organisation (voir chapitre I, sous-section 2.6.2). Nous avons utilisé les indicateurs suivants : le nombre de manutentions par conteneur, le temps de manutention moyen par conteneur et le taux de livraison à l'heure des conteneurs exports aux terminaux maritimes. Le nombre de manutentions par conteneur doit être inférieur ou égal à deux. En fait, un conteneur est manutentionné au plus deux fois, *i.e.*, d'un wagon vers le buffer et puis du buffer vers un wagon. Le temps de manutention moyen par conteneur est au maximum 3 minutes (voir Figure III.2). Ce temps inclut le temps de déplacement du portique, et de récupération et de dépôt du conteneur. Le taux de livraison à l'heure des conteneurs doit être égal à 100% du fait que le mode planifié a été utilisé dans cette étude (Benghalia 2015). Les indicateurs de performance organisationnels affichés par nos modèles dans le tableau IV.7 démontrent que la logique de la simulation a été bien implémentée.

Tableau IV.7 Les indicateurs de performance organisationnels

	Jour	Le nombre de manutentions par conteneur	Le temps de manutention moyen par conteneur	Le taux de livraison à l'heure des conteneurs
Stratégie agent	Jour 1	1.406	2.34 min	100%
	Jour 2	1.418	2.38 min	100%
	Jour 3	1.388	2.29 min	100%
	Jour 4	1.424	2.41 min	100%
	Jour 5	1.408	2.52 min	100%
Stratégie basée sur l'heuristique	Jour 1	1.403	2.37 min	100%
	Jour 2	1.420	2.37 min	100%
	Jour 3	1.368	2.31 min	100%
	Jour 4	1.417	2.40 min	100%
	Jour 5	1.401	2.47 min	100%

1.6.4. Formule de validation des stratégies

Dans le but de prouver que les contraintes associées aux composants du système (zones et délimiteurs) ainsi que les règles et les contraintes définies dans les deux stratégies permettent aux portiques de respecter la distance de sécurité entre eux, i.e., pas d'interférences durant la simulation des opérations de manutention, nous avons appliqué une formule de validation sur toutes les tâches exécutées. En outre, cette formule nous a permis de capter d'autres situations-actions qui devraient être ajoutées au code de conduite des portiques dans la stratégie à base d'agents.

Désignant J comme l'ensemble des tâches de manutention exécutées, tel que $\mathrm{J} = \{1,2,3,..,\mathrm{n}\}$, avec $\mathrm{n} \in \mathbb{N}^*$, où chaque tâche est effectuée par un seul portique. Toutes les tâches sont effectuées dans des espaces sans interférences si et seulement si, pour n'importe quel $k, j \in J$, ayant leurs zones privées intersectées, elles sont exécutées séparément dans le temps par différents portiques :

$$\forall\, k, j \in J,\ et\ I_j \neq I_k\ ,$$

$$if\ \ Z_j^- \cap Z_k^- \neq \emptyset \longrightarrow \left[S_j, F_j\right] \cap [S_k, F_k] = \emptyset$$

- I_j : Le portique qui a assuré l'exécution de la tâche *j*.
- Z_j^- : La zone privée que le portique a prise pour exécuter la tâche *j*.
- E_j: Le temps d'exécution de la tâche *j*. $E_j > 0$.
- S_j : La date où la tâche *j* a commencé. $S_j \geq 0$.
- F_j : La date où la tâche *j* a pris fin. $F_j \geq 0, tel\ que\ F_j = S_j + E_j$.

La figure IV.13 donne un exemple de validation et la figure IV.14 illustre comment la validation de toutes les tâches a été réalisée. Dans la figure IV.13, les tâches *j* et *l* appartiennent au portique A et les tâches *k* et *m* au portique B. Les tâches *k* et *j* sont traitées presque dans la même période, mais il n'y a pas d'interférence entre les zones privées, contrairement aux tâches *m* et *l*, où il y a une interférence entre les zones privées, mais elles sont exécutées séparément

dans le temps. Toutes les tâches vérifiées ont satisfait la formule de validation. Après la validation des tâches, la conclusion suivante a été tirée : l'utilisation des contraintes de mouvement (7) et (8) est suffisante pour respecter les contraintes de zones (1) à (4) et les contraintes de délimiteurs (5) et (6).

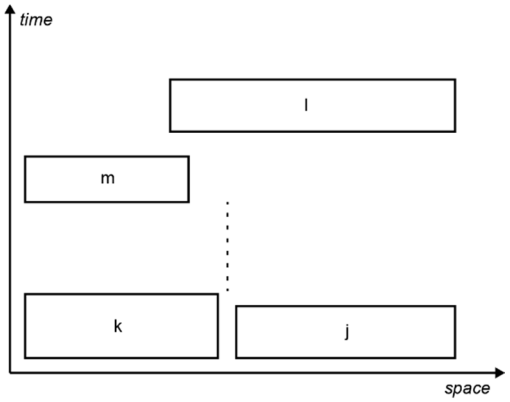


Figure IV.13 Exemple de validation

```
1 :  Input: J, n
2 :  for i := 0 to n - 1 do
3 :      j ←J [ i ];
4 :      for m := i + 1 to n do
5 :          k ←J [ m ];
6 :          if (I_j ≠ I_k) ∧ ( Z_j^- ∩ Z_k^- ≠ ∅) ∧ ([S_j, F_j] ∩ [S_k, F_k] ≠ ∅ )
     then
7 :              return false;
8 :          end if
9 :      end for
10 : end for
11 : return true;
```

Figure IV.14 Méthode de validation

1.7. Résultats des simulations et comparaison des modèles

L'efficacité de nos stratégies sont évaluées et comparées à celles des modèles de (Leriche et al. 2015) qui utilisent le système actuel de la cour ferroviaire du MMT (*reachstackers* et les zones d'opérations fixes), voir la section 1.2.

Dans la première partie de cette section, nous décrivons les paramètres de simulation. Dans la deuxième partie, le nombre de réplications exécutées pour chaque modèle de simulation est exposé. Dans la troisième partie, nous montrons les résultats des simulations du jour avec la charge de travail la plus élevée (Jour 1 ; Tableaux IV.5 et IV.6). La dernière partie est réservée à la comparaison de nos modèles avec le modèle régi par la règle « *less-distance-rule* », car il est le meilleur modèle décrit dans (Leriche et al. 2015), en plus nous discutons les résultats en vue de déterminer lequel de ces modèles :

- Minimise considérablement les temps d'attente des portiques.
- Fournit le temps de service minimal.
- Equilibre le mieux la charge de travail des portiques.
- Permet une meilleure utilisation des portiques.

1.7.1. Paramètres de simulation

La simulation de la cour ferroviaire concerne plusieurs journées de travail. Toutes les simulations ont été exécutées à l'aide paramètres affichés dans le tableau IV.8. La période de service de chaque jour de simulation commence suite à l'arrivée du premier train, habituellement vers 7 heures du matin, et se termine lorsque tous les trains ont reçu la totalité de leurs conteneurs, généralement aux alentours de 19h00. Dans la simulation, l'arrivée des trains au TMM est définie par une fréquence (taux). La fréquence d'arrivée des TGL est de 1 par 15 minutes, celle des navettes du Port 2000 est de 1 par deux heures, tandis que pour les

navettes du terminal atlantique (ATL), la fréquence est de 1 par jour (les terminaux Port 2000 et le terminal atlantique se trouvent dans des emplacements différents, voir Figure III.4). Le TMM reçoit la première navette aux environs de 11h00, de plus la durée de trajet entre le TMM et les terminaux maritimes dépend du nombre de conteneurs transportés, c'est-à-dire, plus il y a de conteneurs, plus long est le temps du trajet. Les TGL passent plus d'une heure avant de s'installer à la cour ferroviaire, tandis que les navettes prennent au moyen 17 min pour arriver sur la cour ferroviaire. Ce temps écoulé est dû aux manœuvres ferroviaires (attelage de locomotives, dételage de locomotives, switch change, etc.) et au trajet parcouru. Les navettes séjournent à la cour ferroviaire pour une durée au maximum égale à 90 minutes. Pour introduire la variation et l'incertitude dans le comportement des portiques, *i.e.*, la durée de chargement et de déchargement d'un wagon, et la durée d'empilement et de dépilement de conteneurs au niveau des buffers, nous avons utilisé des intervalles définis dans (Cartenì and Luca 2012). Les auteurs ont exposé les temps moyens et les écarts-types pour chaque activité élémentaire de manutention de conteneurs à base d'une analyse statistique.

Tableau IV.8 Paramètres de simulation

Paramètres fixes	Vitesse du portique	10 km/h
	Distance de sécurité	24,384 m
	Durée de séjour des navettes	90 min
Paramètres variables	Durée pour décharger un wagon	$\bar{x}$=0,888 et s=0,352
	Durée pour récupérer un conteneur de sa pile (dans le buffer)	$\bar{x}$=0,769 et s=0,380
	Durée pour charger un wagon	$\bar{x}$=1,331 et s=0,434
	Durée pour empiler un conteneur	$\bar{x}$=0,760 et s=0,309
	Durée de trajet entre le TMM et les terminaux maritimes	60 - 70 min
Taux d'arrivée	TGL	par 15 min
	Navettes de Port 2000	par 2 heurs
	Navette d'ATL	par jour

1.7.2. Nombre de réplications et le calibrage des paramètres de la stratégie à base d'heuristique

Un modèle de simulation doit être exécuté plusieurs fois jusqu'à ce qu'il se stabilise. En effet, les valeurs de certains paramètres varient d'une exécution à l'autre, ainsi les résultats seront différents avec une haute ou faible variation. De ce fait, on doit faire tourner le modèle de simulation (réplication) jusqu'à ce le degré de confiance fixé pour les résultats est atteint (Hoad et al. 2007) et (Petty 2012). En d'autres termes, la majorité des réplications donnent des résultats qui convergent vers une moyenne de résultats avec un taux d'erreur. Par exemple, 95 % des réplications donnent un temps de service aux alentours de 12h. Les réplications concernent seulement le modèle à base d'agents, pour le modèle à base d'heuristique, nous avons fixé le nombre d'itérations à 250 (la version d'anylogic utilisée ne permet pas à notre modèle de dépasser 250 itérations, sinon la simulation se bloque). Noter que la différence entre itération et réplication est que les itérations sont liées par des résultats, *ex.*, les phérormones, alors que les réplications sont indépendantes.

AnyLogic fournit une expérimentation appelée « *Parameter Variation Experiment* » qui arrête les réplications après un nombre minimum de réplications, lorsque le degré de confiance est atteint ou bien si le nombre maximal de réplications est dépassé. Le degré de confiance a

été fixé à 95% calculé à partir du temps de service avec un pourcentage d'erreur de 0,5 (Cumming 2006). Le nombre minimum et maximum de réplications est de 10 et 500, respectivement. L'expérimentation s'est arrêtée à 14 réplications, en plus nous avons gardé les résultats de la réplication qui minimise le plus le temps de service pour la comparaison de modèles.

Un autre point important est le calibrage des paramètres de la stratégie à base d'heuristique. Pour cela, nous avons utilisé la méthode de plans d'expérience (plan factoriel fractionnaire) pour relever les bonnes valeurs des paramètres de l'algorithme, voir Tableau IV.9. Nous avons déterminé les effets absolus des différents paramètres sur les résultats en utilisant la meilleure itération de chaque jeu de paramètres.

Tableau IV.9 Valeurs optimales des paramètres

q_0	q_1	q_2	q_3	q_4	α	β	ρ
0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	3	2	0,6

1.7.3. Résultats des simulations

Les figures IV.15 - IV.18, illustrent le déroulement des opérations de manutention. Dans la figure IV.15, nous décrivons la nature des tâches de manutention exécutées par les deux portiques ferroviaires. Le transfert direct de conteneurs est un mouvement exécuté pour déplacer directement un conteneur d'un mode de transport à un autre. Par contre, la bufferisation est une double manutention, où le conteneur passe par un buffer avant d'être déposé sur le mode de transport qu'il l'acheminera à sa destination. Le nombre total de manutentions est la somme des transferts directs additionné au nombre de bufferisation multiplié par deux. La figure IV.16 détaille les déplacements des portiques. La barre en bleue concerne la distance totale parcourue par les portiques pour achever leurs charges de travail. De plus, elle inclut la distance qu'ils ont parcourue pour retourner à leurs positions de stationnement. Les deux autres barres montrent respectivement les distances parcourues selon la destination du conteneur, c'est-à-dire, conteneurs destinés à l'import et conteneurs destinés à l'export. La figure IV.17 montre une journée de travail des portiques. Le temps de service représente le temps écoulé depuis le début des manutentions jusqu'à la fin. Il est divisé en trois périodes. Premièrement, le temps durant lequel les portiques ont été actifs. Deuxièmement, leur période d'inactivité. Troisièmement, le temps où ils étaient en attente pour éviter le risque de croisement. La figure IV.18 met en évidence la productivité des portiques durant la période de service. La productivité indique le nombre de conteneurs traités par unité de temps. L'axe vertical montre le nombre de tâches exécutées toutes les 15 minutes et l'axe horizontal concerne la période de service.

Les figures IV.19 et IV.20 donnent un rapport d'état sur l'activité des portiques. Dans la figure IV.19, nous reportons les taux d'utilisation (formule 14), où le taux d'activité à vide est le rapport du temps durant lequel les portiques ont été occupés sans conteneur dans leur chariot et le temps de service. Quant au taux de bufferisation, il est déterminé par rapport au nombre de conteneurs bufférisés et le nombre total de conteneurs traités. En ce qui concerne le taux

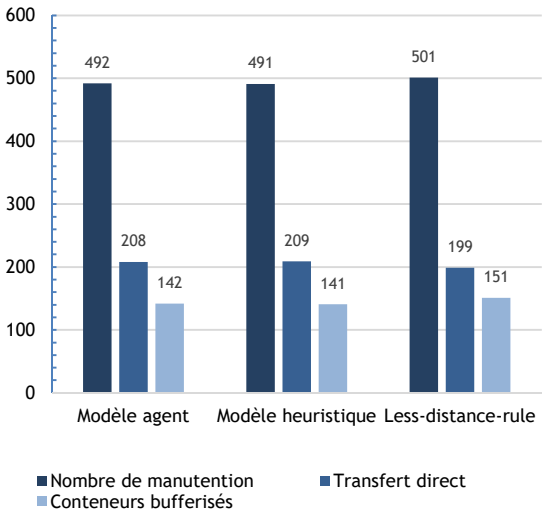


Figure IV.15 Statistique de manutention de conteneurs

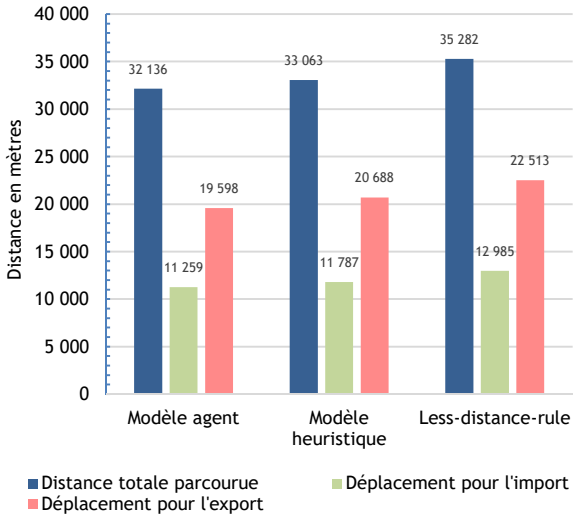


Figure IV.16 Distance parcourue par les deux portiques

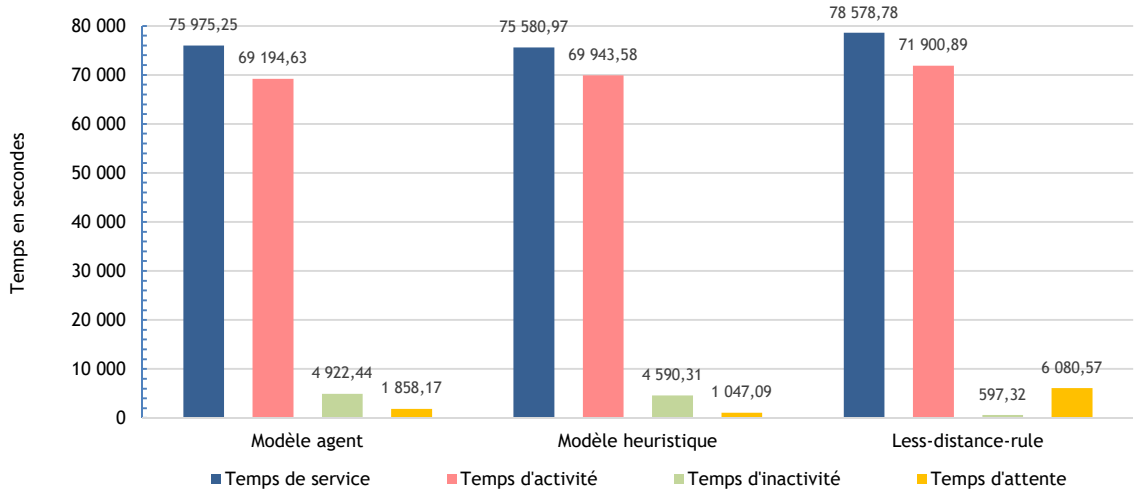


Figure IV.17 Les différents temps des portiques

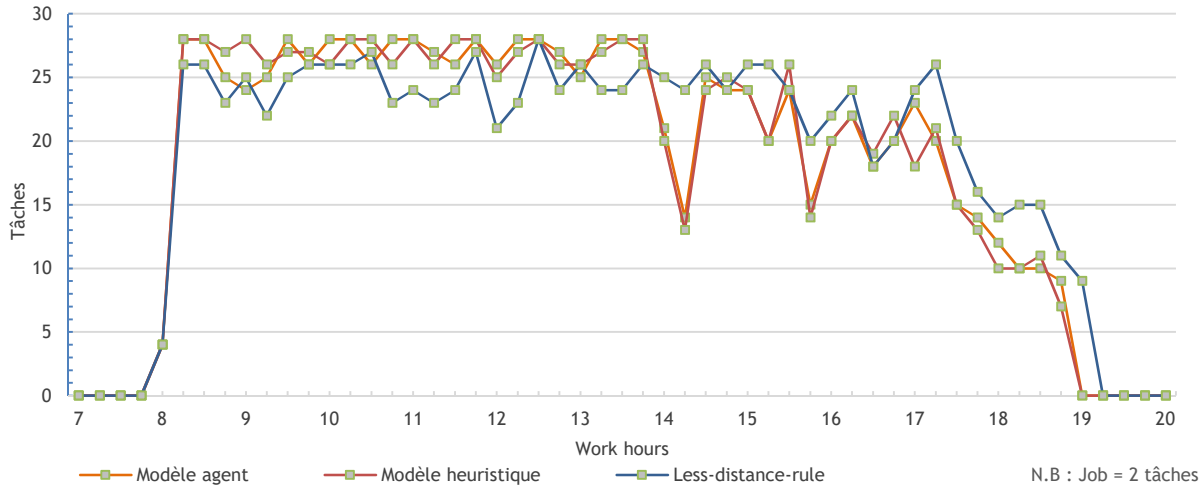


Figure IV.18 Productivité des portiques

de déplacement à vide, il est calculé à partir du rapport de la distance parcourue par les portiques sans conteneur et la distance totale. Nous remarquons que les solutions proposées manifestent un taux de bufferisation aux alentours de 40% et un taux d'activité et de déplacement à vide assez élevé. Cela est dû à la politique de manutention choisie. En effet, les portiques cherchent les conteneurs destinés à être chargés sur le mode de transport ayant l'ordre de priorité le plus

élevé. Toutefois, ces conteneurs ne sont pas forcément assez proches des portiques. Ils se déplacent donc sur de longues distances (sans conteneur) pour les récupérer, ce qui explique pourquoi les taux d'activité et de déplacement à vide dépassent 50%. La figure IV.20 met en exergue le partage et la différence de la charge de travail entre les deux portiques. On s'aperçoit

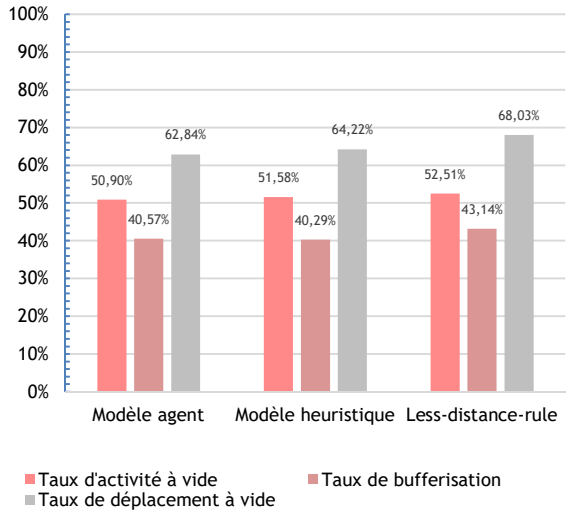


Figure IV.19 Utilisation des portiques

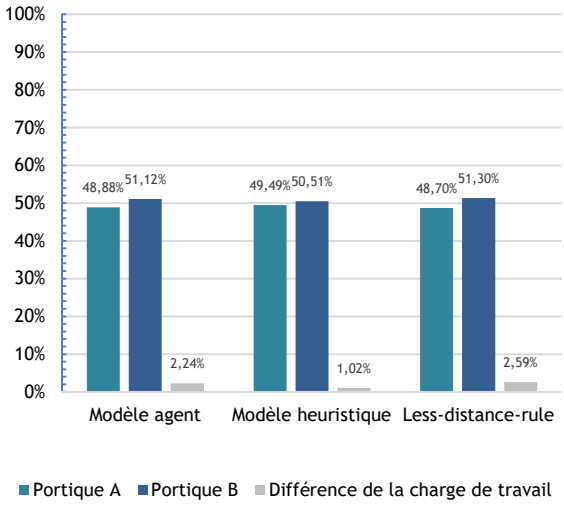


Figure IV.20 Charge de travail des portiques

que le portique B a exécuté légèrement plus de tâches que le portique A.

$$taux\ d'activité\ à\ vide = \frac{temps\ d'activité\ vide}{temps\ de\ service}$$

$$taux\ de\ bufferisation = \frac{nombre\ de\ conteneurs\ bufférisés}{nombre\ de\ conteneurs\ traités} \qquad (14)$$

$$taux\ de\ déplacement\ à\ vide = \frac{distance\ parcourue\ à\ vide}{distance\ totale}$$

Les figures IV.21 - IV.23 décrivent l'activité de transfert de conteneurs en import et en export. La figure IV.21 montre les temps de séjours moyens des conteneurs imports et exports à l'intérieur du TMM, les temps moyens durant lesquels les conteneurs imports et exports ont passé dans un buffer et le temps moyens des opérations d'accueil, de déchargement, de chargement et de départ des TGL. La figure IV.22 indique le taux de remplissage de chaque

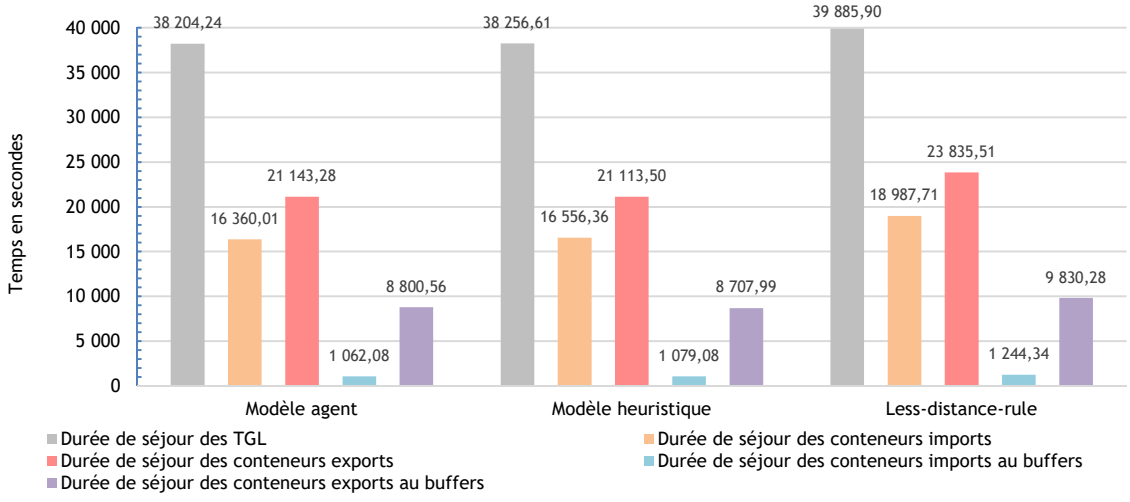


Figure IV.21 Durée des séjours des TGL et conteneurs

navette ferroviaire pendant son séjour au TMM (EVP transportés divisés sur la capacité de la navette en EVP). Dans la figure IV.23, nous constatons que les navettes 1 et 2 sont restées dans la cour ferroviaire pendant toute la durée de séjour permise. Par contre, les autres ont quitté le TMM avant l'expiration de leurs dates de séjours, puisqu'elles ont reçu tous les conteneurs destinés à être livrés à leur terminal maritime.

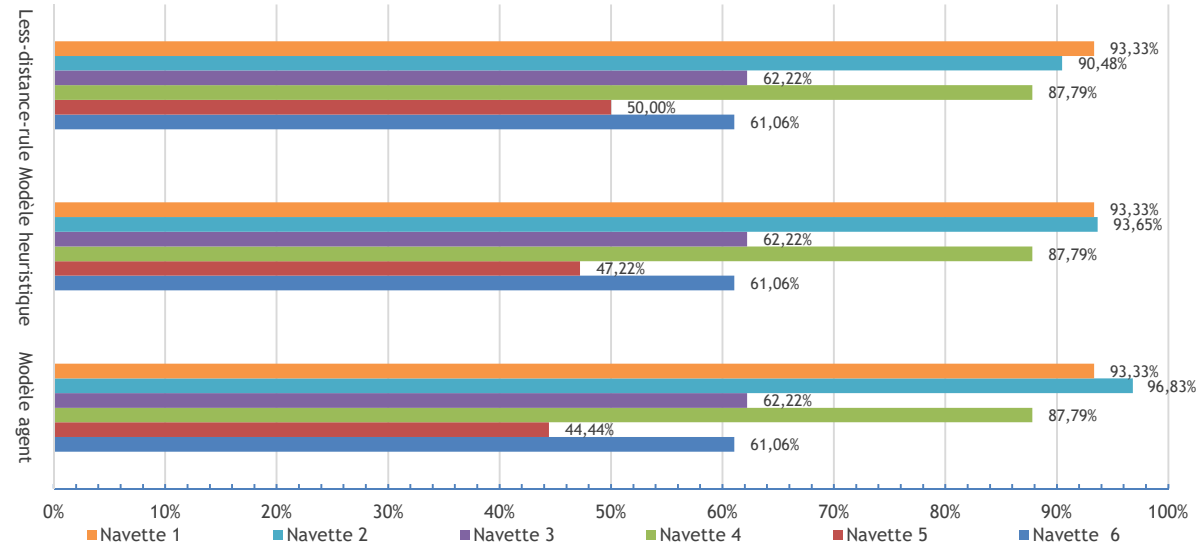


Figure IV.22 Taux de remplissage des navettes

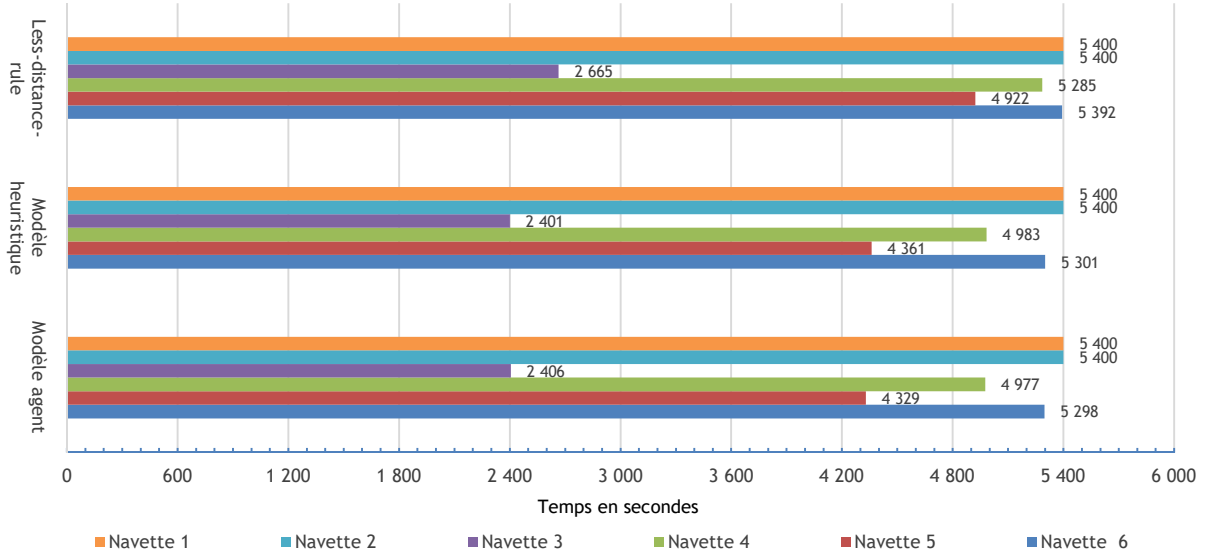


Figure IV.23 Durée de séjours des navettes

1.7.4. Comparaison et discussion

A. Les stratégies proposées vs le modèle *less-distance-rule*

Les graphes expliqués ci-avant montrent clairement les avantages de nos approches à tous les niveaux. Le nombre de manutentions totales et surtout les conteneurs mis en buffer ont connu une légère baisse, en plus le temps nécessaire pour manutentionner un conteneur est minimisé (tableau IV.7), ce qui a réduit le temps d'accomplissement des jobs (temps de service), comme illustré dans la figure IV.17. Dans cette figure, il est également évident que le temps d'attente indiqué par nos modèles est nettement inférieur et il ne dépasse les 2.5% du temps de service, contrairement à (Leriche et al. 2015), où le temps d'attente représente 7.2%. Ces

résultats prouvent que les buffers d'échanges et les nouvelles règles de manutention sont efficaces en termes de minimisation de l'occurrence des situations improductives, que ce soient les situations d'interférence ou de blocage, d'autant plus que les buffers d'échange éliminent l'usage des *reachstackers*, *i.e.*, moins d'interférence.

En ce qui concerne la productivité des opérations, elle est améliorée grâce à une meilleure utilisation des portiques. La figure IV.18 indique que la charge de travail pendant la première moitié de la journée (entre 8h et 14h) est considérable, car tous les trains de grandes lignes arrivent tôt le matin. La productivité de nos modèles durant cette période a été aux environs de 105 tâches par heure, tandis que la meilleure règle de (Leriche et al. 2015) affiche seulement 98 tâches par heure. Cela montre que les portiques soumis à nos règles sont plus performants. Dans la deuxième moitié de la journée, la productivité a baissé, en particulier dans nos modèles, puisque 63% du travail est déjà accompli durant la première moitié, de ce fait dans nos modèles les portiques manutentionnent beaucoup plus rapidement les conteneurs.

Les figures IV.16, IV.19 et IV.20, confirment la meilleure utilisation des portiques au niveau de nos stratégies, vu que la distance parcourue, le taux d'utilisation et la différence de la charge de travail entre les deux portiques sont moins importants. D'ailleurs, tous les modèles exposent un bon équilibrage de la charge de travail, car ils partagent certaines règles de manutention (les trains sont garés à la cour ferroviaire de manière à avoir presque le même nombre de conteneurs dans les deux zones d'opérations). D'après les figures IV.21 - IV.23, nos stratégies offrent un meilleur niveau de service aux modes de transport, puisque le temps de séjour des navettes et des TGL est minimisé et aucun conteneur n'est abandonné. Cependant, en raison de l'utilisation du mode planifié, seul le taux de remplissage des navettes ferroviaires TDF 2 et 5 est différent. Avec nos modèles, la navette ferroviaire 2 a livré plus de conteneurs au TDF, par conséquent la navette 5 avait moins de conteneurs à transférer. Au regard de ces résultats, nous pouvons en déduire que les stratégies proposées permettent une meilleure qualité de service et une évacuation plus rapide des conteneurs vers leurs destinations.

D'un autre côté, les solutions proposées apportent plus d'avantages en termes de gains et de consommation d'énergie. En effet, avec les buffers d'échanges, aucun véhicule de manutention supplémentaire n'est nécessaire pour éviter les situations d'impasse ni pour transférer les conteneurs d'une zone d'opérations à l'autre, ce qui diminue les coûts des opérations et d'énergie. De plus, les coûts de construction et d'exploitation de ces buffers sont négligeables puisqu'il y a déjà des espaces de stockage dans la cour ferroviaire (buffers sud et nord), en plus ils ne représentent que 11% de la capacité de stockage totale. En outre, le taux de remplissage des buffers sud et nord ne dépasse presque jamais les 40%, donc les buffers d'échanges n'auront pas un effet négatif sur la capacité de stockage de la cour ferroviaire.

B. Stratégie à base d'agents vs stratégie à base d'heuristique

Dans la figure IV.18, les courbes associées aux deux stratégies (couleur verte et orange) sont presque superposées. Toutefois, il existe deux différences majeures, premièrement, entre

8 h 45 minutes et 9 h, où la stratégie agent affiche 25 tâches et l'autre affiche 29. La deuxième différence apparue entre 16 h 45 minutes et 17 h, durant laquelle les portiques de la stratégie agent exécutent 28 tâches et ceux de l'autre 22. D'autre part, les distances parcourues suivant les règles de la première stratégie sont moins importantes par rapport à la deuxième, en même temps, le temps d'accomplissement des tâches au niveau de la deuxième est inférieur à celui réalisé par la première (figures IV.16 et IV.17). Dans la stratégie agent, les deux portiques ne se déplacent que si le mouvement est autorisé, alors le but principal du modèle heuristique est de trouver la meilleure suite de tâches permettant de minimiser le temps de service et le temps d'attente des portiques.

Dans les figures IV.19 et IV.20, nous remarquons que la stratégie agent donne une meilleure utilisation des portiques et que l'autre stratégie offre un meilleur équilibrage de charge de travail. Quant à l'activité de transfert de conteneurs en import et en export, elle est plus ou moins identique dans les deux stratégies (figures IV.20 - IV.23), vu que la différence entre eux est de l'ordre de quelques secondes. On note la présence d'une petite différence au niveau du taux de remplissage des deux navettes 2 et 5, de l'ordre de 3 % (figure IV.22).

Le tableau suivant résume les résultats des trois modèles comparés.

Tableau IV.10 Résultats des cinq jours de simulation

		Temps de service (s)	Temps d'attente (s)	Distance parcourue (m)	Taux de déplacement à vide	Différence de la charge de travail	Temps de séjour moyen des TGL (s)	Temps de séjour moyen des navettes (s)
Jour 1	Modèle agent	75975	1858	32136	62.84%	2.24%	38204	4635
	Modèle heuristique	75580	1047	33063	64.22%	1.02%	38256	4641
	Less-distance-rule	78578	6080	35282	68.03%	2.59%	39885	4844
Jour 2	Modèle agent	72548	1316	29539	61.25%	2.21%	37278	4521
	Modèle heuristique	72247	1086	31201	64.03%	1.17%	37485	4622
	Less-distance-rule	77284	5317	33691	69.12%	2.84%	39703	4867
Jour 3	Modèle agent	73168	1596	29156	63.01%	2%	38012	4471
	Modèle heuristique	72993	1176	30049	64.83%	1.2%	37911	4504
	Less-distance-rule	78061	5895	33810	67.21%	2.74%	40124	4765
Jour 4	Modèle agent	74085	1624	31751	60.66%	1.9%	37583	4501
	Modèle heuristique	73983	1014	32619	61.05%	0.95%	37433	4448
	Less-distance-rule	78741	5418	34917	68.33%	2.1%	39468	4897
Jour 5	Modèle agent	74563	1954	32009	61%	2.11%	36477	4665
	Modèle heuristique	74015	1421	34155	60.51%	1.25%	37002	4701
	Less-distance-rule	77969	6457	35207	69.57%	2.96%	39124	4891

2. Ordonnancement des opérations à la cour fluviale

Cette section se focalise sur l'aspect stochastique de l'ordonnancement des portiques de manutention de la cour fluviale du terminal multimodal du port du Havre. L'ordonnancement vise à déterminer la séquence de déchargement et de chargement de conteneurs par les portiques affectés à une barge dont la durée de service est minimale, *i.e.*, l'ordre d'exécution de tâches de manutention qui minimise le temps de service des portiques. Dans cette section, une tâche est

un ensemble de conteneurs à manutentionner, elle est définie par une durée et un emplacement. Les tâches de déchargement sont distribuées sur des baies distinctes de la barge (voir Figure IV.24) tandis que les tâches de chargement sont affectées à différents emplacements du buffer de la cour fluviale. D'ailleurs, la distribution de ces tâches sur les portiques est régie par des contraintes de précédence, d'interférence et de non-croisement. Les contraintes de précédence servent à établir la liste des tâches qui doivent précéder l'exécution d'une tâche donnée, *i.e.*, une tâche ne débute que si certaines tâches sont finies. Ainsi, les contraintes suivantes doivent être respectées :

Contraintes de précédence :

- Les tâches de déchargement précédent les tâches de chargement.
- Les tâches de déchargement sur le pont précédent les tâches de déchargement sur la cale.
- Les tâches de chargement sur la cale précédent les tâches de chargement sur le pont.

Contraintes de non-croisement et d'interférence :

- Deux tâches adjacentes ne peuvent pas être exécutées simultanément par deux différents portiques.
- Un portique ne peut pas dépasser l'autre (ne peut pas passer au-dessus de l'autre).
- Les deux portiques gardent entre eux à tout moment une distance supérieure ou égale à deux baies.

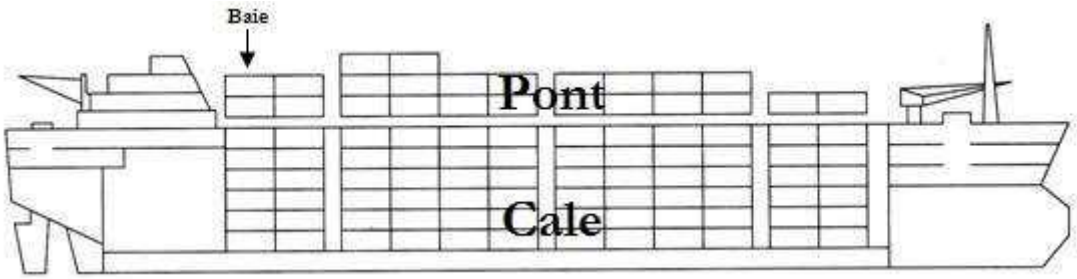


Figure IV.24 La structure d'une barge

Les durées des tâches sont considérées comme incertaines puisqu'elles dépendent de plusieurs paramètres qui varient, à savoir, les temps de chargement et de déchargement de conteneurs et les temps de déplacement des portiques entre les baies. Dans ce travail, nous proposons une hybridation d'une métaheuristique de colonie de fourmis et une simulation à base d'agents. A travers ce couplage, les solutions trouvées (les séquences des tâches) par la métaheuristique sont simulées et évaluées de manière stochastique en utilisant les scénarios générés par la simulation pour calibrer les durées des tâches. Ces nouvelles durées seront utilisées ensuite par la métaheuristique pour fournir des nouvelles solutions, et ainsi de suite jusqu'à atteindre un nombre d'itérations fixé. Les scénarios sont générés en concordance avec

les probabilités de distributions des paramètres. Par ailleurs, pour obtenir les bonnes périodes, le couplage est exécuté jusqu'à ce qu'il converge vers un point de stabilité. Le travail présenté dans cette section a été réalisé en collaboration avec M. ROUKY Naoufal.

2.1. Rappel : le modèle de simulation de la cour fluviale

La figure IV.25 présente les agents composant le modèle de simulation. L'APO est l'agent qui orchestre le déroulement des opérations au niveau la cour fluviale. Il diffuse les ordres de manutention sur les portiques et gère les entrées/sorties des barges. Lorsque cet agent reçoit une notification d'arrivée de la barge, il détermine ses besoins (conteneurs à décharger et conteneurs à charger), puis il lui alloue un poste d'amarrage. Une fois la barge est amarrée, l'APO prépare le plan d'opérations et l'envoie aux portiques. Les portiques entament ensuite la manutention des conteneurs en respectant la distance de sécurité (contrainte pour éviter le croisement des portiques). Dans la simulation, les tâches sont exécutées selon la séquence définie par l'algorithme de colonie de fourmis, mais sans tenir compte des durées des tâches. En effet, ces durées sont utilisées juste à l'optimisation, elles seront ensuite calibrées grâce à la simulation. Le nombre de conteneurs par tâches est déterminé en divisant la durée d'exécution (la durée de la tâche) sur deux, puisqu'un conteneur subit deux opérations : l'opération de récupération puis l'opération de dépôt. La durée de ces deux opérations ainsi que le temps de déplacement des portiques entre les baies suivent une loi triangulaire pour avoir de nouvelles durées des tâches (voir le tableau IV.11). A la fin des opérations de manutention, l'APO autorise la barge à quitter le TMM et alimente l'optimisation par les nouvelles durées des tâches. Les navettes ferroviaires ne sont pas considérées afin de diminuer la complexité du problème d'ordonnancement des portiques. Le modèle de simulation est exposé dans la figure IV.26.

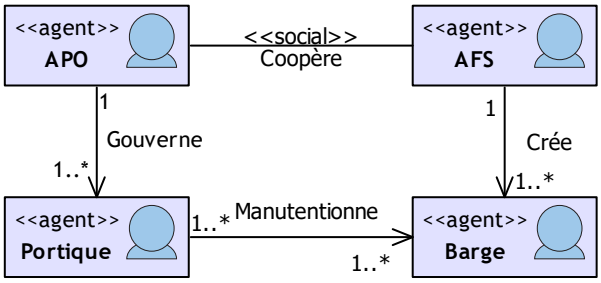


Figure IV.25 Les agents du modèle

Tableau IV.11 Paramètres de simulation

Paramètres	Min	Max	Mode
Récupération ou dépôt du conteneur (s)	55	65	60
Temps de déplacement du portique (s)	58	62	60

2.2. Couplage Optimisation-Simulation

Nous avons utilisé l'expérimentation « *Compare runs* » fournie par le logiciel de simulation Anylogic pour exécuter le couplage optimisation-simulation. La figure IV.27 présente l'algorithme d'optimisation « colonie de fourmis ».

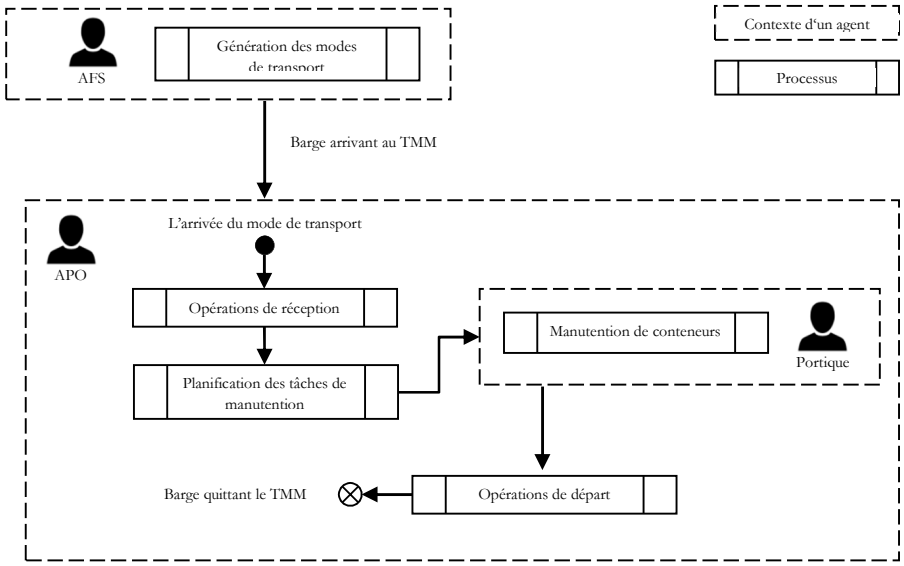


Figure IV.26 Modèle de simulation

La fonction objective de l'algorithme d'optimisation est construite autour de la date de fin des tâches (*Cmax*) qui doit être minimisée. Les solutions sont construites progressivement comme nous avons expliqué dans la section précédente (voir, section 1.5). Cependant dans cette section, nous déterminons d'abord la séquence de tâches affectées aux portiques avant de la simuler, contrairement à la section précédente où l'algorithme de colonie de fourmis a été utilisé pour déterminer le prochain mouvement du portique. Comme illustré dans la figure IV.27, d'abord les valeurs de phéromones, la date de disponibilité des portiques et les propriétés des tâches (durée, liste de prédécesseurs, nombre de conteneurs, etc.) sont initialisés soit avec les valeurs de l'itération précédente ou avec une valeur de départ (dans la première itération). Ensuite, le portique ayant la date de disponibilité minimale est choisi et la liste des tâches candidats est définie selon deux contraintes : (1) la tâche n'a pas de prédécesseurs ; (2) la tâche n'est pas sélectionnée. Les tâches prédécesseurs sont identifiées avant le lancement de l'algorithme.

```
1: Initialiser la matrice des phéromones.
2:    Tant que un nombre maximal d'itération n'est pas atteint faire
3:       Pour k 1 de à m faire
4:          Initialiser les dates de disponibilités des grues de quai.
5:          Initialiser les ensembles de prédécesseurs de toutes les tâches.
6 :         Tant que toutes les tâches ne sont pas sélectionnées faire
7:                Sélectionner un portique.
8:                Définir la liste des candidates.
9:                Sélectionner une tâche.
10:               Assigner une date de début d'exécution de la tâche sélectionnée et
                  supprimer cette tâche de la liste des listes de prédécesseurs des
                  autres tâches.
11:               Mettre à jour la date de disponibilité du portique sélectionné.
12:         Fin tant que
13:      Fin pour
14:      Mettre à jour la trace de phéromone.
15:   Fin tant que
```

Figure IV.27 L'algorithme de colonie de fourmis proposé

L'étape suivante consiste à calculer la probabilité de chaque tâche et celle avec la plus grande probabilité est attribuée au portique choisi :

$$probabilite\ (tâche) = \frac{Pheromone(tâche)\ x\ Visibilite(tâche)}{\sum_i^n Pheromone(i)\ x\ Visibilite(i)} \quad (15)$$

La tâche sélectionnée se voit assigner une date de début et la date de disponibilité du portique est mise à jour de façon à respecter la distance de sécurité (les deux portiques gardent entre eux à tout moment une distance supérieure ou égale à deux baies), voir formule 16.

$$\begin{cases} date\ de\ début = ma\,x(date\ de\ disponibilité\ des\ portiques) + \ le\ nombre\ de\ baies\ qui \\ \qquad\qquad séparent\ la\ tâche\ et\ le\ portique \\ date\ de\ disponibilité\ du\ portique = ancien\ date + \ date\ de\ début\ de\ la\ tâche \end{cases}$$

Enfin, quand tous les tâches sont sélectionnées, la simulation est lancée plusieurs fois (réplication) et la meilleure réplication (qui affiche le *Cmax* minimal) est utilisée pour déterminer les nouvelles durée des tâches (la nouvelle durée est le temps écoulé pour manutentionner tous les conteneurs de la tâche) et aussi pour mettre à jour les valeurs de phéromones des tâches (voir formules 17 et 18) à injecter comme données d'entrées à l'algorithme d'optimisation. Le couplage quant à lui, est exécuté jusqu'à ce qu'il se stabilise. C'est-à-dire, lorsque la différence entre les cinq dernières solutions évaluées est inférieure à 1 %, voir la figure IV.28.

La quantité de phéromone qui sera ajoutée à la fin de la simulation sur les tâches est déterminée par la formule suivante :

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \frac{1}{Cmax} \quad (17)$$

Les valeurs de phéromones sont mise à jour à l'aide de (ρ est le facteur d'évaporation) :

$$\tau_{ij}^c(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}^c(t) + \ \Delta\tau_{ij}^c(t) \ (18)$$

La différence (ou gap) est calculée comme suite :

$$\left|\frac{DateFinSim - DateFinACO}{DateFinMax}\right| * 100$$

- *DateFinSim* : *Cmax* calculé par la simulation.
- *DateFinACO* : *Cmax* calculé par l'optimisation (ACO).
- *DateFinMax* : *Cmax* final.

2.3. Implémentation et résultats

Le tableau IV.12 montre l'instance (jeux de données) utilisée pour alimenter le couplage (Kim and Park 2004). En ce qui concerne l'implémentation sous Anylogic, tout d'abord, nous avons commencé par développer un package qui représente l'infrastructure de la cour fluviale du TMM, en utilisant l'outil Eclipse. Ensuite, nous avons intégré ce package (fichier Jar), à notre environnement de développement. Par la suite, nous avons implémenté les agents et la

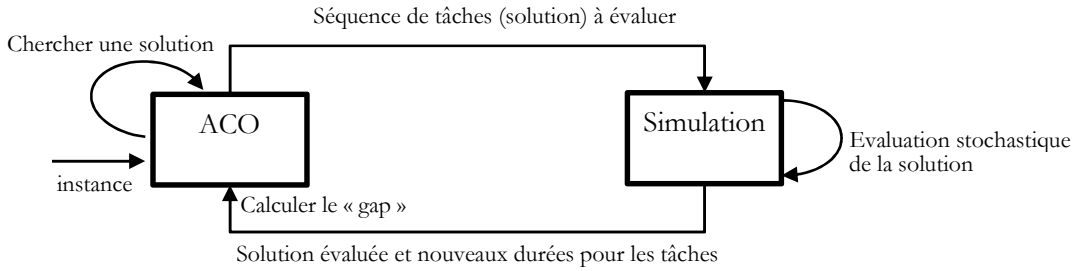


Figure IV.28 Couplage O-S

logique de la simulation grâce aux outils fournis par le logiciel : Agent, State Chart, et la librairie « Process Modeling Library » (voir Figure IV.29). Enfin, nous avons débogué le modèle pour détecter d'éventuelles erreurs.

Tableau IV.12 Instance utilisée

	Baie	Position	durée	Type d'opération
Tâche 1	2	cale	41	Chargement
Tâche 2	10	pont	19	Chargement
Tâche 3	3	pont	6	Déchargement
Tâche 4	2	cale	12	Déchargement
Tâche 5	6	pont	37	Déchargement
Tâche 6	2	pont	34	Chargement
Tâche 7	7	pont	48	Déchargement
Tâche 8	7	cale	10	Chargement
Tâche 9	3	cale	56	Déchargement
Tâche 10	5	cale	3	Déchargement



- **sourceBarge** : pour injecter les barges dans la simulation.
- **moveToBerth** : pour déplacer les barges au poste d'amarrage.
- **delay** : pour mettre en attente les barges jusqu'à la fin des opérations.
- **moveToExit** : pour déplacer les barges vers la sortie du TMM
- **sink** : pour détruire les barges.

Figure IV.29 Les blocs Anylogic impliqués dans l'implémentation du modèle de simulation

Le tableau IV.13 montre la meilleure séquence obtenue pour l'instance tandis que la figure IV.30 expose l'évolution de la valeur du gap (écart). Le coupage se stabilise après les sept premières tournées. Néanmoins, nous avons remarqué que même si le gap se stabilise, la différence entre les dates de fin des tâches des itérations (les tournées du couplage) est très importante. Nos travaux continuent pour résoudre ce problème.

Tableau IV.13 Résultats

Séquence	Baie	Position	Durée	Date de début	Type d'opération	Id portique	Conteneurs
Tâche 7	7	pont	56.5128873	1	Déchargement	2	24
Tâche 10	5	cale	4.61135982	4	Déchargement	1	2

Tâche 4	2	cale	14.097694	11.6113583	Déchargement	1	6
Tâche 1	2	cale	49.4116884	25.709055	Chargement	1	21
Tâche 8	7	cale	11.6637516	57.5128867	Chargement	2	5
Tâche 2	10	pont	23.5300679	72.1766367	Chargement	2	10
Tâche 3	3	pont	6.92933373	76.12074	Déchargement	1	3
Tâche 5	6	pont	44.6862892	86.0500733	Déchargement	1	19
Tâche 9	3	cale	65.2819655	103.32343	Déchargement	2	28
Tâche 6	2	pont	39.5482453	135.212337	Chargement	1	17

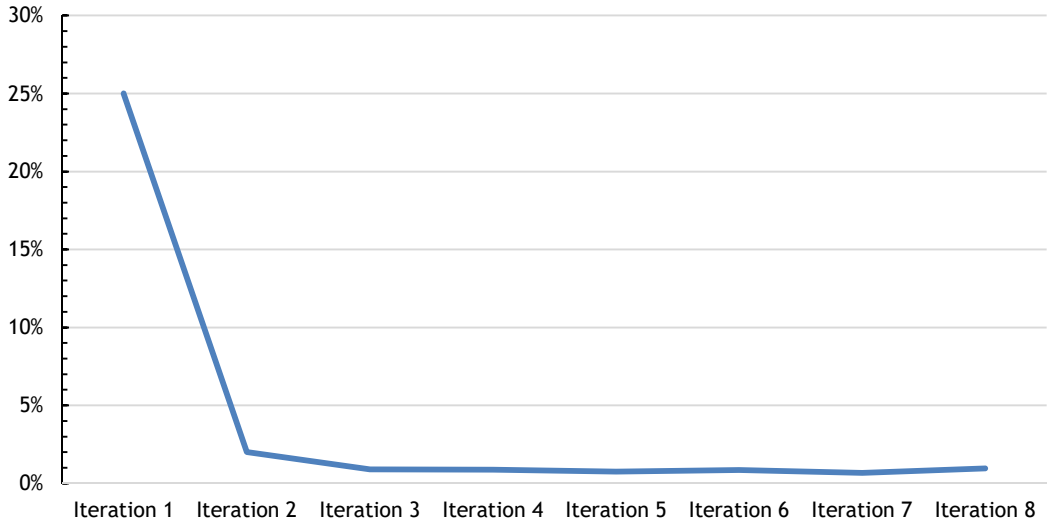


Figure IV.30 Evolution du gap

3. Conclusion

Ce chapitre s'est focalisé sur l'ordonnancement des portiques dans les cours du terminal multimodal du port du Havre. Dans la première section, nous avons proposé deux approches pour gérer les problèmes d'interférence et de blocage de portiques au niveau de la cour ferroviaire et nous avons défini une nouvelle architecture pour la zone de travail des portiques. Au mieux de notre connaissance, le présent document est la première étude qui aborde minutieusement les problèmes d'interférence et de blocage de portiques en utilisant la simulation à base d'agents. Les résultats obtenus ont révélé le remarquable potentiel de nos solutions en termes de minimisation des temps et des mouvements improductifs. À partir de ces résultats, les conclusions suivantes sont tirées : la stratégie à base d'agents donne une séquence de situations qui minimise les mouvements improductifs des portiques, tandis que, l'approche basée sur la colonie de fourmis offre une séquence de jobs qui minimise les temps improductifs des portiques. En général, dans la littérature la meilleure solution est celle qui minimise le temps de service, alors on peut dire que la meilleure approche proposée est l'approche heuristique. Dans la deuxième section, nous avons étudié brièvement l'aspect stochastique du problème d'ordonnancement des portiques. Nous avons présenté le couplage utilisé et les résultats obtenus. Néanmoins, les résultats ont montré que même si le couplage se stabilise, la différence entre les dates de fin des tâches des itérations (*Cmax*) est très importante. Nos travaux continuent pour résoudre ce problème.

Cependant, il convient de noter certaines limites de cette étude :

(1). Les modèles développés ne font pas attention aux perturbations tels que : les défaillances mécaniques des équipements, les retards dans la livraison des conteneurs, les voies ferrées hors service, etc.

(2). Les conteneurs frauduleux et les conteneurs transportant des matières dangereuses ne sont pas pris en compte dans cette étude.

(3). Dans la planification des activités de transfert intra-portuaire de conteneurs, nous ignorons la date d'arrivée des conteneurs importés aux TMM.

(4). Les navettes ferroviaires ne sont pas considérées dans le problème d'ordonnancement à la cour fluviale.

Nous allons intégrer ces points dans nos prochains travaux, de plus nous allons examiner l'efficacité et la capacité de nos solutions en augmentant le nombre de portiques.

Conclusion générale

Le travail présenté dans cette thèse est la continuité des travaux de (Benghalia 2015) et de (Oudani 2016). Nous nous sommes intéressés à la modélisation et à la simulation multi-agents des terminaux à conteneurs et aux problèmes d'ordonnancement des portiques de manutention au niveau des zones d'opérations. Par nature, la gestion des opérations d'un terminal à conteneurs est une tâche complexe, alors il est important de mettre au point des approches et des méthodes qui aident à la prise de décisions. De ce fait, dans ce manuscrit, nous avons développé des solutions qui donnent lieu à de meilleurs résultats au niveau de l'ordonnancement des opérations de manutention et de la gestion de portiques.

Apports et limites

Au terme de ces quatre années de thèse, le bilan de nos travaux de recherche est satisfaisant. Dans la première contribution, nous avons proposé un modèle orienté distribution de charge de planification sur trois agents. L'agent planificateur tactique qui prend des décisions à moyen terme, l'agent planificateur opérationnel qui prend des décisions à court terme, l'agent planificateur temps réel qui s'occupe de la gestion de risques et l'agent fournisseur de services de transport qui planifie l'arrivée et le départ des modes de transport externe. De plus, nous avons introduit de nouveaux concepts pour modéliser les interactions entre les agents en mettant en évidence leurs comportements, leurs états et les transitions qui les relient. Dans la seconde contribution, nous avons apporté des solutions innovantes et ingénieuses aux problèmes d'ordonnancement de portiques à la cour ferroviaire. Les résultats obtenus ont révélé le remarquable potentiel de nos solutions en termes de minimisation des temps et des mouvements improductifs des portiques. Au mieux de notre connaissance, le présent document est la première étude qui aborde minutieusement les problèmes d'interférence et de blocage de portiques en utilisant la simulation à base d'agents. La dernière contribution concerne le cas stochastique du problème d'ordonnancement des opérations de chargement et de déchargement des barges par des portiques. Nous avons étudié le problème via un couplage Optimisation-Simulation pour déterminer les bonnes périodes des tâches qui minimisent la durée de service des portiques de manutention.

Cependant, quelques limites de cette étude méritent d'être traitées dans nos prochains travaux :

(1). Les modèles développés ne font pas attention aux perturbations tels que : les défaillances mécaniques des équipements, les retards dans la livraison des conteneurs, les voies ferrées hors service, etc.

(2). Les conteneurs frauduleux et les conteneurs transportant des matières dangereuses ne sont pas pris en compte dans cette étude.

(3). Dans la planification des activités de transfert intra-portuaire de conteneurs, nous ignorons la date d'arrivée des conteneurs importés aux TMM.

(4). Les navettes ferroviaires ne sont pas considérées dans le problème d'ordonnancement à la cour fluviale.

(5). La différence entre les dates de fin de tâches des itérations du couplage Optimisation-Simulation est très importante.

Publications

Nos travaux de recherche ont fait l'objet de plusieurs publications dans des manifestations scientifiques et des dans des revues internationales à comité de lecture :

1. M. N. Abourraja, J. Boukachour, A. El Fazziki, et M. Najib. "Une modélisation à base d'agents d'un Terminal à Conteneurs : Une approche orientée distribution de charge entre planificateurs", 2éme édition du colloque international sur le monitoring des systèmes industriels 2014 (CIMSI'2014), Marrakech, Maroc.

2. M. N. Abourraja, J. Boukachour, M. Y. Samiri, M. Najib, A. El Fazziki, A. Bouain, et M. Oudani, "Un modèle agent pour simuler les opérations du terminal multimodal du port du Havre," presented at the 3rd International Conference on Logistics Operations Management, Fez, Morocco, 2016, pp. 514–523.

3. M. N. Abourraja, M. Oudani, M. Y. Samiri, D. Boudebous, A. El Fazziki, M. Najib, A. Bouain, and N. Rouky, "A Multi-Agent Based Simulation Model for Rail–Rail Transshipment: An Engineering Approach for Gantry Crane Scheduling," IEEE Access, vol. 5, pp. 13142–13156, 2017 (Thomson, Scopus, …).

4. M. N. Abourraja, M. Oudani, M. Y. Samiri, J. Boukachour, A. El Fazziki, A. Bouain, and M. Najib, "An improving agent-based engineering strategy for minimizing unproductive situations of cranes in a rail–rail transshipment yard," SIMULATION, 2017 (Thomson, Scopus, …).

5. M. N. Abourraja, M. Y. Samiri, J. Boukachour, M. Najib, A. El Fazziki, et A. Bouain, "De l'analyse de besoins à l'implementaion du modèle de simulation d'un terminal à conteneurs," accepted in the 4th International Conference on Logistics Operations Management, Le Havre, France, 2018.

Nous avons aussi participé à la réalisation d'autres travaux :

1. A. Bouain, M. N. Abourraja, A. El Fazziki, and M. Sadgal, "Towards an approach for modeling and implementing pervasive services", Journal of Convergence Information Technology, Vol. 11, no. 5, pp. 133-141, 2016 (Scopus, …).

2. M. Y. Samiri, M. N. Abourraja, J. Boukachour, M. Najib, et A. El Fazziki, “Un système d’aide à la décision basé produit intelligent et logique floue pour le ciblage des conteneurs à risques”, presented at the 3rd International Conference on Logistics Operations Management, Fez, Morocco, 2016.

3. A. Bouain, A. El Fazziki, M. Sadgal, and M. N. Abourraja, “Towards a pervasive information system for patient triage and referral in emergency departments,” Int. J. Ad Hoc Ubiquitous Comput., vol. 25, no. 4, pp. 273–283, Jan. 2017 (Thomson, Scopus, …).

4. M. Y. Samiri, M. Najib, A. El Fazziki, M. N. Abourraja, D. Boudebous, and A. Bouain, “APRICOIN: An Adaptive Approach for Prioritizing High-Risk Containers Inspections,” IEEE Access, vol. 5, pp. 18238–18249, 2017 (Thomson, Scopus, …).

5. N. Rouky, M. N. Abourraja, J. Boukachour, D. Boudebous, A.H. El Alaoui, and F. El Khoukhi, “Optimization and Simulation for the Quay Crane Scheduling Problem under Uncertainty ,” accepted in the 4th International Conference on Logistics Operations Management, Le Havre, France, 2018.

6. N. Rouky, M. N. Abourraja, J. Boukachour, D. Boudebous, A.H. El Alaoui, and F. El Khoukhi, "Simulation optimization based ant colony algorithm for the uncertain quay crane scheduling problem", Int. J. Ind. Eng. Comput., 2018, In Press (Scopus, …). Perspectives

Pour améliorer nos travaux, nous projetons de :

(1). Développer un outil d’aide à la décision. Le modèle de simulation développé ici peut être considéré comme la base d’un outil d’aide à la décision, puisque la simulation permet d’évaluer, de tester et de valider les solutions apportées à un problème donné. Cependant, notre but est de développer un outil qui permettra aux utilisateurs de choisir le type d'installations et d’équipement qu’ils souhaitent étudier via la simulation des activités portuaires et qui offrira des jugements aidant les utilisateurs à se prononcer sur leurs stratégies de gestion des opérations.

(2). Etudier l’impact de la gestion du risque sur la performance du terminal multimodal et du système de transfert intra-portuaire de conteneurs. L’objectif est de déterminer à quel niveau l’inspection de conteneurs et la ségrégation de conteneurs transportant des matières dangereuses auront un effet négatif sur la performance des opérations de transport et de manutention. Nous envisageons aussi d’étudier les conséquences des perturbations tels que : les défaillances mécaniques des équipements, les retards dans la livraison des conteneurs, les voies ferrées hors service, etc.

(3). Examiner l'efficacité des deux stratégies d’ordonnancement des portiques à la cour ferroviaire en augmentant le nombre de portiques et des conteneurs

manutentionnés et enrichir le problème d'ordonnancement des portiques à la cour fluviale en introduisant les navettes ferroviaires.

(4). Introduire des capacités d'apprentissage et de raisonnement intelligent dans les agents de contrôle : APO, APT, APRG et AFS.

(5). Automatiser la transformation du modèle conceptuel écrit en AML et UML vers le modèle de simulation Anylogic en utilisant les concepts de l'ingénierie dirigée par les modèles.

Nous espérons, par l'écriture de ce manuscrit, avoir enrichi, ne serait-ce que quelque peu, la littérature scientifique. Nous souhaitons que les solutions exposées soient utiles et permettent à d'autres chercheurs de progresser dans leurs travaux.

Références

Adam E (2000). Modèle d'organisation multi-agents pour l'aide au travail coopératif dans les processus d'entreprise : application aux systèmes administratifs complexes. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2000.

Ak A (2008). Berth and Quay Crane Scheduling: Problems, Models and Solution Methods. Georgia Institute of Technology, 2008.

Alderton P, Giuseppe S (2013). Port Management and Operations. Taylor & Francis, 2013.

Alsoufi G, Xinan Y, Abdellah S (2016). Robust Berth Allocation Using a Hybrid Approach Combining Branch-and-Cut and the Genetic Algorithm. In International Workshop on Hybrid Metaheuristics, Springer, 2016, 187–201.

Amaran S, Sahinidis NV, Sharda B, Bury SJ (2014). Simulation Optimization: A Review of Algorithms and Applications. 4OR 2014; 12 (4): 301–333.

Amrani-Zouggar Aïcha (2009). Impact Des Contrats D'approvisionnement Sur La Performance de La Chaîne Logistique: Modélisation et Simulation. Bordeaux 1, 2009.

Angeloudis P, Bell MGH (2011). A Review of Container Terminal Simulation Models. Maritime Policy & Management, 2011; 38 (5): 523–540.

Baird AJ (2007). The Development of Global Container Transhipment Terminals. In International Workshop on Ports, Cities and Global Supply Chains (2005: Hong Kong, China), 2007.

Bellifemine F, Bergenti F, Caire G, Poggi A (2005). JADE—a Java Agent Development Framework. In: Multi-agents Programming. Springer, 2005, 125–147.

Benghalia A, Boukachour J, Boudebous D (2013). Évaluation de La Performance Du Trafic Des Conteneurs Maritimes. In 9th International Conference on Integrated Design and Production, Tlemcen, Algeria, 2013.

Benghalia A, Boukachour J, Boudebous D (2014), Modélisation et simulation du transfert massifié de conteneurs. In The 2nd International IEEE conference on Logistics Operations Management (GOL'14), Rabat, Morocco, 2014.

Benghalia A, Oudani M, Boukachour J, Boudebous D, Alaoui AEH (2014). Proposition d'une approche de couplage optimisation-simulation pour le transfert de conteneurs maritimes. In MOSIM 2014, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation, 2014.

Benghalia A, Oudani M, Boukachour J, Boudebous D, Alaoui AEH (2015). Optimization-Simulation for Maritime Containers Transfer. Int. J. Appl. Logist. 2014; 5 (2): 50–61.

Benghalia A (2015). Modélisation et Évaluation de La Performance Des Terminaux Portuaires. Université Le Havre Normandie, 2015.

Bielli M, Boulmakoul A, Rida M (2006). Object Oriented Model for Container Terminal Distributed Simulation. European Journal of Operational Research, 2006 ; 175 (3): 1731–1751.

Bierwirth C, Meisel F (2009). A Fast Heuristic for Quay Crane Scheduling with Interference Constraints. Journal of Scheduling, 2009; 12 (4): 345–360.

Bierwirth C, Meisel F (2010). A Survey of Berth Allocation and Quay Crane Scheduling Problems in Container Terminals. European Journal of Operational Research, 2010; 202 (3): 615–27.

Bierwirth C, Meisel F (2015). A Follow-up Survey of Berth Allocation and Quay Crane Scheduling Problems in Container Terminals. European Journal of Operational Research, 2015; 244 (3): 675–89.

Blum R (2010). La Desserte Ferroviaire et Fluviale Des Grands Ports Maritimes Français. Paris: Rapport À Mr Le Premier Ministre, 2010.

Borshchev A (2013). The big book of simulation modeling: multimethod modeling with AnyLogic 6. Anylogic North America, 2013.

Böse JW (2011). General Considerations on Container Terminal Planning. In: Handbook of Terminal Planning. Springer New York, 2011, 3-22.

Boysen N, Fliedner M, Kellner M (2010). Determining Fixed Crane Areas in Rail–rail Transshipment Yards. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2010; 46 (6): 1005–1016.

Boysen N, Fliedner M, Jaehn F, Pesch E (2013). A Survey on Container Processing in Railway Yards. Transportation Science, 2013; 47 (3): 312–329.

Bratman ME., Israel DJ, Pollack ME (1988). Plans and Resource-Bounded Practical Reasoning. Computational Intelligence, 1988; 4 (3): 349–355.

Bresciani P, Perini A, Giorgini P, Giunchiglia F, Mylopoulos J (2004). Tropos: An Agent-Oriented Software Development Methodology. Autonomous Agents and Multi-agents Systems, 2004; 8 (3): 203–236.

Brickner LR, Chun MD, Chou RC, von Isenburg C, Radzikowski P (1990). Grid rail container transport and storage system. US Patent No. 4973 219, Sea-Land Corporation, Elizabeth, NJ, 1990.

Brinkman B (2011). Operations Systems of Container Terminals: A Compendious Overview In: Handbook of Terminal Planning. Springer New York, 2011, 25–39.

Bruzzone AG, Longo F (2013). 3D Simulation as Training Tool in Container Terminals: The TRAINPORTS Simulator. Journal of Manufacturing Systems, 2013; 32 (1): 85–98.

Burns MG (2014). Port Management and Operations. Taylor & Francis, 2014.

Cai Y, Huo Y-z (2009). Simulation and Optimization of Container Terminal Logistics System: An Overview [J]. Journal of System Simulation, 2009.

Calvez B (2007). Le calibrage de modèles à base d'agents pour la simulation de systèmes complexes. Université d'Évry Val d'Essonne, 2007.

Carlo HJ, Vis IFA, Roodbergen KJ (2014a). Storage Yard Operations in Container Terminals: Literature Overview, Trends, and Research Directions. European Journal of Operational Research, Maritime Logistics 2014; 235 (2): 412–30.

Carlo HJ, Vis IFA, Roodbergen KJ (2014b). Transport Operations in Container Terminals: Literature Overview, Trends, Research Directions and Classification Scheme. European Journal of Operational Research, 2014; 236 (1): 1–13.

Carlo HJ, Vis IFA, Roodbergen KJ (2015). Seaside Operations in Container Terminals: Literature Overview, Trends, and Research Directions. Flexible Services and Manufacturing Journal, 2015; 27 (2–3): 224–62.

Carson Y, Maria A. 1997. Simulation Optimization: Methods and Applications. In Proceedings of the 29th Conference on Winter Simulation, IEEE Computer Society, 1997, 118–126.

Cartenì A, de Luca S (2012). Tactical and Strategic Planning for a Container Terminal: Modelling Issues within a Discrete Event Simulation Approach. Simulation Modelling Practice and Theory, 2012; 21 (1): 123–145.

Cervenka R, Trencansky I (2004). Agent Modeling Language: Language Specification. Whitestein Technologies, 2004.

Charkaoui A, Ait Ouahman A, Bouayad B (2012). Modeling the Logistics Performance in Developing Countries: An Exploratory Study of Moroccan Context. International Journal of Academic Research, 2012; 4 (2): 129–135.

Cheyroux L (2003). Sur L'évaluation de Performances Des Chaînes Logistiques. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2003.

Chung L, Nixon BA, Yu E, Mylopoulos J (2012). Non-Functional Requirements in Software Engineering. Springer Science & Business Media, 2012.

Clausen U, Kaffka J, Meier F (2012). CONTSIM–Container Terminal Management with Simulation. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2012, 54: 332–340.

Conan D (2016). Prérequis sur la modélisation et l'expression des besoins. http://www-inf.it-sudparis.eu/COURS/CSC4102/Chap/c02-prerequis-modelisation-expressiondesbesoins-chap.pdf.

Cooper K, Abraham SP, Unnithan R.S, Chung L, Courtney S (2006). Integrating Visual Goal Models into the Rational Unified Process. Journal of Visual Languages & Computing, 2006; 17 (6): 551–583.

Cumming G (2006). Understanding replication: Confidence intervals, P-Values, and What's Likely to Happen next Time. Proceedings of the 7 th International Conference on Teaching Statistics, Voorburg, The Netherlands: International Statistics Institute, 2006.

Daganzo CF (1989). The Crane Scheduling Problem. Transportation Research Part B: Methodological, 1989; 23 (3): 159–75.

Drogoul A (1993). De La Simulation Multi-agents À La Résolution Collective de Problèmes. Université Paris VI, 1993.

Drogoul A, Vanbergue D, Meurisse T (2003). Multi-agents based simulation: where are the agents? In: Sichman JS, Bousquet F, Davidsson P (Eds.), Multi-agents-Based Simulation. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Berlin, 2003, 2581: 1-15.

Dubreuil J (2008). La logistique des terminaux portuaires de conteneurs. Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport, 2008.

European Commission. Keep Europe Moving: Sustainable Mobility for Our Continent, 2006. Mid-term Review of the European Commissions 2001 Transport White Paper. European Commission, Luxembourg.

Epstein JM (2008). Why Model?. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 2008; 11 (4): 12.

Esmer S (2008). Performance Measurements of Container Terminal Operations, 2008.

Fazlollahtabar H, Saidi-Mehrabad M (2013). Methodologies to Optimize Automated Guided Vehicle Scheduling and Routing Problems: A Review Study. Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications, 2013; 77 (3–4): 525-45.

Feng F, Pang Y, Lodewijks G (2015). Integrate Multi-agents Planning in Hinterland Transport: Design, Implementation and Evaluation. Advanced Engineering Informatics, 2015; 29 (4): 1055-1071.

Ferber J, Perrot JF (1995). Les Systèmes Multi-agents: Vers Une Intelligence Collective. InterEditions, 1995.

Fortino G, Russo W(2012). ELDAMeth: An Agent-Oriented Methodology for Simulation-Based Prototyping of Distributed Agent Systems. Information and Software Technology, 2012; 54 (6): 608–624.

Fotuhi F, Huynh N, Vidal JM, Xie Y (2013). Modeling Yard Crane Operators as Reinforcement Learning Agents. Research in Transportation Economics, 2013; 42 (1): 3–12.

Foures D (2015). Validation de Modèles de Simulation. Université Toulouse III Paul Sabatier, 2015.

Frémont A, Franc P (2010). Hinterland Transportation in Europe: Combined Transport versus Road Transport. Journal of Transport Geography, Special Issue on Comparative North American and European gateway logistics, 2010; 18 (4): 548–56.

Fu MC (1994). Optimization via Simulation: A Review. Annals of Operations Research, 1994; 53 (1): 199–247.

Fu MC (2001). Simulation Optimization. In Proceedings of the 33nd Conference on Winter Simulation; IEEE Computer Society, 2001,53–61.

Garro A, Monaco MF, Russo W, Sammarra M, Sorrentino G (2015). Agent-Based Simulation for the Evaluation of a New Dispatching Model for the Straddle Carrier Pooling Problem. Simulation, 2015; 91: 181-202.

Garro A, Russo W (2010). easyABMS: A Domain-Expert Oriented Methodology for Agent-Based Modeling and Simulation. Simulation Modelling Practice and Theory, 2010; 18 (10): 1453–1467.

Gaud N (2007). Systèmes Multi-agents Holoniques: De L'analyse À L'implantation. Université de Belfort-Montbéliard. Laboratoire Systèmes et Transport, 2007.

Golden BL., Raghavan S, Wasil EA (2008). The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges, Springer Science & Business Media, 2008.

Gras P (2010). Le Temps Des Ports. Déclin et Renaissance Des Villes Portuaires (1940-2010). Tallandier, 2010.

Gudelj A, Krčum M, Twrdy E (2010). Models and Methods for Operations in Port Container Terminals. PROMET-Traffic&Transportation, 2010; 22 (1): 43–51.

Gulyás L, Kozsik T, Fazekas S. (1999). The Multi-agents Modeling Language. In Proceedings of Proceedings of the 4th International Conference on Applied Informatics (ICAI), 1999, 43–50.

Günther HO, Kim KH (2005). Container Terminals and Automated Transport Systems. Springer, 2005.

Günther HO, Kim KH (2006). Container Terminals and Terminal Operations. OR Spectrum, 2006; 28 (4): 437–45.

Gutknecht O, Ferber J (2000). Madkit: A Generic Multi-agents Platform. In Proceedings of the Fourth International Conference on Autonomous Agents, ACM, 2000, 78–79.

Han XL, Gong X, Jo J (2015). A New Continuous Berth Allocation and Quay Crane Assignment Model in Container Terminal. Computers & Industrial Engineering, 2015; 89: 15–22.

Henesey LE, Davidsson Paul, Persson JA (2006). Agent Based Simulation Architecture for Evaluating Operational Policies in Transshipping Containers. In Multiagent System Technologies, Springer, 2006, 73–85.

Henesey LE (2006). Multi-agents systems for container terminal management, Blekinge Institute of Technology, Karlskrona, Sweden, 2006.

Hoad K, Robinson S, Davies R (2007). Automating DES Output Analysis: How Many Replications to Run. In Proceedings of the 39th Conference on Winter Simulation: 40 Years! The Best Is yet to Come, IEEE Press, 2007, 505–512.

Huget MP (2005). Modeling Languages for Multiagent Systems. Agent-Oriented Software Engineering (AOSE-2005), 2005, 1–12.

Hunt J (2003). An Introduction to the UML and the Unified Process. Guide to the Unified Process Featuring UML, Java and Design Patterns, 2003, 21–37.

Ioannou PA, Kosmatopoulos EB, Jula H, Collinge A, Liu CI, Asef-Vaziri A, Dougherty Jr E (2000). Cargo Handling Technologies. Final Report, Prepared for Task 1, 2000.

Kefi M (2008). Optimisation Heuristique Distribuée du Problème de Stockage de Conteneurs dans un Port. Ecole Centrale de Lille, 2008.

Kellner M, Boysen N, Fliedner M (2012). How to Park Freight Trains on Rail–rail Transshipment Yards: The Train Location Problem. OR Spectrum, 2012; 34 (3): 535–561.

Kemme N (2011). RMG Crane Scheduling and Stacking: Overview and Implications on Terminal Planning. Operations Research/ Computer Science Interfaces Series, 2011; 49 (1): 271–301.

Kemme N (2013a). Container-Storage Yard. In Design and Operation of Automated Container Storage Systems, Springer, 2013, 53–87.

Kemme N (2013b). Container-Terminal Logistics, Springer, 2013.

Kim KH, Günther HO (2006). Container Terminals and Cargo Systems, Springer, 2006.

Kim KH, Kang JS, Ryu KR (2004). A Beam Search Algorithm for the Load Sequencing of Outbound Containers in Port Container Terminals. OR Spectrum, 2004; 26 (1): 93–116.

Kim KH, Park YM (2004). A Crane Scheduling Method for Port Container Terminals. European Journal of Operational Research, 2004; 156 (3): 752–768.

Kim KH, Phan MHT, Woo YJ (2012). New Conceptual Handling Systems in Container Terminals. Industrial Engineering and Management Systems, 2012; 11 (4): 299–309.

Kroll P, Kruchten P (2003). The Rational Unified Process Made Easy: A Practitioner's Guide to the RUP, Addison-Wesley Professional, 2003.

Kruchten P (2004). The Rational Unified Process: An Introduction. Addison-Wesley Professional, 2004.

Kuhn TS. (1970). The Structure of Scientific Revolutions, International Encyclopedia of Unified Science, Chicago: The University of Chicago Press, 1970; 2 (2).

Lajjam A, Tabaa Y, Medouri A (2014). A New Approach for Sequencing Loading and Unloading Operations in the Seaside Area of a Container Terminal. International Journal of Supply and Operations Management, 2014; 1 (3): 328–346.

Law AM (1991). Simulation Modeling and Analysis. McGraw-Hill New York, 1991.

Lee DH, Chen JH (2010). An Improved Approach for Quay Crane Scheduling with Non-Crossing Constraints. Engineering Optimization, 2010; 42 (1): 1–15.

Lee DH, Wang HQ, Miao L (2008). Quay Crane Scheduling with Non-Interference Constraints in Port Container Terminals. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2008; 44 (1): 124–135.

Lehnfeld J, Knust S (2014). Loading, Unloading and Premarshalling of Stacks in Storage Areas: Survey and Classification. European Journal of Operational Research, 2014; 239 (2): 297–312.

Leriche D, Oudani M, Cabani A, Hoblos G, Mouzna J, Boukachour J, Alaoui AEH (2015). Simulating New Logistics System of Le Havre Port. IFAC-PapersOnLine, 15th IFAC Symposium on Information Control Problems in ManufacturingINCOM 2015, 48 (3): 418–23.

Lim A, Rodrigues B, Xiao F, Zhu Y (2004). Crane Scheduling with Spatial Constraints. Naval Research Logistics (NRL), 2004; 51 (3): 386–406.

Lim A, Rodrigues B, Zhu Y (2007). A M-Parallel Crane Scheduling Problem with a Non-Crossing Constraint. Naval Research Logistics (NRL), 2007; 54 (2): 115–127.

Liu C, Ioannou PA. (2002). Petri Net Modeling and Analysis of Automated Container Terminal Using Automated Guided Vehicle Systems. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2002; 1782: 73–83.

Maione G, Ottomanelli M (2005). A Preliminary Petri Net Model of the Transshipment Processes in the Taranto Container Terminal. In Emerging Technologies and Factory Automation, 2005.

Martín-Soberón AM, Monfort A, Sapiña R, Monterde N, Calduch D (2014). Automation in Port Container Terminals. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2014, 160: 195–204.

Meersmans PJM, Dekker R (2001). Operations Research Supports Container Handling, 2001.

Mei SHA (2005). Overview of Research on Modeling and Simulation of Container Terminal Logistics System [J].” Journal of Shanghai Maritime University, 2005; 1: 001.

Mei SHA (2008). Generality Abstract Methodology of General Simulation Modeling for Container Terminals Logistics Operations System [J]. Journal of System Simulation, 2008; 2: 007.

Miller K, Mukerji J (2003). MDA Guide Version 1.0. 1. OMG Framingham, 2003.

Minsky ML (1968). Matter, Mind and Models.In Minsky, M. (Ed) Semantic Information Processing, MIT Press, Cambridge, Mass, 1968

Morvan G. 2009. Approche Multi-agents D’un Système D’aide À La Décision En Environnement Dynamique Incertain-Application À L’entomologie Médico-Légale. Artois, 2009.

Najib M., ElFazziki A, Boukachour J (2012). A Container Terminal Management System. In Proceedings of the International Conference on Harbour Maritime and Multimodal Logistics M&S, 118–127, 2012.

Najib M, Boukachour J, ElFazziki A (2013). A Multi Agent Framework for Risk Management in Container Terminal: Suspect Containers Targeting. International Journal of Computer Science and Applications, 2013; 10 (2): 33–52.

Najib M. (2014). Gestion Des Risques Liés Au Transport Des Matières Dangereuses. Université Le Havre Normandie/ Université Cadi Ayyad, 2014.

Ng WC (2005). Crane Scheduling in Container Yards with Inter-Crane Interference. European Journal of Operational Research, 2005; 164 (1): 64–78.

Ottjes JA, Veeke HPM, Duinkerken MB, Rijsenbrij JC, Lodewijks G (2007). Simulation of a Multiterminal System for Container Handling. In Container Terminals and Cargo Systems, Springer Berlin Heidelberg, 2007.

Oudani M, Alaoui AEH, Boukachour J (2014). An Efficient Genetic Algorithm to Solve the Intermodal Terminal Location Problem. International Journal of Supply and Operations Management 1, 2014; (3): 279–296.

Oudani M (2016). Optimisation Des Problèmes de Transport Multimodal. Normandie université/Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, 2016.

Parunak HVD (1999). Industrial and Practical Applications of DAI. In: Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence, 1999, 337–421.

Petty MD (2012). Calculating and Using Confidence Intervals for Model Validation. In Proceedings of the Fall 2012 Simulation Interoperability Workshop, 10–14.

Rouquier JB (2008). Robustesse et Émergence Dans Les Systèmes Complexes: Le Modèle Des Automates Cellulaires. Ecole normale supérieure de Lyon, 2008.

Russell S, and Norvig P (1995). A Modern Approach. Artificial Intelligence. Prentice-Hall, Egnlewood Cliffs 25: 27.

Şahin, C, and Kuvvetli Y (2016). Differential Evolution Based Meta-Heuristic Algorithm for Dynamic Continuous Berth Allocation Problem. Applied Mathematical Modelling, 2016; 40 (23): 10679–10688.

Sayama H (2015). Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems, Open SUNY, 2015.

Schmidt JW, Taylor RE (1970). Simulation and Analysis of Industrial Systems, Richard D. Irwin, 1970

Schütt H (2011). Simulation Technology in Planning, Implementation and Operation of Container Terminals. In: Handbook of Terminal Planning. Springer New York, 2011, 103-116

Shannon RE (1998). Introduction to the Art and Science of Simulation. In Proceedings of the 30th Conference on Winter Simulation, IEEE Computer Society Press, 1998, 7–14.

Siebert J (2011). Approche Multi-agents Pour La Multi-Modélisation et Le Couplage de Simulations. Application À L'étude Des Influences Entre Le Fonctionnement Des Réseaux Ambiants et Le Comportement de Leurs Utilisateurs. Université Henri Poincaré-Nancy I, 2011.

Singh VP (2009). System Modeling and Simulation, New Age International, 2009.

Stahlbock R, Voß S (2008a). Operations research at container terminals: a literature update. OR Spectrum, 2008; 30: 1-52.

Stahlbock R, Voß S (2008b). Vehicle Routing Problems and Container Terminal Operations– an Update of Research. In The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges, Springer, 551–589.

Steenken D, Voß S, Stahlbock R (2004). Container terminal operation and operations research - a classification and literature review OR Spectrum. 2004; 26: 3-49.

Sterman, JD (2000). Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World, 2000.

Sun Z, Lee JH, Chew EP, Tan KC (2012). MicroPort: A General Simulation Platform for Seaport Container Terminals. Advanced Engineering Informatics, 2012; 26 (1): 80–89.

Talley WK (2000). Ocean Container Shipping: Impacts of a Technological Improvement. Journal of Economic Issues 34, 2000; (4): 933–948.

Talley WK (2004). Guest Editor's Foreword. Review of Network Economics, 2004; 3 (2).

Theofanis S, Boile M, Golias M (2009). Container Terminal Berth Planning: Critical Review of Research Approaches and Practical Challenges. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009; 2100: 22–28.

Thomas BJ, Monie G (2000). The Measurement of Port Performance: With Particular Reference Ten Container Terminal Operations. ILO (International Labour Organization) PDP (Port Worker Development Programme), Cardiff/Antwerp, 2000.

Tounsi J (2009). Modélisation Pour La Simulation de La Chaîne Logistique Globale Dans Un Environnement de Production PME Mécatroniques. Université de Savoie, 2009.

Treuil JP, Drogoul A, Zucker JD (2008). Modélisation et Simulation À Base D'agents: Exemples Commentés, Outils Informatiques et Questions Théoriques. Dunod, 2008.

Truong-Meyer XM (2012). Modélisation en génie des procédés. Ed. Techniques Ingénieur, 2012

Vis IFA (2006). Survey of Research in the Design and Control of Automated Guided Vehicle Systems. European Journal of Operational Research, 2006; 170 (3): 677–709.

Vis IFA, De Koster R(2003). Transshipment of Containers at a Container Terminal: An Overview. European Journal of Operational Research, 2003; 147 (1): 1–16.

Wiegmans BW, Masurel E, Nijkamp P (1999). Intermodal Freight Terminals: An Analysis of the Terminal Market. Transportation Planning and Technology, 1999; 23 (2): 105–128.

Wiegmans BW (2003). Performance Conditions for Container Terminals, 2003.

Wooldridge M, Jennings NR (1995). Agent Theories, Architectures, and Languages: A Survey. In Intelligent Agents, Springer, 1995, 1–39.

Wooldridge M (2009). An Introduction to Multiagent Systems, John Wiley & Sons, 2009.

Yin, XF, Khoo LP, Chen CH (2011). A Distributed Agent System for Port Planning and Scheduling. Advanced Engineering Informatics, 2011; 25 (3): 403–412.

Yun WY, Choi YS (1999). A Simulation Model for Container-Terminal Operation Analysis Using an Object-Oriented Approach. International Journal of Production Economics, 1999; 59 (1): 221–230.

Zhang C, Hammad A (2011). Multiagent Approach for Real-Time Collision Avoidance and Path Replanning for Cranes. Journal of Computing in Civil Engineering, 2011; 26 (6): 782–794.

Zhen L, Jiang X, Lee LH, Chew EP (2013). A Review on Yard Management in Container Terminals.” Industrial Engineering and Management Systems, 2013; 12 (4): 289–304.

Zhu Y, Lim A (2006). Crane Scheduling with Non-Crossing Constraint. Journal of the Operational Research Society, 2006; 57 (12): 1464–1471.

Webbliographie :

"Fourmi." 2016. Wikipédia. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fourmi&oldid=131942098.

"George Box." 2016. Wikipédia.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=George_Box&oldid=130397209.

"Jay Wright Forrester." 2017. Wikipedia.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Jay_Wright_Forrester&oldid=768175980.

"Liste des plus grands porte-conteneurs." 2016. Wikipédia.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Liste_des_plus_grands_porte-conteneurs&oldid=130757292.

"Système complexe." 2017. Wikipédia.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Syst%C3%A8me_complexe&oldid=134983809.

"Système multi-agents." 2016. Wikipédia.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Syst%C3%A8me_multi-agents&oldid=131334190.

"HAROPA | Ports de Paris Seine Normandie." 2015. Accessed November 16.
http://www.haropaports.com/.

"Modal Share of Freight Transport to and from EU Ports - Think Tank." 2015. Accessed November 18 2016.
http://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document.html?reference=IPOL_STU(2015)540350.