

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

LA LOGISTIQUE DES TERMINAUX PORTUAIRES DE CONTENEURS

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN ADMINISTRATION DES AFFAIRES
MBA RECHERCHE OPTION MANAGEMENT ET TECHNOLOGIE

PAR
JULIEN DUBREUIL

FÉVRIER 2007

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, j'aimerais remercier sincèrement mon directeur de recherche, M. Teodor Gabriel Crainic. C'est grâce à ses conseils précieux, à ses critiques constructives et à sa passion pour l'univers du transport que ce mémoire a pu prendre forme. Ensuite, je tiens à remercier sincèrement ma famille pour le soutien qu'ils m'ont apporté durant mes études et durant la rédaction de ce mémoire.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance au Centre de recherche sur les transports et à la Chaire de recherche du CRSNG en management logistique pour les ressources qu'ils ont mis à ma disposition tout au long de mes études de maîtrise.

Dans le cadre de cette recherche, j'ai eu la chance de rencontrer plusieurs intervenants du domaine du transport maritime. Je tiens à remercier chacun de ces intervenants : Mme Madeleine Paquin, Présidente Logistec Corporation ; M. Roger Carré, Directeur général Termont Montréal ; M. Calvin Whidden Vice-président Ceres corporation ; M. Kevin Doherty, Vice-président Terminaux Montréal Gateways ; M. Meguerditch Kanondjian, Directeur des opérations Terminaux Montréal Gateways ; M. Didier Vanal, Directeur général CMA-CGM Montréal ; M. Andrew Nation, Directeur des opérations CMA-CGM Montréal ; M. Murray Graves, Directeur de l'administration Halterm Limited.

Finalement, je tiens absolument à remercier mes amis qui m'ont supporté tout au long de mes études.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
RÉSUMÉ.....	xii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I	
TRANSPORT INTERMODAL ET TERMINAUX MARITIMES DE	
CONTENEURS	3
1.1 Transport intermodal.....	3
1.2 Transport maritime de conteneurs.....	7
1.3 Rôle des terminaux portuaires dans le transport intermodal	10
1.4 Organisation physique et équipements d'un terminal maritime de conteneurs.....	11
1.4.1 Zone d'opérations portuaires.....	12
1.4.2 Zone de stockage du terminal	16
1.4.3 Zone d'opérations terrestres.....	21
1.5 Flux d'informations et systèmes de communication et de gestion des terminaux.....	24
1.6 Cheminement d'un conteneur à l'intérieur du terminal	26
1.7 Conclusion	26
CHAPITRE II	
PROBLÈMES DE PLANIFICATION ET DE GESTION DES TERMINAUX	
MARITIMES DE CONTENEURS	27
2.1 La planification stratégique.....	27
2.2 La planification tactique.....	36
2.3 La planification opérationnelle	46
2.4 Planification en temps réel.....	53
2.5 Systèmes intelligents dans les ports	56
2.6 Conclusion	60

CHAPITRE III

PROCESSUS D'UN TERMINAL MARITIME DE CONTENEURS	61
3.1 Processus de la zone d'opérations portuaire du terminal	62
3.2 Processus de la zone d'opérations terrestre du terminal	66
3.3 Processus de la zone de stockage du terminal.....	73
3.4 Flux d'informations.....	74
3.5 Conclusion	77

CHAPITRE IV

ANALYSE COMPARATIVE DE L'UTILISATION DES SYSTÈMES DE TRANSPORT INTELLIGENTS ENTRE LES PORTS DE LA CÔTE EST CANADIENNE ET LES PORTS DU RESTE DU MONDE	78
4.1 Systèmes de transport intelligents.....	79
4.2 Méthodologie	81
4.3 Les systèmes de transport intelligents dans les terminaux portuaires de conteneurs.....	82
4.4 Futurs STI possibles.....	92
4.5 Mise en contexte des ports de la côte Est canadienne.....	94
4.6 Les systèmes de transport intelligents dans les ports de la côte Est canadienne.....	98
4.7 Opportunités pour les ports de la côte Est canadienne.....	103
4.8 Conclusion	107

CHAPITRE V

DESIGN D'UN SIMULATEUR DES OPÉRATIONS D'UN TERMINAL MARITIME DE CONTENEURS	108
5.1 Simulation de terminaux portuaires de conteneurs et méthodologie générale.....	108
5.2 Design général du simulateur.....	111
5.3 Niveaux de la simulation.....	113
5.4 Modèles et sous-modèles du design d'un simulateur de terminal maritime de conteneurs	113

5.5 Conclusion	128
CHAPITRE VI	
IMPLANTATION D'UNE SIMULATION D'UN TERMINAL MARITIME DE	
CONTENEURS	129
6.1 Objectifs de la simulation	129
6.2 Logiciel utilisé	130
6.3 Étude de cas pour l'implantation	132
6.4 Implantation	134
6.5 Conclusion	182
CHAPITRE VII	
VALIDATION	184
7.1 Analyse des données	184
7.2 Calibration et validation.....	198
7.3 Conclusion	214
CHAPITRE VIII	
EXPÉRIMENTATIONS	216
8.1 Cadre de référence	216
8.2 Premier test : Arrivées simultanées de navires	217
8.3 Deuxième test : Panne majeure d'une grue de quai	224
8.4 Troisième test : Ajout d'une grue de quai.....	235
8.5 Conclusion	245
CONCLUSION	247
BIBLIOGRAPHIE	251
RÉFÉRENCES WEBS.....	257

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Disposition d'un terminal maritime spécialisé dans la manutention de conteneurs.	12
Figure 1.2	Grue de quai au Port de Rotterdam	13
Figures 1.3 a, b.	Véhicule guidé automatiquement et système à remorques multiples.	14
Figure 1.4	Système de convoyeur à moteur linéaire	15
Figure 1.5	Chariot cavalier	16
Figure 1.6 a, b.	Pont roulant sur pneumatiques et pont roulant sur rails.	18
Figure 1.7	Chariot à prise par le haut et chariot à prise par le haut avec mat télescopique.	18
Figure 1.8	Pile de conteneurs	20
Figure 1.9	Système d'entreposage et d'extraction automatique.	21
Figure 1.10	Guérite d'un terminal de conteneurs.	22
Figure 3.1	Signification des symboles utilisés dans les diagrammes de processus.	62
Figure 3.2	Processus de déchargement des conteneurs.	64
Figure 3.3	Processus de chargement des conteneurs.	65
Figure 3.4	Processus d'identification des camionneurs et de traitement des opérations de transport routier	68
Figure 3.5	Processus de réception des conteneurs par camion	69
Figure 3.6	Processus de livraison des conteneurs par camions.	70
Figure 3.7	Processus de réception des conteneurs par train	71
Figure 3.8	Processus de livraison par train.	73
Figure 3.9	Processus de remaniement des conteneurs.	74
Figure 4.1	Modèle de traitement des données d'un système de transport intelligent.	79
Figure 5.1	Modèle de développement d'un logiciel	110
Figure 5.2	Représentation d'un terminal maritime de conteneurs comme une suite de files d'attente.	112
Figure 5.3	Arrivée des navires.	114
Figure 5.4	Processus d'allocation des grues de quai	115
Figure 5.5	Processus d'allocation des serveurs pour le déchargement des navires.	117
Figure 5.6	Processus de déchargement des navires.	118

Figure 5.7 Processus d'allocation des serveurs pour le chargement des navires.....	119
Figure 5.8 Processus de chargement des navires.....	120
Figure 5.9 Processus de déchargement des trains.....	121
Figure 5.10 Processus de chargement des trains	123
Figure 5.11 Processus d'allocation des serveurs aux trains.....	124
Figure 5.12 Processus de déchargement de camions.....	125
Figure 5.13 Processus de chargement des camions.....	126
Figure 5.14 Processus de réallocation des serveurs aux navires	127
Figure 5.15 Processus de réallocations des serveurs aux trains.....	128
Figure 6.1 Modules de base du logiciel de simulation <i>ARENA</i>	131
Figure 6.2 Modèle général de la simulation.	135
Figure 6.3 Sous-modèles de génération des arrivées de navire.	138
Figure 6.4 Sous-modèle d'allocation des quais.....	140
Figure 6.5 Allocation des grues de quai.....	141
Figure 6.6 Première étape du processus de réallocation des grues de quai.....	143
Figure 6.7 Sous-modèle « Réallocation des grues de quai 1 ».....	145
Figure 6.8 Modèle général d'allocation des serveurs	147
Figure 6.9 Sous-modèle «Allocation des serveurs 2»	149
Figure 6.10 Initialisation de l'allocation des serveurs.....	151
Figure 6.11 Sous-modèle des grues de quai.....	153
Figure 6.12 Déchargement des navires	154
Figure 6.13 Chargement des navires.....	157
Figure 6.14 Sous-modèle des opérations des serveurs.....	161
Figure 6.15 Libération du quai et des grues de quai.....	163
Figure 6.16 Départ des navires.....	164
Figure 6.17 Arrivée des trains	166
Figure 6.18 Allocation d'une voie ferrée aux trains.....	167
Figure 6.19 Déchargement des trains.....	169
Figure 6.20 Chargement des trains.....	170
Figure 6.21 Libération de la voie ferrée	171
Figure 6.22 Départ des trains.....	172

Figure 6.23 Horaire des camions.....	174
Figure 6.24 Arrivée des camions.....	176
Figure 6.25 Déchargement des camions.....	178
Figure 6.26 Chargement des camions.	180
Figure 6.27 Départ des camions.	181
Figure 6.28 Inventaire de la zone de stockage du terminal.	182
Figure 7.1 Sous-modèle d'arrivée des navires ajusté pour tester le simulateur avec les données réelles.	199
Figure 7.2 Productivité réelle et simulé des opérations de déchargement et de chargement des navires.	204
Figure 8.1 Évolution de l'inventaire moyen de la zone de stockage du terminal.....	222
Figure 8.2 Ajustement au sous-modèle d'opérations des navires.....	225
Figure 8.3 Sous-modèle d'opération des grues de quai lorsqu'une grue est en panne.....	226
Figure 8.4 Sous-modèle de génération des pannes de grues de quai.....	227
Figure 8.5 Temps à quai des navires de la ligne 1.....	230
Figure 8.6 Temps à quai des navires de la ligne 2.....	231
Figure 8.7 Évolution de l'inventaire moyen de la zone de stockage du terminal.....	233
Figure 8.8 Sous-modèle d'opération des grues de quai.....	235
Figure 8.9 Temps à quai des navires de la ligne 1.....	239
Figure 8.10 Temps à quai des navires de la ligne 2.....	240
Figure 8.11 Évolution de l'inventaire moyen de la zone de stockage du terminal.....	243

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 7.1 Erreurs carrées moyennes des distributions pour le temps entre les arrivées de navire de la ligne1.	187
Tableau 7.2 Erreurs carrées moyennes des distributions pour le temps entre les arrivées de navire de la ligne2.	187
Tableau 7.3 Fonctions des distributions aléatoires des grues de quai.	187
Tableau 7.4 Erreurs carrées moyennes des distributions pour le temps de traitement de la grue 1.....	188
Tableau 7.5 Erreurs carrées moyennes des distributions pour le temps de traitement de la grue 2.....	188
Tableau 7.6 Erreurs carrées moyennes des distributions pour le temps de traitement de la grue 3.....	188
Tableau 7.7 Fonctions des distributions aléatoires pour les plans de chargement des navires.	189
Tableau 7.8 Erreurs carrées des distributions pour le nombre de conteneurs à décharger des navires de la ligne 1.....	190
Tableau 7.10 Erreurs carrées des distributions pour le nombre de conteneurs à charger sur les navires de la ligne 1.....	190
Tableau 7.9 Erreurs carrées des distributions pour le nombre de conteneurs à décharger des navires de la ligne 2.....	190
Tableau 7.11 Erreurs carrées des distributions pour le nombre de conteneurs à charger sur les navires de la ligne 2.....	190
Tableau 7.12 Minimum, mode et maximum pour une distribution aléatoire triangulaire des temps de travail des serveurs lors du déchargement des navires.....	191
Tableau 7.13 Minimum, mode et maximum pour une distribution aléatoire triangulaire des temps de travail des serveurs lors du chargement des navires.	192
Tableau 7.14 Comparaison des données réelles et des résultats de la simulation pour le temps de travail des grues de quai et la productivité des opérations de chargement et de déchargement des navires.....	203

Tableau 7.15 Temps de traitement et plan de chargement moyens des trains pour le premier scénario.....	206
Tableau 7.16 Inventaire moyen des dix rondes de simulation du premier scénario.....	208
Tableau 7.17 Taux d'utilisation des équipements du terminal.....	209
Tableau 7.18 Moyenne, variance et écart-type des statistiques des navires de la première ligne pour la simulation d'une année complète d'opérations.....	211
Tableau 7.19 Moyenne, variance et écart-type des statistiques des navires de la deuxième ligne pour la simulation d'une année complète d'opérations.....	211
Tableau 7.20 Temps de traitement et plan de chargement moyens des trains pour la simulation d'une année complète d'opération.....	213
Tableau 7.21 Inventaire moyen des dix rondes de simulation d'une année complète d'opérations du terminal.....	213
Tableau 7.22 Taux d'utilisation des équipements du terminal.....	214
Tableau 8.1 Comparaison entre les données réelles, les données obtenues de la simulation des opérations du terminal et les données obtenues de la simulation des opérations du terminal avec des retards de navires qui causent des arrivées simultanées.....	219
Tableau 8.2 Temps de traitement et plan de chargement moyens des trains pour dix rondes simulation avec arrivées simultanées de navires.....	221
Tableau 8.3 Inventaire moyen de la zone de stockage du terminal.....	221
Tableau 8.4 Taux d'utilisation des équipements du terminal.....	223
Tableau 8.5 Comparaison entre les données réelles, les données obtenues de la simulation des opérations du terminal et les données obtenues de la simulation des opérations du terminal avec une panne majeure d'une grue de quai.....	229
Tableau 8.6 Temps de traitement et plan de chargement moyens des trains pour dix rondes simulation avec panne d'une grue de quai.....	232
Tableau 8.7 Inventaire moyen de la zone de stockage du terminal.....	232
Tableau 8.8 Taux d'utilisation des équipements du terminal.....	234
Tableau 8.9 Comparaison entre les données réelles, les données obtenues de la simulation des opérations du terminal et les données obtenues de la simulation des opérations du terminal avec l'ajout d'une grue de quai supplémentaire.....	237

Tableau 8.10 Temps de traitement et plan de chargement moyens des trains pour dix rondes simulation avec une grue de quai supplémentaire.....	241
Tableau 8.11 Inventaire moyen de la zone de stockage du terminal.....	242
Tableau 8.12 Taux d'utilisation des équipements du terminal.....	244

RÉSUMÉ

Perçus pendant longtemps comme faisant parti d'un secteur d'activité économique archaïque, les terminaux portuaires de conteneurs constituent un maillon important et méconnue de plusieurs chaînes de transport intermodal. La croissance rapide des volumes de conteneurs manutentionnés dans ces terminaux a pour conséquence d'entraîner une congestion de ceux-ci et, par le fait même, une perturbation des réseaux d'approvisionnements de plusieurs entreprises.

En conséquence, l'objectif de ce mémoire peut être divisé en deux temps. Dans un premier temps, la première partie de ce mémoire vise à comprendre le fonctionnement et les problématiques liées à la gestion des terminaux portuaires de conteneurs. Pour ce faire, une revue de la littérature liée à la planification et la gestion des terminaux portuaires de conteneurs est effectuée, ainsi qu'une étude des processus de ces terminaux.

Dans un second temps, ce mémoire vise à proposer des pistes de solutions afin de faciliter la transition des conteneurs dans ces terminaux. La principale piste de solution identifiée est l'application des systèmes de transport intelligents aux terminaux portuaires de conteneurs. Dans ce sens, une étude comparative de l'utilisation des systèmes de transport intelligents entre les ports de la côte est canadienne et les ports du reste du monde est présentée. Ensuite, une première version d'un simulateur des opérations d'un terminal portuaire de conteneurs est développée, afin d'être utilisée comme outil d'analyse pour mesurer l'impact d'une introduction plus importante des systèmes de transport intelligents dans les terminaux portuaires de conteneurs.

Mots clefs : Terminaux portuaires de conteneurs, systèmes de transport intelligents, simulation, transport intermodal, transport de marchandises.

INTRODUCTION

La conteneurisation des marchandises a joué un rôle important dans le développement des réseaux internationaux de transport intermodal. En effet, avec l'arrivée du conteneur, un important réseau international de transport basé sur l'utilisation d'un format standard de cargaison s'est développé. Cette standardisation a permis d'accélérer le transfert de la marchandise d'un mode de transport à l'autre. Aujourd'hui encore, les opérations de transfert d'un mode de transport à l'autre demeurent l'élément clé d'un système de transport performant.

Parmi ces points de transfert, les terminaux portuaires de conteneurs sont généralement identifiés comme le maillon faible de la chaîne. Tel qu'il a été déjà démontré à plusieurs reprises, une chaîne de transport intermodale ne peut être plus forte que le plus faible de ses maillons. C'est pourquoi ce mémoire s'intéresse à la logistique des terminaux portuaires de conteneurs. Plus précisément, ce mémoire vise à comprendre le fonctionnement de ces terminaux et à identifier des pistes de solution pour surmonter le goulot d'étranglement qui se produit à ce niveau de la chaîne.

Pour ce faire, le chapitre I situe les terminaux portuaires de conteneurs et leur rôle dans les réseaux de transport intermodaux. De plus, le rôle ainsi que l'organisation générale de ces terminaux sont présentés.

Le chapitre II présente les différentes problématiques liées à la planification et à la gestion des terminaux portuaires de conteneurs. Les différentes problématiques sont décrites et une revue de la littérature pertinente sur ces problématiques est présentée.

Dans le but d'approfondir la compréhension du fonctionnement de ces terminaux, le chapitre III présente une cartographie des différents processus d'un terminal maritime de conteneurs, ainsi qu'une description des principaux flux d'informations en amont et en aval des terminaux.

Le chapitre IV présente une analyse comparative de l'utilisation des systèmes de transport intelligents entre les ports de la côte Est canadienne et les ports du reste du monde. Dans un premier temps, ce chapitre définit ce que sont les systèmes de transport intelligents et explique en quoi ceux-ci peuvent être utiles aux terminaux portuaires de conteneurs. Dans un second temps, les différentes applications des systèmes de transport intelligents aux terminaux portuaires de conteneurs sont présentées et l'utilisation de ceux-ci par les terminaux de la côte Est canadienne est analysée.

En se basant sur le constat que les systèmes de transport intelligents constituent une piste de solution à l'amélioration des opérations de transbordement de conteneurs dans les terminaux portuaires, le chapitre V présente le design d'une première version d'un outil d'analyse pour mesurer l'impact que pourrait avoir une plus grande utilisation des systèmes de transport intelligents. L'outil d'analyse en question est une simulation des opérations d'un terminal maritime de conteneurs.

Le chapitre VI procède à une implantation de la simulation à l'aide de la version 8.1 du logiciel de simulation *ARENA*. Cette implantation se base sur le design développé au chapitre précédent.

Cette implantation est ensuite validée au chapitre suivant en se basant sur des données obtenues d'un terminal maritime de conteneurs de la côte Est canadienne. À partir de cette validation, certaines limites de l'outil sont relevées et des pistes de solutions pour contourner ces limites sont présentées.

Ensuite, le chapitre VIII présente des expérimentations effectuées sur le simulateur afin de démontrer le type d'analyse qui peuvent être faites à partir de celui-ci. Les résultats de ces tests sont analysés.

Finalement, la conclusion effectue un rappel des principales conclusions de chacun des chapitres et présente des avenues de recherche futures.

CHAPITRE I

TRANSPORT INTERMODAL ET TERMINAUX MARITIMES DE CONTENEURS

Ce chapitre vise à situer le transport maritime et les terminaux maritimes de conteneurs à l'intérieur des chaînes de transport intermodal internationales. Le chapitre est organisé de la façon suivante : La section 1.1 définit le transport intermodal. La section 1.2 présente brièvement le rôle et l'organisation du transport maritime au sein des réseaux de transport internationaux. Ensuite, le rôle des terminaux maritimes de conteneurs est présenté dans la section 1.3. La section 1.4 présente l'organisation physique des terminaux et les équipements utilisés au sein de ceux-ci, tandis que la section 1.5 présente les systèmes de communication et de gestion des terminaux. Le cheminement d'un conteneur à l'intérieur du terminal est présenté à la section 1.6.

1.1 Transport intermodal

Le transport intermodal est aujourd'hui un élément fondamental des systèmes de transport modernes. Largement défini, il consiste au transport d'une personne ou d'un chargement d'un point d'origine à une destination par une séquence d'au moins deux modes de transport, le transbordement d'un mode à l'autre étant effectué dans un terminal intermodal. Afin de réduire l'étendue de la présente étude, le transport d'individu sera exclu pour se concentrer sur le transport de marchandises. Donc, en reprenant la définition préalablement présentée, on obtient : le transport de marchandise d'une origine à une destination via au moins deux modes de transport, incluant un transfert dans un terminal intermodal.

Cette définition reste générale et inclut plusieurs types de produits transportés et plusieurs chaînes de transport. Par exemple, le transport régional et international de colis postaux, le transport de matières premières sur de grandes distances, etc. Par contre, à l'heure actuelle, la part la plus importante du transport intermodal international revient aux conteneurs (Günther et Kim 2005). C'est pourquoi la définition retenue du transport intermodal est celle adopté par Crainic et Kim (2005), soit : une chaîne multimodale de services de transport de

conteneurs. Cette chaîne liant l'expéditeur au destinataire dans un service « porte à porte » se déroulant sur de grandes distances.

La définition précédente a permis de relever l'importance du conteneur dans le transport intermodal. En effet, la standardisation des manutentions qu'a entraîné le conteneur est une des principales raisons du développement du transport intermodal. Par contre, il existe plusieurs cheminements pour un conteneur dans une opération de transport intermodal. Dans le cas présent, l'étude se limitera aux transports internationaux qui impliquent une portion de transport maritime. Le cheminement d'un conteneur au sein de ces réseaux est détaillé dans la sous-section suivante.

1.1.1 Cheminement d'un conteneur à travers le réseau de transport intermodal

Tout d'abord, peu importe le cheminement futur du conteneur, la première étape consiste invariablement à la cueillette du conteneur vide dans un dépôt pour le livrer au client. Cette première étape est généralement constituée d'un transport routier du dépôt au client, mais peut aussi inclure un transport ferroviaire ou un transport par barge si le client est situé loin du dépôt.

Une fois le conteneur rempli, il est cueilli chez le client pour être acheminé au terminal maritime. Ce transport peut se faire uniquement par camion ou par une combinaison de modes de transport. Dans le second cas, l'organisation des opérations implique la cueillette du conteneur chez le client, suivi d'un transport par camion jusqu'au terminal intermodal. À ce terminal, le conteneur sera entreposé en attente d'être chargé sur un train ou une barge selon le cas. L'étape suivante consiste au transport jusqu'au terminal portuaire où le conteneur sera déchargé et entreposé jusqu'à ce que les opérations de chargement du navire océanique débutent.

Comme il sera présenté subséquemment, le transport maritime du conteneur peut se faire par un lien direct entre deux ports ou via un réseau de liaisons portuaires. Une fois le transport maritime complété, le conteneur doit être acheminé au client final. Tout comme le transport

depuis le client jusqu'au terminal portuaire, la livraison du conteneur peut se faire par transport routier ou par une combinaison de modes.

1.1.2 Les acteurs du réseau de transport intermodal

Tel qu'il a pu être constaté dans l'illustration précédente du cheminement d'un conteneur, le transport de celui-ci via un réseau intermodal international implique de nombreuses entités. En effet, les différents intervenants sont généralement des entreprises indépendantes, bien que les transporteurs maritimes tendent à intégrer divers maillons de la chaîne au cours des dernières années.

Le premier intervenant est l'expéditeur. Celui-ci est un membre d'une chaîne d'approvisionnement qui désire expédier au maillon suivant de la chaîne la marchandise qui se retrouve à l'intérieur du conteneur. Le second intervenant, bien qu'il ne soit pas immédiatement impliqué dans un mouvement physique de marchandise, est la ligne de transport maritime international. En effet, c'est celle-ci qui est contactée par l'expéditeur au déclenchement du processus de transport. Au cours des dernières années, le rôle des transporteurs maritimes s'est modifié au sein des chaînes de transport internationales. D'entreprises se concentrant exclusivement sur le transport maritime de conteneurs, plusieurs d'entre-elles se sont transformées en entreprises de services logistiques par la création de filiales dédiées à cette activité. C'est pourquoi ce sont généralement celles-ci qui coordonnent les flux de conteneurs de l'expéditeur au destinataire.

Les mouvements de conteneurs impliquent plusieurs autres intervenants. Tout d'abord, le dépôt peut constituer une tierce partie indépendante des transporteurs routiers, ferroviaires et maritimes. Par exemple, le terminal portuaire peut avoir une section de son terminal dédié à l'entreposage de conteneurs vides. Par contre, dans la majorité des cas, le dépôt sera opéré par un des transporteurs impliqués.

Le premier de ceux-ci est le transporteur routier qui assure le transport du conteneur entre les divers terminaux et à l'expéditeur et au destinataire. Les faibles barrières à l'entrée dans cette industrie ont pour effet de diversifier les joueurs qui y évoluent. En effet, avec le

développement de l'offre de service de transport intermodal, certaines entreprises de transport ferroviaire en sont venues à réaliser elles-mêmes les opérations de transport routier entre les clients et les terminaux ferroviaires. De plus, les lignes maritimes ont-elles aussi développées des services de transport routier. L'intégration par les lignes maritimes des autres activités de la chaîne de transport intermodal a d'ailleurs mené à des offres de services intégrés où l'ensemble des activités étaient réalisées par la même entreprise (Au Canada, c'était notamment le cas du Canadien Pacifique, avant la scission de l'entreprise en cinq entités indépendantes). Par contre, il existe aussi des entreprises de transport routier indépendantes. Encore une fois, les faibles barrières à l'entrée de l'industrie ont pour effet de diversifier les types d'entreprises qui y existent. Effectivement, il existe des transporteurs de grande taille qui possèdent une flotte imposante, mais il existe aussi des transporteurs indépendants qui possèdent une flotte de quelques camions seulement.

Les transporteurs ferroviaires peuvent aussi être impliqués dans l'acheminement du conteneur de l'expéditeur au destinataire. En Amérique du Nord, les transporteurs ferroviaires sont généralement indépendants des différents intervenants de la chaîne. Par contre, la situation est grandement différente en Europe, où des services de navettes (*shuttle*), entre les ports et différentes destinations au cœur du continent, sont mis en place par des consortiums de transporteurs maritimes et parfois même par l'administration portuaire (c'est notamment le cas de la liaison Betuwe qui lie le port de Rotterdam à l'Allemagne (Arjen Van Klink et Van Den Berg 1998)).

Au lieu d'un transport par train, une barge peut être utilisée pour le transport du conteneur. Cette forme de transport est très peu utilisée en Amérique du Nord, mais elle est beaucoup plus utilisée en Europe. Ces entreprises sont généralement indépendantes des autres de la chaîne.

Un autre intervenant important de la chaîne de transport intermodal est le terminal portuaire. C'est à ce terminal que sont consolidés les conteneurs qui nécessitent un transport maritime en eaux profondes. On retrouve chez les opérateurs de terminaux portuaires des acteurs

indépendants, tout comme on en retrouve d'autres qui sont la propriété de transporteurs maritimes.

Le destinataire est l'entreprise qui reçoit le conteneur de marchandises en provenance de l'expéditeur. Plusieurs autres tierces parties peuvent intervenir dans la chaîne de transport, mais celles-ci ne sont pas impliquées physiquement dans les mouvements du conteneur, comme les douanes et autres organismes gouvernementaux.

Maintenant que les différents intervenants de la chaîne de transport intermodal sont connus, la prochaine section présente plus particulièrement l'organisation du transport maritime dans les échanges internationaux.

1.2 Transport maritime de conteneurs

Le transport maritime occupe une place importante dans les mouvements internationaux de conteneurs. En effet, plus de 60% du cargo général transporté par navire est aujourd'hui conteneurisé, certaines routes entre les pays industrialisés atteignant un taux de 100% (Steenken et col. 2004). De plus, cette conteneurisation s'est effectuée rapidement, le premier service régulier remontant seulement à 1961 (Steenken et col. 2004). De nos jours, le trafic international de conteneurs est estimé à environ 300 millions de conteneurs EVP (Équivalent Vingt Pieds) (Crainic et Kim 2005). L'EVP est la mesure utilisée dans le domaine du transport intermodal de conteneur. Un EVP équivaut à l'espace occupé par un conteneur de norme ISO, qui a une largeur de huit pieds, une hauteur de huit pieds et une demi et une longueur de vingt pieds. Selon cette unité de mesure, un conteneur de quarante pieds de long correspond donc à deux EVP.

L'industrie du transport maritime de conteneurs a subi d'importantes transformations au cours des dernières années. Tout d'abord, le marché a été marqué par de nombreuses fusions et acquisitions. D'ailleurs, ce processus de consolidation du marché ne semble pas encore terminé puisque deux importantes transactions ont eu lieu au cours de l'année 2005, soit l'acquisition de l'entreprise anglaise P&O Nedlloyd par la danoise Maersk et l'achat de la compagnie canadienne CP Ships par le conglomérat allemand TUI propriétaire du

transporteur Hapag Lloyd. Afin de survivre, la majorité des plus petits transporteurs s'est intégrée à l'intérieur d'alliances avec d'autres transporteurs dans le but d'offrir une couverture mondiale des routes de transport.

Ensuite, les principales routes de transports intercontinentaux ont aussi subies d'importantes modifications. Traditionnellement, ces routes relient l'Amérique du Nord, l'Europe et l'Asie. Plus précisément, on retrouvait trois principaux services de transport. Le premier service liait les ports de l'Europe de l'Ouest et du Nord aux ports de la côte Est de l'Amérique. Le second service liait les pays asiatiques, principalement le Japon et Hong Kong, aux ports de la côte Est de l'Amérique via le canal de Panama. Finalement, le troisième service liait les ports de l'Europe de l'Ouest et du Nord aux ports asiatiques par la traversée des océans Atlantique et Pacifique qui nécessitait un transfert par le canal de Panama. Ce dernier était donc d'une importance cruciale dans les routes maritimes internationales.

Par contre, les routes asiatiques ont subi une transformation majeure. En effet, la consolidation du marché et la recherche d'économies d'échelle ont mené à la construction de navires de tailles de plus en plus importantes. Les capacités de ceux-ci atteignent maintenant de 8 000 à 10 000 EVP, comparativement aux premiers porte-conteneurs qui pouvaient accommoder plus ou moins 1 000 EVP. Par contre, la taille et le tirant d'eau de ceux-ci restreignent leurs déplacements. En effet, plusieurs ports ne peuvent pas accommoder de tels navires et leur taille imposante ne leur permettent pas d'utiliser le canal de Panama ou le canal de Suez. En conséquence, les routes asiatiques ont dû être modifiées pour accommoder ces navires, ce qui a mené à la création d'un pont terrestre entre les ports des côtes Ouest et Est de l'Amérique. Ainsi, les navires en provenance d'Asie s'arrêtent à un port de la côte Ouest américaine, ils sont déchargés du navire et chargés sur un train à destination d'un port de la côte Est, pour être, ensuite, transbordés sur un navire à destination de l'Europe. En ce qui a trait au service de l'Asie vers la côte Est américaine, des mini-ponts ont été mis en place et lient celle-ci avec les ports de la côte Ouest par transport ferroviaire.

La consolidation des transporteurs et la construction de plus gros navires ont eu pour conséquence une réorganisation des réseaux de transport maritime sous une forme « hub and

spoke ». Dans ce type de réseau, les navires de plus grande taille opèrent sur des lignes transocéaniques régulières entre un nombre limité de ports. À partir de ces ports, les conteneurs sont transférés sur de plus petits navires et distribués vers les ports ne pouvant recevoir les navires plus imposants.

Le développement de ces réseaux a eu d'importants impacts sur le transport international. En effet, les ports qui ont été choisis comme points de transfert (*hub*) par les grandes lignes maritimes ont dû faire face à des augmentations considérables et rapides du volume de conteneurs manutentionnés. De plus, la recherche d'économies d'échelles a mené à une forte concentration du trafic international. C'est notamment le cas de Côte Ouest américaine où trois groupes de ports (Los Angeles et Long Beach, Oakland, Seattle et Tacoma) reçoivent 95% du trafic international (Slack 2001).

Cette concentration a pour effet de mettre en compétition les ports d'une même région pour atteindre le statut de centre de transbordement. L'Europe est particulièrement caractérisée par cette compétition entre les ports. En effet, au Nord, les ports de Rotterdam, Anvers et Hambourg se disputent le premier rang, tandis qu'au Sud, les ports de Gioia Tauro, Algésiras et Valence font de même. La compétition est à ce point forte, que les ports du Nord tentent de voler des parts de marché aux ports du Sud par la mise en place de services ferroviaires directs, entre les ports du Nord et le marché méditerranéen. Du côté asiatique, la situation est caractérisée par l'importance des principaux centres de transbordement. En effet, les ports de Hong Kong et Singapour, les deux principaux centres de transbordement, manutentionnent tous les deux des volumes qui excèdent vingt millions d'EVP par année. De plus, la récente ouverture de la Chine au commerce extérieur a nécessité le développement de nouveaux terminaux de conteneurs dans ce pays. La croissance du trafic est si importante que des terminaux qui n'existaient pas il y a dix ans manutentionnent aujourd'hui des volumes de conteneurs qui frôlent les dix millions d'EVP. En conséquence, la compétition entre les ports est très forte pour atteindre le statut de centre de transbordement.

La réorganisation du réseau de transport maritime international sous une forme « hub and spoke », ainsi que la forte compétition qui existe entre les ports ont pour conséquence de

créer de fortes pressions sur les terminaux portuaires de conteneurs. À ces pressions, s'ajoute la croissance constante des volumes de conteneurs transportés. C'est ce qui explique pourquoi les ports sont souvent identifiés comme le goulot dans les réseaux de transport intermodal internationaux. Afin de demeurer compétitifs, les terminaux portuaires de conteneurs doivent donc miser sur l'efficacité des opérations de transbordement.

1.3 Rôle des terminaux portuaires dans le transport intermodal

Malgré qu'il existe plusieurs types de terminaux intermodaux, les terminaux qui impliquent les manutentions les plus complexes sont les terminaux portuaires. En effet, ceux-ci doivent effectuer des transbordements entre divers modes de transport, comparativement aux autres types de terminaux qui se limitent à une interface entre un ou deux modes. De plus, l'équipement nécessaire à l'exploitation d'un terminal portuaire est très dispendieux. Bien que les équipements utilisés dans le terminal soient semblables à ceux utilisés dans les terminaux terrestres, la nécessité d'utiliser des grues de quais pour les transferts entre les navires et le quai contribue à augmenter la capitalisation des terminaux portuaires. Le coût de ces grues était estimé à environ 8 millions de dollars américains en 2001 (Slack 2001). Par contre, la taille de plus en plus importante des navires a entraîné une prolifération des grues de type post-panamax, qui sont plus dispendieuses.

Aux coûts élevés d'acquisition des équipements s'ajoute la croissance importante des volumes manutentionnés dans ces terminaux. La complexité des opérations et l'augmentation des volumes manutentionnés confèrent donc aux terminaux maritimes un rôle prépondérant dans les réseaux de transport internationaux. En effet, ils doivent être en mesure d'assurer un cycle de déchargement/chargement rapide. Les coûts d'acquisition et d'opération des porte-conteneurs représentent des milliers de dollars par jour, c'est pourquoi les armateurs cherchent à utiliser les terminaux les plus efficaces. Cependant, l'efficacité opérationnelle n'est pas la seule tributaire de la compétitivité d'un port. Puisque les conteneurs doivent être ensuite livrés aux destinataires finaux, la connectivité aux modes de transport terrestres joue aussi un rôle important. Afin de s'adapter à ces changements, des terminaux maritimes spécialisés dans la manutention de conteneurs se sont développés.

Le rôle de ces terminaux est de servir de plateforme de transbordement entre les navires océaniques et les autres modes de transport plus locaux. Crainic et Kim (2005) identifient trois types d'opérations de manutention dans ces terminaux : 1) les opérations portuaires qui comprennent l'amarrage, le déchargement et le chargement des porte-conteneurs, 2) les opérations de réception et d'expédition en provenance ou partant vers les autres modes de transport (camions, trains), 3) les activités de manutention et d'entreposage des conteneurs dans la cour du terminal.

Ces activités sont effectuées à l'intérieur de trois zones d'opérations distinctes. La section suivante présente ces différentes zones d'opérations, ainsi que les équipements qui y sont utilisés.

1.4 Organisation physique et équipements d'un terminal maritime de conteneurs

Les opérations des terminaux de conteneurs peuvent être divisées en trois grandes catégories. La première catégorie regroupe les opérations liées au chargement et au déchargement des navires et barges. Ces opérations sont réalisées dans la zone d'opérations portuaires. La seconde catégorie contient l'ensemble des opérations de stockage et de manutention des conteneurs dans la cour et les opérations sont effectuées dans la zone de stockage du terminal. La dernière catégorie d'opérations concerne le transfert des conteneurs vers les modes de transport terrestres. Les opérations de cette catégorie se déroulent dans la zone d'opérations terrestre. La figure 1.1 représente la disposition d'un terminal maritime spécialisé dans la manutention de conteneurs. Cette disposition représente un terminal qui utilise des ponts roulants et des camions qui tirent des remorques pour le transport interne des conteneurs. Dans un terminal qui utilise des chariots cavaliers, les conteneurs seraient disposés en rangées plutôt qu'en blocs.

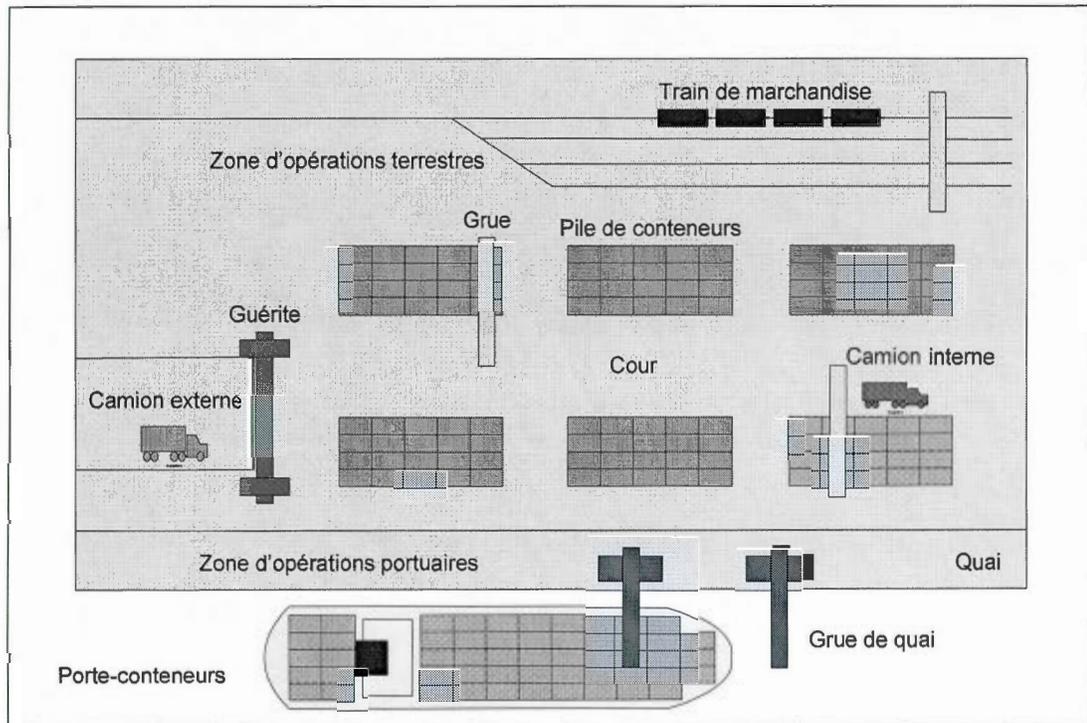


Figure 1.1 Disposition d'un terminal maritime spécialisé dans la manutention de conteneurs.

1.4.1 Zone d'opérations portuaires

Cette zone comprend l'équipement utilisé pour effectuer les opérations de chargement/déchargement des navires ainsi que les opérations de transport entre le quai et la cour du terminal. Le rôle de cette zone est de servir de point de transfert des conteneurs entre le terminal et les navires.

Le premier type d'équipement utilisé dans cette zone est la grue de quai (figure 1.2) qui est utilisée pour le transfert des conteneurs entre les navires et le quai. Cette grue est composée d'une structure d'acier montée sur rails lui permettant de se déplacer le long du quai et d'un pont roulant qui se déplace de l'avant à l'arrière le long d'un mât, ce qui lui permet de soulever les conteneurs du navire pour les poser sur les véhicules de transport interne du terminal.

Bien qu'il existe des grues de quai de diverses grosseurs et de diverses capacités, deux types de grues sont généralement répertoriés : les grues à pont roulant simple et les grues à pont roulant double (Steenken, et col. 2004). La figure 1.2 présente une grue de quai à pont roulant simple. Pour ce type de grue, l'ensemble des manutentions est réalisé par l'unique pont roulant. Ce dernier soulève le conteneur du navire et le dépose sur le véhicule de transport interne. Le second type de grue de quai possède l'avantage de réduire le cycle du pont roulant affecté au déchargement du navire. En effet, une plateforme bâtie dans l'empattement de la grue sert de tampon entre le navire et les véhicules de transport. La grue n'a pas à descendre jusqu'au sol ce qui diminue la distance de déplacement verticale du chariot de la grue. De plus, la zone tampon permet d'accumuler quelques conteneurs s'il n'y a pas de véhicule disponible au moment où le conteneur est déchargé du navire. À l'inverse, lors du chargement du navire, la zone tampon permet d'accumuler quelques conteneurs et diminue le risque d'arrêt des équipements.



Figure 1.2 Grue de quai au Port de Rotterdam (Tirée de : www.ikj.nl/container)

Une fois que les conteneurs sont déchargés, il existe deux cheminements possibles pour ceux-ci. La première possibilité, la plus répandue, consiste à déposer le conteneur sur un véhicule de transport interne du terminal, qui transportera le conteneur jusqu'à la position de stockage qui lui a été assignée. Le conteneur demeurera stocké ainsi, jusqu'à ce qu'il soit sur un autre mode de transport pour être livré au client final de la chaîne de transport. La seconde possibilité consiste à effectuer un transfert direct vers un autre mode de transport en chargeant le conteneur sur un train ou un camion à la base de la grue de quai. L'objectif de

cette forme d'organisation des opérations est de diminuer l'espace d'entreposage nécessaire et d'accélérer la livraison du conteneur au client. Bien qu'il ait été populaire à une certaine époque, ce concept est aujourd'hui très peu répandu puisque la coordination des trains et des camions avec les opérations de chargement et déchargement des navires s'avère très complexe.

Tel que mentionné auparavant, dans les cas où un système d'opérations avec transferts indirects est utilisé, des véhicules sont nécessaires pour le transport des conteneurs à l'intérieur du terminal. Pour ces transports internes, Steenken et col. (2004) définissent deux catégories de véhicules : les véhicules passifs et les véhicules actifs. Dans le premier cas, les véhicules n'ont qu'une fonction de transport et ils ne possèdent pas la capacité de soulever les conteneurs, ce que le second type de véhicule est en mesure de faire.

Il existe principalement deux types de véhicules passifs : les véhicules automatisés et les véhicules non automatisés. Les véhicules automatisés consistent en une plateforme de transport guidée électroniquement capable de porter l'équivalent de deux EVP à la fois (figure 1.3a). La mise en place d'un système de transport automatisé implique des investissements importants, ce qui explique le nombre restreint de terminaux qui les utilisent.



a



b

Figures 1.3 a, b. Véhicule guidé automatiquement et système à remorques multiples. (Tirée de : Iannou et col. 2000) **a** Véhicule guidé automatiquement au Deltaport Terminal du Port de Rotterdam. **b** Système de transport à remorques multiples au Port de Rotterdam.

L'alternative consiste à utiliser un système de remorques tirées par des camions opérés par des employés du terminal. Les remorques ont la capacité de transporter deux EVP ou un conteneur aux dimensions excédentaires à la norme ISO de quarante pieds, comme les

quarante-cinq pieds, qui sont de plus en plus utilisés. Afin d'augmenter la productivité de chaque déplacement de camion, certains terminaux ont mis en place des systèmes à remorques multiples (figure 1.3b). C'est notamment le cas du Port de Rotterdam (Hollande), qui utilise ce système pour les transports inter terminaux. Ces trains de remorques permettent le transport de dix EVP à la fois (Ottjes et col. 1996). Par contre, ces systèmes ne peuvent pas être mis en place dans tous les ports, puisque les conventions collectives des employés de la majorité des ports américains ne le permettent pas (Ioannou et col. 2000).

D'autres systèmes passifs de transport des conteneurs ont été imaginés, mais ils ne sont que peu ou pas développés. Parmi ceux-ci, les systèmes de convoyeurs à moteurs linéaires (*linear motor conveyance system*) offrent des perspectives intéressantes (Ioannou et col. 2000). Le seul prototype existant d'un tel système est celui du terminal Eurokai du Port de Hambourg en Allemagne (figure 1.4). Le principe de ce système consiste à bâtir une infrastructure de rails sur lesquels circulent les plateformes de transport des conteneurs. La principale différence avec les véhicules guidés automatiquement est que les plateformes peuvent effectuer des virages à angle droit. Donc, les plateformes nécessitent moins d'espace que les véhicules guidés automatiquement pour effectuer un virage. Le principal avantage de ce type d'organisation, par rapport à un système de transport automatisé conventionnel, se situe au niveau des coûts d'entretien, puisque les coûts de l'investissement initial et les coûts d'opérations sont comparables (Ioannou et col. 2000).

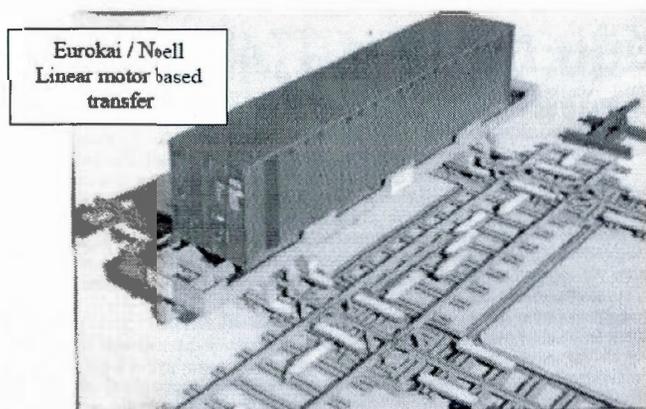


Figure 1.4 Système de convoyeur à moteur linéaire (Tirée de Ioannou et col. 2000)

La seconde classe de véhicules de transport interne se différencie de la première par son autonomie d'opération pour le déplacement des conteneurs. En effet, les chariots cavaliers (figure 1.5) n'ont pas besoin de l'intervention d'une tierce machinerie pour soulever le conteneur, puisqu'ils possèdent un treuil dans leur empattement leur permettant de le lever. Comme dans la forme précédente d'organisation du transport interne, il existe des chariots cavaliers automatisés et non automatisés. Cette forme de terminal automatisé est moins répandue, le seul système de la sorte répertorié en 2004 était celui de Patrick Terminal/Brisbane, en Australie (Steenken et col. 2004). L'utilisation de chariots cavaliers, qu'ils soient automatisés ou non, entraîne d'importantes modifications à la configuration de la cour d'un terminal, comme il sera présenté à la section suivante.

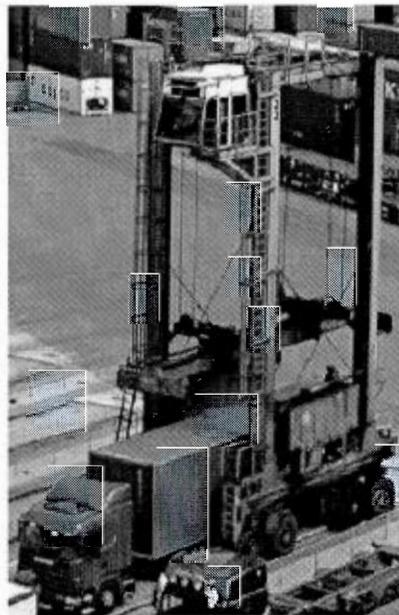


Figure 1.5 Chariot cavalier (Tirée de : Steenken et col. 2004)

1.4.2 Zone de stockage du terminal

La zone de stockage du terminal est la zone où sont entreposés les conteneurs lorsqu'ils sont déchargés des navires ou en attente d'être chargés. Le rôle de cette zone est de servir de tampon afin d'absorber temporairement les flux de conteneurs en provenance et à destination des navires et des autres modes de transport. De plus, la zone de stockage du terminal sert

aussi de point de triage des conteneurs. En effet, les conteneurs qui sont entreposés dans cette zone, sont triés selon divers critères afin de simplifier les opérations des autres zones.

Les activités au sein de cette zone sont généralement organisées en fonction du statut des conteneurs. Les conteneurs en attente d'être chargés sur un navire se retrouvent, dans la plupart des cas, près de la zone d'opérations portuaires, soit près des grues de quai. La raison de cet emplacement est qu'il permet de diminuer la distance parcourue par les véhicules de transport interne lors des opérations de chargement du navire, ce qui diminue la probabilité qu'une grue de quai se retrouve en position d'attente. Quant à eux, les conteneurs déchargés du navire, qui quitteront le terminal par transport ferroviaire, seront entreposés près des voies ferrées de façon à diminuer la distance à parcourir lors du chargement des trains. L'espace restant de la zone sera utilisé pour l'entreposage des conteneurs vides et des conteneurs déchargés des navires qui quitteront le terminal par transport routier.

Afin d'effectuer les manutentions au sein de cette zone, plusieurs équipements peuvent être utilisés. Parmi ceux-ci, on retrouve les chariots cavaliers qui sont aussi utilisés pour le transport entre le quai et la zone de stockage. Une autre option est l'utilisation de ponts roulants sur pneumatiques (figure 1.6a). Celui-ci ressemble à un chariot cavalier, mais possède un empattement beaucoup plus large qui lui permet de circuler au-dessus de blocs de conteneurs, comparativement au chariot cavalier qui peut seulement circuler au-dessus de rangées de conteneurs. Par contre, ce type d'équipement ne peut pas être utilisé pour le transport de conteneurs puisque son large empattement réduit considérablement sa mobilité. Une variante à ce type de grue est le pont roulant sur rails (figure 1.6b), qui est identique au premier type à l'exception qu'il circule sur des rails plutôt que des pneus. Bien que ce système soit moins flexible que le premier, il permet d'augmenter considérablement la hauteur et la largeur des piles et il est présentement possible d'automatiser son fonctionnement.

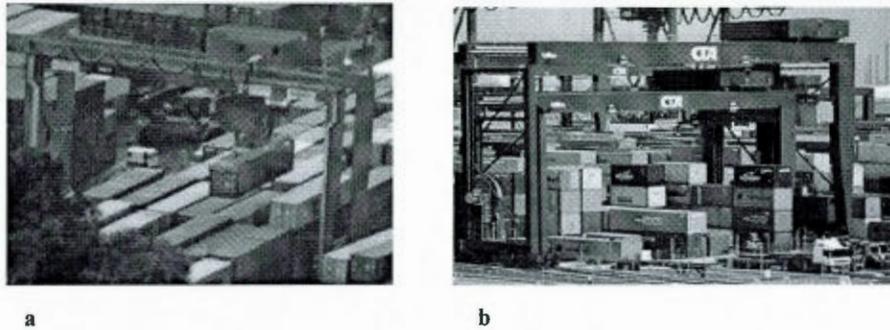


Figure 1.6 a, b. Pont roulant sur pneumatiques et pont roulant sur rails. **a** Pont roulant sur pneumatique au port de Salerno en Italie (Tirée de : www.ikj.nl/container/). **b** Pont roulant sur rail double. L'empattement plus large du pont roulant supérieur permet aux grues de se croiser (Tirée de :Steenken et col. 2004).

Une alternative à ces équipements est l'utilisation de chariots élévateurs (figure 1.7). À l'intérieur de cette catégorie, on retrouve les chariots à prise par le haut (*toplift*), les chariots à prise par le haut avec mat télescopique (*reachstacker*) et les chariots à fourches (*forklift*). Par contre, ces équipements sont moins utilisés pour la manutention des conteneurs pleins, puisqu'ils nécessitent un espace plus grand entre les blocs de conteneurs. Ils sont beaucoup plus utilisés pour la manutention des conteneurs vides, puisque leur coût d'acquisition est moins important que celui des ponts roulants.



Figure 1.7 Chariot à prise par le haut (gauche) et chariot à prise par le haut avec mat télescopique (droite). (Tirée de : Ioannou et col. 2000)

Il existe plusieurs stratégies pour la gestion des conteneurs à l'intérieur de la zone de stockage d'un terminal maritime de conteneurs. Günther et Kim (2005) identifient deux types de stratégies pour le stockage de conteneurs : les systèmes de stockage directs et les systèmes de stockage indirects. Un système de stockage direct utilise les mêmes équipements pour le

transport et le stockage des conteneurs, tandis qu'un système indirect utilise des équipements différents pour exécuter les deux tâches. Une forme de stockage direct consiste à déposer les conteneurs sur des remorques et à stocker les remorques dans la cour. Par contre, ce mode de stockage est en voie de disparition puisqu'il nécessite de grands espaces; espaces qui se font rares due aux quantités importantes de conteneurs à traiter et à la croissance des restrictions environnementales au développement de nouveaux terminaux (Leach 2005). Les opérateurs de terminaux de conteneurs doivent donc se tourner vers des stratégies qui permettent d'augmenter la densité de conteneurs dans la cour du terminal.

Une de ces stratégies consiste à utiliser un système de transport avec des chariots cavaliers. La disposition du terminal consistera donc en plusieurs rangées de conteneurs avec entre chaque rangée l'espace suffisant pour les pattes des chariots, afin que ceux-ci puissent circuler au-dessus de la pile. Ce type d'organisation de la cour permet une meilleure utilisation de l'espace que le système sur remorque, mais la disposition des conteneurs en rangées ne permet pas les gains dus à la densité des conteneurs que permet un système de transfert indirect. L'utilisation de chariots cavaliers, tout comme le stockage de conteneurs sur des remorques, est un système de transfert direct, puisque le même équipement est utilisé pour le transport et le stockage des conteneurs.

La stratégie la plus répandue pour le stockage des conteneurs est le système de transfert indirect utilisant des ponts roulants sur pneumatiques. Dans ce type de configuration, les conteneurs sont empilés en blocs selon leur provenance et/ou leur destination ainsi que selon leurs caractéristiques (longueur, poids, conteneur réfrigéré, etc.). Les ponts roulants circulent au-dessus des piles et effectuent les transferts entre les piles et les véhicules de transport interne.

Une autre stratégie de transfert indirect utilise une configuration similaire, mais avec des équipements de manutention différents. Ces équipements sont les chariots à prise par le haut (*toplift*), les chariots à prise par le haut avec mat télescopique (*reachstacker*) et les chariots à fourches (*forklift*).

Peu importe la stratégie utilisée, la superposition de conteneurs, bien qu'elle permette une meilleure utilisation de l'espace, entraîne le risque d'avoir à remanier les conteneurs. Un remaniement est nécessaire lorsqu'un conteneur est situé sous un autre conteneur. Par exemple, le conteneur A de la figure 1.8 est directement accessible, tandis que l'extraction du conteneur B nécessite un remaniement du conteneur C. Des piles de conteneurs élevés entraînent une plus grande probabilité d'avoir à effectuer des remaniements.

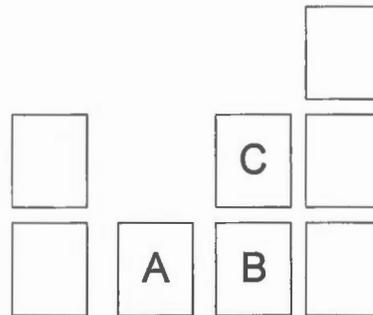


Figure 1.8 Pile de conteneurs

Dans le but d'éviter ces remaniements, des concepts de système d'entreposage et extraction automatisé (*automated storage/retrieval system*) ont été développés. Ces systèmes consistent en une structure d'entreposage de plusieurs étages à l'intérieur de laquelle un système automatisé, de cueillette et de dépôt des conteneurs, permet de manipuler uniquement le conteneur désiré. La localisation et la manutention des conteneurs à l'intérieur de la structure sont gérés par le système de contrôle du système. Un système d'entreposage et d'extraction automatisé remplacerait un bloc de conteneur dans un terminal traditionnel, tel qu'illustré sur la figure 1.9. À l'heure actuelle, la seule application existante de ce système est au port de Hong Kong. Par contre, le système n'a pas été mis en place dans le contexte d'opération d'un terminal, puisqu'il est situé à l'extérieur des terminaux et qu'il est utilisé pour le stockage des conteneurs vides seulement.

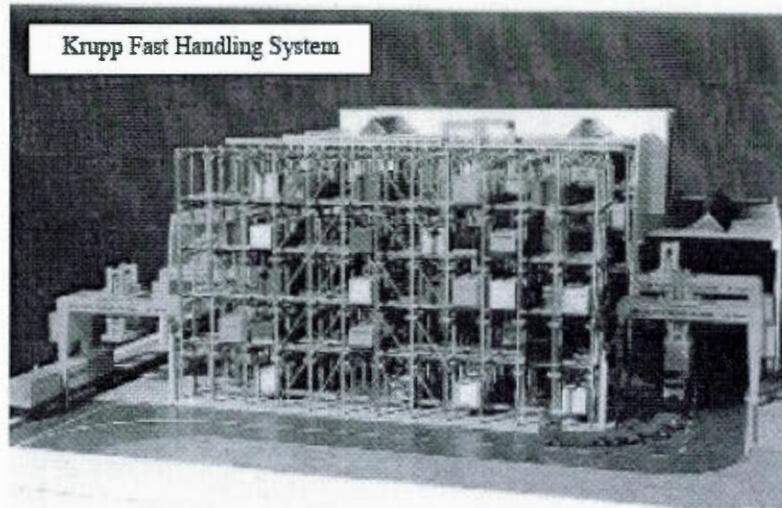


Figure 1.9 Système d'entreposage et d'extraction automatique. (Tirée de Ioannou et col. 2000)

1.4.3 Zone d'opérations terrestres

La zone d'opérations terrestres est la zone où sont effectuées toutes les opérations de réception et d'expédition des conteneurs provenant de trains, de camions et de barges. Le rôle de cette zone est de servir d'interface entre le terminal et les moyens de transport précédemment mentionnés. De plus, ce rôle d'interface implique que c'est cette zone qui est responsable de la gestion des entrées et sorties des trains et des camions.

Les équipements utilisés pour la manutention des conteneurs dans cette zone dépendent du système de transfert qui a été choisi dans la zone de stockage du terminal. En effet, les terminaux maritimes de conteneurs utilisent généralement le même type d'équipement dans les deux zones. Cette concordance des systèmes de transfert a pour but de maximiser l'utilisation des équipements. Pour ce qui est de la gestion des entrées et sorties des camions, elle se fait via la guérite du terminal. Celle-ci consiste en une zone assortie de plusieurs voies d'accès au terminal (figure 1.10).



Figure 1.10 Guérite d'un terminal de conteneurs. (Tirée de : www.cpships.com)

En ce qui concerne les opérations sur les camions, la première étape est de gérer l'entrée et la sortie de ceux-ci du terminal. La formule classique pour la gestion de ces opérations consiste à avoir des employés postés aux différentes voies d'accès de la guérite qui valident la concordance de la documentation avec le conteneur chargé sur le camion. Récemment, des systèmes d'automatisation des opérations de la guérite ont été développés. Ces systèmes reposent sur l'utilisation de caméras numériques et de logiciels de reconnaissance optique des caractères. Un portail situé dans la file d'attente de la guérite prend une série de photos du conteneur et du camion sous différents angles. Le logiciel de reconnaissance optique des caractères utilise les photos pour déterminer le numéro du conteneur et de l'immatriculation du camion. Ces informations sont acheminées à une base de données qui envoie une autorisation d'accès au terminal si les informations concordent. Le processus est le même à la sortie du terminal, à l'exception que le portail se trouve à l'intérieur du terminal.

Outre le contrôle des entrées et sorties de camions du terminal, la zone d'opérations terrestre est aussi le lieu du terminal où se déroulent les opérations sur ces camions. Selon le type d'organisation de la cour et le type d'équipement de transport interne qui a été choisi, ces opérations seront différentes pour les conteneurs reçus/expédiés par camions. En effet, si la cour est organisée en blocs de conteneurs, le camion est chargé/déchargé près de la pile où le conteneur est entreposé. Par contre, dans le cas où le terminal utiliserait des chariots

cavaliers, une zone de manutention doit être aménagée. Dans celle-ci, les camions sont déchargés par les chariots cavaliers qui transportent ensuite le conteneur jusqu'à son emplacement d'entreposage (Steenken et col. 2004). Dans le cas d'un chargement, la séquence d'opérations est inversée.

En ce qui a trait aux trains, la gestion des entrées et sorties du terminal s'effectue aussi au sein de la zone d'opérations terrestres. Par contre, dû aux fréquences plus faibles des mouvements de trains, la gestion de ceux-ci s'avère plus simple que la gestion des entrées et sorties de camions. C'est pourquoi les mouvements sont gérés à partir d'horaires établis par l'opérateur du chemin de fer qui confirme les mouvements de trains avec le terminal. Les opérations de chargement et de déchargement des trains sont généralement effectuées par des ponts roulants et le transport des conteneurs entre la pile et les wagons est effectué par des chariots cavaliers, des camions ou des véhicules guidés automatiquement. Certains terminaux qui ont mis en place un système de transfert direct utilisant des chariots cavaliers, utilisent aussi ceux-ci pour les opérations sur les trains (Steenken et col. 2004).

La zone d'opérations terrestres est aussi le lieu où sont parfois réalisées les opérations de déchargement et de chargement des barges. En effet, bien que les barges constituent un moyen de transport pour la distribution régionale des produits, au point de vue opérationnel, le chargement et le déchargement de celles-ci se font de la même façon que les transbordements sur les navires océaniques. Donc, dans certains terminaux, les opérations sur les barges sont réalisées dans la zone d'opérations portuaires. Par contre, dans d'autres cas, une section du terminal est aménagée pour les opérations sur les barges dans la zone d'opérations terrestres. Une telle section est semblable à la zone d'opérations portuaires, mais les grues de quais utilisées sont plus petites, afin de diminuer les coûts d'exploitation.

La zone d'opérations terrestres peut constituer un terminal spécialisé à l'intérieur du port, mais externe au terminal maritime. Cette forme d'organisation permet de spécialiser une section du port dans la manutention d'un certain type de mode de transport, mais occasionne des transports entre les terminaux, comme c'est le cas au terminal Maasvlakte du Port de Rotterdam (Ottjes et col. 1996).

1.5 Flux d'informations et systèmes de communication et de gestion des terminaux

Les activités des terminaux de conteneurs, se déroulant dans les zones d'opérations présentées précédemment, sont supportées par de nombreux flux d'informations. Ces flux peuvent être regroupés en trois catégories : les flux en amont du terminal, les flux internes du terminal et les flux en aval du terminal. Afin de gérer ces informations, les terminaux de conteneurs utilisent des systèmes d'information. L'objectif de cette section n'est pas de présenter le détail des flux d'informations, mais une vision générale. Le chapitre trois de ce mémoire présente les flux d'informations de façon plus détaillée.

1.5.1 Les flux en amont du terminal

Les flux en amont du terminal regroupent un ensemble d'informations nécessaires à la coordination des opérations. Ils incluent notamment les plans de chargement des navires, barges et trains à destination du terminal, les diverses informations sur les conteneurs (destination, caractéristiques, etc.) et les informations provenant des autorités douanières. Ces échanges se font avec plusieurs intervenants qui comprennent les lignes maritimes, les agents maritimes, les transitaires, les compagnies de transport routier et ferroviaire, les agences douanières et plusieurs autres. Ces communications se font de plusieurs façons, notamment par échange de données informatisées, par fax et par téléphone.

1.5.2 Les flux internes du terminal

Une multitude d'informations circulent à l'intérieur du terminal. Ces informations sont nécessaires à la gestion des opérations du terminal. Elles concernent donc la position et les mouvements des conteneurs, les tâches à exécuter et l'affectation des équipements du terminal à ces tâches. Ces informations sont transmises par communications orales par radios, par échanges de données via radios fréquences et par communications directes.

Récemment, avec le développement de terminaux automatisés, la quantité d'informations qui circulent a grandement augmentée. En effet, l'automatisation des opérations nécessite de nombreuses communications entre les équipements et le système de contrôle de ceux-ci. Bien

entendu, ces communications sont automatisées et transigent via des systèmes de communications électroniques.

1.5.3 Les flux en aval du terminal

Les flux en aval du terminal comprennent un ensemble d'informations nécessaires à la suite des opérations de transport des conteneurs dans le réseau de transport intermodal. Ces informations sont les plans de chargement des navires, trains et barges qui quittent le terminal, et les rapports de livraison des conteneurs. Ces échanges se font avec les mêmes intervenants et avec les mêmes technologies que les échanges en amont du terminal.

1.5.4 Les systèmes de communication et de gestion des terminaux

Les systèmes de communication et de gestion des terminaux sont un ensemble de technologies qui supportent les processus physiques d'un terminal. Leur principale fonction est de véhiculer l'information nécessaire au déroulement des activités du terminal.

Le système au cœur du processus de gestion du terminal est le système d'opération du terminal. En effet, c'est ce système qui gère les informations sur les conteneurs et sur les opérations du terminal. Ces informations incluent le positionnement des conteneurs sur le terminal, la destination des conteneurs, le mode de transport utilisé pour atteindre cette destination, les caractéristiques du conteneur et du matériel qu'il contient (matière dangereuse et classe de celle-ci) et les plans de chargement des navires, trains et barges qui fréquentent le terminal.

Ces informations proviennent de sources multiples. Les informations sur les opérations du terminal peuvent provenir de transmetteurs de données radios utilisés par les employés du terminal. Un transmetteur de données radios est un terminal informatique manuel qui communique avec le système d'opérations du terminal, ce qui permet une mise à jour des informations en temps réel. L'alternative aux transmetteurs de données radios est la prise d'information manuelle par les employés du terminal. Le désavantage de cette méthode est qu'elle demande une entrée de données manuelle, ce qui augmente le risque d'erreurs et ne

permet pas une information en temps réelle. Pour ce qui est des informations qui ne proviennent pas des opérations du terminal, elles proviennent des intervenants en amont et en aval du terminal. Une grande part de ces informations est acheminée au système d'opération du terminal par échange de données informatisée.

1.6 Cheminement d'un conteneur à l'intérieur du terminal

À partir de ces descriptions, il est possible d'établir le cheminement d'un conteneur à travers le terminal. L'objectif n'est pas de détailler les processus opérationnels d'un terminal maritime de conteneurs, ce sujet faisant l'objet d'un chapitre subséquent. À ce moment, il s'agit de présenter les principales étapes du cheminement des conteneurs dans le terminal.

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

1.7 Conclusion

Ce chapitre a situé le transport maritime et les terminaux maritimes de conteneurs au sein des réseaux internationaux de transport intermodal. De plus, les sections 1.4 à 1.6 ont présenté l'organisation générale des opérations et les équipements utilisés dans ces terminaux. À partir de cette présentation sommaire du fonctionnement de ces terminaux, il apparaît évident que la gestion des opérations de ces terminaux présente plusieurs problématiques. Dans le but d'approfondir la compréhension de la logistique des terminaux portuaires de conteneurs, le chapitre suivant présente les problèmes de planification et de gestion des terminaux maritimes de conteneurs.

CHAPITRE II

PROBLÈMES DE PLANIFICATION ET DE GESTION DES TERMINAUX MARITIMES DE CONTENEURS

L'objectif de ce chapitre est de présenter les différentes problématiques liées à la gestion des terminaux maritimes spécialisés dans la manutention de conteneurs ainsi que la littérature qui traite de ces problèmes. Pour ce faire, l'approche utilisée consiste à regrouper les différentes problématiques selon les trois niveaux de planification généralement utilisés en gestion : stratégique, tactique, opérationnel. À ces trois niveaux de planification un quatrième est ajouté afin de refléter les récents développements en automatisation des opérations portuaires : la planification en temps réel. Ces quatre niveaux constituent les sections 2.1 à 2.4 du chapitre. Ces sections présentent différentes contributions provenant du domaine de la recherche opérationnelle. La section 2.5 du chapitre traite des systèmes intelligents de transport dans les ports, mais présente des contributions provenant de domaines autres que la recherche opérationnelle. De plus, cette section traite de systèmes d'aide à la décision en développement.

2.1 La planification stratégique

La planification stratégique d'un terminal maritime de conteneurs concerne les décisions qui portent sur le design du terminal. Ces décisions concernent principalement le type d'équipements utilisés et la disposition du terminal (Meersmans et Dekker 2001). Il est important de spécifier que ces décisions sont caractérisées par un arbitrage entre le niveau de service offert aux clients et le niveau d'investissement pour le développement du terminal. Un accroissement de la capacité du terminal nécessite des investissements majeurs dus aux coûts importants de la construction du terminal et de l'acquisition des équipements de manutention (Crainic et Kim 2005). Le niveau de service d'un terminal dépend de la disponibilité des quais et de la capacité de celui-ci à offrir des opérations de déchargement et de chargement rapides. En effet, un niveau de service insuffisant a pour conséquence de créer des files d'attentes de navires pour l'accès au terminal, ainsi qu'un prolongement du temps à

quai des navires. L'horizon de planification des décisions stratégiques s'étend sur plusieurs années (Vis et de Koster 2003). Bien que les sous-sections suivantes présentent ces décisions comme distinctes, il s'avère difficile de le faire, puisque chaque décision entraîne des répercussions sur les autres. C'est pourquoi la dernière sous-section concerne les études qui traitent du design d'un terminal dans son ensemble.

2.1.1 Localisation

La première décision stratégique liée à la planification et à la gestion des terminaux portuaires est l'emplacement du terminal. Bien que le problème de la localisation d'un terminal portuaire de conteneurs n'ait pas été traité directement, des problèmes de localisation similaires peuvent être répertoriés dans la littérature sur le sujet. L'objectif des problèmes de localisation est de trouver un emplacement pour le terminal qui minimisera les coûts de transport vers les principaux marchés à desservir. En ce sens, ces problèmes sont une partie d'un problème plus générale de design de réseau de transport. Pour une revue de la littérature concernant les problèmes de design de réseau, le lecteur peut se référer à Crainic (2000). Crainic et Kim (2005) présentent diverses formulations de problèmes de localisation. Parmi celles-ci, on retrouve le problème de localisation de terminaux avec équilibrage introduit par Crainic, Dejax et Delorme (1989). L'objectif de ce problème est de déterminer l'emplacement de dépôts intermédiaires de conteneurs afin de minimiser les mouvements de conteneurs vides. Un modèle de localisation de «hub» est aussi présenté par Crainic et Kim (2005). L'objectif de cette formulation est de minimiser les coûts totaux du système de transport en optimisant la position des centres de consolidation (hub).

Dans les deux types de modèles de localisation précédemment présentés, la complexité des modèles rend la résolution difficile. C'est pourquoi plusieurs méthodes de résolution heuristiques et méta-heuristiques ont été développées comparativement au faible nombre de méthodes exactes.

2.1.2 Nombre de quais

Une fois l'emplacement du terminal choisi, la décision suivante au niveau du design d'un terminal maritime de conteneurs consiste à déterminer le nombre de quais qui sera mis à la disposition des porte-conteneurs. L'objectif de cette problématique est de déterminer un nombre de quais optimal. Il est entendu par optimal que le design choisi permettra un équilibre entre le niveau de service aux porte-conteneurs, les coûts de construction et d'exploitation du terminal et la capacité d'adaptation aux variations de volume. Un plus grand nombre de quais permettra d'offrir un meilleur service en diminuant les risques de congestion des quais. Par contre, plus le nombre de quais augmente, plus les risques d'interférences entre les opérations des différents navires augmentent. En effet, une augmentation du nombre de quais nécessite plus d'équipement pour les opérations de transport et d'entreposage des conteneurs, donc, plus de circulation dans le terminal.

De plus, une augmentation du nombre de quais permet de diminuer le taux d'utilisation de la capacité du terminal, puisqu'elle augmente la capacité du terminal. Cependant, cette diminution entraîne une augmentation des coûts d'exploitation, puisque des investissements plus importants sont absorbés par un même volume d'activités. Le problème de la détermination du nombre de quais doit donc prendre en considération les coûts associés au temps d'opération sur les navires, les coûts de construction des quais et les coûts d'opérations des quais. Ces derniers coûts font référence aux coûts qu'implique l'utilisation d'un quai, soit les coûts des équipements, de la main d'œuvre, etc.

La majorité des études portant sur le problème de la détermination du nombre de quais utilisent des approches descriptives reposant sur des modèles probabilistes ou sur la théorie des files d'attentes. Parmi les premières études, Fratar, Goodman et Brant (1960) représentent le taux d'occupation d'un quai commercial à l'aide d'une loi de Poisson. À partir de cette distribution, ils déterminent le taux d'occupation maximale des quais d'un terminal selon le nombre de quais du terminal, pour un terminal désirant maintenir un niveau de service de 95%. Le niveau de service est défini comme la proportion de jours dans l'année où les navires n'ont pas à attendre pour obtenir un quai. La principale conclusion des auteurs est que

le taux d'occupation maximal des quais d'un terminal augmente avec le nombre de quais du terminal, mais à un taux décroissant.

Miller (1971) utilise la théorie des files d'attente pour déterminer le taux d'occupation d'un terminal possédant un seul quai. Le modèle est descriptif et présente une approche de simulation pour déterminer les délais d'attente moyens pour un terminal d'un seul quai.

Parmi les études plus récentes, on retrouve celle de Ramani (1996). Il présente une simulation pour la planification générale du développement de terminaux portuaires spécialisés dans la manutention de conteneurs. Cette simulation s'inscrit dans une perspective macro plutôt que micro. En effet, l'objectif de l'auteur est de déterminer les infrastructures nécessaires lors du développement d'un nouveau terminal, notamment le nombre de quais. L'évaluation des besoins nécessaires est faite en comparant différentes configurations possibles. Afin de comparer ces configurations, les mesures utilisées sont le taux d'occupation des quais, les temps d'attente des navires, la productivité aux différents quais et le temps de cycle (déchargement et chargement) des navires. La simulation a été testée sur des terminaux maritimes de conteneurs en Inde.

2.1.3 Nombre de grues de quai

Le nombre de grue de quai est étroitement lié au nombre de quais, puisqu'un quai supplémentaire a une utilité restreinte s'il n'est pas équipé pour recevoir les navires. L'objectif du problème du nombre de grues de quais est de déterminer un nombre de grues qui permettra d'offrir un niveau de service élevé aux navires qui fréquentent le terminal tout en minimisant les investissements liés à l'acquisition de l'équipement. Comme dans le cas du nombre de quais à construire, le nombre de grues de quai doit permettre au terminal d'être en mesure d'absorber les variations futures du volume de conteneurs manutentionnés. De plus, la décision doit tenir compte du fait que la productivité du quai augmente avec le nombre de grues installées, mais à un taux décroissant puisque le risque d'interférence entre les grues augmente (Crainic et Kim 2005). Le nombre de grues de quai à installer sur un terminal constitue une décision importante puisqu'elles représentent l'équipement le plus dispendieux sur le terminal.

À ce sujet, Daganzo (1989) a développé un modèle stochastique pour évaluer la performance de stratégies d'opération des grues de quai. Celui-ci peut être utilisé pour déterminer le nombre de grues de quai, en mesurant le profit associé à l'augmentation de la productivité du terminal. Cette augmentation provient de l'ajout d'une grue supplémentaire et considère les coûts d'acquisition et d'opération de celles-ci.

2.1.4 Système de transport interne du terminal et design de la cour du terminal

Le choix du système de transport interne du terminal est une décision critique dans le design de ce dernier. En effet, selon le système choisi, l'organisation du terminal sera différente. Steenken et col. (2004) identifient certains facteurs de décisions pour le choix de ces équipements, soit : les restrictions d'espace, des facteurs historiques et économiques. Le premier facteur s'avère particulièrement important dans les régions où l'espace est restreint. Par exemple, les principaux ports d'Asie (Hong Kong, Singapour, Busan, Kobe et Kaohsiung) utilisent une organisation des conteneurs en blocs avec des ponts roulants sur pneumatique puisque cette stratégie permet une forte densité de conteneurs (Crainic et Kim 2005). Au niveau économique, ces décisions peuvent être justifiées par des coûts de main d'œuvre élevés. Les facteurs de décision historiques lient les décisions présentes aux décisions passées, puisqu'un changement majeur au système de transport interne entraîne des investissements importants et une réorganisation des processus du terminal.

L'objectif du choix du système de transport interne du terminal est de déterminer une organisation des opérations de transport qui permettra de minimiser les coûts d'opérations du terminal et de maximiser le niveau de service aux grues de quai. Par maximisation du service aux grues de quai, il est entendu que l'objectif est de minimiser les temps morts. En effet, un arrêt d'une grue a un impact direct sur le temps à quai du navire, donc sur le service à la clientèle, qui cherche à minimiser son séjour dans le port. Ces deux objectifs sont en quelque sorte contradictoires, puisque la probabilité d'arrêt de la grue diminue lorsque le nombre de véhicules de transport augmente; ce qui, par le fait même, fait augmenter les coûts totaux d'acquisition du système.

Quant au problème du design de la cour du terminal, l'objectif est de déterminer une organisation de la cour qui permet de minimiser les coûts d'acquisition, tout en minimisant les possibilités de remaniements de conteneurs. Comme dans le cas précédent, ces deux objectifs sont contradictoires. En effet, afin de minimiser le nombre de remaniements possibles, la hauteur des piles doit être minimisée. Par contre, la minimisation de la hauteur des piles nécessite une plus grande surface d'entreposage dans la cour, ce qui fait augmenter le coût d'acquisition du terrain.

Il a été choisi de présenter ces deux problèmes simultanément, puisque ces décisions sont liées. En effet, le choix du système de transport aura nécessairement un impact sur le design de la cour du terminal, puisque selon le système choisi les piles de conteneurs seront plus ou moins denses.

La simulation peut être utilisée comme outil de conception et d'évaluation pour le design du système de transport interne du terminal. Dans cet ordre d'idée, Vis et Harika (2004) proposent une simulation qui a pour objectif de déterminer quel type de véhicule utiliser dans un terminal automatisé. La simulation compare un terminal utilisant des véhicules de transport guidés automatiquement et des véhicules de levée automatique (chariots cavaliers guidés par ordinateur). La base de comparaison utilisée est l'effet de l'utilisation de l'un ou l'autre des types de véhicules sur le temps de déchargement du navire, le degré d'occupation des divers équipements et le nombre de véhicules requis. La simulation utilise des données recueillies au « European Combined Terminal » du port de Rotterdam. La conclusion de l'étude est que le système avec véhicules de levée automatique est souhaitable dans le cas d'une décision basée sur le coût d'acquisition seulement. Par contre, une analyse de sensibilité révèle que la disposition du terminal et une variation des aspects techniques de la grue de quai (diminution du temps de cycle) ont pour effet de modifier le choix du type d'équipement lorsque le critère de sélection est le coût d'acquisition.

Afin de tenir compte des effets que peuvent avoir les différentes décisions les unes sur les autres, il est possible de jumeler certaines décisions liées au design du terminal. C'est le cas de l'étude Kim et Kim (1998), qui combine une décision sur le système de transport interne à

une décision sur l'organisation de la cour du terminal. En effet, ils proposent un modèle pour déterminer l'espace et le nombre de ponts roulants sur pneumatiques nécessaires aux opérations de manutention des conteneurs importés. Le modèle développé vise à minimiser les coûts d'investissements (coût d'achat des ponts roulants), les coûts d'espace et les coûts variables des ponts roulants sur pneumatiques et des camions, qui sont liés au temps passé dans le terminal par ces derniers. Un exemple numérique permet aux auteurs de tirer deux conclusions. La première est qu'il existe une corrélation négative entre l'augmentation du coût de l'espace et la taille de l'aire d'empilement des conteneurs, tandis que la seconde est que le nombre optimal de ponts roulants et la taille optimale de l'espace d'empilement des conteneurs augmentent lorsque le coût des camions externes augmente.

2.1.5 Degré d'automatisation des opérations

La planification stratégique des opérations d'un terminal maritime de conteneurs implique aussi de déterminer le degré d'automatisation des opérations. L'automatisation des opérations peut se faire à plusieurs niveaux. Le plus élevé consiste à développer un terminal qui est pratiquement entièrement automatisé, comme le terminal Delta SeaLand du Port de Rotterdam. Dans ce terminal, le transport des conteneurs est automatisé, tout comme le transfert des conteneurs entre les véhicules et les piles qui est effectué par des ponts roulants automatiques.

La décision sur le degré d'automatisation des opérations d'un terminal maritime de conteneurs a pour objectif de déterminer le niveau d'automatisation adéquat d'un terminal. L'automatisation des opérations nécessite un volume de conteneurs important, puisque les coûts d'acquisition des équipements automatisés sont très élevés, d'où l'importance d'un volume important afin de les rentabiliser. C'est pourquoi le niveau d'automatisation des opérations souhaitable varie selon les terminaux.

Liu et col. (2000) présentent une simulation qui compare trois organisations différentes du transport interne d'un terminal : un système non automatisé, un système de convoyeurs à moteurs linéaires et un système de véhicules guidés automatiquement. La simulation est appliquée au port de Norfolk, situé sur la côte est américaine. En se basant sur les résultats

obtenus, les auteurs affirment que l'automatisation permet de doubler la productivité du terminal. Les deux formes d'automatisation permettent une productivité semblable pour le même nombre de véhicules. Cependant, les véhicules guidés automatiquement présentent un taux d'inactivité plus élevé, ce qui laisse présager la possibilité d'une productivité supérieure par une meilleure stratégie de déploiement.

Ottjes, Duinkerken, Evers et Dekker (1996) ont développé une simulation qui compare trois types d'organisation des opérations de transport inter terminal pour le terminal Maasvlakte du port de Rotterdam. L'objectif de la simulation est de déterminer qu'elle serait le système le plus efficace pour effectuer les transports entre terminaux prévus pour l'année 2005. Le volume de transfert prévu était de 1 400 000 conteneurs EVP au moment où la recherche a été effectuée. La simulation compare trois organisations distinctes, le système à remorques multiples qui était à ce moment utilisé, l'utilisation de véhicules guidés automatiquement et l'utilisation de véhicules de levée automatiques. Il est important de noter que le système à remorques multiples n'est pas automatisé. Les trois possibilités évoquées sont comparées en mesurant le niveau d'inefficience de chacune. Celui-ci est défini comme le pourcentage de véhicules arrivant à destination avec un retard. La simulation repose sur deux modèles : le modèle générateur, qui simule le flux de conteneurs entre les composantes du terminal et le modèle «Inter terminal transport» qui simule le processus complet à l'aide des données du premier modèle. Les conclusions de l'étude sont que le système avec véhicules guidés automatiquement offre la solution la plus performante sur la base des coûts des différents systèmes, car le système avec véhicules de levée automatiques nécessite des perfectionnements.

2.1.6 Terminaux complets

Tel que mentionné dans l'introduction de cette section, il s'avère difficile de considérer les décisions, concernant le design du terminal, indépendamment les unes des autres. C'est pour quoi cette sous-section se consacre aux études portant sur le design du terminal dans son ensemble. Dû à la complexité qu'entraîne la considération de l'ensemble des décisions sur le design du terminal, la majorité des études sur le sujet est basée sur la simulation.

Kia et col. (2002) qui proposent une simulation qui compare deux formes d'organisation des opérations. Dans le premier cas, le terminal simulé utilise un système de blocs de conteneurs et de pont roulant sur pneumatiques, où environ 85% des conteneurs sont livrés par camions. Dans le second cas, un système de transfert direct entre les navires et des trains est simulé. Dans ce système, les conteneurs sont déchargés des navires et déposés directement sur des trains qui les transportent ensuite à un dépôt terrestre. Les conclusions de l'étude sont que le second système permet une réduction du temps à quai du navire ainsi qu'une réduction du taux d'utilisation de l'espace de la cour, espace qui est de plus en plus rare. Par contre, les auteurs mentionnent que la simulation ne tient pas compte des délais ou annulations de trains. Ces délais peuvent avoir un impact important sur les flux de conteneurs et sur la synchronisation des opérations ferroviaires et portuaires.

Sgouridis et Angelides (2002) présentent une simulation d'un terminal qui utilise des chariots cavaliers pour le transport interne des conteneurs. La simulation est utilisée pour représenter le port de Thessaloniki, situé dans la mer méditerranée. L'outil développé permet d'évaluer divers scénarios lors du design d'un nouveau terminal ou il peut servir comme système d'aide à la décision pour l'agrandissement d'un terminal existant. Par contre, il ne permet pas de simuler des terminaux utilisant un autre système de transport interne que les chariots cavaliers.

Liu et col. (2002), quant à eux, comparent quatre organisations différentes de terminaux automatisés. Les quatre organisations en question sont : 1) un terminal utilisant des véhicules de transport automatisés 2) un terminal équipé de convoyeurs à moteurs linéaires 3) un terminal comprenant un système de navettes sur rails aériens (*overhead grid rail system*) 4) un terminal muni d'un système entreposage et extraction automatique (*automated storage/retrieval system*). Les deux derniers systèmes utilisent des véhicules guidés automatiquement pour le transport entre les piles et le navire. Les critères de comparaison des différentes formes d'automatisation sont la productivité et les coûts liés à chacune des options. Les différents tests mènent les auteurs aux conclusions que la performance des différents systèmes est comparable, mais que le système d'entreposage et extraction automatique permet une productivité accrue en termes d'espace d'entreposage. De plus, le

système avec convoyeurs à moteurs linéaires s'avère le plus dispendieux, dû à l'infrastructure nécessaire à sa mise en place.

Une approche de simulation différente a été utilisée par Alessandri, Sacone et Siri (2004), qui représentent les conteneurs et leurs mouvements par des files d'attentes. Ces files d'attentes représentent le travail à effectuer par les différentes ressources du terminal. Les activités de transfert de ces ressources sont représentées par des équations de temps discrets (*discrete-time equations*) et l'évolution dynamique des différentes files d'attentes dépend de l'utilisation des ressources du terminal. Au niveau du design du terminal, cette méthode a l'avantage de faciliter la variation de la capacité du terminal par une simple modification de cette variable.

2.2 La planification tactique

Au niveau tactique, les décisions concernent l'organisation des opérations du terminal de façon générale. Plus précisément, la planification tactique vise à déterminer quels équipements seront alloués à quel ensemble de tâches qui doivent être complétés, donc l'allocation de la capacité du terminal. L'horizon de planification de ces décisions couvre des périodes allant de quelques jours à quelques mois (Vis et de Koster 2003).

2.2.1 L'allocation de quais aux navires

À l'arrivée du navire, un quai (espace où sera amarré le navire) doit lui être assigné. Ainsi, la décision doit tenir compte non seulement de l'espace disponible à l'arrivée du navire, mais aussi des besoins futurs en quais pour les navires arrivant prochainement. C'est pourquoi la planification doit être faite pour une période suffisamment longue pour éviter une file d'attente, le temps à quai étant une période sans génération de revenus pour les armateurs.

L'objectif du problème d'allocation de quais est de déterminer un horaire d'affectation des navires aux quais qui permet de diminuer le temps total d'exécution des opérations. Pour ce faire, plusieurs facteurs doivent être considérés. Tout d'abord, la disponibilité des quais et les caractéristiques de ceux-ci et des navires. En effet, le plan d'allocation choisi doit éviter qu'il

il y ait des interférences entre les navires et il doit respecter les contraintes liées à la taille et au tirant d'eau des navires, afin d'éviter l'allocation d'un navire à un quai qui ne peut pas le recevoir. Ensuite, l'emplacement des conteneurs sur le terminal doit être considéré. Plus les conteneurs sont situés loin du navire, plus les risques de délais des opérations augmentent. De plus, une grande distance entre le navire et la pile de conteneurs peut entraîner la nécessité d'ajouter des véhicules de transport interne, afin d'éviter les délais, ce qui fait augmenter les coûts d'opérations et les risques de problèmes de congestion du terminal.

Guan et Cheung (2005) proposent trois modèles pour le problème de l'allocation de quais aux navires. Les trois modèles reposent sur un diagramme espace-temps, où l'abscisse représente le temps et l'ordonnée représente les sections du quai. Un navire est donc représenté sur le diagramme par un rectangle pour lequel la hauteur représente la taille du navire et la longueur représente le temps des opérations de déchargement et de chargement. Ces modèles ont tous le même objectif, soit de minimiser la somme des temps à quai des navires multipliée par un facteur d'importance relative de ceux-ci pour le terminal. Le premier modèle est appelé la formulation selon la position relative (*relative position formulation*). Cette formulation considère la position des rectangles les uns par rapport aux autres et vise à empêcher un chevauchement des rectangles dans le diagramme espace-temps. Le second modèle est la formulation par assignation de position (*position assignment formulation*). Cette formulation suppose une partition de l'espace-temps en blocs unitaires, où chaque bloc a la hauteur d'une section de quais et la longueur d'une unité de temps. La formulation considère donc les navires selon leur position sur la surface espace-temps. Le troisième modèle est une relaxation de la formulation par assignation de position.

Afin de résoudre ces modèles, les auteurs développent une heuristique, à laquelle ils ajoutent une recherche par arborescence (*tree search procedure*). La recherche par arborescence insère les navires dans le diagramme espace-temps par ordre chronologique et utilise des bornes inférieures et supérieures afin d'effectuer des coupes et de diminuer le nombre de branchements. L'heuristique regroupe d'abord les navires en lots selon leur temps d'arrivée. Ensuite, le lot dont la taille totale est la plus petite est choisi et une position sur les quais est assignée aux navires qui compose ce lot. Cette procédure est répétée jusqu'à ce qu'une

solution réalisable soit obtenue. Une fois cette solution obtenue, une procédure d'échange entre les lots est utilisée. Pour chaque lots voisins l'un de l'autre dans le diagramme espace-temps, les rectangles sont échangés par paires et si l'échange permet de réduire la valeur de la solution, il est retenu. Finalement, dans un second temps, la recherche par arborescence est appliquée à la solution obtenue suite à la procédure d'échange.

Afin de valider l'algorithme développé, les auteurs ont effectué des tests qui comparent l'heuristique, l'heuristique avec la recherche par arborescence et une méthode exacte utilisant un « branch and bound ». Leurs conclusions sont que l'heuristique est efficace pour générer de bonnes solutions initiales et que l'ajout de la recherche par arborescence à celui-ci s'avère plus efficace que la méthode exacte, qui nécessite des temps de calculs trop importants.

Pour des raisons d'espace disponible ou dû aux coûts importants de développement d'un terminal, certains ports ont opté pour un système de quais publics. C'est le cas du port de Kobe au Japon qui est le sujet d'étude de Nishimura, Imai et Papadimitriou (2001). Dans cette étude, les auteurs développent un modèle qui est résolu à l'aide d'un algorithme génétique pour optimiser l'allocation de quai aux navires dans un port où les quais sont publics. L'objectif du modèle développé est de minimiser le temps de service total. La formulation du problème proposée par les auteurs suppose les conditions suivantes : 1) chaque navire doit être amarré à un seul quai à la fois. 2) le quai alloué au navire doit respecter les spécifications techniques de celui-ci (taille, tirant d'eau) 3) le temps de service de chaque navire est dépendant du quai qui lui a été assigné.

Le résultat de cette formulation est une programmation non linéaire en nombres entiers, qui peut difficilement être résolue à l'aide de méthodes exactes. Nishimura et col. (2001) divisent donc l'horizon de planification en plusieurs périodes qui sont considérés comme des sous-problèmes du problème général. Ensuite, un algorithme génétique est appliqué successivement à chacun des sous-problèmes, la solution du premier devenant le point de départ du second et ainsi de suite. Afin de valider l'heuristique développée, des solutions générées par l'algorithme génétique sont comparées à des données historiques provenant du port de Kobe. Les résultats démontrent que l'algorithme génétique a permis d'arriver à un

temps de service similaire aux données historiques, mais en utilisant cinq quais au lieu de sept.

2.2.2 L'allocation de grues de quai aux navires

La construction d'un horaire de travail des grues de quai consiste à déterminer quelle grue travaillera sur quel navire et sur quelle partie du navire en particulier. Donc, l'horaire de travail d'une grue indique la séquence de navires travaillés, l'ordre dans lequel les cales seront servies ainsi que la quantité et le type d'opérations à effectuer.

Les intrants du processus de création d'un horaire pour les grues de quai sont le plan de chargement (*stowage plan*) du navire, la disponibilité des grues et un plan qui indique la position sur le terminal des conteneurs à charger sur le navire (Kim et Park 2004).

Le problème d'allocation de grues de quai aux navires vise à déterminer une séquence de travail des cales des navires qui permet de minimiser le temps d'opération total sur le navire. La réalisation de ce plan de travail doit tenir compte du nombre de conteneurs à manutentionner, de la position des conteneurs, de l'impossibilité des grues de se croiser et des possibilités d'interférence entre les grues. En effet, la taille des grues de quais nécessite de laisser une cale libre entre les grues afin d'éviter un contact au cours des opérations. De plus, la séquence d'opérations doit tenir compte du nombre de conteneurs par cales. Cette considération est nécessaire afin d'éviter qu'une grue termine les opérations d'une cale et qu'une autre grue crée de l'interférence avec la cale suivante qui a été affectée à la première grue.

Kim et Park (2004) ont développé un modèle pour le problème d'allocation de grues de quai qui a pour objectif de déterminer la séquence d'opérations des grues qui minimisera le temps d'opération sur un navire. Le modèle résultant de cette formulation est une programmation linéaire à entiers mixtes. Des tests utilisant un logiciel commercial de résolution problèmes de programmation entière et linéaire ont démontré que les temps de calculs s'avèrent trop importants pour que le modèle soit utilisable dans un contexte pratique.

Afin de remédier à cette situation, Kim et Park (2004) proposent une heuristique pour la résolution du problème d'allocation de grues de quais aux navires. L'heuristique de type « greedy randomized adaptative research procedure (GRASP) », utilise deux phases: la phase de construction de solution et la phase d'amélioration de la solution. La première utilise un algorithme glouton pour obtenir une solution réalisable, tandis que la phase d'amélioration effectue des itérations en améliorant localement la solution construite dans la phase précédente. Les itérations sont faites à l'aide de la méthode 2-opt. Afin de valider l'heuristique, des tests sont effectués sur des données empiriques et comparent celle-ci à une méthode de résolution exacte de type « branch and bound ». Les conclusions de ces tests sont que la méthode exacte s'avère inefficace lorsque la taille du problème atteint 3 grues et 20 tâches, puisque le nombre de nœuds sur un même niveau excède la limite d'arrêt de 175 000, ce qui arrête l'algorithme à une solution non optimale. De plus, les tests démontrent que pour une telle taille du problème, l'algorithme GRASP atteint des solutions en utilisant des temps de calculs moyens équivalents à 3% du temps de calcul du « branch and bound ».

Dû à l'impossibilité des grues de quai de se croiser, le problème d'allocation de grues de quai est parfois considéré de façon simultanée au problème d'allocation de quai. C'est le cas de Park et Kim (2003), qui présentent un modèle d'allocation de quais et de déploiement de grues de quai. Le problème est divisé en deux phases. La première phase vise à déterminer à quel moment le navire sera amarré, la position sur le quai qui lui sera assignée, ainsi que le nombre de grues qui travailleront sur le navire. L'objectif de cette phase est de minimiser le coût de manutention des conteneurs, le coût de pénalité d'une arrivée différente du TAE (Temps d'Arrivée Estimé) et le coût de pénalité d'un délai au départ du navire. Cette première phase est résolue à l'aide de la méthode du sous-gradient (*subgradient optimization procedure*).

En utilisant les données de la première phase, la seconde phase détermine la séquence d'opérations pour chacune des grues. L'objectif du modèle représentant cette seconde phase est de minimiser le nombre de déplacements des grues avant le début des opérations sur le navire. Cette seconde phase est ensuite résolue par une programmation dynamique.

Dans le but de démontrer l'efficacité de la méthode, les auteurs l'utilisent en se basant sur la situation du «East Container Terminal» du port de Pusan en Corée. Ce terminal utilise onze grues sur un quai d'une longueur de 1 200 mètres. Pour la première phase du problème du problème, une heuristique est comparée à une méthode d'énumération complète. Les résultats sont que l'heuristique obtient des résultats semblables à la méthode d'énumération, mais beaucoup plus rapidement que celle-ci. Pour la seconde phase, la programmation dynamique a permis d'obtenir des résultats en une moyenne de cinq secondes, ce qui en fait une méthode utilisable pour des applications pratiques. Les auteurs concluent qu'afin d'être utilisée dans un contexte d'opérations, des heuristiques plus performantes doivent être développées pour la première phase du problème.

2.2.3 Planification du chargement

La planification du chargement consiste à positionner les conteneurs sur le navire. En générale, une route de navire est constituée de plusieurs arrêts dans différents ports et à chacun de ces arrêts des conteneurs sont déchargés du navire et d'autres sont chargés. La planification du chargement consiste à répartir les conteneurs de ces différents arrêts dans les diverses cales du navire.

Le problème de la planification du chargement d'un navire vise à développer un plan de chargement qui minimise le nombre de manutentions improductives. Ces manutentions se produisent lorsqu'un conteneur, qui doit être déchargé, se retrouve sous un conteneur qui doit être déchargé au port suivant. Par contre, le plan de chargement doit tenir compte de plusieurs facteurs.

Tout d'abord, on retrouve les contraintes de stabilité du navire. En effet, le chargement du navire doit être réparti de manière à ce que la stabilité du navire ne soit pas compromise. L'impact sur le plan de chargement est qu'il peut s'avérer nécessaire de mélanger les destinations dans une même cale afin de respecter ces contraintes. Les contraintes de stabilité sont étroitement liées aux caractéristiques des conteneurs. La principale caractéristique à considérer est le poids des conteneurs. En effet, les conteneurs doivent être chargés sur le navire de façon à ce que les plus pesants soient au fond du navire et les moins pesants sur le

dessus. Cet ordre est nécessaire afin de stabiliser le navire, ainsi que dans le but d'éviter qu'un conteneur lourd écrase un conteneur léger ou vide. De plus, le plan de chargement doit tenir compte des contraintes qu'imposent les conteneurs réfrigérés et les conteneurs de matières dangereuses. Les premiers doivent être chargés près d'une source de courant électrique, tandis que les seconds sont restreints à certaines cales. Le problème de la planification du chargement est aussi lié au problème d'allocation de grues de quai aux navires, puisque le plan doit tenir compte des possibilités d'interférences entre les grues lors des opérations sur les navires aux différents ports de la route de celui-ci. Wilson et Roach (1999) décrivent le problème de la planification du chargement d'un porte-conteneurs.

D'ailleurs, ces auteurs proposent une méthode de résolution pour le problème de la planification du chargement qui combine une méthode exacte et une méta-heuristique. La première méthode utilisée est un « *branch and bound* » dont l'objectif est d'allouer des blocs de conteneurs aux travées du navire (*ship bay*). La seconde méthode utilisée est une recherche tabou qui vise à positionner individuellement les conteneurs à l'intérieur des travées. Des discussions avec des gestionnaires et des planificateurs de terminaux permettent aux auteurs d'affirmer que les solutions obtenues sont comparables à celles obtenues par les planificateurs.

2.2.4 Transport interne

Les décisions stratégiques pour le transport interne du terminal portent sur le type d'équipement et d'organisation du terminal. Une fois ce choix fait, la planification tactique consiste à déterminer le nombre de véhicules qui seront utilisés pour le transport des conteneurs entre le navire et la pile (Vis 2005). En effet, elle consiste à déterminer le nombre de véhicules de manière à assurer un déroulement des opérations efficient. Les informations nécessaires à cette prise de décision sont le nombre de transport qui doivent être effectués, les temps de manutention des conteneurs et les temps de transport des véhicules (Vis et col. 2001).

L'objectif du problème de gestion de la flotte de transport interne du terminal consiste à minimiser le nombre de véhicules qui seront nécessaires aux opérations de transport entre le

navire et la pile. La détermination du nombre de véhicules est sujette à un compromis entre la minimisation des coûts de transport des conteneurs entre les piles et les grues et le niveau de service aux grues. En effet, une augmentation du nombre de véhicule a pour conséquence de diminuer les risques de délais aux grues de quai dus à l'absence de véhicules, mais entraîne une augmentation des coûts, tandis qu'une diminution du nombre de véhicules utilisés aura l'effet contraire.

Vis et col. (2001) utilisent un réseau à flot maximal pour déterminer le nombre de véhicules guidés automatiquement nécessaires pour exécuter l'ensemble des tâches de transport du navire à la pile et vice-versa. Le modèle est résout à l'aide d'un algorithme de flot à coût minimum.

Koo et col. (2005) proposent un modèle pour déterminer la taille de la flotte de véhicules qui se base sur la situation du port de Pusan en Corée. Le volume de conteneurs qui transitent par ce port est si important que des conteneurs doivent être transportés vers des terminaux externes. Koo et col. (2005) partent du principe que la taille de la flotte dépend du temps total de transport. Ce temps total de transport consiste à la somme des temps de transport chargé, des temps de chargement et de déchargement des véhicules et des temps de transport à vide. Les trois premiers peuvent être obtenus facilement lorsque la liste de transport à effectuer et le temps de ces transports sont connus, mais les temps de transport à vide dépendent du routage des véhicules. C'est pourquoi les auteurs traitent le problème de la taille de la flotte et du routage des véhicules simultanément.

Dans un premier temps, Koo et col. (2005) utilisent le modèle proposé par Maxwell et Muckstadt (1982) pour fixer la borne inférieure à la taille de la flotte de véhicules. La fonction objectif de ce modèle vise à minimiser le temps total de transports à vide entre les différents terminaux. Ainsi, une fois les temps de transport à vide connus, le temps de transport total peut être calculé et divisé par le nombre d'heures-véhicules disponibles, ce qui permet de fixer une taille de flotte minimale. Le résultat obtenu est utilisé comme borne inférieure, puisque la modélisation ne tient pas compte des mouvements individuels des véhicules, mais plutôt des flux entre les différents terminaux, ce qui rend la solution

difficilement applicable à des situations réelles. Dans un deuxième temps, une heuristique utilisant une recherche tabou est utilisée pour déterminer simultanément la taille de la flotte et le routage des véhicules. La solution de départ utilisée par l'heuristique est la borne inférieure pour la taille de la flotte et une solution générée par un algorithme glouton pour le routage des véhicules. Des expérimentations comparant la recherche tabou avec une heuristique utilisant un algorithme d'insertion, préalablement développé par les auteurs, et un algorithme glouton leurs permettent de conclure que la recherche tabou est plus efficace, puisqu'elle obtient des temps de transport total inférieurs, avec une flotte de véhicules moins importante.

2.2.5 Planification de l'entreposage

La planification de l'entreposage concerne l'ensemble des stratégies et méthodes qui peuvent être utilisées pour déterminer de quelle façon les conteneurs seront triés dans les diverses piles à l'intérieur du terminal. De plus, la gestion des piles vise aussi à minimiser les mouvements inutiles dans la manutention des conteneurs.

Chen (1999) propose une étude qualitative qui compare deux stratégies de gestion de l'espace et des mouvements dans un terminal. La première stratégie, le *pre-marshalling*, consiste à mettre les conteneurs reçus pour l'exportation dans une zone temporaire, jusqu'à la réception du plan de chargement de la ligne maritime. Une fois la liste reçue, les conteneurs sont triés selon le navire, le type de conteneur, la destination et le poids. Le principal avantage de cette méthode est de simplifier la réception des conteneurs. Par contre, le remaniement des conteneurs avant l'arrivée du navire impose une charge de travail importante, qui risque de congestionner le terminal. La seconde stratégie, le *sort and store* est semblable à la première, mais le tri des conteneurs s'effectue à la réception. Le principal avantage de cette méthode est qu'elle diminue la quantité de remaniement avant l'arrivée du navire. Ces manutentions peuvent être effectuées durant les périodes de baisse d'activités du terminal, donc cette stratégie diminue les risques de congestion à l'intérieur du terminal. Cependant, cette stratégie nécessite un espace important afin de trier les conteneurs dans les différentes piles, espace qui se fait de plus en plus rare dans la majorité des terminaux. Au niveau de l'importation, l'auteur propose de séparer les conteneurs du nouveau navire de ceux déchargés des navires précédents. De plus, l'auteur mentionne que la hauteur des piles est un

facteur important à considérer, puisque le nombre de manutentions improductives s'accroît avec des piles plus élevées.

À propos des manutentions improductives, Kim (1997) présente un modèle dont le but est d'évaluer le nombre de manipulations sans valeur ajoutée possibles selon la configuration de la pile de conteneurs. Le modèle est dérivé du modèle IOS (Index of selectivity) et consiste en une régression linéaire qui estime le nombre de manipulations. La régression linéaire permet une estimation plus rapide et plus précise que la méthode IOS.

Duinkerken, Evers et Ottjes (2001) ont développé une simulation visant à mesurer l'efficacité de diverses stratégies de gestion des piles de conteneurs dans un terminal automatisé. Pour ce faire, quatre indicateurs de performance sont utilisés : le taux d'activité de la grue de quai (% de la période de travail où la grue est active), la proportion de remaniement de conteneurs pour l'exportation, le *stack response move*, qui correspond au temps moyen que prend le pont roulant sur pneumatiques pour effectuer un cycle complet et le taux d'activité du pont roulant sur pneumatiques. Deux méthodes différentes d'empilement des conteneurs sont utilisées afin de déterminer dans quelle rangée les conteneurs seront triés, la méthode aléatoire et la méthode des rangées dédiées, où des rangées sont attribuées à chaque grue de quai. De plus, quatre stratégies différentes pour l'empilement des conteneurs sont simulées. Ces stratégies sont : l'aléatoire, la stratégie de nivellement, qui consiste à remplir les rangées par étages, la stratégie de la hauteur minimale de la pile la plus près et le coefficient de capacité d'empilement restante. La capacité d'empilement restante pour une position dans la pile se calcule en soustrayant la hauteur actuelle de la pile à la hauteur maximale de la pile et en multipliant cette somme par la catégorie du conteneur sur le dessus de la pile. Les auteurs concluent que la hauteur de la pile et le nombre de véhicules guidés automatiquement sont les deux facteurs ayant la plus grande influence sur la performance du système. De plus, ils concluent que le fait d'affecter des allées dédiées à certaines grues n'avait pas une grande influence sur la performance et qu'en réalité la quantité d'information nécessaire à l'implantation de cette stratégie est trop importante pour qu'elle soit utilisée efficacement.

2.3 La planification opérationnelle

Au niveau tactique, la capacité a été allouée aux tâches à effectuer de façon générale. L'étape suivante, la planification opérationnelle, vise la répartition de cette capacité aux différentes tâches afin qu'elles soient réalisées. Ces décisions relèvent tous de l'opérateur du terminal, puisqu'elles concernent l'organisation de ses activités.

2.3.1 Ordonnancement des opérations de déchargement et de chargement

L'ordonnancement des opérations de déchargement et de chargement consiste à déterminer l'ordre dans lequel les conteneurs seront déchargés, dans le premier cas, et chargés, dans le second cas. L'objectif du problème d'ordonnancement des opérations de déchargement et de chargement est de déterminer la séquence d'opérations qui permettra de minimiser le temps à quai du navire.

La majorité de la recherche s'est concentrée sur le problème de l'ordonnancement des opérations de chargement, puisque c'est celui-ci qui a le plus grand impact sur les coûts de manutention des conteneurs et sur le temps à quai du navire.

La recherche sur le problème d'ordonnancement des opérations de chargement peut être divisée en deux catégories. En effet, le problème peut viser le positionnement de chacun des conteneurs individuellement ou l'ordonnancement des opérations de cueillette des conteneurs dans la cour du terminal. Dans le premier cas, l'ordonnancement demande une quantité d'informations beaucoup plus importante, car il nécessite de connaître la position exacte des conteneurs sur le navire et dans la cour.

Dans le premier cas, où l'on vise le positionnement de chacun des conteneurs sur le navire, l'objectif du problème est de minimiser le temps total d'opération de la grue de quai lors des opérations de chargement. Cette minimisation du temps total se fera par une minimisation des déplacements de la grue. Par contre, un compromis peut être nécessaire si la séquence de chargement entraîne un nombre trop important de manutentions improductives par les ponts roulants sur pneumatiques. En effet, il se peut que l'ordonnancement obtenu nécessite des

conteneurs qui se retrouvent en dessous d'autres qui viennent plus loin dans la séquence. De plus, l'ordonnancement des opérations de chargement doit se faire de manière à respecter le plan de chargement qui a été préalablement établie.

Kim et col. (2004) propose un algorithme utilisant une recherche par rayon (*beam search algorithm*) pour l'ordonnancement du chargement d'un navire. L'algorithme procède en deux étapes. Dans un premier temps, il ordonne des groupes de conteneurs aux caractéristiques similaires appelés « *clusters* ». Dans un second temps, la séquence de conteneurs à l'intérieur de ceux-ci est ordonnancée. Dans le but de mesurer son efficacité, l'algorithme est comparé à une méta-heuristique de recherche dans le voisinage et à un algorithme utilisant le système des fourmis (*ant system*). Les conclusions des auteurs sont que l'algorithme développé obtient des solutions plus précises que la méta-heuristique, mais requiert des temps de calculs plus longs. Par rapport à l'algorithme utilisant un système de fourmis, la solution proposée obtient de meilleures solutions plus rapidement.

Dans les cas où l'ordonnancement est fait pour l'ordre de cueillette des conteneurs dans la cour du terminal, l'objectif ne sera pas le même. Vu sous cette perspective, l'objectif est maintenant de minimiser le temps total d'opération pont roulant. Ce temps total est le temps nécessaire pour transférer les conteneurs à charger, de la pile aux véhicules de transport interne. Le temps total d'exécution dépend de la distance totale parcourue par la grue et du nombre de changement de blocs de conteneur.

L'étude précédente considérait le problème en cherchant à positionner chaque conteneur de façon individuelle. Kim et Kim (1999), quant à eux, considèrent le problème pour l'ordonnancement des opérations d'un pont roulant. La fonction objectif minimise le temps de réalisation de l'ensemble des tâches, qui dépend du nombre de transfert entre les blocs et de la distance totale parcourue. Dans une autre étude, les mêmes auteurs (Kim et Kim 2003) comparent une méthode exacte, une heuristique avec recherche par rayons et l'algorithme génétique développé dans la première étude (Kim et Kim 1999), pour le même modèle. Les conclusions des auteurs sont que l'algorithme avec recherche par rayons est plus performant que l'algorithme génétique pour des problèmes dont la taille atteint 30 blocs de conteneurs

dans la cour du terminal. Pour ce type de problème, la méthode exacte s'avère inefficace, puisqu'elle nécessite des temps de calculs trop longs.

2.3.2 Transport entre le quai et les piles

La planification des activités de transport entre le quai et les piles, au niveau opérationnel, consiste à déterminer quelle stratégie sera utilisée pour affecter les véhicules aux tâches de transport. Il existe deux stratégies, soit : l'affectation d'un groupe de véhicules à une grue ou la mise en commun des véhicules qui peuvent ainsi servir toutes les grues sur tous les navires. L'avantage de la seconde stratégie est qu'elle permet une meilleure utilisation des véhicules puisqu'elle diminue le nombre de déplacements sans chargement (Steenken et col. 2004). Par contre, la coordination des véhicules et des grues est beaucoup plus complexe, puisqu'elle doit être effectuée en temps réel, il est donc impossible d'avoir un plan d'affectation préalable (Crainic et Kim 2004). C'est pourquoi en pratique la mise en commun des véhicules est seulement utilisée dans les terminaux qui utilisent des véhicules de transport automatisés, tandis que les autres terminaux appliquent une stratégie de véhicules dédiés, qu'il s'agisse de camions ou de chariots cavaliers (Steenken et col. 2004).

L'objectif du problème de transport entre le quai et les piles au niveau opérationnel est de minimiser les temps de transport à vide. Dans le cadre des opérations de chargement, les transports à vide se produisent généralement lorsqu'un conteneur a été livré à la grue et que le véhicule de transport interne doit retourner à la pile pour reprendre un conteneur. Lors des opérations de chargement, la situation est renversée. La mise en commun des véhicules de transport interne permet de minimiser les transports à vide en affectant à une tâche de transport du quai à la pile à un véhicule qui termine une tâche de transport de la pile au quai. Le transport à vide est limité à la distance entre les deux navires. Le problème est donc caractérisé par un arbitrage entre les distances parcourues à vide par les véhicules de transport interne et la complexité de gestion des opérations.

Böse, Reiners, Steenken et Voss (2000) traitent du problème de déploiement des chariots cavaliers dans un terminal spécialisé dans la manutention de conteneurs. Plus précisément, ils ont utilisé un algorithme génétique sur des données provenant du terminal « Burchardkai »

du port de Hambourg. En premier lieu, les auteurs comparent trois stratégies de déploiement : statique, semi-dynamique et dynamique. La première consiste à allouer des chariots cavaliers à une grue de quai seulement. La seconde consiste à permettre aux chariots cavaliers alloués à un navire de servir toutes les grues de quai affectées à ce navire. La dernière stratégie consiste à permettre à tous les chariots cavaliers de servir toutes les grues. Avant même d'appliquer l'algorithme au problème, les résultats de tests sans optimisation du déploiement permettent aux auteurs de conclure que la dernière stratégie permet de diminuer les délais, donc d'augmenter la performance du terminal. L'algorithme génétique est ensuite utilisé sur les résultats des stratégies semi-dynamique et dynamique. Les résultats obtenus démontrent un déploiement permettant de diminuer les temps morts (délais) pour les deux stratégies. Par contre, les auteurs concluent que l'algorithme devra être utilisé dans une simulation tenant compte d'influences stochastiques afin de valider les résultats obtenus. En effet, dans l'application actuelle, les temps de cycles des grues sont assumés constants et la capacité de la zone tampon dans l'empatement de la grue de quai est considérée comme infinie. De plus, l'ensemble des opérations liées à l'empilement des conteneurs dans la cour est présumé comme fixe et les locations connues.

Duinkerken, Evers et Ottjes 2002 ont développé une simulation dont l'objectif est de mesurer la performance de deux méthodes d'organisation du trafic dans un terminal maritime automatisé de conteneur. Les deux méthodes comparées sont 1) circulation en boucles (circulation layout) 2) circulation croisée (crossover layout). La circulation en boucles est semblable aux méthodes actuellement utilisées, puisqu'elle consiste à faire longer les véhicules le long du navire pour ensuite les diriger vers la pile et les rediriger vers le navire sans qu'aucun chemins ne se croisent. Dans le cas de la circulation croisée, les véhicules peuvent passer directement de la pile à la grue de quai sans avoir à longer le navire. L'étude mesure donc la performance des deux méthodes d'organisation, en utilisant comme mesure de performance l'occupation de la grue de quai, soit le pourcentage de temps où la grue est active, le ratio d'erreur de chargement, le rapport entre le nombre de conteneurs chargés selon la mauvaise séquence et le nombre total de conteneurs chargés, et le nombre de véhicules guidés automatiquement utilisés. La simulation effectue des analyses en variant le nombre de véhicules et la vitesse de ceux-ci pour mesurer l'impact de ces variations sur la performance

du système. Les conclusions sont que la circulation croisée permet de diminuer le nombre de véhicules utilisés par rapport à la circulation en boucles.

2.3.3 Déploiement des équipements de manutention de la cour

Les problèmes de gestion de l'équipement sont cruciaux pour les terminaux maritimes, due aux sommes d'argent importantes investies dans ces équipements. C'est pourquoi les terminaux cherchent à optimiser l'utilisation de ces équipements pour en tirer la meilleure utilisation possible.

Le problème de déploiement des équipements de manutention de la cour vise à minimiser le temps total d'opérations de ces équipements. Le temps d'opérations est aussi dépendant des temps des mises en routes nécessaires à une séquence d'opérations. Un temps de mise en route survient lorsque l'équipement doit se déplacer d'une tâche à l'autre. Par exemple, lorsqu'un pont roulant sur pneumatiques doit changer de bloc de conteneurs. De plus, le temps total dépend aussi du nombre de remaniement de conteneurs qui devront être effectués au cours de la séquence d'opérations, puisque ces remaniements prolongent le temps d'extraction d'un conteneur de la pile.

Il existe aussi un lien entre le nombre de remaniements et les temps de mise en route des équipements. En effet, si le déploiement des équipements est fait en considérant seulement les temps de mise en route, la séquence risque de comporter plusieurs remaniements pour extraire l'ensemble des conteneurs d'un bloc avant d'effectuer un déplacement vers un autre bloc.

À ce sujet, Linn et col. (2003) présentent un algorithme qui vise à optimiser le déploiement des ponts roulants sur pneumatiques dans un terminal maritime de manutention de conteneurs, dans le but de minimiser le temps à quai des navires porte-conteneurs. La première étape de l'algorithme élimine certaines situations de départ qui ne peuvent pas être changées durant la période d'activité (ex : blocs où les 2 grues sont occupés à 100%) afin d'alléger les calculs, qui doivent être fait pour chaque périodes de quatre heures. Ensuite, une équation mathématique basée sur un problème de programmation à entiers mixtes vise à

minimiser les surcharges de travail dans les blocs où celles-ci existent. Les données utilisées pour tester l'algorithme proviennent du terminal Modern Terminal Limited, un terminal important du port de Hong Kong. Les conclusions des auteurs sont que l'optimisation des opérations de déploiement des ponts roulants sur pneumatiques dans un terminal contribue à diminuer le temps à quai des navires. Par contre, ils ajoutent que le modèle ne tient pas compte de la possibilité de déploiements multiples dans un bloc de quatre heures, le modèle se limitant à un seul déploiement à tous les quatre heures.

Gambardella, Rizzoli et Zaffalon (1998) utilisent une combinaison d'optimisation et de simulation pour traiter le problème du déploiement des équipements de la cour. Les auteurs partent du principe que les solutions générées par l'outil d'optimisation ne peuvent tenir compte de la nature stochastique des opérations du terminal. C'est pourquoi les solutions obtenues sont validées par une simulation.

Dans un premier temps, les auteurs modélisent le problème comme un problème de design de réseau. En effet, dans le cadre des opérations de chargement les sources du flot sont les différentes piles de conteneurs et la destination du flot est le navire. Pour ce qui est du déchargement, la source et la destination du flot sont inversées. Le flot dans le réseau circule en passant par des nœuds qui représentent les grues de quai. Les arcs reliant les piles aux grues de quai ont une capacité qui dépend des ressources qui ont été allouées. La modélisation selon un problème de design de réseau en fait donc un problème de programmation linéaire à entiers mixtes. Afin de résoudre le modèle, une méthode exacte utilisant un « branch and bound » est utilisée. Bien que ce type de problèmes nécessite généralement des temps de calculs importants, les auteurs affirment que, dans ce cas particulier, la taille limitée du problème permet d'obtenir de bonnes solutions en quelques minutes.

Dans un deuxième temps, le déploiement obtenu est utilisé par une simulation orienté objet qui représente, dans le cas présent, les opérations d'un terminal du port de La Spezia en Italie. La simulation est basée sur une hiérarchisation des agents sur trois niveaux, soit les planificateurs, les opérateurs et les composants. Les premiers, qui incluent l'agent

responsable de la planification de la cour et l'agent responsable de la planification des navires, sont les entités qui utilisent le modèle d'optimisation préalablement présenté. Les opérateurs, qui comprennent les ponts roulants sur pneumatiques, les grues de quai et les véhicules de transport interne, se situent au niveau intermédiaire, puisqu'ils sont en mesure d'éviter des conflits locaux comme l'utilisation d'un même espace pour déposer un conteneur par deux ponts roulants. Les composants, quant à eux, se situent au dernier niveau hiérarchique et ne possèdent pas d'intelligence. Les composants comprennent les conteneurs, les piles de la cour, les navires, les trains et les camions externes. À noter que les trois derniers ne possèdent pas d'intelligence puisqu'ils sont considérés comme externes, donc hors du contrôle du terminal. La simulation repose sur le principe que les événements externes génèrent des réponses des agents, qui agissent ensuite sur les composants. Par exemple, l'arrivée d'un navire générera un plan de déploiement qui sera utilisé pour la simulation des opérations du terminal.

Suite à des tests sur des données provenant du port de La Spezia, Gambardella et col. (1998) concluent que l'outil peut être utilisé comme système d'aide à la décision, mais qu'afin d'être plus efficace un modèle d'optimisation de l'ordonnancement des opérations devra être ajouté aux agents planificateurs.

2.3.4 Ordonnancement de l'entreposage

L'objectif du problème d'ordonnancement de l'entreposage est d'affecter une position aux conteneurs dans la zone de stockage du terminal de manière à minimiser les remaniements de conteneurs lors des opérations de chargement. Bien que ces remaniements puissent se faire avant l'arrivée du navire, le problème demeure le même, puisque ces remaniements occupent le temps d'équipements qui pourraient être affectés à d'autres tâches plus productives.

Kim et Bae (1998) ont traité les problèmes de remaniement des conteneurs en exportation avant l'arrivée du navire. Le remaniement consiste à placer les conteneurs en ordre de chargement dans les piles, afin d'éviter les pertes de temps durant le chargement. Les auteurs cherchent à minimiser le nombre de conteneurs à manutentionner. Pour ce faire, le problème est décomposé en trois sous-problèmes : l'allocation de travées (*yard bays*), la détermination

des manutentions à effectuer et l'ordonnancement des tâches. Les deux premiers sous-problèmes sont résolus simultanément en utilisant la programmation dynamique et l'algorithme du problème de transport. Ensuite, le troisième sous-problème est défini comme un problème du voyageur de commerce avec contrainte de précédence sous forme de contrainte à satisfaire. En conclusion, les auteurs constatent que la résolution du problème est longue et que des méthodes heuristiques plus efficaces doivent être développées afin d'accélérer la résolution.

Preston et Kozan (2001) ont, quant à eux, développé un algorithme génétique dont le but est de minimiser le temps à quai des navires porte-conteneurs. L'hypothèse de base du modèle est qu'en minimisant le temps d'utilisation moyen de l'équipement du terminal, on minimise le temps à quai des navires. Donc, une situation idéale serait que chaque machine travaille le même nombre d'heures ce qui ferait que la charge de travail serait répartie entre les différents équipements du terminal, ainsi le temps à quai du navire serait minimisé. C'est pourquoi les auteurs ont développé un modèle de localisation des conteneurs qui vise à minimiser les manutentions improductives dans le but de minimiser le temps de travail des équipements. C'est ce modèle qui est résolu à l'aide de l'algorithme génétique. Finalement, les auteurs testent et valident l'algorithme à l'aide d'une simulation qui utilise la méthode développée avec les heuristiques pour l'ordre de chargement des conteneurs sur le navire du PEPS (premier entrée, premier sortie) et du DEPS (dernier entrée, premier sortie) ainsi qu'une règle aléatoire. Pour chacune des règles, 100 essais sont effectués. Les meilleurs résultats pour chaque heuristiques sont comparés et sont tous très similaires, ce qui pousse les auteurs à croire que l'algorithme développé est efficace, peu importe l'heuristique utilisée.

2.4 Planification en temps réel

Le dernier niveau de planification des opérations est la planification en temps réel. Au niveau précédent, la planification opérationnelle, les tâches à effectuer étaient allouées aux ressources du terminal. La planification en temps réel vise maintenant à déterminer la meilleure façon de réaliser cette tâche. Ces décisions se font à des intervalles de temps très courts dus à la nature dynamique des opérations d'un terminal maritime de conteneurs, qui ne permet pas une planification à long terme.

2.4.1 Routage des véhicules de transport automatisé

Les problèmes de routage des véhicules de transport automatisé consistent à affecter les véhicules de transport interne aux tâches de transport à effectuer, de manière à minimiser la distance totale parcourue par les véhicules. La distance totale dépend des transports à vide, des routes affectées aux véhicules et de la congestion du terminal.

Grunow, Günther et Lehmann (2004) proposent un modèle de programmation linéaire à entier multiple qui a pour objectif d'optimiser le déploiement de véhicules guidés automatiquement. La particularité de la méthode est le fait qu'elle considère la partialité de chargement des véhicules (un seul EVP chargé sur une capacité de deux EVP), ce qui en fait une méthode de déploiement « event driven » donc offrant une meilleure possibilité d'adaptation aux changements en temps réel. Par contre, une faiblesse du modèle est sa myopie. On dit de ce modèle qu'il est myope, car les décisions qu'il prend sont basées sur les véhicules, donc que celui-ci considère les tâches à effectuer par rapport à un véhicule disponible et non l'ensemble des véhicules par rapport à l'ensemble des tâches. De plus, les temps de calculs de l'algorithme par un ordinateur sont longs, ce qui rend le système difficilement utilisable dans un environnement réel.

Lim et col. (2003) proposent, quant à eux, un algorithme basé sur un concept de marché. Dans ce type d'algorithme, les tâches à accomplir (transport de A à B) sont des acheteurs et les véhicules sont des vendeurs qui cherchent à maximiser leur profit. L'assignation d'une tâche se fera lorsque le profit sera maximisé, donc que l'écart entre le coût et le prix d'un transport sera le plus grand pour un véhicule, les tâches cherchant quant à elles les véhicules ayant le coût d'opportunité le plus bas. L'avantage de cette méthode est qu'elle corrige la myopie des méthodes basées sur les véhicules ou basées sur les tâches, puisqu'elle considère l'ensemble des tâches par rapport à l'ensemble des véhicules. En effet, un véhicule nouvellement libéré d'une tâche soumet une offre à la tâche lui offrant la marge maximale, celle-ci envoie un avis d'annulation au véhicule qui lui était précédemment assigné si la nouvelle offre possède un coût d'opportunité plus bas. Par contre, de l'aveu des auteurs eux-

mêmes, l'algorithme est difficilement applicable à une situation réelle puisqu'il nécessite des temps de calculs encore trop longs.

Bish et col. (2001) proposent une heuristique en deux étapes pour le routage des véhicules de transport interne du terminal. Selon eux, la taille des terminaux et la complexité des opérations rend le développement d'un modèle complet pratiquement impossible. C'est pourquoi ils décomposent le problème en plusieurs sous-problèmes, soit l'allocation de véhicules aux conteneurs déchargés, l'assignation d'un emplacement dans le terminal à ces conteneurs et la circulation des véhicules dans le terminal. L'algorithme développé vise les deux premiers problèmes. Le principe de l'heuristique est d'assigner une location aux conteneurs en minimisant la distance totale parcourue entre les locations et le navire; pour, ensuite, utiliser un algorithme glouton pour l'allocation des véhicules aux tâches de transport. Les auteurs concluent qu'il est possible de développer des heuristiques efficaces bien que le problème soit compliqué. Par contre, d'autres recherches sont nécessaires afin de rendre le modèle plus réaliste.

Evers et Koppers (1996) présentent une méthode de gestion du trafic des véhicules guidés automatiquement de type décentralisé (distributed traffic control). Ce type de gestion du trafic se fait via le découpage du terminal en plusieurs secteurs, chaque secteur ayant une forme d'intelligence qui lui permet de gérer le trafic. Le modèle est basé sur 4 types d'entité, soit : les noeuds, les liens, les « semaphore » et les secteurs. Les liens représentent les divers chemins sur le terminal, les noeuds représentent les intersections et opérations, les « semaphore » servent à contrôler l'accès à divers endroits sur le terminal afin de régulariser le trafic de la même manière que le fait un feu de circulation, ce sont donc ces entités qui possèdent l'intelligence. Des règles de priorité sont données aux « semaphore » pour gérer le flot de véhicules. Les auteurs testent leur modèle à l'aide d'une simulation et concluent que ce système, par sa décentralisation, diminue la quantité de communications nécessaires, puisque les véhicules envoient les informations sur leur position à un niveau local seulement. De plus, ils concluent aussi que leur système augmentera la capacité du terminal, car il permet à plusieurs véhicules de circuler au même moment à travers les noeuds ou sur les chemins entre les noeuds. Par contre, les résultats de la simulation ne peuvent être utilisés

pour prédire la performance du terminal, puisqu'ils ne tiennent pas compte des délais à la pile.

2.5 Systèmes intelligents dans les ports

Bien que les sections précédentes du chapitre présentent des modèles et simulations qui peuvent constituer la base de systèmes de transport intelligents, ceux-ci peuvent prendre d'autres formes. Cette section présente diverses contributions aux systèmes de transport intelligents provenant d'autres domaines que la recherche opérationnelle et aussi des systèmes d'aide à la décision en cours de développement. Les sujets sont regroupés dans les catégories suivantes : suivi du cargo et de l'équipement, gestion des terminaux, communication et échanges de données et systèmes d'aide à la décision.

2.5.1 Suivi du cargo et de l'équipement

Les systèmes de suivi du cargo combinent l'utilisation d'équipement de collecte de données et de logiciels de traitement de ces données afin d'offrir un suivi en temps réel des opérations de transport.

Dürr et Giannopoulos (2003) proposent le système SITS (Simple Intermodal Tracking and Tracing System). SITS utilise des documents XML (eXtended Markup Language) pour agréger l'information sur le statut de la marchandise transportée, information provenant de sources multiples. Les utilisateurs peuvent accéder au système via Internet et suivre le cheminement de leur marchandise à travers la chaîne de transport intermodal. L'accès à l'information est sécurisé par une identification avec mot de passe qui donne accès à un tableau de bord contenant les données sur la marchandise de l'utilisateur.

Une revue des différentes technologies de l'information et des communications appliquées au domaine du transport est présentée par Giannopoulos (2004). Les technologies utilisées et en voie de développement pour les divers modes de transport ainsi que pour le transport intermodal sont présentées ainsi qu'une ouverture sur les développements pour la décennie à venir.

2.5.2 Gestion des terminaux

La gestion des terminaux maritimes de conteneurs est aujourd'hui supportée par divers systèmes d'informations. Parmi ceux-ci, le principal est le système d'opération du terminal. Celui-ci constitue le système transactionnel utilisé pour l'ensemble des processus administratifs qui supportent les processus opérationnels du terminal. L'information sur ces systèmes provient de deux sources : les sites web commerciaux d'entreprises qui distribuent des produits existants et la littérature scientifique qui présente des systèmes en développement ou en phase conceptuelle. Dans le premier cas, les références incluent les compagnies Navis (<http://www.navis.com/>) et Cosmos (<http://www.cosmosworldwide.com/>).

Le système Navis repose sur une suite de modules qui peuvent être ajoutés au système d'opération du terminal nommé *Sparcs*. Les modules supplémentaires sont *ExpertDecking*, *AutoStow*, *Quay Commander* et *Prime Route*. Le premier est un système d'allocation de position aux conteneurs dans les piles de la zone de stockage du terminal. Le second est un logiciel de planification du chargement des navires. Le troisième effectue l'allocation de grues de quai aux navires et permet de suivre en temps réel l'état des opérations sur les navires. Finalement, le module *Prime route* effectue l'allocation des tâches aux équipements du terminal. Bien que le système Navis permet l'utilisation d'autres logiciels avec le système d'opération du terminal *Sparcs*, l'utilisation des modules avec un système d'opération autre n'est pas possible.

En ce qui concerne le système Cosmos, il est composé de six modules. Ceux-ci peuvent être intégrés entre eux ou avec d'autres systèmes existants. Le cœur du système, qui constitue le système d'opération du terminal, se nomme *CTCS* (*Container terminal control system*). S'ajoute à celui-ci, le module *Ships*, pour la planification du chargement et l'allocation de grues aux navires, le module *Space*, pour la planification de la cour, le module *Traffic*, pour l'allocation des tâches aux équipements, le module *Visual Gate System*, pour l'automatisation de la guérite et le module *E-Terminal*, pour la mise en ligne d'informations opérationnelles sur le terminal. Le but de ce système, comme dans le cas de Navis, est d'informatiser, voir d'automatiser la prise de certaines décisions tactiques et opérationnelles dans les terminaux portuaires de conteneurs.

Le port de Singapour fait figure de pionnier dans le domaine de l'utilisation des systèmes d'informations pour la gestion des opérations portuaires. En effet, le port, qui rivalise avec Hong Kong pour la première place mondiale dans le domaine du conteneur, a été parmi les premiers ports à informatiser ses opérations. À ce sujet, Wan et col. (1992) présentent les différents systèmes développés par le port de Singapour au début des années 90 et les avantages compétitifs qui découlent de ces systèmes. Les deux principaux systèmes développés se nomment PORTNET et CITOS. Dans le premier cas, il s'agit d'un système de commerce électronique complet qui permet l'informatisation des processus depuis la réservation d'un transport de conteneur, jusqu'à la facturation du service. PORTNET inclut aussi les relations avec les organismes gouvernementaux. Dans le second cas, CITOS est un système d'opération du terminal au même titre que les systèmes proposés par Navis et Cosmos. Les fonctionnalités du premier sont semblables à celles des seconds.

Lee-Partridge et col. (2000) dressent un portrait plus récent des systèmes d'information du port de Singapour, avec une emphase sur les facteurs qui ont contribué au succès de ces systèmes, tant dans le développement que dans la mise en place. Les conclusions des auteurs sont que, bien que les considérations techniques aient eu un rôle important dans le succès des systèmes d'informations, les considérations organisationnelles semblent avoir eu un impact important. En effet, les auteurs identifient les facteurs de succès managériaux qui ont été mis en place au port de Singapour. Ces facteurs sont : 1) des investissements en systèmes d'information orientés vers une perspective d'affaire 2) l'alignement du plan stratégique et du plan de développement des systèmes d'information 3) maintenir une structure de systèmes d'information flexible et extensible 4) encourager la créativité et l'innovation en systèmes d'information.

En ce qui a trait aux formes conceptuelles, elles visent principalement l'arrimage des technologies de collectes de données avec des systèmes d'opérations du terminal. Parmi celles-ci, Bozzo et col. (2001) présentent le système MOCONT, qui permettrait d'automatiser les processus d'identification et de localisation des conteneurs. En effet, l'utilisation d'un satellite et d'un système de navigation inerte permet de positionner en temps réel les

conteneurs sur le terminal. De plus, des caméras installées sur les équipements de manutention et liées à un logiciel de reconnaissance optique des caractères permettent d'automatiser l'identification des conteneurs. Le principal avantage de ce système serait d'avoir une vision en temps réel du positionnement des conteneurs, donc d'être en mesure de suivre les déplacements de ceux-ci en tout temps. Cette vision en temps réel permettrait d'obtenir une information optimale pour la prise de décision.

2.5.3 Communication et échange de données

Garstone (1995) présente les avantages de l'utilisation de l'échange de données informatisées (EDI) dans les échanges entre les ports et leurs différents partenaires.

Bien que la communication avec les partenaires externes soit importante, elle doit être complétée par une communication et des flux informationnels internes. Kia et col. (2000) démontrent l'importance de ceux-ci par une simulation qui compare un port utilisant des systèmes intelligents à un port qui n'en utilise pas. Les technologies utilisées dans le port simulé sont : l'identification des conteneurs par micro-ondes, la lecture optique de codes à barres et la reconnaissance électronique de la voix. Les données à la base de la simulation proviennent d'observations effectuées dans des ports de la côte Ouest des Etats-Unis (Los Angeles, Long Beach) et au port de Melbourne en Australie. Les conclusions sont que l'introduction des technologies dans les ports augmente l'efficacité de ceux-ci en diminuant le temps à quai des navires, donc les coûts liés à cette période d'inactivité, en diminuant les heures de salaire à payer et en réduisant le taux d'occupation de la surface d'empilement des conteneurs.

2.5.4 Systèmes d'aide à la décision

Tel que mentionné auparavant, diverses études présentées précédemment peuvent servir de base pour le développement de systèmes de transport intelligents dans les terminaux de conteneurs. Par contre, l'objectif premier de celles-ci n'était pas de constituer un systèmes d'aide à la décision opérationnel, ce que proposent les auteurs suivants.

Murty et col. (2005) proposent une base pour un système d'aide à la décision pour la gestion des opérations quotidiennes d'un terminal. Les auteurs présentent les modèles et les algorithmes utilisés pour le développement du système. Le système repose sur neuf décisions principales : 1) l'allocation de quais aux navires 2) l'allocation de grues de quai aux navires 3) la distribution des rendez-vous pour les camions externes 4) le routage des camions à l'intérieur du terminal (camions internes et externes) 5) la politique de déploiement à la guérite du terminal et aux quais 6) l'assignation d'un espace d'entreposage 7) le déploiement des ponts roulants sur pneumatique 8) l'allocation des camions internes aux grues de quai 9) détermination du nombre optimal de camions internes. Par contre, le système n'est pas encore opérationnel et les auteurs poursuivent le développement.

De leur côté, Henesy et Törnquist (2004) utilisent plutôt une simulation à plusieurs agents (*multi-agents simulation*) pour développer un système d'aide à la décision. L'architecture de la simulation est la suivante : un agent est responsable de la guérite, un autre est responsable de la planification du terminal et un agent est responsable de la planification du chargement des navires. Aux agents précédemment mentionnés, s'ajoutent les agents représentant les divers modes de transport qui interagissent avec le terminal. L'interaction entre l'ensemble de ces agents permet de régulariser les flux internes du terminal en favorisant les échanges à l'intérieur du terminal. Par contre, le système d'aide à la décision développé dans cette étude n'est pas fonctionnel puisqu'il est encore à la phase de conception.

2.6 Conclusion

Tel qu'il a pu être constaté dans ce chapitre, la planification et la gestion des terminaux maritimes de conteneurs impliquent la prise de nombreuses décisions complexes. De plus, la revue de littérature associée à chacun de ces problèmes a présenté divers outils pour traiter ces problèmes. Cependant, avant de traiter l'une ou l'autre de ces problématiques, il importe de bien comprendre le fonctionnement d'un terminal maritime de conteneurs. C'est pourquoi le chapitre suivant présente les différents processus opérationnels d'un terminal maritime de conteneurs.

CHAPITRE III

PROCESSUS D'UN TERMINAL MARITIME DE CONTENEURS

Ce chapitre présente les principaux processus d'un terminal de conteneurs. Les processus sont regroupés selon les différentes zones d'opérations du terminal qui ont été préalablement présentées. La section 3.1 présente les processus de la zone d'opérations portuaires du terminal. Une description des processus de la zone d'opérations terrestres est disponible à la section 3.2. La section 3.3 présente les processus de la zone de stockage du terminal, tandis que la section 3.4 présente les flux d'informations nécessaires à la gestion d'un terminal maritime de conteneurs. Il est important de noter que les sections 3.1 à 3.3 présentent les processus impliquant un mouvement physique des conteneurs, donc qu'ils ne comprennent pas les différentes phases de planification préalables à chacun de ceux-ci, qui ont été présentées dans le chapitre précédent.

Les descriptions des processus présentées dans ce chapitre assument un terminal qui utilise un système de transfert indirect utilisant des ponts roulants sur pneumatiques pour le stockage des conteneurs dans les piles. Cette configuration a été retenue, puisqu'il s'agit de la plus répandue et qu'elle est utilisée dans la majorité des terminaux de la côte Est canadienne qui ont été visités dans le cadre de cette étude. De plus, le terme transmetteur de données sera utilisé pour l'ensemble des descriptions de processus. Ce terme sera utilisé pour représenter l'ensemble des technologies qui peuvent être utilisées pour la transmission de données entre le système d'opération du terminal et des terminaux informatiques manuels. En effet, plusieurs modes de transfert des données existent. Parmi ceux-ci on retrouve notamment l'utilisation de satellites à basse orbite, les transferts de données radios, les lecteurs optiques de codes à barres et les puces RFID actives et passives.

Les symboles utilisés pour représenter les différents types d'activités dans les diagrammes de processus sont présentés dans la figure 3.1.

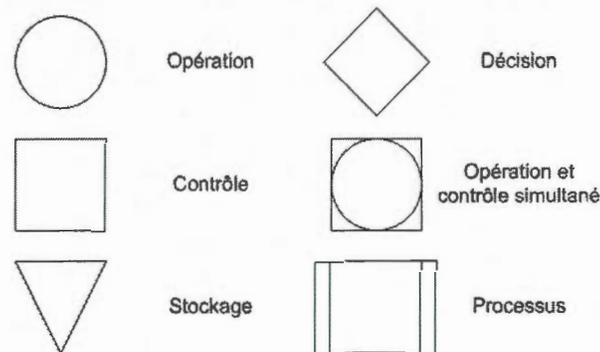


Figure 3.1 Signification des symboles utilisés dans les diagrammes de processus.

3.1 Processus de la zone d'opérations portuaire du terminal

La zone d'opérations portuaires du terminal est la section du terminal où sont effectuées les opérations de chargement et de déchargement des navires et des barges.

3.1.1 Processus de déchargement des navires

La première étape du processus de déchargement est la prise du conteneur par la grue de quai. Une fois le conteneur saisi, la grue le transporte de la cale du navire au quai où il est déposé sur un véhicule de transport interne. Pendant le transfert, un vérificateur situé dans une patte de la grue saisit le numéro du conteneur dans un transmetteur de données. Ainsi, le numéro du conteneur est transmis au système d'opération du terminal qui associe le numéro du conteneur aux informations qui le concerne. Ensuite, la position qui a été assignée au conteneur apparaît à l'écran du transmetteur de données. Le vérificateur indique ensuite la position assignée à l'opérateur du véhicule de transport interne.

Si le conteneur n'a pas à être inspecté, il est transporté jusqu'à la pile, où un pont roulant sur pneumatiques décharge le camion et dépose le conteneur dans la pile. Une fois qu'il est déposé dans la pile, un vérificateur saisit le numéro du conteneur dans un transmetteur de données radios et valide ou corrige la position de celui-ci. Le conteneur restera dans la pile jusqu'à ce qu'un autre processus débute et qu'il soit nécessaire de manutentionner le conteneur.

Par contre, si le conteneur nécessite une inspection, le processus sera différent. Suite au déchargement du conteneur du navire, le camion le transporte jusqu'à la zone d'inspection des douanes. Une fois rendu, le camion est déchargé et le conteneur est déposé sur le sol. Ensuite, deux types d'inspection peuvent être effectués : non intrusives et intrusives (Lewis et al. 2003).

Dans le premier cas, des technologies comme les rayons x, les rayons gamma et les détecteurs de radiations sont utilisées pour inspecter le contenu du conteneur. Une fois l'inspection complétée, il y a deux cheminements possibles pour le conteneur. Si aucune inspection supplémentaire n'est nécessaire, il est chargé sur un véhicule de transport interne et le processus précédemment présenté reprend.

Cependant, il se peut qu'une inspection supplémentaire soit nécessaire. Dans ce cas, les agents des douanes procèdent à une inspection intrusive. Dans ce type d'inspection, le conteneur est ouvert afin d'en inspecter le contenu. Par la suite, si le contenu est jugé légal, le conteneur est chargé sur un véhicule de transport interne et le processus de déchargement reprend. Par contre, si le contenu est jugé illégal, le conteneur est saisi. Il est important de noter que des inspections intrusives peuvent être effectuées sans qu'il y ait d'inspection non intrusive au préalable. La figure 3.2 illustre le processus de déchargement des conteneurs.

Suite aux événements du 11 septembre 2001, la sécurité dans les terminaux de conteneurs est devenue une préoccupation beaucoup plus importante. Certaines des modifications apportées à la réglementation canadienne pourraient avoir un impact important sur les opérations des terminaux de conteneurs. En effet, il sera prochainement obligatoire pour les opérateurs canadiens de terminaux portuaires de faire passer tous les conteneurs par un détecteur de radiations. Dans les cas où des conteneurs afficheront un niveau de radiations trop élevé, le conteneur devra être laissé sur le navire et retourné à son point d'origine. Cette mesure vise à prévenir l'introduction de « bombes sales » par conteneurs.

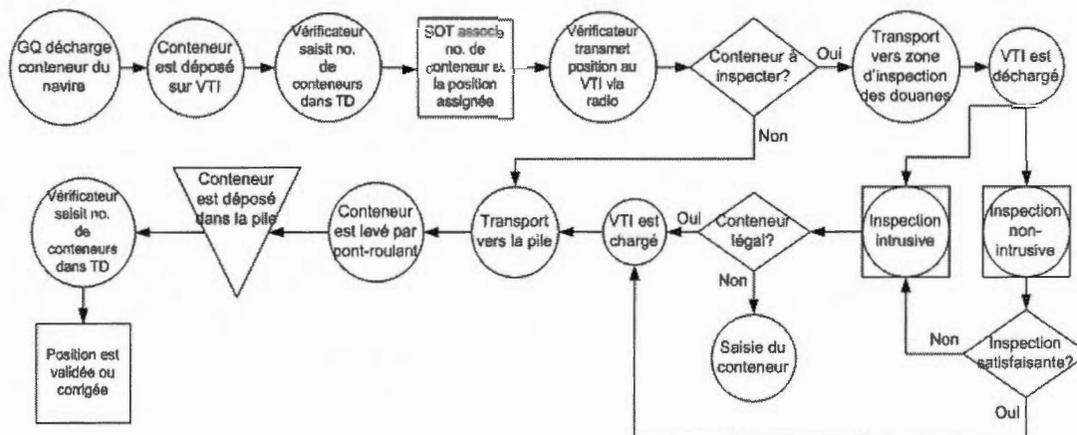


Figure 3.2 Processus de déchargement des conteneurs.

3.1.2 Processus de chargement des conteneurs

Le chargement de conteneurs sur un navire constitue généralement le processus suivant celui de déchargement. En effet, une fois le déchargement des conteneurs importés complété, le cargo à exporter est chargé sur le porte-conteneurs.

Avant que commence le chargement des navires, les planificateurs des opérations du terminal ont établi le plan de chargement et l'ordonnancement des opérations de chargement. Ainsi, une séquence de conteneurs, à charger, a été établie pour les diverses cales du navire. Puisqu'elle est établie à l'aide du système d'opération du terminal, celui-ci contient la séquence.

Le chargement du navire débute à la pile où les conteneurs sont regroupés en bloc. Le système d'opérations du terminal envoie les instructions de chargement à un vérificateur situé près de la pile, à l'opérateur du véhicule de transport interne et à l'opérateur du pont roulant sur pneumatiques. Une fois les instructions reçues, le pont roulant prend le conteneur et le dépose sur le véhicule de transport interne. Par contre, il se peut que le conteneur ne soit pas accessible, car situé sous un autre. Dans ces cas, des manutentions de conteneurs supplémentaires sont nécessaires pour dégager le conteneur désiré.

Une fois le conteneur transféré sur le véhicule de transport interne, ce dernier se dirige vers la grue à laquelle il est assigné et se place dans la file d'attente pour être déchargé par la grue de quai. Celle-ci charge ensuite le conteneur sur le navire à la position assignée. Lorsque le conteneur est dans la file d'attente pour être chargé, un vérificateur, situé dans la patte de la grue et muni d'un transmetteur de données, saisit le numéro du conteneur et valide la position de celui-ci sur le navire. Dans le cas où le conteneur en fil d'attente ne serait pas celui qui est prévu, le système d'opération du terminal vérifiera les caractéristiques du conteneur et acceptera le changement s'il entraîne une modification insignifiante sur le plan de chargement.

Bien qu'il s'avère très rare que cet événement se produise, il se peut qu'une inspection douanière soit nécessaire durant le processus de chargement. En effet, ce processus est exceptionnel puisqu'en général les inspections sur les conteneurs exportés se font avant l'arrivée du navire. Dans ces cas, suite à son chargement près de la pile, le véhicule de transport interne se dirige vers la zone d'inspection des douanes et le conteneur est déchargé pour être inspecté. Le processus d'inspection est le même que dans le cas d'un déchargement de navire. Une fois ce processus terminé, le véhicule de transport interne se dirige vers le navire et le processus de chargement reprend. La figure 3.3 représente ce processus incluant la possibilité d'une inspection durant les opérations.

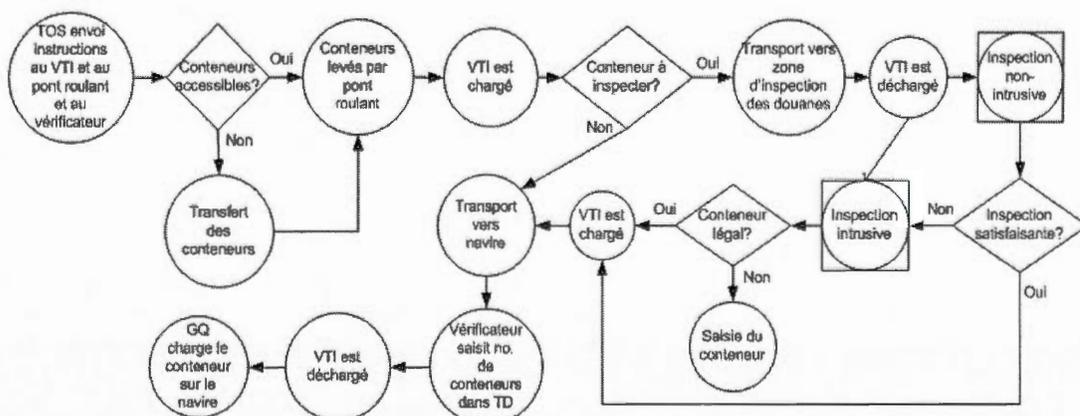


Figure 3.3 Processus de chargement des conteneurs

3.1.3 Processus de réception et de livraison par barges

La zone d'opérations portuaire inclut aussi les opérations de réception et de livraison par barges. Dans ces cas, les processus sont similaires aux processus de chargement et de déchargement des navires. En effet, le processus de livraison par barge est l'équivalent d'un chargement de navire, tandis que le processus de réception par barge est l'équivalent d'un déchargement de navire. Par contre, les opérations sur les barges ne requièrent pas toujours la présence d'agents des douanes, puisque les barges sont aussi utilisées pour le transport régional de conteneurs.

3.2 Processus de la zone d'opérations terrestre du terminal

La zone d'opérations terrestre comprend les opérations de réception et de livraison de deux modes de transport : les trains et les camions.

3.2.1 Processus d'identification des camionneurs et de traitement des opérations de transport routier

Le processus d'identification des camionneurs et de traitement des opérations de transport routier est une étape préalable aux opérations sur les camions. En effet, c'est au cours de ce processus qu'est produite la documentation nécessaire au camionneur pour accéder au terminal.

Ce processus débute lorsque le chauffeur du camion se présente au bureau du terminal. Le chauffeur présente une carte d'identité et une photo est prise. Une fois ces étapes complétées, l'étape suivante consiste à déterminer les besoins de celui-ci.

En général, les camions se présentent au terminal chargé, de manière à maximiser leurs revenus en combinant les opérations de réception et de livraison de conteneurs. Par contre, il arrive qu'un camion vide se présente au terminal. Dans ces cas, la suite des opérations est d'identifier le conteneur à livrer pour créer le reçu de terminal qui donnera accès au terminal et mettra en branle le processus de livraison par camion.

Lorsque le camion se présente au terminal chargé d'un conteneur, la suite des opérations dépend du statut de celui-ci. En effet, il peut s'agir d'un conteneur plein, d'un vide ou d'un retour de douane. Dans le premier cas, le sceau de sécurité est vérifié et une position sur le terminal est assignée au conteneur. Dans le second cas, le conteneur est inspecté afin de s'assurer de son bon état et la position assignée est indiquée au chauffeur. Dans le troisième cas, la documentation, qui accompagne le retour, est validée et une position est assignée. Le statut du conteneur, soit vide, plein ou retour de douane, se retrouve sur le récépissé (*waybill*) du camionneur. Ce document, qui est créé par le transporteur routier, est utilisé dans cette industrie pour décrire le chargement transporté, ainsi que l'origine et la destination de celui-ci.

Une fois ces étapes complétées, il existe deux possibilités pour la suite des opérations. Dans un premier temps, si le camion ne livre pas de conteneur, un reçu de terminal est créé et une copie est remise au chauffeur. Le camion se présente ensuite à la guérite et le processus de réception des conteneurs par camions débute. Dans un deuxième temps, l'autre possibilité est que le camion procédera ensuite à une livraison de conteneur. Dans ce cas, le conteneur à livrer est identifié et un reçu de terminal est créé pour la réception et la livraison des conteneurs. Une fois le reçu complété, le camion se présente à la guérite pour commencer les processus de réception et de livraison. Dans le but de diminuer les transports à vide, les camions vont généralement se présenter au terminal chargé d'un conteneur et quitter le terminal chargé d'un autre conteneur. La figure 3.4 illustre le processus d'identification des camionneurs et de traitement des opérations de transport routier.

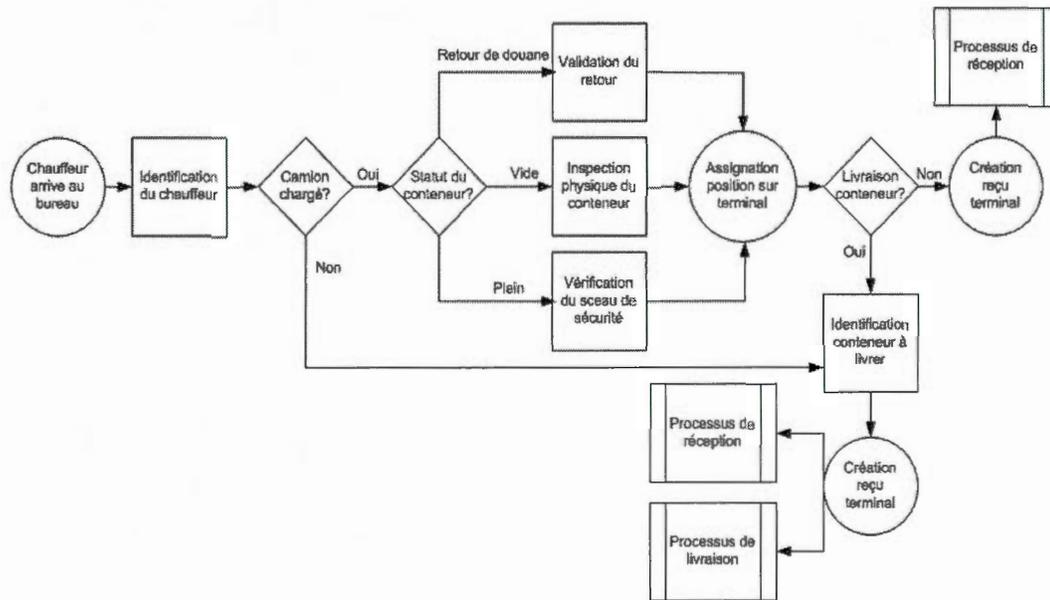


Figure 3.4 Processus d'identification des camionneurs et de traitement des opérations de transport routier

3.2.2 Processus de réception par camion

Le processus de réception par camion est précédé par le processus d'identification des chauffeurs. Une fois celui-ci complété, le camion se présente à la guérite et le processus de réception commence. Ensuite, le reçu de terminal est vérifié. S'il est valide, l'accès est accordé; s'il ne l'est pas, l'accès est refusé et le processus prend fin. Lorsque l'accès est valide, la prochaine étape du processus est le déplacement du camion jusqu'à location assignée au conteneur. Le camion est ensuite déchargé par un pont roulant sur pneumatiques et le conteneur est déposé dans la pile. Un vérificateur saisit le numéro du conteneur sur un transmetteur de données et valide ou corrige la position de celui-ci.

La livraison ou non d'un conteneur par le camion influence la suite du processus. Si oui, le processus de réception prend fin et le processus de livraison débute; si non, le camion retourne à la guérite, le chauffeur signe le reçu de terminal et le camion quitte. Le processus de réception par camion et les différentes possibilités qu'il comporte sont illustrées par la figure 3.5.

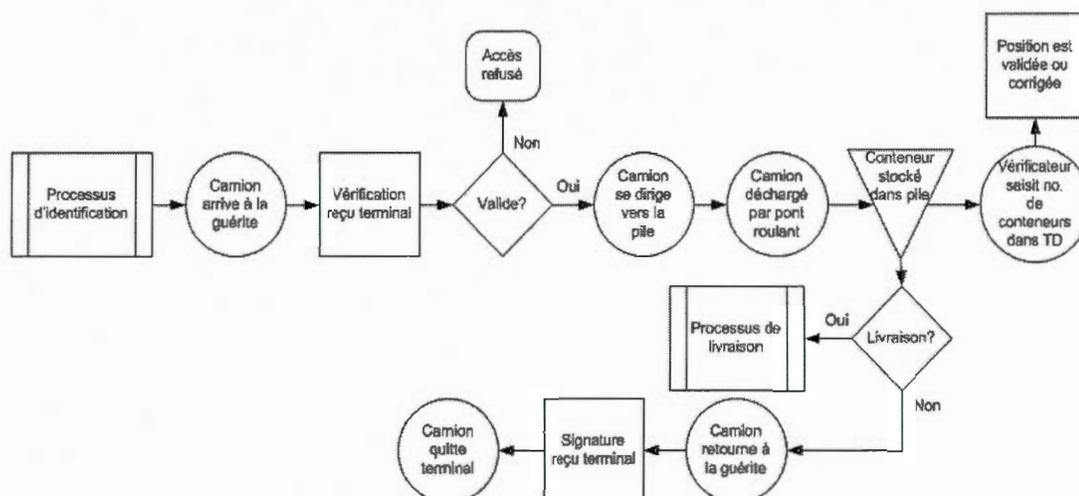


Figure 3.5 Processus de réception des conteneurs par camion

3.2.3 Processus de livraison par camion

Le processus de livraison d'un conteneur par camion est toujours précédé du processus de réception ou du processus d'identification des chauffeurs. Par contre, la première possibilité est plus fréquente que la seconde.

Lorsque le camion s'est présenté vide à la guérite du terminal, le chauffeur doit présenter le reçu de terminal issu du processus d'identification. Si le reçu est valide, l'accès est accordé au chauffeur. Dans le cas contraire, l'accès est refusé et le processus prend fin. La suite du processus est la même, peu importe la provenance du camion.

Lorsque l'accès au terminal a été accordé ou lorsque le processus de réception est complété, le camion se dirige vers la pile où est situé le conteneur. Une fois rendu, un pont roulant sur pneumatiques prend le conteneur et le dépose sur le camion. Il est possible que le conteneur ne soit pas accessible. Dans ce cas, des manutentions supplémentaires doivent être effectuées afin de dégager le conteneur désiré.

L'étape suivant le chargement du camion est le retour de celui-ci à la guérite du terminal. Ensuite, un vérificateur et la sécurité du terminal vérifient que le numéro de conteneur et ce qui est inscrit sur le reçu concordent. S'il y a concordance, le chauffeur signe le reçu et quitte

le terminal, le cas contraire entraîne un retour à la pile pour corriger la situation. La figure 3.6 représente le processus de livraison par camion.

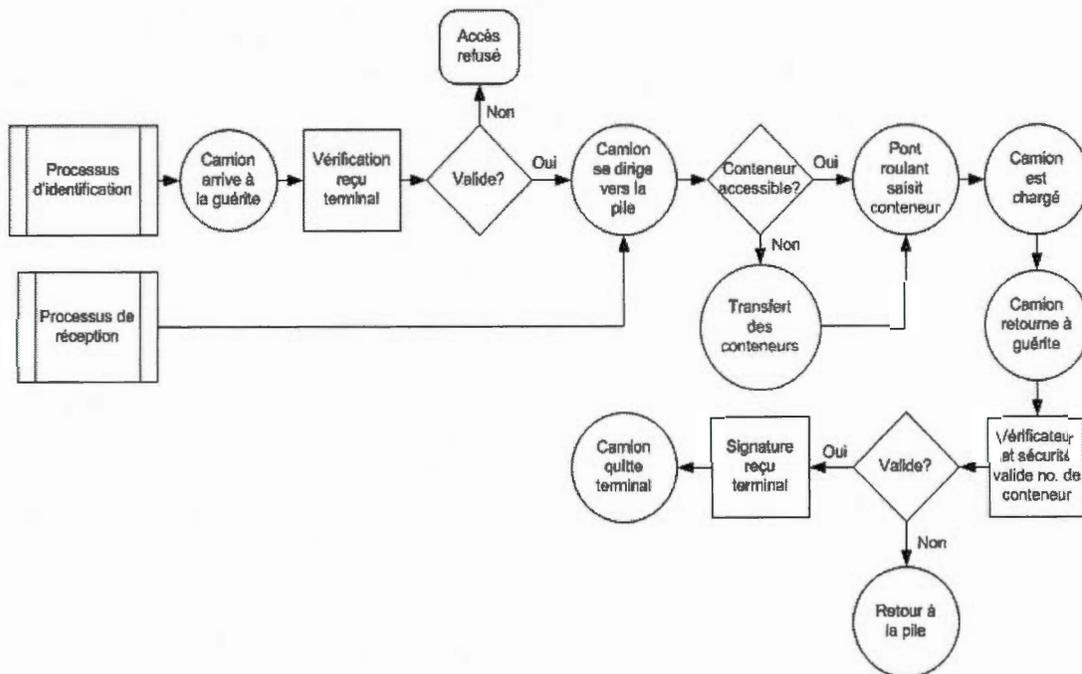


Figure 3.6 Processus de livraison des conteneurs par camions.

3.2.4 Processus de réception par train

La réception de conteneur peut aussi s'effectuer par train. Dans ces cas, le processus débute par l'envoi d'une note d'arrivée au terminal provenant du transporteur ferroviaire. Dans les cas où la capacité des voies ferrés du terminal est inférieure à la longueur des blocs de wagons, le terminal doit ensuite établir l'ordre de priorité des blocs de wagons à pousser sur le terminal. Avant l'arrivée des trains sur le terminal, les planificateurs de ce dernier doivent établir la répartition des trains sur les voies ferrées du terminal.

Une fois les wagons rendus sur le terminal, un vérificateur saisit les numéros de conteneur à l'aide d'un transmetteur de données. Le système d'opération du terminal associe ensuite les numéros de conteneurs avec leurs informations respectives, ce qui permet aux planificateurs

du terminal d'établir la séquence d'opérations pour le déchargement des wagons. Par la suite, une position sur le terminal est assignée aux conteneurs pour l'entreposage.

Le système d'opération du terminal envoie ensuite la séquence d'opération préalablement établie au pont roulant sur pneumatiques. Ce dernier procède alors au déchargement des conteneurs. Lorsqu'un conteneur est déchargé, il est déposé sur un véhicule de transport interne. L'opérateur de celui-ci procède ensuite à un appel radio du numéro, afin de connaître la position qui lui a été assignée sur le terminal. Le vérificateur saisit le numéro dans un transmetteur de données, ce qui permet au système d'opération du terminal d'associer le numéro de conteneur à la position qui lui a été assignée. Le vérificateur indique ensuite à l'opérateur du véhicule de transport interne la position et celui-ci se dirige vers cet emplacement. À son arrivée à la pile, le conteneur est saisi par un pont roulant qui le dépose dans la pile. Un vérificateur, situé près de celle-ci, saisit le numéro du conteneur dans son transmetteur de données et valide ou corrige la position de celui-ci. Le processus de réception des conteneurs par train est schématisé sur la figure 3.7.

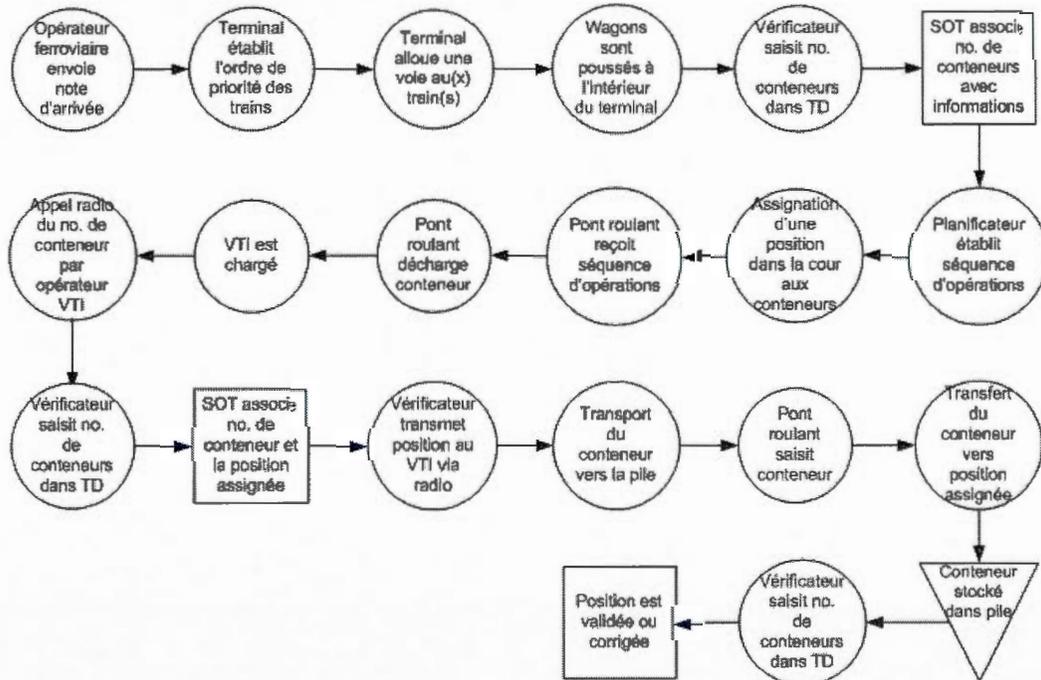


Figure 3.7 Processus de réception des conteneurs par train

3.2.5 Processus de livraison par train

Le train constitue un autre mode de transport pour la livraison des conteneurs importés. Ce processus de livraison diffère de celui par camion puisque les trains ne possèdent pas l'autonomie de mouvement des camions, ce qui implique qu'ils doivent être chargés dans une section dédiée du terminal. Ce processus suit généralement la réception de conteneurs par train. En de très occasions seulement, les wagons utilisés pour la livraison ne proviendront pas du processus de réception.

La première étape du processus de livraison est l'identification des conteneurs prioritaires par le planificateur. Ces conteneurs ont été préalablement identifiés par la ligne de transport maritime et constituent généralement les conteneurs dont la date de livraison est la plus rapprochée. Une fois ces conteneurs identifiés, le planificateur crée le plan de chargement et crée, ensuite, la séquence de travail. Cette séquence est envoyée au vérificateur qui la reçoit sur son transmetteur de données.

Par la suite, le vérificateur informe les opérateurs du pont roulant travaillant sur la pile et du véhicule de transport interne de la position du conteneur, afin qu'il soit chargé sur le véhicule. Dans certains cas, il arrive que le conteneur ne soit pas accessible, ce qui nécessite un transfert de conteneur afin d'extraire celui qui doit être chargé. Un transfert de conteneur entraîne une ou des modifications de position, qui doivent être corrigées par le vérificateur afin d'éviter des erreurs de location dans le système d'opération du terminal.

Une fois que le véhicule de transport interne est chargé, le vérificateur transmet la position du conteneur sur le train, qui lui a été assigné lors de la création du plan de chargement, aux opérateurs du véhicule de transport interne et du pont roulant qui travaille sur le train. Le conteneur est ensuite transporté vers le train, où le pont roulant le décharge du camion et le transfère sur le train.

Lorsque le chargement du train est complété, un vérificateur muni d'un transmetteur de données saisit les numéros de conteneurs et de wagons afin de valider le chargement. La validation est effectuée par le planificateur et lorsqu'elle est complétée, le plan de chargement

est envoyé au transporteur ferroviaire par échange de données informatisées. De plus, une liste indiquant les conteneurs chargés est envoyée aux lignes maritimes. Par contre, cette liste n'est pas la même pour toutes les lignes maritimes, puisqu'elle ne révèle pas les conteneurs des compétiteurs, mais seulement leurs conteneurs. La figure 3.8 représente le processus de livraison par train.

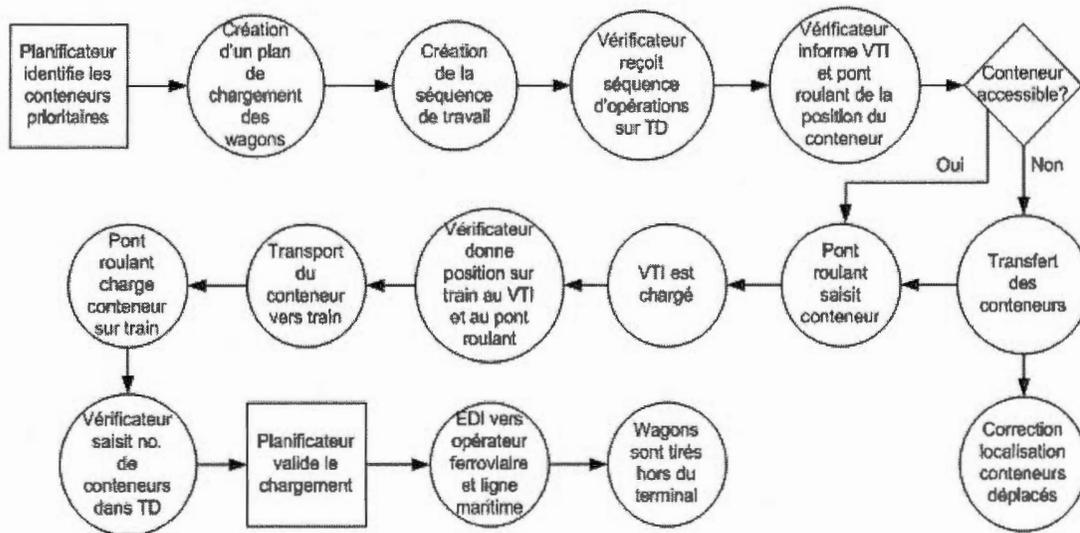


Figure 3.8 Processus de livraison par train.

3.3 Processus de la zone de stockage du terminal

La zone de stockage du terminal est la section du terminal où sont entreposés les conteneurs. L'ordre d'entrée et de sortie des conteneurs étant inconnue et difficilement prévisible, des remaniements de conteneurs peuvent être nécessaires pour accéder à d'autres conteneurs. (Pour une représentation graphique du phénomène, voir la figure 1.8 du chapitre 1.)

3.3.1 Processus de remaniement de conteneurs

Tel qu'il a été vu dans les processus précédents, des remaniements peuvent se produire au cours de ces processus pour avoir accès au conteneur nécessaires. Dans le cas présent, il s'agit d'un processus de remaniement des conteneurs avant l'arrivée d'un navire. Ces remaniements sont parfois nécessaires afin de libérer de l'espace de stockage pour les conteneurs du prochain navire. Par contre, les opérateurs de terminaux maritimes tentent de

les minimiser puisqu'ils représentent des mouvements improductifs et qu'ils monopolisent les équipements nécessaires aux autres processus du terminal.

La première étape du processus de remaniement est d'identifier les conteneurs qui doivent être déplacés. Ensuite, une séquence d'opération est établie par un planificateur du terminal. Une fois la liste créée, elle apparaît sur le transmetteur de données d'un vérificateur. Ce dernier indique ensuite à l'opérateur du pont roulant le conteneur à déplacer. Le conteneur est ensuite extrait de la pile et déposé sur un véhicule de transport interne. Le vérificateur indique la nouvelle localisation du conteneur au conducteur du véhicule et celui-ci transporte le conteneur à cette localisation, où il est saisi par un pont roulant et déposé dans la pile. Une fois que le conteneur est dans la pile, un vérificateur saisi le numéro de la boîte à l'aide d'un transmetteur de données et corrige la position du conteneur afin de mettre à jour les données du système d'opération du terminal. La figure 3.9 illustre le processus de remaniement des conteneurs.

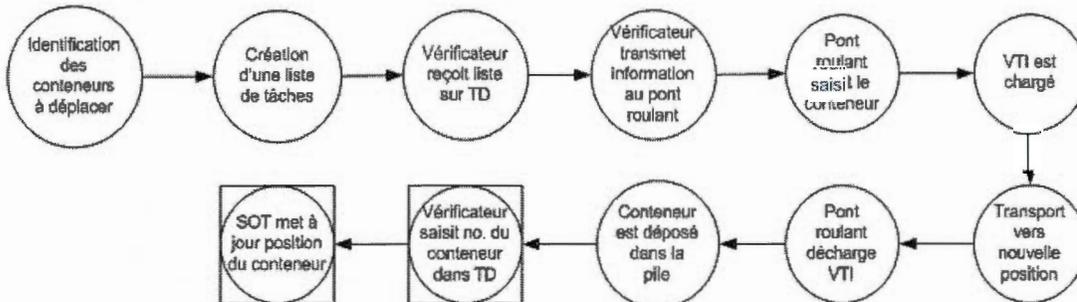


Figure 3.9 Processus de remaniement des conteneurs.

3.4 Flux d'informations

Les processus d'un terminal de conteneurs sont supportés par une multitude de flux d'informations qui incluent plusieurs intervenants. Afin de comprendre ces flux, cette section présente les flux en amont du terminal, depuis la vente du service de transport par la ligne maritime, et en aval, jusqu'à la réception de la liste de conteneurs chargés sur le navire par le terminal de destination de ce dernier.

3.4.1 Flux d'informations en amont du terminal

Les flux d'informations débutent avec l'offre de service du département de vente de la ligne maritime. Lorsque le client accepte le prix proposé, il doit ensuite effectuer une réservation en fonction de la date de départ d'un navire et de la destination choisie.

Les clients peuvent effectuer leur réservation de plusieurs façons. La première est via téléphone avec un employé de la ligne maritime. Ce dernier entre la réservation au système d'information de l'entreprise en obtenant les informations du client. La seconde façon est par l'envoi d'un courrier électronique à la ligne maritime qui inclut les informations sur la réservation. Une troisième voie peut être utilisée par les clients, il s'agit d'utiliser un système de réservation en ligne. Parmi les systèmes existants, on retrouve le système INTTRA qui a été développé par un consortium comprenant plusieurs lignes maritimes. Les systèmes de réservation en ligne permettent aux clients d'effectuer une demande de réservation en ligne. Par contre, le succès de la réservation en ligne demeure mitigé. En effet, les clients sont réticents à utiliser ce système puisqu'il ne permet pas de confirmer la réservation, mais seulement d'effectuer une demande, la confirmation venant plus tard de la ligne maritime.

Une fois la réservation faite, la ligne maritime envoie à l'expéditeur, une confirmation qui contient l'ensemble des informations concernant la réservation. De plus, ces informations sont envoyées au terminal maritime et/ou au transporteur ferroviaire via EDI. Si la ligne maritime coordonne la cueillette du conteneur vide, elle devra engager un transporteur routier pour cueillir le conteneur vide et le livrer chez l'expéditeur.

À ce point, l'information finale n'est pas connue, il s'agit donc de l'information nécessaire à la coordination de la cueillette du conteneur vide pour le livrer chez le client et ensuite le livrer au terminal maritime pour le chargement sur le navire.

Pour la cueillette du conteneur vide, deux possibilités s'offrent à l'expéditeur; donner la tâche à la ligne maritime d'organiser la cueillette et la livraison au point de chargement du conteneur, ou effectuer elle-même les arrangements. Dans le premier cas, c'est la ligne

maritime qui s'occupera de coordonner l'ensemble des opérations jusqu'à la livraison au terminal maritime.

Une fois que le conteneur est prêt à être livré au terminal, le transporteur routier ou ferroviaire envoie les informations concernant le conteneur au terminal qui peut ainsi comparer les informations envoyées par ces derniers et les informations en provenance de la ligne maritime.

3.4.2 Flux d'informations en aval du terminal

Les flux d'informations en aval du terminal ont pour objectif de coordonner la suite des opérations de livraison des conteneurs aux destinataires finaux. La majorité de ces informations constituent des informations en amont pour le prochain terminal visité par le porte-conteneurs.

Trois jours ouvrables après le départ du navire du terminal, ce dernier doit « fermer le navire », c'est-à-dire qu'il doit confirmer le plan de chargement final et l'envoyer à la ligne maritime et au terminal de destination du navire. Ce processus de fermeture du navire est très important, puisqu'il permet de confirmer la liste de chargement du navire en éliminant les conteneurs qui n'ont pu être chargés sur le navire. Dans les cas où le terminal de destination est un terminal de transbordement, ces derniers peuvent envoyer l'information au terminal de destination finale du navire.

Cette information est nécessaire afin que le terminal de destination, qu'il soit un centre de transbordement ou non, puisse effectuer une planification de la cour qui permettra de trier les conteneurs selon diverses caractéristiques.

Pour le transport transatlantique, le terminal de destination reçoit généralement l'information 3 jours ouvrables avant l'arrivée du navire. Par contre, dû au temps de transit de 7 jours et au week-end, il se peut que les informations soient reçues seulement 48 heures avant l'arrivée du navire.

Les informations concernant la progression du navire sont transmises par le capitaine de celui-ci à la ligne maritime propriétaire du navire quotidiennement. De cette façon, les différents intervenants concernés peuvent être tenus au courant de l'évolution du navire.

3.5 Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif de détailler les divers processus d'un terminal maritime de conteneurs. Tel que mentionné en introduction du chapitre, ces processus ont été établis à partir d'observations effectuées dans des ports de la côte Est canadienne. Bien que les niveaux d'activité des différents ports de cette région ne sont pas comparables à ceux des plus grands ports du monde, il reste que la complexité inhérente à la planification et à la gestion des opérations est aussi présente dans ces ports. Donc, les ports de la côte Est canadienne peuvent aussi bénéficier de l'utilisation d'outils d'aide à la décision. Dans le but de positionner les ports canadiens par rapport aux ports du reste du monde en ce qui a trait à l'utilisation de ces outils, le chapitre suivant présente une analyse comparative entre les deux groupes de ports.

CHAPITRE IV

ANALYSE COMPARATIVE DE L'UTILISATION DES SYSTÈMES DE TRANSPORT INTELLIGENTS ENTRE LES PORTS DE LA CÔTE EST CANADIENNE ET LES PORTS DU RESTE DU MONDE

Les chapitres précédents ont démontré les défis et enjeux avec lesquels les terminaux maritimes de conteneurs doivent composer. À partir de ceux-ci, il peut être conclu qu'il y a un besoin de technologies de gestion de l'information et d'aide à la décision pour relever et gérer ces défis et enjeux. Les systèmes de transport intelligents (STI) répondent à ce besoin et peuvent fournir ces technologies aux terminaux portuaires de conteneurs. Plusieurs terminaux importants ont mis en place des systèmes de transport intelligents à des degrés divers d'avancement. Cependant, où en sont les terminaux de la côte Est canadienne dans leur intégration de ces technologies?

Ce chapitre a donc pour objectif de comparer l'état d'avancement des ports de la côte Est canadienne avec les ports les plus importants du reste du monde, quant à l'utilisation des systèmes de transport intelligents. Pour ce faire, le chapitre est organisé comme suit : la section 4.1 précise la notion de systèmes de transport intelligents, en 4.2, la méthodologie utilisée pour cette analyse est détaillée, tandis que la section 4.3 présente différentes formes de STI implantées dans des terminaux portuaires de conteneurs. Les STI présentés au sein de la section 4.3 sont regroupés en trois groupes, soit les STI internes, les STI appliqués aux relations avec les partenaires et les STI utilisés à des fins de sécurité. En se basant sur ces systèmes existants, la section 4.4 explore des STI potentiels qui pourraient être développés, dans un avenir proche. Avant de présenter l'état d'avancement des STI dans les ports de la côte Est canadienne, la section 4.5 met en contexte les ports concernés par l'analyse. En 4.6, les systèmes de transport intelligents utilisés dans les ports de cette région sont présentés et un portrait de la situation dans les autres ports canadiens et dans les ports américains est présenté. Finalement, la section 4.7 présente des opportunités s'offrant aux ports de la côte

Est canadienne et le rôle que peuvent jouer les STI dans l'appropriation de ces opportunités. Le chapitre se termine avec une brève conclusion en 4.8.

4.1 Systèmes de transport intelligents

Tout d'abord, il importe de définir qu'est-ce qu'un système de transport intelligent. Plusieurs définitions existent, parmi celles-ci, l'organisme STI Canada retient la suivante : « L'application des technologies avancées et émergentes (ordinateurs, capteurs, commande, communication et dispositifs électroniques) dans le transport pour sauver des vies, du temps, de l'argent, de l'énergie et l'environnement. » De son côté, l'organisme ITS America retient celle-ci : « Les systèmes de transport intelligents comprennent un large éventail de technologies de l'information, de la communication et de commande, ainsi que des dispositifs électroniques. Lorsque appliquées à l'infrastructure de transport ou aux véhicules eux-mêmes, ces technologies permettent de suivre et de gérer les flux de trafic, de réduire la congestion, de fournir des routes alternatives aux voyageurs, d'augmenter la productivité et sauver des vies, du temps et de l'argent. »

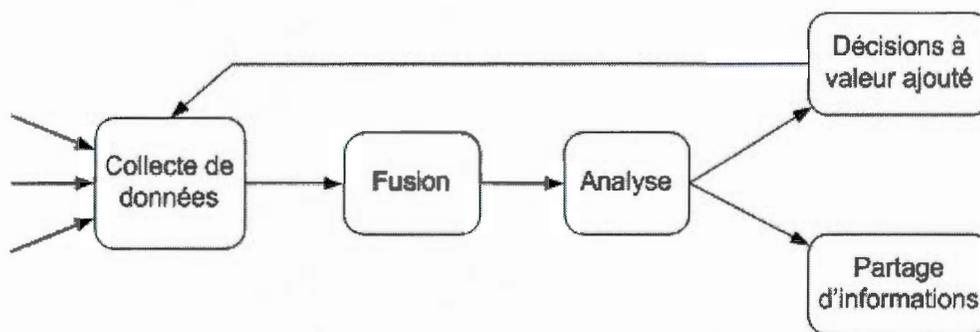


Figure 4.1 Modèle de traitement des données d'un système de transport intelligent (adapté de Crainic 2006)

La figure 4.1 présente le modèle de traitement des données, par un STI, retenu par Crainic (2006). Ce modèle représente le traitement des données d'un STI appliqué à un opérateur privé, comparativement à un STI public. Ce dernier type d'applications de STI ne sera pas considéré, afin de limiter l'envergure de l'étude. La première étape consiste à la collecte des données nécessaires à la prise de décision. Ces données peuvent provenir de sources diverses et multiples. Les données sont ensuite fusionnées afin de les organiser, de les nettoyer et de

les valider. Les données fusionnées sont analysées ce qui permet la prise de décisions à valeur ajoutée et/ou le partage d'informations. Dans le but de rendre le système dynamique, les résultats issus du processus d'analyse peuvent être réutilisés comme intrant au système.

Tel qu'il peut être constaté, ce modèle sous-tend l'existence de deux types de technologies au sein de ces systèmes, soit les technologies matérielles (*hardware*) et les technologies logicielles (*software*). Du côté des technologies matérielles, on retrouve, entre autres, les systèmes de positionnement global (*GPS*), l'échange de données informatisées (EDI), les systèmes de suivi des véhicules et du cargo, la communication bidirectionnelle ainsi qu'une panoplie de systèmes informatiques montés à bord des véhicules. L'ensemble de ces systèmes s'adresse principalement au premier bloc du modèle de traitement des données, soit la collecte de données, et à la diffusion des informations vers les différents partenaires de l'entreprise. Du côté des technologies logicielles, on retrouve notamment les modèles d'optimisation, la simulation et l'analyse statistique. Ce sont principalement ces outils qui sont utilisés pour la fusion et l'analyse des données desquels découlent les décisions à valeur ajoutée.

Les STI dédiés au transport de marchandises sont traditionnellement regroupés au sein de deux grands groupes : les systèmes avancés pour l'opération des véhicules commerciaux (*Commercial Vehicle Operations*) et les systèmes avancés pour la gestion de flottes (*Advanced Fleet Management Systems*) (Crainic, Gendreau 2004).

Les systèmes avancés pour l'opération des véhicules commerciaux se retrouvent au niveau institutionnel. Ils visent à améliorer la performance des infrastructures de transport et des postes douaniers ainsi qu'à automatiser et simplifier les contrôles gouvernementaux sur les opérations de transport de marchandises. Pour ce faire, ces systèmes utilisent entre autres les systèmes de suivi des véhicules et du cargo, la communication bidirectionnelle et l'échange de données informatisées.

Les systèmes avancés pour la gestion de flottes, de leur côté, se retrouvent au niveau privé, donc au niveau de l'opérateur. L'objectif de ces systèmes est de fournir de l'information en

temps réel sur les différents véhicules de la flotte, afin de centraliser l'information et de l'utiliser pour la planification et la gestion des activités du transporteur. Ainsi, l'opérateur de la flotte est en mesure d'obtenir une allocation et une utilisation efficiente de la flotte, ainsi que la satisfaction des besoins de sa clientèle. Les systèmes utilisés pour les systèmes avancés de gestion de la flotte sont généralement les mêmes que dans le cas des systèmes avancés pour l'opération des véhicules commerciaux, mais incluent une part plus importante d'aide à la décision.

4.2 Méthodologie

Tel que mentionné dans le titre, ce chapitre a pour objectif de dresser un portrait de l'état d'avancement de l'utilisation des systèmes de transport intelligents entre les ports de la côte Est canadienne et les ports du reste du monde. L'objectif est de déterminer le niveau d'intégration des systèmes de transport intelligents de ces ports, pour ensuite identifier des opportunités d'utilisation de ces systèmes pour les ports de la côte Est canadienne.

Afin de dresser ce portrait, il est nécessaire de définir le point de comparaison utilisé pour évaluer le niveau d'intégration des systèmes de transport intelligents par les ports de la côte Est canadienne. Ce point de comparaison est donc constitué des informations provenant de la revue de littérature effectuée au deuxième chapitre de ce document, ainsi que des informations qui ont pu être recueillies sur les sites web des ports internationaux manutentionnant de grands volumes de conteneurs. Ces ports incluent notamment les ports de Hong Kong, Singapour, Rotterdam, Hambourg, Anvers, Kaoshiung et Pusan. Ils ont été choisis, puisqu'il s'agit des ports qui manutentionnent les volumes annuels de conteneurs les plus importants, ce qui en fait les ports les plus susceptibles de mettre en place des STI dû à la complexité provenant de la gestion de ces volumes importants de conteneurs. Les différents systèmes de transport intelligents utilisés par ces ports ont été relevés pour constituer une liste d'applications possibles de STI dans les ports. Donc, les systèmes relevés ne sont pas nécessairement implantés dans l'ensemble des ports du groupe, mais plutôt une accumulation des systèmes relevés afin de construire un point de référence utilisant les meilleures pratiques dans le domaine.

Quant aux données sur les terminaux de conteneurs de la côte Est canadienne, qui seront présentées ultérieurement, elles proviennent de visites aux différents terminaux des ports de Montréal et Halifax et de discussion avec les dirigeants de ces terminaux. De plus, des informations sur le port de Vancouver ont été amassées à partir de la littérature afin de ne pas négliger ce port qui manutentionne le volume de conteneurs le plus important au Canada. Par contre, puisqu'il n'a pas été possible de visiter ce port, ni de rencontrer les dirigeants des compagnies qui y opèrent les terminaux de manutention de conteneurs, l'analyse ne sera pas la même pour le port de Vancouver.

4.3 Les systèmes de transport intelligents dans les terminaux portuaires de conteneurs

Une fois les STI définis, une question peut être soulevée : Pourquoi appliquer les STI aux terminaux portuaires de conteneurs? L'utilité des STI provient des divers enjeux inhérents à la planification et à la gestion de ces terminaux. En effet, tel qu'il a été constaté dans le chapitre II, la gestion d'un terminal implique la prise de nombreuses décisions complexes et la gestion d'une quantité importante d'informations. De plus, la congestion croissante des terminaux ainsi que l'incertitude liée à la planification et la gestion des terminaux maritimes de conteneurs ajoutent à cette complexité. À partir de ces constatations, il peut être conclu qu'il y a un besoin de technologies pour assister les gestionnaires dans la prise de décisions et la gestion de l'information, afin de coordonner les opérations de ces terminaux. L'application des STI aux terminaux maritimes de conteneurs constitue une réponse à ce besoin. Cette section vise à présenter les formes que peuvent prendre les STI dans les terminaux portuaires de conteneurs.

Les applications de STI dans les terminaux portuaires de conteneurs peuvent être regroupées en deux principaux groupes : les systèmes internes du terminal et les systèmes de communication et collaboration avec les partenaires. À l'intérieur de ces deux groupes, les systèmes peuvent être classés selon leur utilisation, d'une part pour la collecte et la distribution de l'information, d'autre part pour la gestion des opérations. À ces deux groupes, un autre peut être ajouté, soit l'automatisation des opérations physiques du terminal.

Finalement, bien que la sécurité dans les ports ne constitue pas le sujet principal de cette étude, l'utilisation des STI pour la gestion de la sécurité dans les ports sera traitée à la fin de cette section du chapitre.

4.3.1 Les systèmes de transport intelligents à l'intérieur des terminaux maritimes de conteneurs

À l'intérieur des terminaux, les STI sont utilisés pour gérer les flux de conteneurs entre les différentes sections du terminal et entre les différents modes de transport.

4.3.1.1 Collecte et distribution de l'information

L'application de systèmes de transport intelligents pour la collecte et la distribution de l'information à l'intérieur des terminaux maritimes de conteneurs repose principalement sur les technologies matérielles de ces systèmes, bien que certains systèmes comprennent une composante logicielle.

Parmi celles-ci, une forme grandement répandue de ces technologies, est l'utilisation de systèmes de communications informatiques portables. Ceux-ci consistent en un terminal informatique relié au système d'opérations du terminal qui permet aux employés d'avoir un accès à distance aux informations sur un conteneur. Généralement, ces appareils sont constitués d'un écran pour afficher les données et d'un clavier pour saisir les numéros de conteneurs, le tout contenu dans un boîtier muni d'une poignée qui permet de le tenir à une seule main. La transmission des données peut être effectuée via plusieurs modes de communication, bien que le plus répandue soit l'utilisation de fréquences radios.

Dans le même ordre d'idée, des systèmes de communications bidirectionnelles peuvent être installés à l'intérieur des équipements de manutention du terminal. Ces systèmes consistent en un appareil semblable aux systèmes de communications informatiques portables, mais qui est incorporé à l'intérieur de la cabine de l'opérateur de l'équipement de manutention. Ces systèmes sont généralement utilisés pour communiquer les tâches à effectuer aux opérateurs.

Une autre technologie de collecte de données est l'utilisation de la reconnaissance optique de caractères. Cette technologie combine l'utilisation de photographies numériques et de logiciels de reconnaissance des caractères. Le principe de ces systèmes consiste à prendre une photo du numéro de conteneur pour ensuite l'identifier à l'aide du logiciel de reconnaissance des caractères. Le numéro peut ensuite être utilisé par le système d'opération du terminal pour la suite du processus en cours. La reconnaissance optique de caractères peut être utilisée en incorporant des caméras sur les équipements du terminal et/ou en construisant des portails au travers desquels les camions doivent circuler. Cette dernière possibilité est utilisée pour l'automatisation des opérations de la guérite du terminal.

Les systèmes de positionnement mondial différentiel (*differential global positioning system*) peuvent être utilisés pour le suivi des équipements d'un terminal maritime de conteneurs. Ces systèmes utilisent cette technologie pour effectuer un suivi en temps réel des déplacements des équipements et pour recueillir des informations sur des indicateurs prédéfinis.

Des puces ou des sceaux intelligents peuvent aussi être utilisés pour la collecte d'informations sur les conteneurs. En effet, ces puces utilisent des fréquences radios pour transmettre les informations qu'elles contiennent. Deux types de puces sont répertoriés : les puces actives et les puces passives. Dans le premier cas, la puce émet des fréquences qui peuvent être captées par une antenne située sur le terminal et transmises au système d'opérations du terminal; tandis que, dans le second cas, la puce agit plutôt comme un réflecteur qui renvoie les informations sur le conteneur lorsque placée à l'intérieur d'une certaine distance d'un émetteur. Par contre, il importe de mentionner que la mise en place d'un tel système ne dépend pas seulement de la volonté du terminal, puisque les puces doivent être en place sur les conteneurs avant qu'un terminal puisse les utiliser. Bien qu'elles ne soient pas utilisées à l'heure actuelle, ces technologies progressent rapidement. Un des principaux freins à la mise en place de ces puces est l'inexistence d'un standard commun pour la transmission et la réception des données. Cette situation pourrait être appelée à changer prochainement puisque les puces et les sceaux intelligents sont vus comme un outil efficace pour garantir l'intégrité du chargement. En effet, la puce ou le sceau, lorsqu'installé

sur le mécanisme d'ouverture des portes du conteneur, enregistre tout ouverture du conteneur ainsi que le moment auquel il a été ouvert.

Finalement, en termes de transport de l'information entre les outils de collecte de données et le système d'opération du terminal, il existe diverses technologies. Parmi celles-ci, l'utilisation des fréquences radios est grandement répandue, puisqu'elle ne nécessite pas une importante implantation d'équipements de communication. Les câbles de fibres optiques combinés à l'utilisation de réseaux locaux sans fil (*Wi-Fi*) constituent aussi un mode de transport de l'information. Par contre, l'implantation d'un tel système, dans un terminal maritime de conteneurs, nécessite des travaux importants afin d'enfouir les fils sous le pavé.

4.3.1.2 Gestion des opérations

Les technologies présentées préalablement étaient axées vers la collecte et la distribution de l'information. Par contre, afin de retirer le maximum de ces informations, celles-ci doivent être traitées. C'est en traitant les informations que des systèmes d'aide à la décision peuvent être développés. Les types de STI seront d'abord présentés selon le niveau d'intelligence qu'ils comprennent. Ensuite, ils seront présentés selon l'approche utilisée, soit une approche globale ou une approche modulaire.

Plusieurs niveaux d'aide à la décision existent. La forme prise par le STI variera selon le niveau d'aide à la décision utilisé. Le premier niveau consiste à la prise de décisions avec de l'information brute. À ce niveau, les STI affichent l'information provenant des outils de collecte et de distribution sans qu'aucun traitement ne soit effectué. Cette information peut prendre deux formes, soit en lot ou en temps réel. La première forme sera surtout utilisée pour la prise de décisions tactiques, tandis que la seconde sera surtout utilisée pour la prise de décisions opérationnelles et en temps réel.

Une première forme de traitement consiste à agréger l'information afin d'offrir aux gestionnaires du terminal, un tableau de bord des opérations. Bien que, dans leur plus simple expression, ces systèmes ne font que présenter l'information agrégée, ils permettent la prise de décision avec une information plus complète. L'utilisation de tableaux de bord des

opérations du terminal constitue le premier pas vers l'automatisation des processus décisionnels du terminal. En effet, une fois l'information agrégée, les fonctions du système peuvent être élargies en y ajoutant un module de suggestions. Ce module utilise l'information recueillie dans le tableau de bord pour suggérer des décisions aux gestionnaires du terminal, en se basant sur des règles de décision prédéfinies. Les gestionnaires du terminal ont ensuite le choix d'accepter la décision proposée par le système ou de formuler leur décision en utilisant l'information provenant du tableau de bord. L'introduction d'un module de suggestions dans un tableau de bord est une première forme d'aide à la décision. Les formes d'aide à la décision seront présentées dans la deuxième partie de cette sous-section.

Le niveau suivant de traitement de l'information consiste à automatiser la prise de décisions. L'automatisation de la prise de décisions peut se faire partiellement ou complètement. Par contre, peu importe le niveau d'automatisation adopté, une supervision humaine doit être maintenue. La différence par rapport au niveau précédent de traitement de l'information est que les décisions sont appliquées automatiquement, sans qu'il y ait une demande d'approbation à chacune des décisions. La supervision du système se fait par le suivi des indicateurs de performances comptabilisés par l'outil mis en place.

L'introduction d'outils d'aide à la décision peut se faire selon deux approches : une approche globale ou une approche par sous-systèmes. Peu importe l'approche utilisée, les outils utilisés seront les mêmes, soit la simulation, l'analyse statistique et l'optimisation.

Dans le cas d'une approche globale, l'utilisation de méthodes d'optimisation est limitée par la taille et la complexité de problèmes globaux. Bien qu'il existe des recherches sur des problèmes de cette taille et de cette complexité, peu de celles-ci ont menées à des systèmes d'aide à la décision utilisables au niveau opérationnel. C'est pourquoi, les approches globales utilisent généralement la simulation pour l'aide à la décision. Par contre, comme la simulation se prête mal à l'aide à la décision au niveau opérationnel, les approches globales utilisant la simulation sont surtout concentrées sur le niveau de planification stratégique, soit le design de terminaux. En effet, à ce niveau les décisions qui sont prises concernent la capacité du terminal. Comme il s'avère difficile de prévoir de façon exacte les volumes futurs

du terminal, les méthodes déterministes s'appliquent difficilement à ce type d'aide à la décision. Pour des exemples de ces systèmes, le lecteur peut se référer à la section 2.1.6 du chapitre II qui porte sur les problèmes de planification et de gestion des terminaux maritimes de conteneurs.

En ce qui a trait aux approches modulaires, celles-ci se prêtent beaucoup mieux à l'utilisation de méthodes d'optimisation. En effet, tel qu'il a été vu au préalable, des méthodes d'optimisation ont été développées pour la majorité des problèmes de planification et de gestion aux niveaux opérationnel et tactique. On retrouve donc dans cette catégorie l'ensemble des modèles d'optimisation de l'allocation de quai aux navires, de l'allocation de grues de quai aux navires, de planification du chargement, de planification et d'ordonnement de l'entreposage, ainsi que tous les autres modèles vus au chapitre II. Cependant, ces approches modulaires peuvent inclure plus d'une problématique de planification et gestion. C'est notamment le cas de l'allocation de quais et de grues de quai aux navires qui peuvent être combinées à l'intérieur d'un même système d'aide à la décision, tel que proposé par Park et Kim (2003).

Les systèmes intégrés d'opérations du terminal (SOT) constituent la principale application courante de systèmes de transport intelligents pour le traitement et la gestion de l'information à l'intérieur du terminal. Ces systèmes comprennent plusieurs modules, qui regroupent diverses problématiques de la gestion des terminaux portuaires de conteneurs. Le cœur de ces systèmes est un système de gestion de l'inventaire des conteneurs sur le terminal. Ce dernier enregistre les « mouvements » de conteneurs. Par mouvements, il est ici entendu les transferts de conteneurs vers les autres modes de transport et les changements de position des conteneurs dans la cour. De plus, les SOT peuvent aussi comprendre des modules d'aide à la décision pour les problèmes de planification et de gestion des terminaux portuaires de conteneurs. En effet, des modules pour déterminer l'allocation de grues de quai aux navires et la planification du chargement sur les navires existent déjà depuis un certain temps, tandis que des modules pour le transport interne des conteneurs commencent à faire leur apparition.

4.3.1.3 Automatisation des opérations

L'automatisation des opérations constitue une autre forme de STI qui peut se faire à divers niveaux dans un terminal. En premier lieu, le transport des conteneurs à l'intérieur du terminal peut être automatisé. L'automatisation du transport interne consiste à remplacer les camions conventionnels par des plateformes de transport guidées électroniquement (voir figure 1.3a).

Ensuite, les opérations de stockage des conteneurs peuvent être automatisées. L'automatisation du stockage des conteneurs consiste à utiliser des ponts roulants sur rails sans opérateur. Les opérations de stockage et d'extraction des conteneurs dans la pile sont donc contrôlées par un système de contrôle automatisé. Le terminal Deltaport du port de Rotterdam fut un des pionniers dans l'utilisation de systèmes de transport et de stockage des conteneurs automatisés (www.ect.nl).

Finalement, les grues de quai peuvent être partiellement automatisées. En effet, l'automatisation est ici partielle, puisque la grue utilise deux chariots pour le transfert des conteneurs entre le navire et le quai. Le premier, qui effectue les transferts entre le navire et une plateforme dans l'empannement de la grue, nécessite un opérateur humain; tandis que le second, qui charge et décharge les véhicules de transport interne est automatique.

4.3.2 STI et relations entre les terminaux maritimes de conteneurs et leurs partenaires

L'application de STI aux relations entre les terminaux maritimes de conteneurs et leurs partenaires permet l'intégration des acteurs des réseaux de transport intermodaux, ce qui épure les flux physiques et informationnels au sein de ces réseaux.

4.3.2.1 Collecte et distribution de l'information

La collecte et la distribution d'information entre les terminaux de conteneurs et leurs partenaires est une des premières applications de systèmes de transport intelligents au domaine du transport maritime. En effet, les transporteurs maritimes et les terminaux maritimes de conteneurs ont été parmi les premiers utilisateurs de l'échange de données

informatisées (EDI), précurseur des STI. Aujourd'hui, rares sont les terminaux qui ne l'utilisent pas pour l'échange de manifestes, de plan de chargement et autres documents reliés au transport de conteneurs.

Avec le développement de l'Internet et de ses applications au domaine des affaires, plusieurs entreprises ont développé des processus d'affaires électroniques. Les terminaux maritimes de conteneurs ne font pas exception. En effet, le suivi d'un conteneur peut maintenant être effectué sans qu'il soit nécessaire de contacter le terminal, par l'utilisation des systèmes de suivi du cargo qui sont disponibles sur les sites web des terminaux. Pour ce faire, les clients entrent le numéro du conteneur ainsi qu'un nom d'utilisateur et un mot de passe aux endroits appropriés et le système de gestion d'inventaire du terminal leur fournit le statut du conteneur.

La logistique électronique ou cyberlogistique (*e-logistics*) est une forme d'affaires électroniques appliquée à la logistique. Plus précisément, la logistique électronique vise à réaliser les activités traditionnelles de la logistique (planifier, organiser, diriger et contrôler les flux physiques, informationnels et financiers) à l'intérieur du « nouvel » environnement d'intégration des partenaires et d'échanges électroniques épurés (Crainic et Gendreau 2004). Donc, par rapport aux processus d'affaires électroniques, la cyberlogistique intègre l'information échangée avec les partenaires et la prise de décisions pour la planification des activités traditionnelles de la logistique.

4.3.2.2 Gestion des opérations

Certaines problématiques de la gestion des terminaux maritimes de conteneurs nécessitent d'être traitées en partenariat avec les parties prenantes concernées par les décisions prises. C'est notamment le cas du chargement des navires et trains. En effet, dans le premier cas, le terminal effectue un premier plan du chargement et le soumet à la ligne maritime qui le valide ou le modifie. Dans le second cas, le transporteur ferroviaire ne choisit pas toujours les conteneurs qui seront chargés, mais indique la destination prioritaire à charger (par exemple : Toronto, Chicago, Detroit, etc.) et fournit un plan de chargement désiré. Donc, les systèmes d'aide à la décision qui sont développés pour ces problématiques doivent tenir compte des

spécifications des parties prenantes, bien que, dans ces cas-ci, le STI peut être implanté pour le terminal seulement, mais les résultats qu'il fournira doivent être discutés avec les partenaires.

La création d'un horaire de service pour les camions est une forme de système d'aide à la décision qui a un impact sur les partenaires. Concrètement, la création d'un horaire de service consiste à allouer une fenêtre de temps aux transporteurs routiers à l'intérieur de laquelle un délai de service est garanti au transporteur. Les transporteurs ayant réservé une fenêtre de temps ont donc un accès prioritaire au terminal par rapport aux transporteurs qui ne l'ont pas fait ou qui se sont présentés à l'extérieur de la fenêtre de temps qu'il leur a été allouée. Les camions qui se présentent sans rendez-vous ou à l'extérieur de la fenêtre de temps allouée s'exposent donc au risque de ne pas être servi ou d'attendre longtemps avant d'être servi. L'aide à la décision dans ce type de système provient du fait que la création d'un horaire permet de planifier les opérations de chargement et de déchargement des transporteurs routiers. En conséquence, le trafic de camions peut être atténué aux périodes de pointe de la journée.

4.3.2.3 Automatisation des opérations

L'introduction d'opérations automatisées peut avoir un impact sur les partenaires du terminal. L'automatisation de la guérite d'accès au terminal nécessite des ajustements de la part des transporteurs routiers qui font affaire avec le terminal. Ceux-ci doivent se familiariser avec les nouvelles directives d'accès au terminal. Par contre, le changement sera beaucoup plus important si l'automatisation de la guérite est combinée au système de planification du stockage de la cour. Dans ce cas, l'accès au terminal se fera de façon à minimiser les remaniements de conteneurs, ce qui aura un impact sur l'ordre de priorité des camions sur le terminal. L'instauration d'un tel système nécessite donc l'implication des transporteurs routiers afin de tenir compte des impacts qu'il peut avoir sur ceux-ci.

4.3.3 STI et sécurité dans les ports

Depuis les événements du 11 septembre 2001, la sécurité est devenue un enjeu majeur dans les ports. En effet, les ports sont vus comme une porte d'entrée potentielle pour le trafic de matières illicites ou l'introduction d'armes de destruction massives. C'est pourquoi les mesures de sécurité ont été grandement resserrées depuis ces événements.

Bien que les utilisations des STI présentées jusqu'à maintenant étaient orientées vers le côté opérationnel des ports, les STI présentent de nombreuses applications aux problématiques de la sécurité dans les ports.

Une première application consiste à utiliser des caméras de surveillance reliées à un centre de contrôle. Ces systèmes permettent de surveiller les principaux points critiques du port ainsi que l'état des points d'accès ferroviaires et routiers du port. De plus, en cas d'incident, les systèmes de surveillance par caméras permettent de revenir sur les événements en visionnant les enregistrements vidéo. Les systèmes de caméras de surveillance pourraient aussi être couplés à des systèmes de déclenchement automatique de signaux ou des alarmes suite à l'identification d'activités suspectes. Des technologies similaires sont présentement utilisées pour la détection d'incidents sur les routes.

Une des principales craintes en matière de sécurité portuaire est l'entrée par infraction d'individus non-autorisés sur le site du port. Le port de Vancouver offre un bon exemple de système qui peut être mis en place pour diminuer ces risques. En effet, un système de cartes d'accès et de contrôle d'accès des véhicules est utilisé conjointement pour gérer les accès sur le site du port (Bickel 2006).

Le système de cartes d'accès utilise une puce électronique ou une bande magnétique qui déverrouille l'accès aux installations portuaires à son titulaire. Pour ce faire des lecteurs doivent être installés aux différents points d'entrée du port. De plus, lorsqu'une photo du titulaire de la carte est ajoutée sur celle-ci, la carte peut servir de pièce d'identification et ainsi permettre une vérification supplémentaire lorsque nécessaire. L'émission de la carte est

faite par l'autorité portuaire et les différentes parties prenantes concernées, par exemple les terminaux et les associations de camionnage.

Le système de contrôle d'accès des véhicules, quant à lui, consiste en des licences d'accès qui sont émises par l'autorité portuaire aux transporteurs routiers qui accèdent aux différents terminaux du port. Lorsque le camion se présente à une porte d'accès du port, le gardien à la guérite d'entrée du port saisie la plaque d'immatriculation du camion dans le système informatique, qui interroge la base de données contenant les véhicules enregistrés. Si le numéro d'immatriculation est reconnu, l'accès est accordé au véhicule; dans le cas contraire l'accès est refusé.

Le système conjoint mis en place par le port de Vancouver consiste à associer l'immatriculation du camion et l'identité du chauffeur de celui-ci, afin de valider l'accès au terminal. Ainsi, un camion dont l'immatriculation est enregistré dans le système d'accès des véhicules, mais dont l'identité du titulaire de la carte d'accès n'est pas associé à cette immatriculation se fera refuser l'accès au port.

Une extension possible d'un tel système consiste à automatiser l'identification des véhicules. En effet, la mise en place d'un système de puces intelligentes ou d'identification des véhicules par reconnaissance optique des caractères permettrait d'accélérer le traitement des camions à l'entrée et de faciliter le flux de camions sur le port.

4.4 Futurs STI possibles

La section précédente présentait des applications de STI existantes dans certains terminaux maritimes de conteneurs. Cette section vise à présenter des applications potentielles qui pourraient être développées ou qui sont en phase conceptuelle.

Une opportunité de développement de STI provient de l'intégration de certaines solutions de planification et de gestion des terminaux maritimes de conteneurs. En effet, en intégrant des solutions de planification, les terminaux pourraient être en mesure de coordonner les opérations et ainsi diminuer la variabilité associée à celles-ci.

Un premier exemple provient de l'évolution d'un système d'horaire de service pour les transporteurs routiers. Cette évolution consiste à coordonner l'horaire avec la planification de l'entreposage des conteneurs dans la cour. Ainsi, les fenêtres de temps pour les opérations des transporteurs routiers sont déterminées de façon à minimiser les remaniements de conteneurs dans la pile et les déplacements des équipements du terminal. Pour ce faire, lors de la prise de rendez-vous, une fenêtre de temps est attribuée au transporteur pour se présenter au terminal, comme dans le cas de la création d'un horaire de travail pour les camions. Afin de minimiser le mouvement des équipements du terminal, la création de l'horaire sera faite de façon à ce que les transporteurs attirés à deux conteneurs situés à proximité l'un de l'autre se présentent sensiblement au même moment de la journée. De plus, le fait de donner une fenêtre de temps, plutôt qu'un rendez-vous fixe, permet au terminal de gérer l'ordonnancement de l'accès au terminal des camions. De cette façon, l'accès sera donné au transporteur venu chercher un conteneur situé sur le dessus de la pile afin d'éviter une double manutention d'un même conteneur.

Ensuite, un second exemple provient de l'intégration encore plus importante des opérations entre divers intervenants de la chaîne de transport. En coordonnant l'ordonnancement des conteneurs dans la cour avec la planification du chargement des navires ainsi que la planification et le déploiement du transport terrestre des conteneurs, les terminaux et les autres parties prenantes de cette chaîne de transport bénéficieront d'une plus grande fluidité des conteneurs à travers le réseau de transport. Plus précisément, un tel système reprendrait le concept de coordination de l'horaire des camions avec l'ordonnancement des conteneurs dans la pile et l'appliquerait à plus grande échelle. En effet, cette coordination des activités permettra de diminuer les remaniements de conteneurs dans les terminaux, puisque la planification de l'entreposage ainsi que la planification de la livraison et de la réception des conteneurs se feront de façon simultanée. Le principal avantage d'un système de la sorte est de diminuer l'incertitude dans la chaîne de transport des conteneurs et d'en coordonner les activités. De plus, la planification du transport routier des conteneurs permettrait de niveler le trafic de camions au terminal et ainsi atténuer le trafic lors des périodes de pointes de la journée.

Un tel système implique que l'ordonnement de la pile de conteneurs pour l'exportation, donc les conteneurs à charger sur le navire, est fait afin de minimiser les remaniements de conteneurs lors des opérations de chargement. Pour ce faire, les conteneurs doivent être placés dans l'ordre dans lequel ils seront chargés sur le navire. Par contre, un tel ordonnancement implique une coordination du déploiement du transport terrestre de conteneurs, puisque, dans le cas contraire, un nombre important de remaniements de conteneurs seraient nécessaires avant l'arrivée du navire. Donc, la livraison des conteneurs doit être faite de manière à respecter l'ordre de chargement des conteneurs. Par contre, un tel système doit tenir compte du fait qu'on ne peut pas simplement imposer un horaire aux transporteurs terrestres, c'est pourquoi le système devra être capable de faire évoluer le plan de chargement au cours de la période de réception des conteneurs, de façon à introduire un élément de flexibilité aux opérations portuaires.

4.5 Mise en contexte des ports de la côte Est canadienne

Maintenant que les STI et les possibilités qu'ils offrent dans les terminaux maritimes de conteneurs ont été situés d'une façon générale, il est possible de revenir à l'objectif premier de ce chapitre, soit de situer les ports de la côte Est canadienne par rapport aux ports du reste du monde quant à l'utilisation des STI. Par contre, avant de débiter cette analyse, il importe de mettre en contexte les ports de la côte Est canadienne, afin de ne pas perdre de vue les situations particulières qui les caractérisent.

Tout d'abord, notons que les ports concernés sont les ports de Montréal et Halifax. Bien que le port de Saint-John au Nouveau-Brunswick et les ports de Corner Brook et St-John's à Terre-Neuve manutentionnent aussi des conteneurs, ils ne sont pas concernés dans cette étude. En effet, ces ports desservent soit des marchés spécialisés, dans le premier cas, soit des marchés locaux, dans le second cas. En conséquence, ces ports manutentionnent de faibles volumes, ce qui limite grandement l'application de systèmes de transport intelligents.

Ensuite, cette mise en contexte vise à positionner d'abord les ports d'Amérique du Nord par rapport aux ports du reste du monde. Puis, le contexte des ports de la côte Est nord-

américaine sera comparée à celui des ports de la côte Ouest. Finalement, les contextes respectifs des ports de Montréal et Halifax seront présentés.

4.5.1 Amérique du Nord vs. reste du monde

Les ports d'Amérique du Nord n'évoluent pas dans le même contexte que les ports européens ou asiatiques. En effet, les grands ports asiatiques et européens agissent à titre de «hub» maritime pour la région, tandis que les ports d'Amérique du Nord constituent plutôt des «hubs» intermodaux. Ce rôle différent a un impact important sur l'organisation des opérations des ports. Dans le premier cas, des navires de tailles importantes amènent de grandes quantités de conteneurs qui seront ensuite transférés sur de plus petits navires qui effectuent la liaison entre le «hub» et les autres ports de la région. Cette situation est particulièrement caractéristique des ports de Singapour et Hong Kong qui constituent des plaques tournantes de leur région. En effet, ces deux ports manutentionnent plus de vingt millions d'EVP par année, mais une infime partie de ce trafic est destinée au marché local. Dans le second cas, le transbordement de conteneurs vers de plus petits navires ne constitue qu'une faible part du trafic de conteneurs qui est majoritairement destiné au transport ferroviaire et routier.

Des facteurs géographiques peuvent expliquer cette situation. En effet, les principaux centres de production industrielle de l'Europe et de l'Asie sont plutôt dispersés sur le continent. Il y a donc une nécessité de distribuer les conteneurs vers ces différentes zones de production. De plus, la densité importante de la population rend plus difficile l'utilisation de modes de transport terrestres. En effet, cette densité entraîne une congestion des réseaux de transport terrestres. Par exemple, dans le cas de l'Europe, l'utilisation importante du réseau de transport ferroviaire pour le transport de passagers ne permet pas le transport de grands volumes de conteneurs sur de grandes distances comme il se fait en Amérique du Nord. En ce qui concerne l'Amérique du Nord, la situation est complètement différente, puisque une part importante de la production industrielle est concentrée autour du Nord-est et du Midwest des États-Unis. Ainsi, les conteneurs doivent être acheminés vers cette région depuis les côtes du continent. Comme la densité de population est plus faible et que la région est enclavée au

cœur du continent, des moyens de transport terrestres doivent être utilisés pour acheminer les conteneurs aux centres de production.

4.5.2 Côte Ouest vs. côte Est de l'Amérique du Nord

La situation des ports des côtes Ouest et Est de l'Amérique du Nord est grandement différente. En effet, les premiers desservent principalement le marché asiatique, un marché en pleine expansion; tandis que les seconds desservent principalement le marché européen, un marché en phase de maturité. En conséquence, les ports de la côte Est font face à des augmentations de volume moins importantes comparativement aux ports du Pacifique. Donc, les ports de la côte Est peuvent absorber plus facilement la croissance du trafic de conteneurs, ce qui n'est pas le cas de la côte Ouest, où la congestion des terminaux existants a entraîné le développement d'un nouveau terminal au port de Prince Rupert. L'entrée en fonction de la première phase de celui-ci est prévue pour la fin de l'année 2006 ou le début de l'année 2007, tandis que la fin des travaux de la seconde phase est prévue pour 2009. À la fin de ce projet, on prévoit que le port aura la capacité de manutentionner 2 millions d'EVP par année, mais selon les prévisions de croissance du marché, il est prévu que cette nouvelle capacité sera insuffisante. Dû aux conditions de marché grandement différentes entre ces deux groupes de ports, il a donc été choisi d'exclure les ports de la côte Ouest (plus précisément le port de Vancouver) puisqu'ils évoluent dans un contexte différent des ports de la côte Est. De plus, les limites de temps de cette étude ont constitué un facteur importants dans le choix des ports visités.

4.5.3 Montréal vs. Halifax

Bien qu'ils s'adressent sensiblement aux mêmes marchés, le contexte dans lequel ces deux ports évoluent est grandement différent.

Tout d'abord, la localisation géographique des ports de Montréal et Halifax influence le trafic qui transite par ceux-ci. Dans le cas du port de Montréal, celui-ci est un port dit intérieur, ce qui signifie qu'il est situé à l'intérieur du continent. L'accès au port se fait via le fleuve Saint-Laurent, ce qui limite le tirant d'eau des navires qui le fréquente. À l'heure actuelle, les plus

gros navires qui fréquentent le port de Montréal ont une capacité de 4100 EVP. Par contre, il importe de mentionner que ces navires ont été spécialement conçus pour la navigation sur le fleuve Saint-Laurent, ils sont plus étroits et plus longs que les navires réguliers, de façon à diminuer leur tirant d'eau. Mis à part ces navires spéciaux, la capacité des plus gros navires réguliers qui fréquentent le port de Montréal à l'heure actuelle atteint plus ou moins 2 200 EVP. La possibilité de déménager le port de Montréal sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent a été évoquée. Par contre, cette possibilité aurait un impact limité sur la taille des navires qui pourraient fréquenter le port, puisque cette relocalisation ne permettrait pas d'augmenter le tirant d'eau des navires qui fréquentent le port, mais seulement la longueur. En effet, le principal haut-fond du fleuve Saint-Laurent se situe dans le lac Saint-Pierre situé dans la région de Trois-Rivières. Le dragage d'un fond de cette superficie nécessiterait des travaux majeurs qui ne sont pas envisagés pour l'instant. De son côté, le port de Halifax est un port côtier, donc directement accessible depuis l'océan Atlantique. Puisqu'il s'agit d'un port en eau profonde, il est en mesure d'accueillir des navires de taille plus imposante. Les plus gros porte-conteneurs qui effectuent des liaisons incluant le port de Halifax atteignent aujourd'hui des capacités allant jusqu'à 5500 EVP. En ce qui concerne le trafic futur de ces ports, la taille des navires qui fréquenteront le port de Halifax devrait augmenter puisqu'il s'agit d'un port en eaux profondes qui peut recevoir les navires de type super post-panamax, soit des navires dont la capacité excède 6 000 EVP. Dans le cas du port de Montréal, il s'avère plus complexe de déterminer l'évolution future du trafic, puisque l'augmentation de la taille des navires nécessite une conception particulière. Il est donc difficile de prévoir dans quelle mesure les transporteurs maritimes seront prêts à investir dans de tels types de navires.

Ensuite, la localisation respective des ports a un effet important sur le trafic qui les fréquente. En effet, les navires qui s'arrêtent au port de Montréal effectuent généralement un seul arrêt sur le continent. En conséquence, l'ensemble des opérations de déchargement et de chargement du porte-conteneurs sont effectuées à ce port. Quant à lui, le port de Halifax est le premier arrêt d'une série de ports, donc les opérations de manutention qui y sont effectuées concernent seulement une partie du chargement du navire. Cette situation a pour effet de complexifier grandement la gestion des terminaux du port de Halifax comparativement à Montréal. En effet, afin de demeurer compétitifs, les terminaux du port doivent être en

mesure de recevoir les navires de type post-panamax, ce qui implique des grues capables de travailler sur ceux-ci. Par contre, le volume de conteneurs manutentionnés au port de Halifax est plus faible que celui de Montréal. Pour l'année 2005, le trafic de conteneurs au port de Montréal s'est élevé à 1 254 560 EVP (Port de Montréal 2006), ce qui représentait une hausse de 2,3% par rapport à l'année précédente, tandis que pour le port de Halifax, ce total s'est élevé à 550 462 EVP, pour une hausse de 4,7% par rapport à l'année précédente. Donc, les terminaux du premier port se retrouvent avec des dépenses en immobilisations plus importantes qui sont amorties sur des volumes moins importants.

La taille des villes a aussi un impact sur les volumes de conteneurs manutentionnés dans leurs ports respectifs. En effet, la population de la région métropolitaine de Halifax s'élève à 310 000 habitants comparativement à la région métropolitaine de Montréal qui s'élève à près de 3 000 000 d'habitants (Statistique Canada, 2006). La première présente donc un marché local beaucoup moins important que la seconde. Le port de Halifax est donc largement plus dépendant du trafic à destination des États-Unis que le port de Montréal.

4.6 Les systèmes de transport intelligents dans les ports de la côte Est canadienne

Afin de présenter l'état des STI dans les terminaux de la côte Est canadienne, l'ordre de présentation utilisé sera le même qu'à la section 4.3, mais les systèmes ne seront pas différenciés selon qu'ils soient utilisés à l'interne seulement ou non.

4.6.1 Collecte et distribution de l'information

En termes de collecte et de distribution de l'information, lors des visites des terminaux, il a été constaté que l'ensemble de ceux-ci utilise l'échange de données informatisées. En effet, celle-ci est appliquée dans ces terminaux pour le transfert d'informations avec les lignes maritimes et les transporteurs ferroviaires. En ce qui a trait aux lignes maritimes, les principales données échangées sont les plans de chargement des navires et des listes de chargement des conteneurs sur les trains. En ce qui concerne les transporteurs ferroviaires, les données échangées sont principalement les plans de chargement des trains.

Ensuite, une autre forme de STI pour la collecte et la distribution des informations qui a été observée est l'utilisation de systèmes de communications informatiques portables. En effet, sur les quatre terminaux visités, deux les utilisaient déjà, tandis qu'un troisième prévoyait les mettre en place prochainement.

4.6.2 Gestion des opérations

Afin de traiter et de gérer l'information, trois terminaux sur quatre possédaient un SOT et le seul terminal qui n'en possédait pas a déjà fait l'acquisition du système et doit le mettre en place prochainement. Les systèmes utilisés, ou en voie d'utilisation, constituent tous des solutions commerciales développées à l'extérieur de ces terminaux, soit l'un ou l'autre des deux principaux SOT présentés au chapitre II.

Dû à la mise en place de ces systèmes, les terminaux visités utilisaient aussi deux formes de systèmes d'aide à la décision incluent dans ces systèmes. En effet, tel que mentionné auparavant, les SOT comprennent généralement des modules de planification du chargement et d'allocation de grues de quai aux navires. Finalement, bien que les SOT utilisés par ces compagnies offrent la possibilité d'ajouter des modules de planification de l'entreposage des conteneurs sur le terminal et d'allocation des tâches aux équipements, aucun terminal n'utilisait ces modules au moment des rencontres.

4.6.3 Automatisation des opérations

Les volumes de conteneurs manutentionnés dans les ports de la côte Est canadienne peuvent difficilement justifier les investissements nécessaires à l'automatisation des opérations. C'est pourquoi aucun des terminaux visités n'a automatisé ses opérations. Par contre, tous les dirigeants ont entrepris des démarches afin d'automatiser les opérations de la guérite du terminal. En effet, les récents développements de cette forme d'automatisation ont permis de réduire les coûts d'acquisition de cette technologie. De plus, la guérite a été identifiée comme un goulot d'étranglement important dans la majorité des terminaux.

4.6.4 Les STI dans les autres ports canadiens

Bien qu'il ne fasse pas part de l'étude actuelle, le port de Vancouver constitue le port le plus important du Canada. En termes d'EVP manutentionnés, les données pour l'année 2005 font état de 1,77 millions d'EVP (Vancouver Port Authority 2006). De plus, les données préliminaires de 2006 portent l'administration portuaire à croire que le volume de conteneurs pour l'année 2006 sera supérieur à 2 millions d'EVP (Vancouver Port Authority 2006). C'est pourquoi il a été jugé pertinent d'inclure certains commentaires sur celui-ci.

Le port de Vancouver semble plus avancé que les ports de la côte Est quant à l'utilisation des STI pour la gestion des opérations des terminaux de conteneurs. En effet, les trois terminaux du port ont déjà automatisé les opérations de la guérite d'accès au terminal. De plus, un des trois terminaux a récemment mis en œuvre un important projet de modernisation des opérations incluant plusieurs implantations de STI.

Parmi celles-ci, l'application de la reconnaissance optique de caractères a été implantée sur de nouvelles grues de quai ainsi que sur les opérations sur les trains. Dans le premier cas, le conteneur peut être identifié automatiquement lorsqu'il est saisi par la grue de quai, ce qui accélère le temps de traitement de celui-ci en éliminant les saisies manuelles auparavant nécessaires. Dans le second cas, des portails, au travers desquelles les wagons circulent, sont installés de chaque côté des voies ferrées du terminal. De cette façon, les numéros des conteneurs et des wagons sur lesquels ils sont chargés sont enregistrés automatiquement, limitant ainsi la saisie de données manuelle.

Conjointement à l'application de la reconnaissance optique de caractères, un réseau de fibre optique ainsi qu'un réseau de communication sans fils ont été mis en place dans le terminal afin de transmettre les données recueillies par ces systèmes au système intégré d'opérations du terminal. De cette façon, l'information recueillie peut être utilisée pour la gestion des opérations du terminal.

Ensuite, un système de positionnement mondial différentiel a été mis en place pour la gestion des équipements du terminal. En effet, grâce à ce système, le terminal est en mesure de

connaître en temps réel le niveau d'essence du véhicule, la pression dans les pneus de celui-ci, la position de celui-ci sur le terminal ainsi que le dernier mouvement de conteneur effectué. De plus, un système d'identification des opérateurs à l'intérieur des véhicules permet de connaître l'identité de l'opérateur de celui-ci. Le système de positionnement mondial différentiel permet de constituer un tableau de bord des opérations du terminal par le suivi des équipements et des conteneurs.

4.6.5 Les STI dans les ports américains

Les ports canadiens étant fortement dépendants du trafic de conteneurs à destination des États-Unis, les ports américains constituent donc les principaux concurrents des terminaux maritimes de conteneurs canadiens. Il importe donc de situer de façon générale l'intégration des STI par les terminaux maritimes de conteneurs des ports américains.

Puisqu'il a été impossible d'avoir accès à de l'information directe de la part des principaux opérateurs américains de terminaux maritimes de conteneurs, les principales sources d'informations utilisées ont été les sites web de ces entreprises et des autorités portuaires des principaux ports, soit les ports de Los Angeles/Long Beach, Oakland, Seattle et New York.

À partir de ces informations, il peut être affirmé que les ports américains ont une intégration des STI à l'image de ce qui a été présenté pour le port de Vancouver. En effet, deux opérateurs de terminaux importants ont développé leurs propres SOT et commercialisent ce système. Le premier système est celui développé par la compagnie Tideworks, une filiale de l'opérateur de terminaux Stevedoring Services of America. Ce dernier est présent dans les ports précédemment mentionnés ainsi que dans plusieurs autres ports des États-Unis. Tandis que le second système a été développé par Maher Terminals Logistic Systems inc., une filiale du plus important opérateur de terminal du port de New York, la compagnie Maher Terminals inc. Comme dans le cas du terminal du port de Vancouver, ces systèmes sont orientés vers le suivi des équipements et des conteneurs, à l'aide de tableaux de bord des opérations. Par contre, il ne semble pas y avoir de module de suggestion ou d'aide à la décision autre que l'agrégation des données opérationnelles du terminal.

Ensuite, à partir des informations sur les sites web des principaux ports, il a pu être constaté qu'un grand nombre de ces ports ont automatisé les opérations de la guérite d'entrée des terminaux.

4.6.6 Conclusions

À la lumière de cette analyse de l'utilisation des STI par les ports de la côte Est canadienne, il peut être conclu que l'intégration des STI par ces ports est relativement faible. En effet, ceux-ci ont adopté des technologies qui sont établies depuis longtemps dans les grands ports européens et asiatiques. Plusieurs raisons peuvent expliquer cette situation.

Tout d'abord, l'espace n'a jamais représenté et ne représente toujours pas un problème majeur aujourd'hui, bien qu'il devienne un enjeu de plus en plus important dans ces ports. En effet, historiquement la croissance du volume de conteneurs manutentionnés a toujours été modeste. De plus, cette croissance a été accompagnée d'une plus grande efficacité opérationnelle des terminaux de manutention de cargo général, diminuant ainsi les besoins pour ce type de terminaux, ce qui a permis la conversion de terminaux de manutention de marchandises générales non conteneurisées en terminaux de manutention de conteneurs. Les ports de Montréal et Halifax n'ont donc pas été confrontés aux mêmes problèmes d'espace que les ports européens et asiatiques, la réponse à une augmentation du volume de conteneurs manutentionnés a donc été généralement de développer de nouvelles infrastructures ou d'agrandir les infrastructures existantes. Par contre, cette réalité tend à changer. En effet, dans le cas du port de Montréal, les possibilités d'expansion des terminaux ont atteint leurs limites et les développements futurs de terminaux devront passer par la conversion de terminaux existants ou la construction de nouveaux terminaux. La situation est la même dans le cas de Halifax où un terminal se rend à la limite d'un espace vert public, tandis que l'autre offre des possibilités d'expansion limitées. Cette situation devrait être un moteur de changement et faciliter l'adoption de nouvelles technologies par les terminaux afin d'augmenter la productivité des infrastructures existantes. C'est d'ailleurs ce qui s'est produit à Vancouver, où la première phase d'un important plan d'expansion de la capacité du port dans le secteur du conteneur consistait à moderniser les terminaux existants.

4.7 Opportunités pour les ports de la côte Est canadienne

La conjoncture actuelle du domaine du transport maritime internationale de conteneurs offre des opportunités intéressantes pour les ports de la côte Est canadienne. En effet, certaines opportunités ne proviennent pas directement des STI, mais il n'y a aucun doute que les STI auront un rôle important à jouer pour saisir ces opportunités.

4.7.1 Opportunités provenant des STI

Suite à la présentation des diverses utilisations actuelles et potentielles des STI dans les terminaux portuaires de conteneurs, il peut en être déduit certaines opportunités pour les ports de la côte Est canadienne. L'objectif n'est pas d'identifier précisément quels systèmes auraient le plus grand impact sur la productivité des ports, mais bien quel serait l'impact général d'une plus grande ouverture à l'utilisation de ces systèmes dans les ports canadiens.

Tout d'abord, par la visibilité et la fluidité accrue des conteneurs qu'ils obtiennent, les terminaux qui mettent en place des STI peuvent diminuer le temps à quai des navires. Cette diminution constitue un avantage compétitif important pour ces terminaux, puisque les lignes maritimes accordent une grande importance à celui-ci. En effet, lorsqu'ils ne sont pas en mer, les navires ne génèrent pas de revenus pour leurs propriétaires, c'est pourquoi ceux-ci cherchent à minimiser le temps à quai de leurs navires.

Ensuite, les STI permettent d'améliorer l'efficacité opérationnelle des terminaux maritimes de conteneurs, donc, par le fait même, ils permettent une meilleure gestion des actifs. Cette plus grande efficacité opérationnelle est obtenue en diminuant les déplacements inutiles des équipements et les remaniements de conteneurs, ainsi qu'en augmentant la visibilité des conteneurs sur le terminal. En conséquence, les équipements de manutention du terminal sont en mesure d'effectuer un nombre plus important de mouvements de conteneurs à valeur ajoutée, permettant ainsi une meilleure gestion des actifs.

4.7.2 Opportunités provenant de la conjoncture internationale

Tel que mentionné au premier chapitre de cet ouvrage, les routes de transport ont été grandement modifiées par l'apparition de navires de plus en plus gros pour les services entre l'Asie et l'Amérique. Par contre, peu importe la taille des navires utilisés sur la côte Ouest, un fait demeure, les ports de la côte Ouest de l'Amérique du Nord sont saturés et les prévisions de croissance du trafic dans les ports de cette région ne portent pas à croire que cette situation est sur le point de s'estomper (par exemple, il est prévu que le trafic triplera au cours des quinze prochaines années au port de Vancouver pour atteindre 5 millions d'EVP en 2020 (Vancouver Port Authority 2006)).

De plus, au cours des prochaines années, les nouveaux navires présentement en construction pour le transport de conteneurs sur l'océan Pacifique seront livrés, ce qui implique que l'on assistera à un important transfert de navires vers les autres routes internationales. En effet, la mise en service de nouveaux navires de tailles plus importantes suit un modèle en cascade. Concrètement, le phénomène se déroule de la façon suivante. Les nouveaux navires, de taille plus importante, sont mis en service sur les routes entre l'Asie et la côte Ouest de l'Amérique du Nord. Les navires qui opéraient sur ces routes sont transféré vers des routes moins importantes, afin d'augmenter la capacité sur ces routes et de diminuer les coûts unitaires de transport des conteneurs. Les navires qui opéraient sur cette seconde route sont ensuite transférer vers une autre route moins importante et ainsi de suite, jusqu'au dernier niveau où les navires les plus anciens sont remplacés par des plus récents qui sont généralement plus efficaces. En effet, en plus d'offrir une plus grande capacité de transport, les nouveaux navires sont généralement plus économiques en termes de carburant et diminuent les frais d'entretien dus à l'usure des navires.

À partir des deux constatations précédentes, soit une saturation des ports de la côte Ouest combinée à une augmentation du trafic et à la livraison de nouveaux navires pour les routes de l'Asie, un constat s'impose : de nouvelles routes pour le transport maritime international de conteneurs entre l'Asie et l'Amérique sont nécessaires. Voyons certaines des possibilités qui s'offrent aux lignes maritimes.

Tout d'abord, un retour vers le canal de Panama pourrait être envisagé. Par contre, cette possibilité pose certains problèmes. Tout d'abord, la taille des navires qui empruntent le canal est limitée, ce qui implique une augmentation des coûts unitaires de transport, donc une augmentation du coût de transport des conteneurs. De plus, à l'heure actuelle le canal de Panama est déjà grandement utilisé, donc, jusqu'à quel point peut-il supporter un trafic de navires plus important? La possibilité d'agrandir le canal de Panama a été évoqué, mais la décision finale n'a toujours pas été prise. En effet, la constitution du Panama oblige le pays à consulter la population pour tout projet d'agrandissement du canal. Le référendum est prévu pour le mois d'octobre 2006 (www.acp.gob.pa). De plus, si la population approuve le projet, le plan d'agrandissement du canal prévoit que les travaux s'échelonnent jusqu'à 2014.

Ensuite, une seconde possibilité, qui est souvent évoquée depuis quelques années, est l'utilisation du passage du Nord. Cette route, qui est à l'heure actuelle impraticable, consisterait à utiliser des navires à coques renforcées, pour la navigation dans les glaces, pour atteindre la côte Est de l'Amérique en transitant par l'océan Arctique au Nord du Canada. Par contre, cette route est, à l'heure actuelle, impraticable due à l'épaisseur des glaces qui la recouvre. Cependant, le réchauffement de la planète a pour effet de réduire l'épaisseur des glaces et cette voie de navigation pourrait devenir praticable dans quelques années.

Finalement, la dernière possibilité pour les lignes de transport maritime consiste à utiliser le canal de Suez pour le transport de l'Asie jusqu'à la côte Est de l'Amérique du Nord. Cette possibilité a l'avantage de permettre l'utilisation de navires de taille plus importante que la route via le canal de Panama et présente des temps de transit de seulement trois jours de plus que les routes du Pacifique. Cette route est d'ailleurs déjà utilisée par certains transporteurs. En effet, le leader mondial du transport maritime de conteneurs, la compagnie danoise Maersk, utilise des navires d'une capacité de 5 500 EVP pour le service MECL 2 qui visite deux ports d'Asie, trois ports de la Méditerranée et trois ports de la côte Est d'Amérique du Nord, dont le port de Halifax.

En comparant ces trois routes potentielles, il ressort que la route utilisant le canal de Suez offre les meilleures opportunités de développement de routes alternatives. Bien que le

développement du passage du Nord pourrait complètement transformer le transport maritime international, cette route n'est présentement pas praticable, donc elle ne constitue pas une alternative viable pour le transport de conteneurs entre l'Asie et l'Amérique du Nord pour l'instant. Par contre, un constat s'impose quant aux ports de la côte Est canadienne. Peu importe laquelle des deux routes est utilisée, ces ports constituent les premiers ports sur ces routes, que ce soit par le canal de Suez ou par le passage du Nord. Donc, les ports de la côte Est canadienne sont dans une position idéale pour saisir des opportunités de croissance importantes.

4.7.3 Développement de la porte d'accès de l'Atlantique (Atlantic Gateway)

La sous-section 4.7.2 a mis en évidence les avantages des ports de la côte Est canadienne provenant de leur situation géographique. À partir de ce constat, une question s'impose : quel est le lien de cette situation géographique avec l'utilisation des STI dans les ports? Bien qu'importante, la situation géographique n'est pas la seule tributaire de la saisie de cette opportunité. En effet, une large part du trafic qui transiterait par les ports de la côte Est canadienne serait destiné au marché des États-Unis. Donc, afin de saisir cette opportunité, les ports de Halifax et Montréal doivent s'assurer d'offrir des flux de conteneurs efficaces vers ces destinations, peu importe le mode de transport utilisé. C'est à ce niveau que les STI ont un rôle important à jouer.

Le concept de porte d'accès (*gateway*) repose sur un principe de coordination des politiques et des activités en matière de transport pour une région donnée. Plus précisément, l'objectif est de considérer le réseau de transport de cette région comme un tout plutôt qu'une somme de parties. De cette façon, le développement du réseau est fait de façon à assurer son efficacité opérationnelle et sa compétitivité par rapport aux régions concurrentes. Ce concept a été utilisé dans l'Ouest du Canada pour constituer la porte d'accès du Pacifique (*Pacific Gateway*) dans le but de saisir une part importante du trafic asiatique en direction de l'Amérique du Nord. Concrètement, la porte d'accès du Pacifique s'est matérialisée en une suite d'investissements dans le port de Vancouver, le réseau ferroviaire, le réseau routier et les STI (Ministère des transports du Canada 2006).

À l'image de ce qui a été développé sur la côte Ouest canadienne, une porte d'accès de l'Atlantique pourrait être développée sur la côte Est. Par contre, afin d'être réellement efficace, celle-ci doit être développée avec une forte orientation vers les STI. En effet, ceux-ci sont la clé d'une coordination des activités de la porte d'accès et de ses différents intervenants, soit les ports et leurs terminaux respectifs, les lignes maritimes et les transporteurs terrestres (ferroviaires et routiers). De plus, l'utilisation des STI est nécessaire afin d'assurer la compétitivité des ports canadiens par rapport aux ports américains. Cette compétitivité accrue proviendrait des avantages procurés par les STI qui ont été présentés à la sous-section 4.7.1.

4.8 Conclusion

Tel qu'il a pu être constaté, l'adoption des STI par les ports de la côte Est canadienne, à l'image du reste de l'Amérique du Nord, est relativement limitée. Pourtant, la combinaison de la saturation des ports de la côte Ouest du continent et de la situation géographique de ces ports offrent des opportunités intéressantes de développement de marché. Par contre, afin de saisir ces opportunités les ports de la côte Est canadienne ainsi que l'ensemble des parties prenantes concernées par les activités de ces ports doivent faciliter et encourager le développement et la mise en place de STI et de système d'aide à la décision pour la planification et la gestion des opérations du terminal. Dans cet ordre d'idée, les chapitres suivants présentent une application de ce type de technologie. Le chapitre suivant présente la représentation logique des activités d'un terminal qui sera utilisée subséquemment pour le développement d'un simulateur des opérations d'un terminal maritime de conteneurs.

CHAPITRE V

DESIGN D'UN SIMULATEUR DES OPÉRATIONS D'UN TERMINAL MARITIME DE CONTENEURS

Le chapitre précédent a démontré les types de systèmes de transport intelligents qui peuvent être utilisés afin de faciliter la planification et la gestion des terminaux maritimes de conteneurs. Ce chapitre constitue une première étape vers la mise en place de systèmes de transport intelligents. Plus précisément, l'objectif est de présenter le design retenu pour le développement d'une simulation des opérations d'un terminal maritime de conteneurs. Dans un premier temps, la section 5.1 explique le choix de l'outil et la méthodologie générale utilisée. Un court rappel de la littérature sur le sujet est aussi inclus. En 5.2, l'approche utilisée pour le design du simulateur est présentée. La section 5.3 détaille les divers niveaux de la simulation, tandis que la section 5.4 présente le design détaillé de la simulation et de ses composants.

5.1 Simulation de terminaux portuaires de conteneurs et méthodologie générale

Tel que mentionné en introduction, il a été choisi de développer une simulation des opérations d'un terminal portuaire de conteneurs. La simulation a été choisie, car le développement d'un tel outil requiert une compréhension approfondie des opérations d'un terminal, ce qui s'inscrit dans la ligne directrice de ce mémoire. De plus, tel qu'il a été constaté au chapitre précédent, le niveau d'intégration des technologies d'aide à la décision par les terminaux portuaires canadiens est relativement faible. La simulation constitue donc un premier pas logique vers l'intégration de systèmes d'aide à la décision opérationnels, puisqu'elle permet de démontrer la représentativité de tels systèmes. En effet, en représentant les opérations du terminal tel qu'elles sont, dans un premier temps, la simulation permet une transition plus fluide vers la mise en place de systèmes de transport intelligents à plus grande échelle. De plus, la simulation constitue un outil d'analyse et d'évaluations de politiques opérationnelles. Ainsi, le simulateur développé pourrait être utilisé pour évaluer l'impact des STI sur la performance opérationnelle du terminal.

5.1.1 Applications existantes de la simulation aux terminaux maritimes de conteneurs

La simulation a été appliquée dans divers buts aux terminaux maritimes de conteneurs. Une des premières applications est celle de Ramani (1996) qui présente une simulation pour la planification du développement de terminaux maritimes de conteneurs. Dans le même ordre d'idée, Liu et col. (2000, 2002) présentent des simulations de terminaux automatisés, dans le but de déterminer quel type d'automatisation des opérations permet d'obtenir la meilleure efficacité opérationnelle. Une simulation comparant un terminal utilisant des véhicules de transport guidés automatiquement à un terminal utilisant des chariots cavaliers automatisés a été développée par Vis et Harika (2004). Plusieurs simulateurs ont été développés par un groupe de chercheurs de l'université technologique de Delft (voir : Duinkerken et col. 1996, 2000, 2001; Evers, Koppers 1996 et Ottjes et col. 1996). Ces simulateurs visaient principalement à évaluer divers modes d'organisation des opérations de transport inter terminaux pour le port de Rotterdam en Hollande.

Une approche de simulation différente a été utilisée par Alessandri, Sacone et Siri (2004), qui représentent les conteneurs et leurs mouvements par des files d'attente. Ces files d'attente représentent le travail à effectuer par les différentes ressources du terminal. Les activités de transfert de ces ressources sont représentées par des équations de temps discrets (*discrete-time equations*) et l'évolution dynamique des différentes files d'attente dépend de l'utilisation des ressources du terminal. Au niveau du design du terminal, cette méthode a l'avantage de faciliter la variation de la capacité du terminal par une simple modification de cette variable.

5.1.2 Envergure de la simulation

Avant d'entrer dans quelques considérations méthodologiques que se soit, il importe de définir l'envergure de la simulation. Par envergure, il est ici entendu le niveau de détail désiré. Dans le cas présent, la simulation qui sera développée se placera d'un point de vue macro. En effet, l'objectif de cette simulation est d'avoir une vue d'ensemble des opérations du terminal, afin d'observer l'ensemble de celui-ci, comparativement à un point de vue

micro, qui observerait le comportement d'une partie précise du système. Par exemple, l'ensemble des travaux du groupe de chercheurs de l'université technologique de Delft (voir section 5.1.1) sur le transport inter terminaux au port de Rotterdam.

5.1.3 Méthodologie

Le développement d'un modèle de simulation des opérations d'un terminal maritime de conteneurs, comme tout développement de système, requiert une ligne directrice pour la gestion des tâches de développement. Afin de structurer ce processus, le modèle de développement de logiciels de Kececi et Modarres (1998) a été retenu (voir figure 5.1).

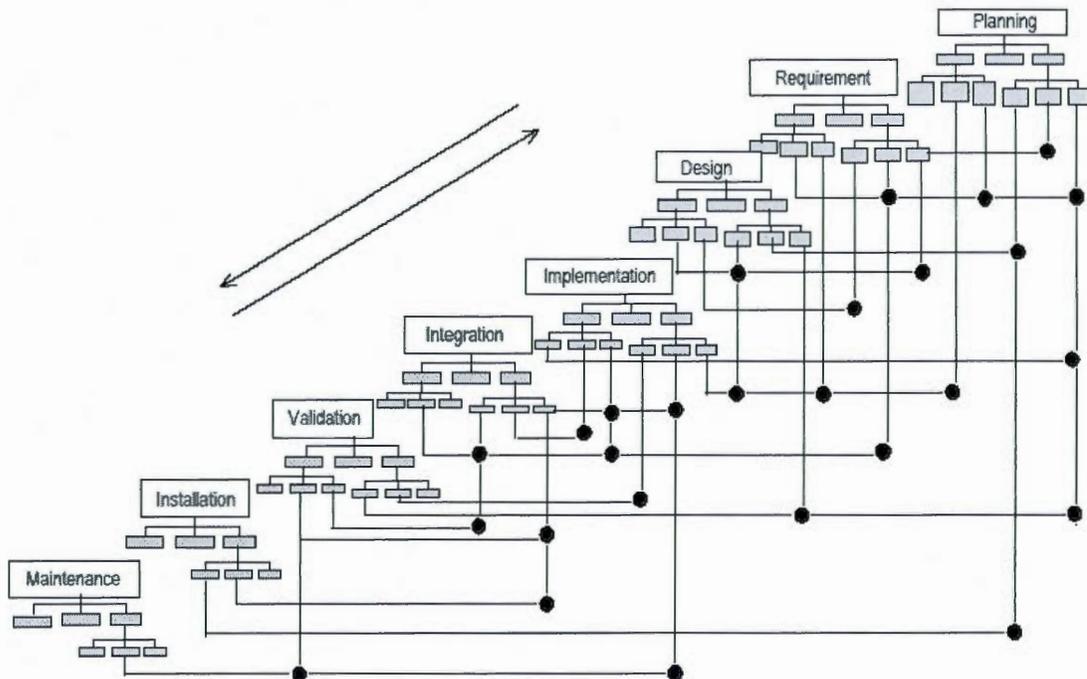


Figure 5.1 Modèle de développement d'un logiciel (Kececi et Modarres, 1998)

Selon ce modèle, l'objectif final est progressivement analysé et précisé à chacune des phases de développement, selon les objectifs et les contraintes de celles-ci. En conséquence, une cohérence est assurée à chacune des phases du développement. Par contre, l'ensemble des phases ne s'applique pas nécessairement au présent projet. En effet, les deux dernières

phases, soit l'installation (*Installation*) et l'entretien (*Maintenance*), ne seront pas considérées, puisque la simulation développée ne sera pas implantée dans un terminal dans le cadre de ce travail. Ce chapitre se concentrera sur les trois premières phases (*Planning, Requirements, Design*), tandis que les chapitres suivants se concentreront sur les trois autres (*Implementation, Integration, Validation*).

5.2 Design général du simulateur

L'approche retenue pour le développement du simulateur s'inspire de celle utilisée par Alessandri, Sacone et Siri (2004). En effet, le terminal est représenté comme une suite de files d'attentes pour l'accès aux ressources du terminal. Ainsi, les conteneurs arrivent au terminal par navires, par trains et par camions et cheminent à travers le terminal en passant d'une file d'attente à l'autre. La figure 5.2 présente cette représentation des activités d'un terminal maritime de conteneurs.

Les blocs A1, A2 et A3 représentent les taux d'arrivées des navires, trains et camions; tandis que les blocs D1, D2 et D3 représentent les taux de départ de ces mêmes modes de transport. Le bloc Q1 représente la file d'attente pour un quai, tandis que le bloc Q2 représente la file d'attente pour les grues de quai. Les blocs Q3 et Q4 situés à l'intérieur de la zone de stockage correspondent aux files d'attente pour le transfert des conteneurs vers la pile (Q3) et pour le transfert des conteneurs depuis l'inventaire de conteneurs du terminal vers les autres modes de transport (Q4). Fait important à noter, les ressources utilisées pour les blocs Q3 et Q4 sont les mêmes, mais les files d'attente ont été séparées sur le schéma afin de représenter la suite logique des opérations par les flèches entre les blocs qui indiquent les flux de conteneurs à l'intérieur du terminal. Les blocs Q5 et Q6 représentent les opérations de déchargement (Q5) et de chargement des trains (Q6). Finalement, les blocs Q7 et Q8 représentent les files d'attente de la guérite du terminal pour l'entrée et la sortie des camions. Aucune file d'attente ne représente le chargement et le déchargement des camions, puisque ces opérations font parties des blocs Q3 et Q4.

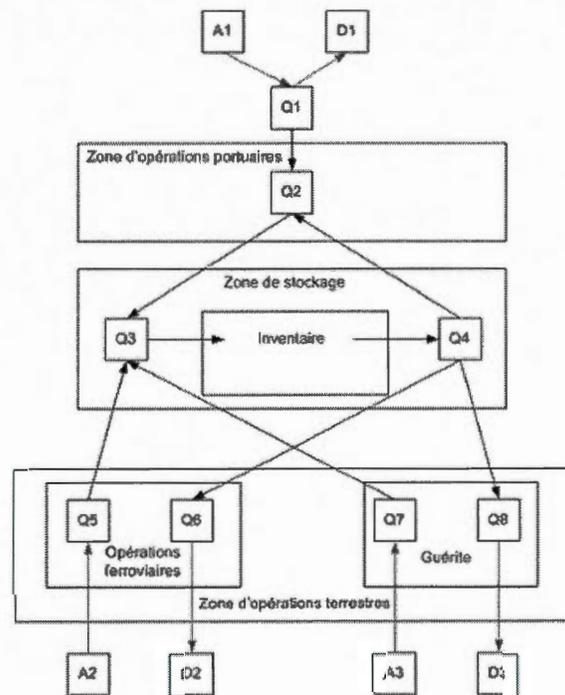


Figure 5.2 Représentation d'un terminal maritime de conteneurs comme une suite de files d'attente.

Puisqu'il s'agit d'une première version d'un simulateur des opérations d'un terminal maritime de conteneurs, certains postulats ont été posés afin de limiter l'envergure du simulateur. Tout d'abord, le nombre de véhicules de transport interne est considéré comme infini. En effet, sans ce postulat, la simulation nécessite une vision micro des opérations, tandis que l'étude actuelle s'inscrit dans une perspective macro des opérations du terminal. Ensuite, puisqu'il s'agit de la forme d'organisation des opérations la plus répandue, il est postulé que le terminal utilise un système de transfert indirect utilisant des ponts roulants sur pneumatiques et/ou des chariots à prise par le haut. Pour une définition des différents types d'organisation des opérations, le lecteur peut se référer à la section 1.4.2 du chapitre I. De plus, il a été postulé que tous les camions qui se présentent arrivent chargés d'un conteneur et qu'ils chargent un autre conteneur avant de repartir du terminal. Ce postulat permet de simplifier la génération des arrivées de camions au terminal et le traitement de ceux-ci à l'intérieur du terminal simulé. Bien qu'il est prévu que ce postulat ait un impact sur les résultats du simulateur, cet impact ne devrait pas être majeur, puisque ce postulat s'avère, en réalité, vrai pour une majorité de camions qui se présentent au terminal. En effet, les

transporteurs routiers ont l'habitude de prévoir un chargement de retour lorsqu'ils se présentent au terminal, afin de maximiser les revenus du déplacement jusqu'au terminal.

5.3 Niveaux de la simulation

Bien que le design proposé s'oriente principalement vers la simulation des opérations physiques du terminal, certains aspects décisionnels ne peuvent être ignorés. C'est pourquoi deux niveaux de simulation peuvent être distingués. Le premier niveau est l'opérationnel. Celui-ci a pour objectif de représenter les mouvements physiques des conteneurs, des équipements et des modes de transport impliqués dans les opérations d'un terminal maritime de conteneurs. À l'opposé, le niveau décisionnel a pour objectif de représenter les décisions des gestionnaires en ce qui concerne l'allocation des ressources du terminal. Ce niveau comprend donc des sous-modèles d'affectation des grues de quai et des serveurs du terminal. À noter que le terme serveur fait ici référence aux ponts roulants sur pneumatique, aux chariots à prise par le haut et à tout autre équipement qui peut être utilisé pour la manutention des conteneurs sur le terminal.

5.4 Modèles et sous-modèles du design d'un simulateur de terminal maritime de conteneurs

La conceptualisation générale de la simulation et les niveaux de celle-ci étant définis, l'étape suivante consiste à préciser la logique de chacun des sous-modèles qui composent le simulateur. Bien que ce design se veuille le plus général possible, certains des sous-modèles comportent des décisions spécifiques au terminal qui sera utilisé pour l'implantation du simulateur. Cette situation est due à l'impossibilité de généraliser le design dans ces cas. Les différents sous-modèles, présentés dans les pages qui suivent, ont été développés en se basant sur les diagrammes des processus opérationnels présentés au chapitre III. De plus, les discussions avec les dirigeants du terminal utilisé comme étude de cas pour l'implantation ont permis de développer les politiques décisionnelles d'allocation de la capacité (grues de quai, ponts roulants sur pneumatiques, chariots à prise par le haut). Une description détaillée de ce terminal sera fournie préalablement à la présentation de l'implantation. Pour le moment, retenons qu'il s'agit d'un terminal du port de Montréal, qui possède trois grues de quai et qui

utilise un système de transfert indirect qui comprend des ponts roulants sur pneumatiques et des chariots à prise par le haut. De plus, le terminal a un client principal qui exploite deux lignes régulières qui relient l'Europe et l'Amérique centrale à Montréal. La capacité des navires sur ces lignes n'est pas la même, ce qui crée certaines différences dans la gestion des opérations de ces deux lignes.

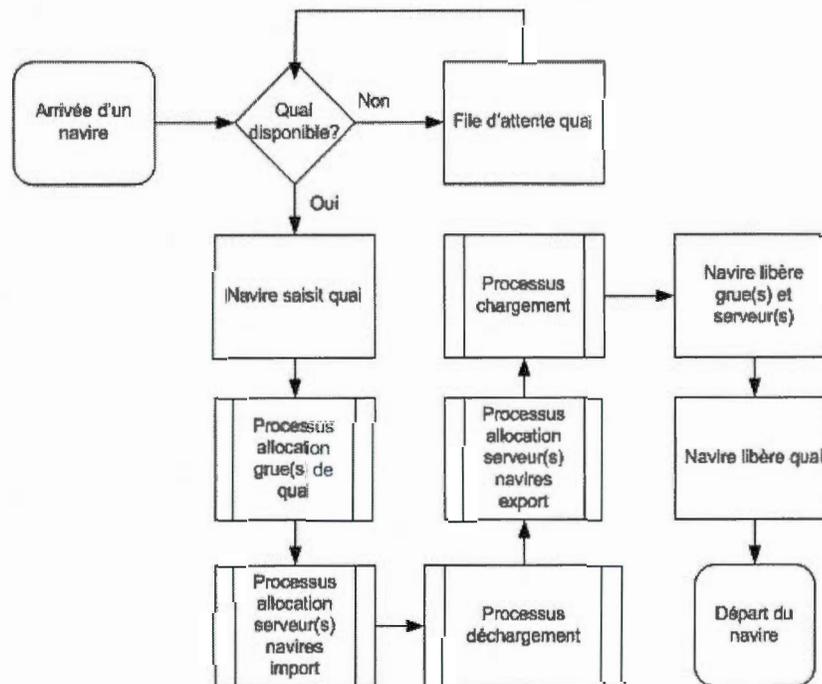


Figure 5.3 Arrivée des navires

5.4.1 Modèle d'arrivée des navires

Tout d'abord, le navire se présente au terminal et un quai doit lui être assigné. Si un quai est disponible, le navire saisit le quai, qui ne peut plus être saisi par un autre navire. Dans le cas contraire, le navire doit se placer dans une file d'attente jusqu'à ce qu'un quai se libère. Ensuite, le processus d'allocation de grue de quai détermine combien de grues seront assignées au navire. Ce processus fournit l'intrant au processus d'allocation de serveurs pour le déchargement du navire (import) et une fois les serveurs alloués, le déchargement du navire démarre. Lorsque ce processus est complété, les serveurs sont libérés et une réallocation de ceux-ci se fait pour le processus de chargement du navire, puisque la quantité

de serveurs nécessaires pour ces opérations n'est pas nécessairement la même qu'au déchargement. Le navire est ensuite chargé et une fois ce processus complété, les grues de quai, les serveurs et le quai sont libérés et le navire quitte le terminal.

5.4.2 Sous-modèle d'allocation des grues de quai

Le premier sous-modèle du modèle d'arrivée des navires au terminal est le processus d'allocation des grues de quai qui est représenté à la figure 5.4.

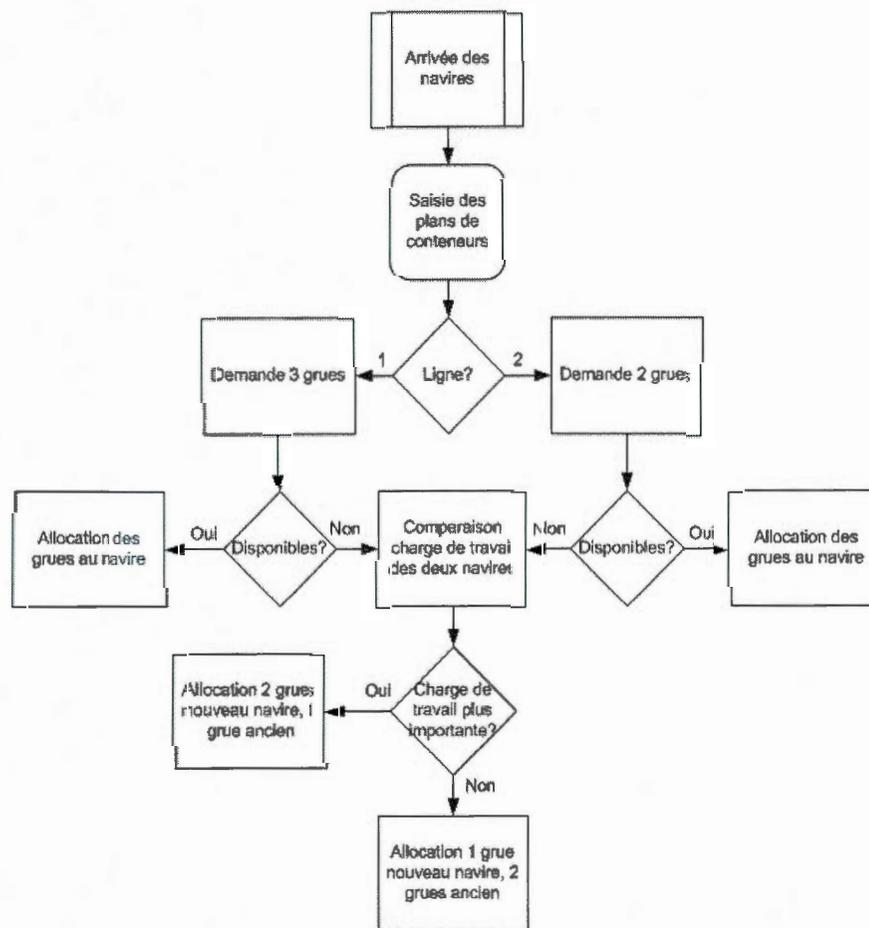


Figure 5.4 Processus d'allocation des grues de quai

Une fois que le navire est amarré à un quai, les plans de déchargement et de chargement des navires sont saisis, afin de déterminer la charge de travail totale du navire. Ensuite, selon la ligne sur laquelle le navire opère le nombre de grues demandées sera différent. En effet, la taille des navires, sur une des deux lignes qui fréquentent le terminal utilisé pour

l'implantation de la simulation, permet d'utiliser trois grues de façon simultanée sur un seul navire; tandis que les navires de l'autre ligne peuvent seulement utiliser deux grues dû aux risques d'interférences entre celles-ci. Dans les cas où la quantité de grues requise est disponible, elles sont allouées au navire et la simulation passe au sous-modèle suivant. Dans les cas contraires, la charge de travail restante des deux navires est comparée et deux grues sont allouées au navire ayant la charge restante la plus importante et une grue est allouée à l'autre navire. Le nombre total de grues allouées ne peut être supérieur à trois, puisque le terminal utilisé pour l'implantation de la simulation possède ce nombre de grues.

5.4.3 Sous-modèle d'allocation des serveurs pour le déchargement des navires

Lorsque le nombre de grues de quai allouées au navire a été déterminé, le nombre de serveurs nécessaires pour le transfert des conteneurs dans les piles de la zone de stockage peut être déterminé. Dans les cas où une seule grue est allouée au navire, deux ponts roulants sur pneumatiques (PRP) et deux chariots à prise par le haut (CPH) sont utilisés pour manipuler les conteneurs dans la cour. Dans les cas où deux grues sont allouées au navire, trois unités de chacun des types d'équipement seront nécessaires et dans les cas où trois grues sont allouées au navire le nombre de serveurs sera de huit, soit quatre ponts roulants sur pneumatiques et quatre chariots à prise par le haut. Dans l'éventualité où le nombre de serveurs requis n'est pas disponible, la simulation procède au sous-modèle de réallocation des serveurs aux navires. La figure 5.5 illustre le sous-modèle du processus d'allocation des serveurs pour le déchargement des navires.

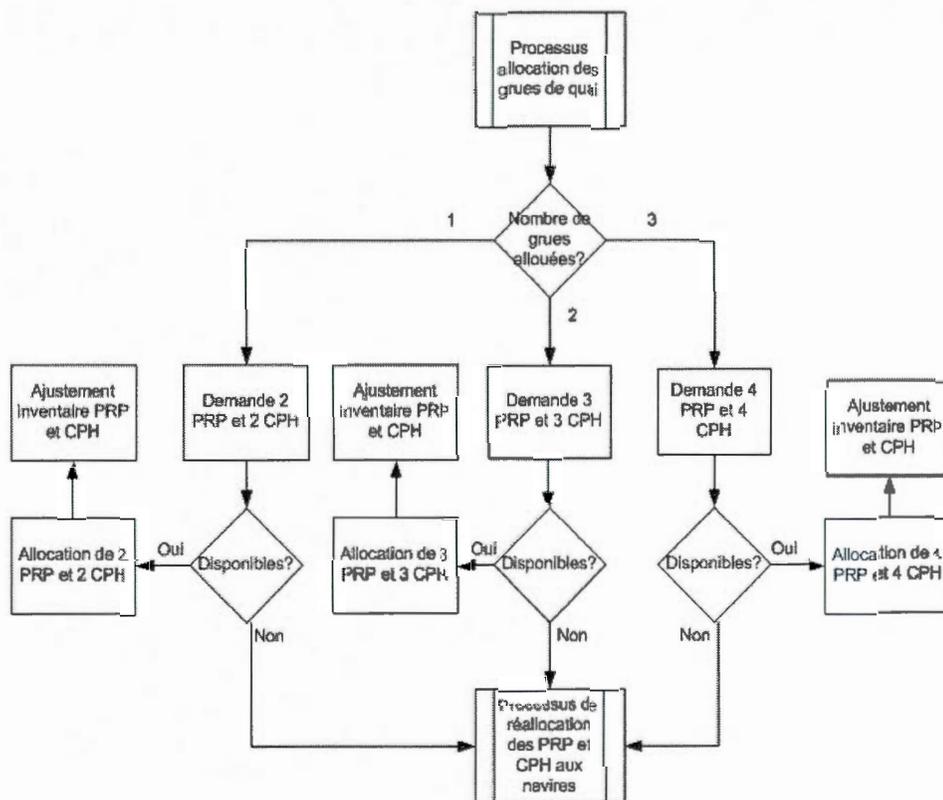


Figure 5.5 Processus d'allocation des serveurs pour le déchargement des navires

5.4.4 Sous-modèle du processus de déchargement des navires

Suite aux divers processus d'allocation des équipements, la simulation procède au sous-modèle du processus de déchargement des navires (figure 5.6). La première étape de celui-ci consiste à la saisie du plan de conteneurs importés. Ensuite, le premier conteneur est déchargé et transporté jusqu'à la pile de la zone de stockage du terminal. Suite à ce transport, la disponibilité du serveur pour le transfert du conteneur dans la pile est inspectée. Si le serveur est disponible, le conteneur est transféré et l'inventaire de conteneurs du terminal est ajusté. Dans le cas contraire, le conteneur se place dans la file d'attente du serveur. À chaque conteneur qui est déchargé du navire, la condition de fin du processus de déchargement est vérifiée. Lorsque cette condition est vraie, les serveurs sont relâchés et le processus d'allocation de serveurs pour le chargement des navires se met en branle.

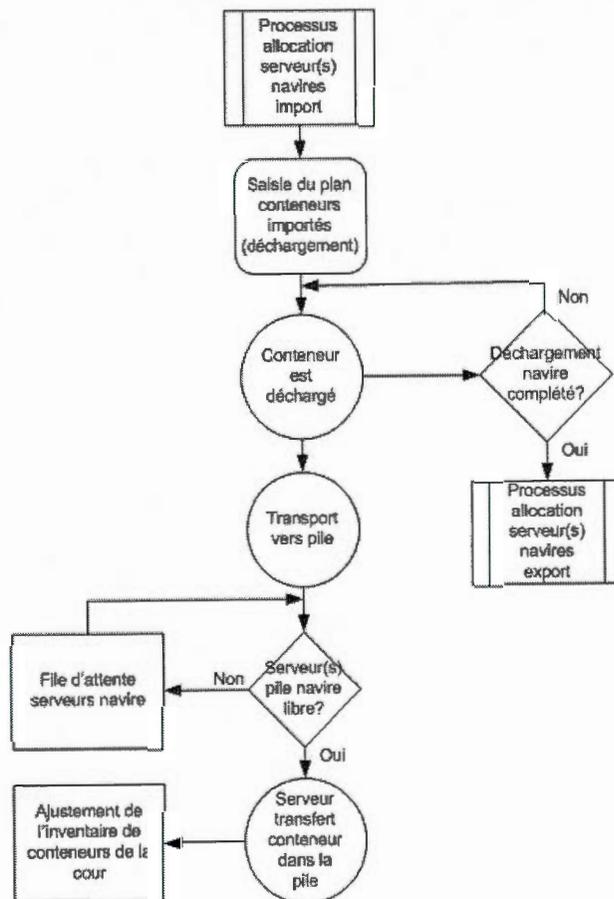


Figure 5.6 Processus de déchargement des navires

5.4.5 Sous-modèle d'allocation des serveurs pour le chargement des navires

La logique du processus d'allocation des serveurs pour le chargement des navires est la même que celle utilisée pour l'allocation des serveurs au déchargement des navires. Par contre, le nombre de serveurs requis ne sera pas le même. En effet, lorsqu'une seule grue est allouée au navire, un seul chariot à prise par le haut est nécessaire, tandis que deux grues nécessitent deux chariots à prise par le haut et trois grues en nécessitent quatre, tel qu'il peut être constaté sur la figure 5.7.

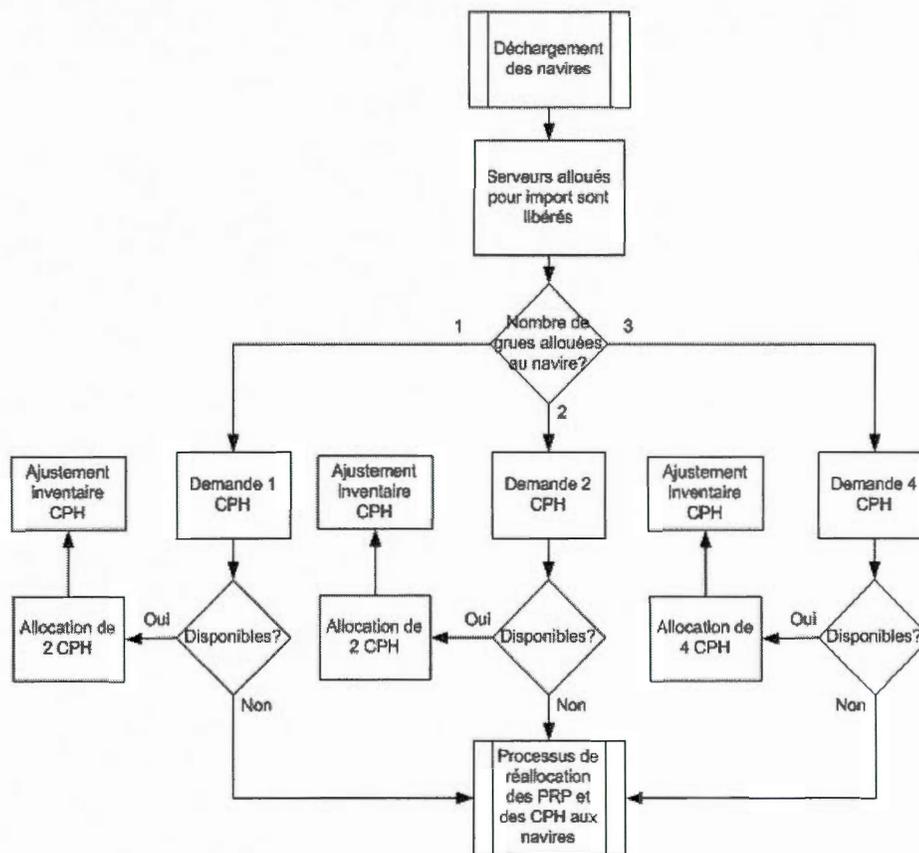


Figure 5.7 Processus d'allocation des serveurs pour le chargement des navires

5.4.6 Sous-modèle du processus de chargement des navires

Le processus de chargement des navires débute avec la saisie du plan de conteneurs exportés. Une fois le nombre de conteneurs à charger connu, le premier conteneur vérifie la disponibilité du serveur à la pile de conteneurs à charger. S'il est libre, le serveur extrait le conteneur de la pile et le conteneur est ensuite transporté vers la grue de quai. S'il n'est pas disponible, le conteneur est maintenu dans la file d'attente pour le serveur. Lorsque les conteneurs sont extraits de la pile, l'inventaire de conteneurs du terminal est ajusté pour déduire les conteneurs qui sont chargés sur le navire. Suite au transport du conteneur, celui-ci est chargé sur le navire par la grue de quai si elle est libre, ou il est maintenu dans la file d'attente si la grue est occupée à charger un autre conteneur. Lorsqu'un conteneur est chargé sur le navire, la condition de fin du processus de chargement est interrogée. Si elle s'avère fautive, le processus se poursuit, tandis que si elle s'avère vraie le processus se termine, les

grues de quai et les serveurs sont relâchés et le navire retourne au modèle d'arrivée des navires où le quai est relâché et le navire quitte le terminal. Le sous-modèle précédemment décrit est représenté par la figure 5.8.

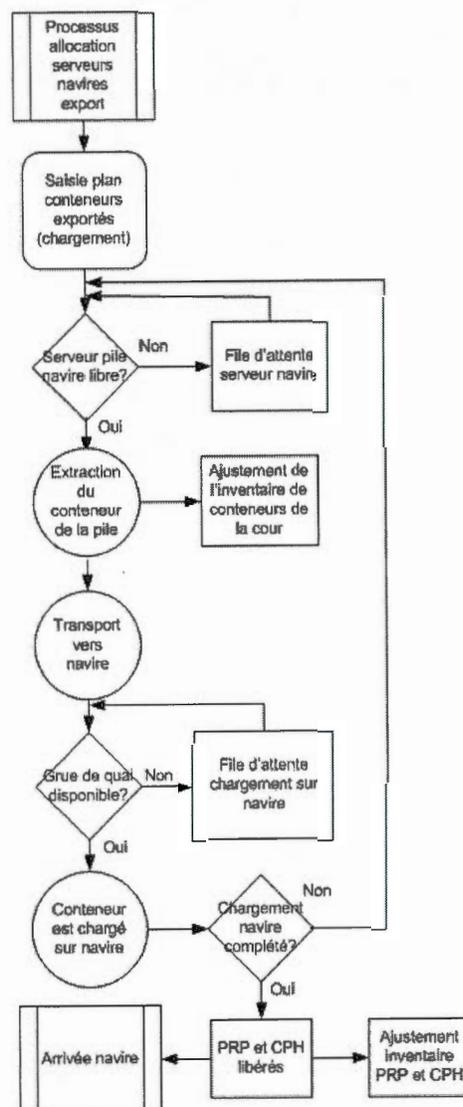


Figure 5.8 Processus de chargement des navires

5.4.7 Sous-modèle du processus de déchargement des trains

Les sous-modèles précédents présentaient les divers processus décisionnels et opérationnels liés à l'arrivée d'un navire à un terminal maritime de conteneurs. Les prochains sous-modèles

présente les divers processus liés à l'arrivée de trains au terminal. La figure 5.9 schématise la logique du sous-modèle de déchargement d'un train.

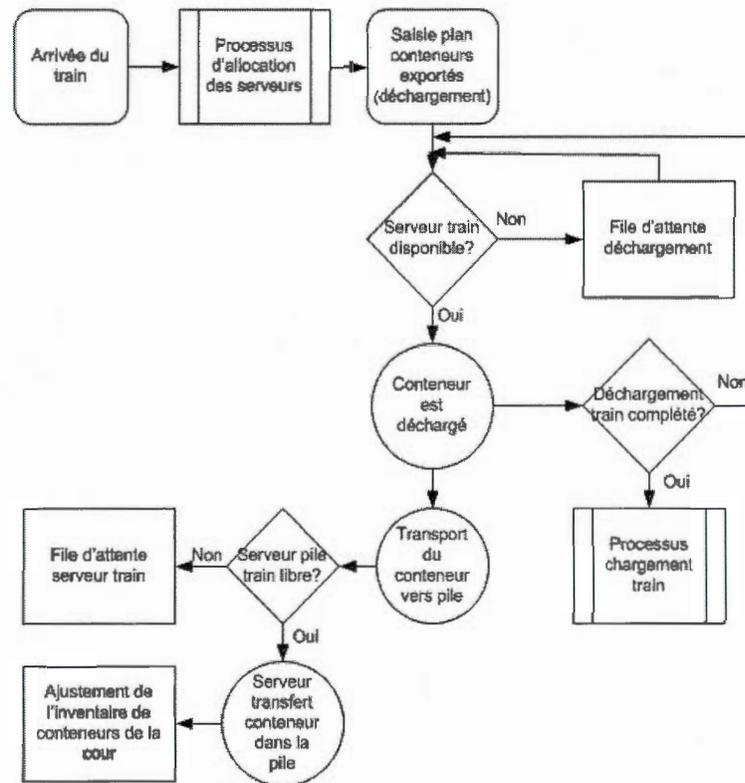


Figure 5.9 Processus de déchargement des trains

Le sous-modèle débute avec l'arrivée d'un train. Celle-ci déclenche le processus d'allocation des serveurs aux trains. Une fois les serveurs alloués, le plan des conteneurs à décharger (export) est saisi. Ensuite, les conteneurs chargés sur le train vérifient la disponibilité des serveurs. Si un serveur est disponible, le conteneur est déchargé et il est transporté vers la pile dans la zone de stockage du terminal. Si aucun serveur n'est disponible, le conteneur se place dans la file d'attente. Une fois transporté jusqu'à la pile, le conteneur est transféré dans celle-ci par un serveur situé près de la pile. Par contre, il se peut que le serveur soit déjà occupé à transférer un autre conteneur. Dans ces cas, le conteneur est maintenu dans une file d'attente, jusqu'à ce que le serveur soit disponible. Ensuite, l'inventaire de conteneur du terminal est augmenté d'une unité supplémentaire. À chaque déchargement d'un conteneur, la condition

de fin du processus de déchargement des trains est vérifiée et lorsqu'elle s'avère vraie, le processus prend fin et le processus de chargement des trains débute.

5.4.8 Sous-modèle du processus de chargement des trains

La figure 5.10 illustre le processus de chargement des trains. Ce processus débute avec la saisie du plan de chargement des conteneurs (import). Par la suite, le serveur alloué à la pile de conteneurs extrait un conteneur de la pile et celui-ci est transporté jusqu'au train. Les autres conteneurs à charger sont placés dans une file d'attente pour la disponibilité du serveur. Une fois qu'il est acheminé au train, le conteneur est chargé sur le train par un serveur alloué au chargement de celui-ci ou, s'il n'est pas disponible, placé dans une file d'attente. Lorsque le conteneur est chargé, la condition de fin du processus de chargement des trains est vérifiée et si le processus est terminé, les équipements utilisés pour le déchargement et le chargement sont libérés et le train quitte le terminal.

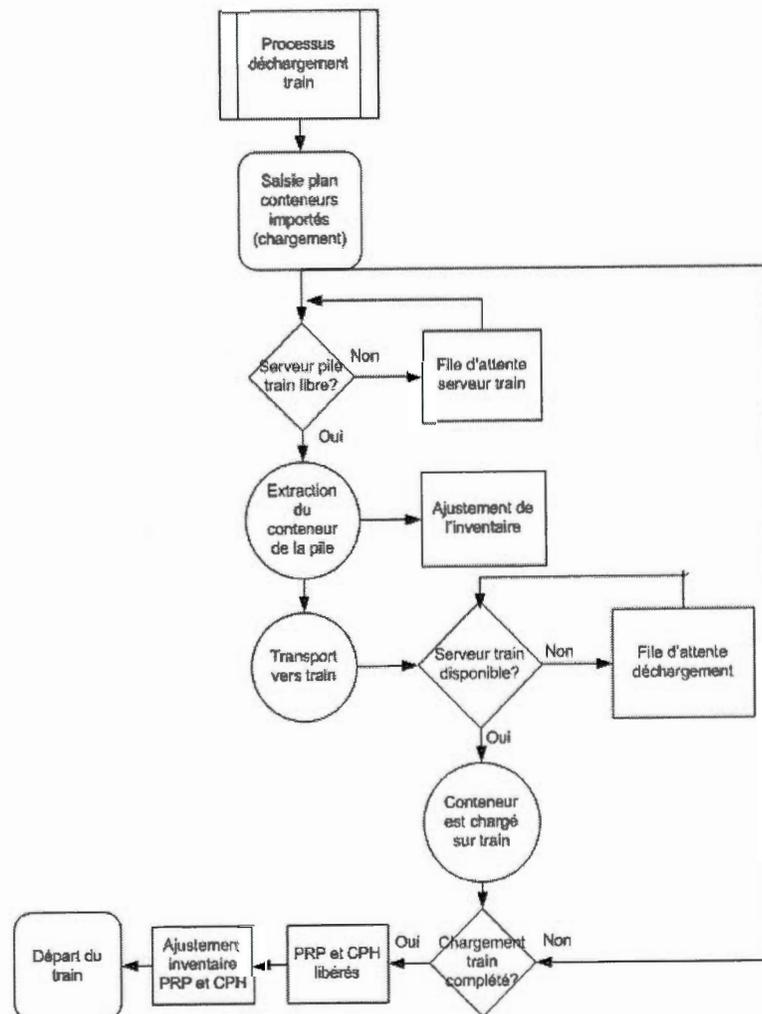


Figure 5.10 Processus de chargement des trains

5.4.9 Sous-modèle d'allocation des serveurs aux trains

Le processus d'allocation des serveurs aux trains débute lorsque les plans de déchargement et de chargement des conteneurs du train sont saisis. En effet, lorsqu'ils sont saisis deux ponts roulants sur pneumatique sont réservés pour les opérations sur les trains, tandis que deux chariots à prise par le haut sont nécessaires pour le transfert des conteneurs dans la pile. Si les équipements sont disponibles, ils sont alloués aux opérations des trains, sinon le processus de réallocation des serveurs aux trains s'amorce. La figure qui suit (5.11) représente le processus d'allocation des serveurs aux trains.

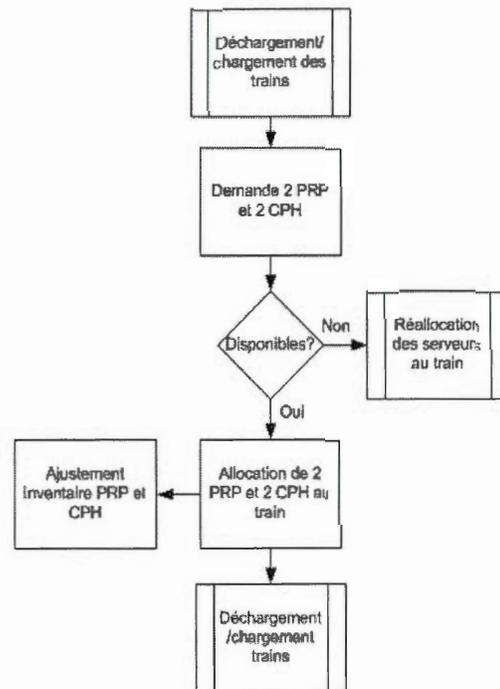


Figure 5.11 Processus d'allocation des serveurs aux trains

5.4.10 Sous-modèle du processus de déchargement des camions

Tout comme les arrivés de navires, l'arrivé de camions au terminal déclenche une suite de processus. Le premier de ceux-ci est le processus de déchargement des camions. Celui-ci débute avec l'arrivé du camion à la guérite du terminal. Lorsque la guérite est disponible, le camion est traité et se dirige ensuite vers la pile de conteneurs, dans la zone de stockage, pour être déchargé. Lorsqu'elle n'est pas disponible, car utilisée par un autre camion, le camion se place dans la file d'attente pour l'accès au terminal. Une fois que le camion est rendu à la pile, un serveur décharge le camion et place le conteneur dans la pile. Par contre, il se peut que le serveur ne puisse décharger le camion à son arrivé puisqu'il a une capacité limitée. Dans ces cas, le camion doit attendre dans une file que le serveur se libère. Suite au déchargement du camion, l'inventaire de conteneurs du terminal est incrémenté afin d'enregistrer la variation entraînée par le processus de déchargement. Suite à ces opérations, le camion passe au processus de chargement des camions. Le processus précédemment décrit est schématisé sur la figure 5.12.

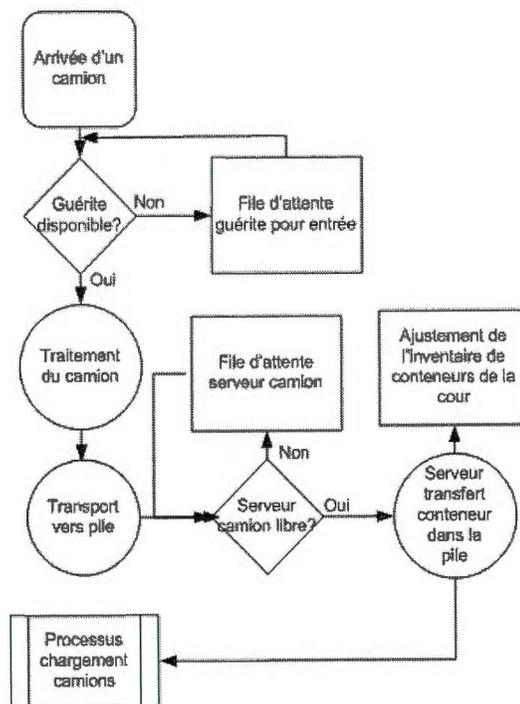


Figure 5.12 Processus de déchargement de camions

5.4.11 Sous-modèle du processus de chargement des camions

Suite au processus de déchargement des camions, le camion passe au sous-modèle de chargement des camions. Le point de départ de celui-ci est l'allocation d'une demande au camion. Ensuite, le camion doit se diriger vers un serveur où un conteneur sera chargé. Comme le serveur est une ressource ayant une capacité limitée, s'il n'est pas disponible le camion doit se placer dans une file d'attente jusqu'à ce qu'il le soit. Une fois l'opération de chargement complétée, le camion se dirige vers la guérite et le conteneur est soustrait de l'inventaire du terminal. Rendu à la guérite, si elle est disponible, le camion est traité et il quitte ensuite le terminal. Dans les cas contraires, le camion se place dans une file d'attente jusqu'à ce que la guérite soit libre. La figure 5.13 présente une représentation graphique du processus de chargement des camions.

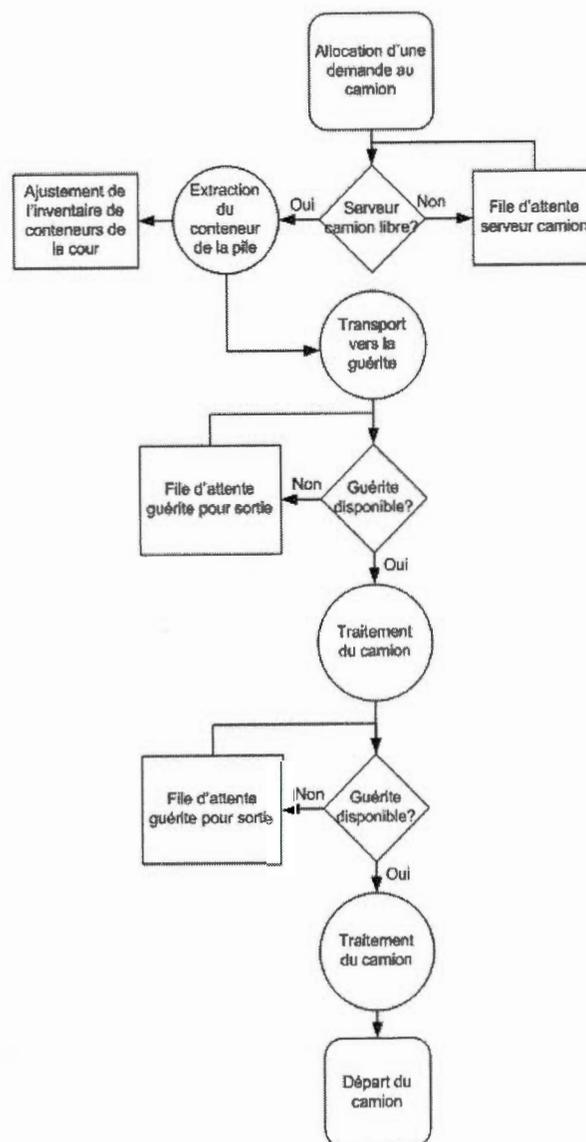


Figure 5.13 Processus de chargement des camions

5.4.12 Sous-modèle de réallocation des serveurs aux navires

Les ressources d'un terminal étant en nombre limité, le simulateur doit être en mesure de représenter le processus décisionnel en cas de besoins excédant la disponibilité des ressources. La première possibilité à ce niveau est un manque de serveurs pour les opérations de déchargement et de chargement des navires. Ces opérations étant primordiales pour le terminal, des serveurs doivent donc être réalloués afin de compléter les opérations sur les

navires. La première étape de cette réallocation consiste à déterminer le nombre de conteneurs qui sont chargés sur le train. Si ce nombre équivaut à 75% du chargement destiné au train, les serveurs utilisés pour le chargement du train sont réaffectés aux opérations du navire. Par contre, si ce nombre représente une proportion inférieure à 75%, les serveurs travaillant sur les camions seront utilisés pour les opérations sur les navires. La logique de réaffectation des serveurs pour les navires est illustrée à la figure 5.14.

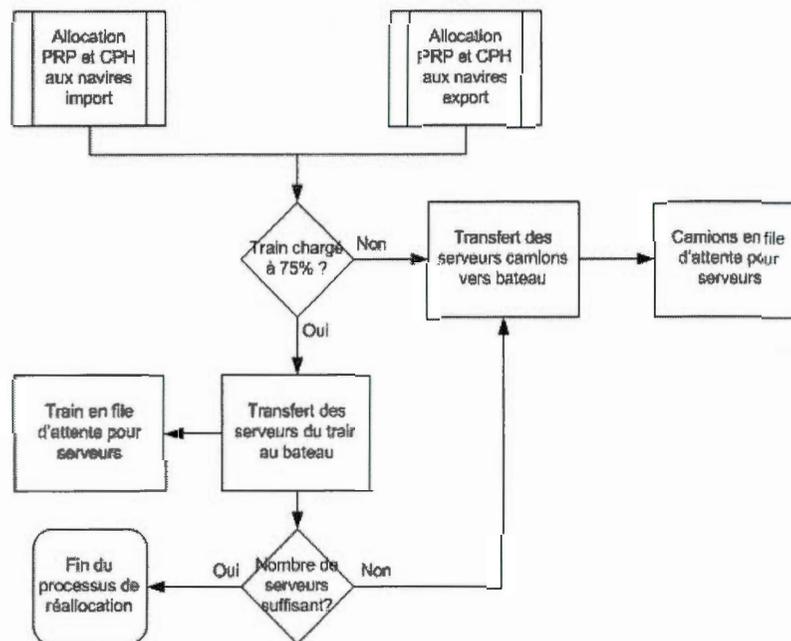


Figure 5.14 Processus de réallocation des serveurs aux navires

5.4.13 Sous-modèle de réallocation des serveurs aux trains

Dans les cas où des serveurs pour les opérations sur les trains sont manquants, celui-ci prendra le serveur affecté aux opérations sur les camions pour compléter ses opérations, si le nombre de conteneurs chargés est inférieur à 75% du nombre de conteneurs à charger. Dans les cas contraires, les serveurs utilisés pour les opérations sur les camions ne changeront pas d'allocation. Ce sous-modèle de décision est représenté sur la figure 5.15.

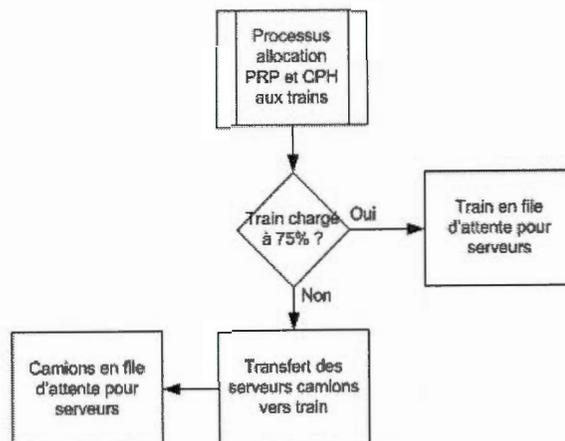


Figure 5.15 Processus de réallocations des serveurs aux trains

5.5 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de montrer la représentation logique des opérations d'un terminal portuaire de conteneurs qui sera utilisée pour le développement d'une simulation de ces opérations. À cette fin, plusieurs diagrammes modélisant les divers processus de ces terminaux ont été présentés. C'est à partir de ces diagrammes que se fera l'implantation de la simulation qui est l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE VI

IMPLANTATION D'UNE SIMULATION D'UN TERMINAL MARITIME DE CONTENEURS

Au cours du chapitre V, divers modèles et sous-modèles d'une logique pour le design d'une simulation des opérations d'un terminal maritime de conteneurs ont été présentés. À partir de ceux-ci, ce chapitre vise à développer une première version d'un outil de simulation d'un terminal portuaire de conteneurs. Pour ce faire, la section 6.1 définit les objectifs de la simulation, tandis que la section 6.2 présente le logiciel utilisé pour le développement du simulateur, ainsi que quelques concepts de base liés à l'utilisation du logiciel afin de faciliter l'explication de l'implantation. La section 6.3 présente ensuite le terminal portuaire de la côte Est canadienne qui a été utilisé pour l'implantation. Les différentes sous-sections de la section 6.4 présentent les différents sous-modèles du simulateur développé. Chacune des explications est accompagnée d'une photo de l'écran du sous-modèle en cours de description afin de faciliter la compréhension. La section 6.5 termine le chapitre avec une brève conclusion.

6.1 Objectifs de la simulation

En premier lieu, l'objectif principal de cette simulation est de démontrer que la simulation peut bel et bien être appliquée aux ports canadiens. Ensuite, un autre objectif est de développer un outil d'analyse pour mesurer l'impact qu'aurait l'application de systèmes de transport intelligents à ces terminaux.

Par contre, il importe d'émettre une mise en garde par rapport aux objectifs précédemment présentés. En effet, dû à un manque de données, certaines hypothèses ont été faites quant aux distributions utilisées pour générer les arrivées de camions au terminal et les plans de chargement et de déchargement des trains. Ces hypothèses ont un impact sur l'implantation des arrivées de camions dans le simulateur. En conséquence, à la sous-section concernant la génération de ces arrivées de la section 6.4 de ce chapitre, l'implantation effectuée sera

présentée, dans un premier temps; tandis que, l'implantation qui aurait été effectuée avec les données suffisantes sera présentée dans un second temps. Dans le cas des trains, ces hypothèses n'ont pas d'impact sur l'implantation du processus d'arrivée, mais elles auront un impact au niveau des distributions utilisées pour générer les plans de chargement et de déchargement des trains. Les distributions utilisées, ainsi que les données nécessaires pour générer des distributions plus représentatives seront présentées au chapitre suivant.

6.2 Logiciel utilisé

Afin de développer le simulateur, la version 8.1 du logiciel *ARENA* (Kelton et col. 2004) a été utilisée. Ce logiciel a été choisi puisqu'il présente une interface graphique facile d'utilisation qui permet d'accélérer le développement du projet de simulation. De plus, un ensemble complet de distributions statistiques ainsi que plusieurs outils statistiques sont disponibles pour le développement de la simulation et la création de rapports de résultats. Afin de faciliter la description de l'implantation, il importe de décrire d'abord certains concepts du logiciel de simulation *ARENA*.

6.2.1 Concepts de base de la simulation avec *ARENA*

Le développement de la simulation se fait à l'aide de modules, dont la fonction est prédéfinie, qui sont reliés entre eux par des connections sur lesquels circulent des entités. À l'arrivée d'une entité dans un module, un test logique peut être effectué sur celle-ci, elle peut saisir une ressource ou être retenue pour une certaine période de temps ou jusqu'à ce qu'une condition soit satisfaite. La figure 6.1 présente certains des modules de base qui sont utilisés pour le développement de simulations avec *ARENA*. Ces modules ne constituent pas une liste exhaustive des différents modules du logiciel, mais constituent certains des modules les plus utilisés.

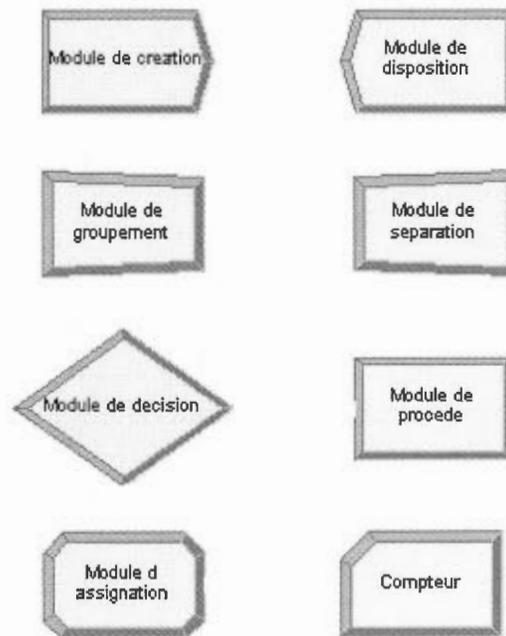


Figure 6.1 Modules de base du logiciel de simulation *ARENA*.

Les trois concepts qui sont au cœur du logiciel de simulation *ARENA* sont les entités, les attributs et les variables. Les entités représentent l'élément de base du logiciel. Celles-ci sont créées au cours du déroulement de la simulation, elles cheminent à travers les différents modules et sont ensuite détruites. La création et le cheminement des entités agissent comme moteur de la simulation. En effet, les actions des entités sont les événements inscrits au calendrier de la simulation. Le déroulement de la simulation suit le déroulement des événements inscrits au calendrier de la simulation. Ainsi, à chaque événement, la simulation évalue l'état du système, met à jour les différentes variables et procède ensuite à l'événement suivant. Les entités représentent donc généralement de vrais objets dans la simulation. Dans le cas présent, les entités représentent les navires, les trains, les camions et les conteneurs, cette dernière forme étant la principale.

Les attributs sont des caractéristiques communes à tout les entités, mais dont la valeur est spécifique à chaque entité. Ils sont principalement utilisés pour identifier les entités en circulation dans la simulation. Les variables (ou variables globales) sont utilisées pour définir

une caractéristique du système. Contrairement aux attributs, les variables ne sont pas rattachées à une entité spécifique, bien qu'elles soient modifiées par les entités. Par exemple, dans le cas de la simulation des opérations d'un terminal maritime de conteneurs, le nombre de navires à quai constitue une variable, tandis que le nombre de conteneurs chargés sur un navire constitue un attribut, puisqu'il est spécifique à ce navire.

Évidemment, le développement d'une simulation avec *ARENA* ne se résume pas aux concepts précédemment définis. Par contre, ceux-ci représentent les concepts de base nécessaires à la description de l'implantation. Pour une vue d'ensemble des possibilités de simulation avec *ARENA*, le lecteur peut se référer à Kelton et col. (2004).

6.3 Étude de cas pour l'implantation

Tel que mentionné dans le chapitre précédent, l'implantation de la simulation s'est faite à partir de données et d'estimations provenant d'un terminal de la côte Est canadienne. Cette section du chapitre vise à définir les caractéristiques du terminal qui ont dû être prise en compte dans l'implantation de la simulation.

6.3.1 Disposition physique et équipements du terminal

La zone d'opérations portuaires du terminal est munie de quatre quais, dont seulement trois peuvent être utilisés pour les opérations sur les navires. En effet, trois des quatre quais constituent une grande section linéaire, tandis que le quatrième est incliné vers l'intérieur du terminal, ce qui bloque l'accès des grues de quais à cette section, ces dernières étant limitées à des déplacements latéraux. Les grues de quais utilisées pour les opérations de chargement et de déchargement des navires sont au nombre de trois.

La zone de stockage du terminal consiste en une aire d'entreposage ouverte d'environ 180 000 mètres carrés. Cette espace permet d'entreposer jusqu'à 7 200 EVP lorsque les conteneurs sont entreposés en piles de trois conteneurs de haut. Éventuellement, la capacité pourra être augmentée en empilant les conteneurs jusqu'à cinq de haut, mais à l'heure actuelle les équipements les plus âgés du terminal ne le permettent pas. La zone de stockage

du terminal utilise un transfert indirect des conteneurs à l'aide de ponts roulants sur pneumatiques, de chariots à prise par le haut et de chariots à prise par le haut avec mat télescopique. On retrouve sept ponts roulants sur pneumatiques, tandis qu'il y a quatre exemplaires de chacun des deux autres types d'équipements.

La zone d'opérations terrestres est munie de quatre voies ferrées d'une longueur totale de 10 000 pieds (environ 3 000 mètres) et d'une guérite possédant deux voies d'entrée et une voie de sortie.

6.3.2 Horaire de travail et clientèle

Les opérations sur les navires et les trains s'effectuent 24 heures par jour. Par contre, dans le cas des trains, les opérations sont effectuées durant le quart de travail de nuit seulement à quelques rares occasions, afin de limiter les coûts de main d'œuvre qui s'y rattachent. En effet, le taux horaire des employés est plus élevé dans ces situations. En ce qui concerne les opérations sur les camions, elles sont effectuées du lundi au vendredi entre huit heures et seize heures. L'allocation de la main d'œuvre aux différentes tâches se fait pour une période huit heures. Il y a donc trois quarts de travail qui sont répartis comme suit : le quart de jour entre huit et seize heures, le quart de soir entre seize heures et minuit, et le quart de nuit entre minuit et huit heures.

En ce qui concerne les opérations sur les trains, une particularité s'applique au port dans lequel le terminal est situé. En effet, bien que les wagons soient acheminés au port par les transporteurs ferroviaires, l'acheminement des wagons sur les différents terminaux du port est effectué par le port lui-même. En conséquence, même si les transporteurs ferroviaires livrent les wagons au port selon un horaire prédéfini, l'arrivée des wagons au terminal recèle un facteur aléatoire, puisque selon la distribution des wagons qui doit être effectuée entre les différents terminaux, l'heure d'arrivée des wagons dans les différents terminaux peut varier.

En ce qui a trait à la clientèle, le terminal fait affaire avec un client principal qui exploite deux lignes à partir de la côte Est canadienne. La première se rend en Europe du Nord et utilise des navires ayant une capacité d'environ 3 000 EVP, tandis que la seconde se rend en

Amérique centrale et utilise des navires de capacités qui varient entre 1 000 et 1 200 EVP. Les deux services ont des départs hebdomadaires vers leurs destinations respectives. La distribution des conteneurs vers les clients finaux possède les mêmes proportions pour les deux lignes, soit 45% des conteneurs livrés par camions et le reste livré par train.

6.4 Implantation

L'objectif de cette section est de montrer de quelle façon les modèles et sous-modèles du simulateur, présentés au chapitre précédent, ont été implantés dans le logiciel de simulation *ARENA*. Ce faisant, les différentes embûches rencontrées ainsi que les choix et compromis qu'elles ont entraînés seront aussi présentés. Les différents modèles de la simulation seront présentés selon une approche du haut vers le bas, soit des niveaux les plus généraux aux niveaux les plus détaillés. Afin de simplifier la description de l'implantation de la simulation, des images de l'interface graphique du logiciel *ARENA* seront présentées pour chacun des modèles et sous-modèles du simulateur.

6.4.1 Modèle général

Ce modèle représente la vue la plus générale du simulateur du terminal. En effet, à sa plus simple expression, le système est composé des arrivées des divers modes de transport, ceux-ci sont traités par le terminal, pour, ensuite, le quitter. Tel qu'il peut être observé sur la figure 6.2, qui représente ce niveau du simulateur, deux sous-modèles supplémentaires sont compris dans ce niveau de la simulation. En ce qui concerne le sous-modèle identifié par l'étiquette « questions techniques », il s'agit d'un sous-modèle qui comprend les définitions des divers éléments qui composent la simulation, soit les variables, les entités, les attributs et les ressources utilisées pour le développement du simulateur. Dans l'autre cas, soit le sous-modèle qui porte l'étiquette « allocation serveurs », il contient l'ensemble des sous-modèles liés au processus d'allocation des serveurs du terminal.

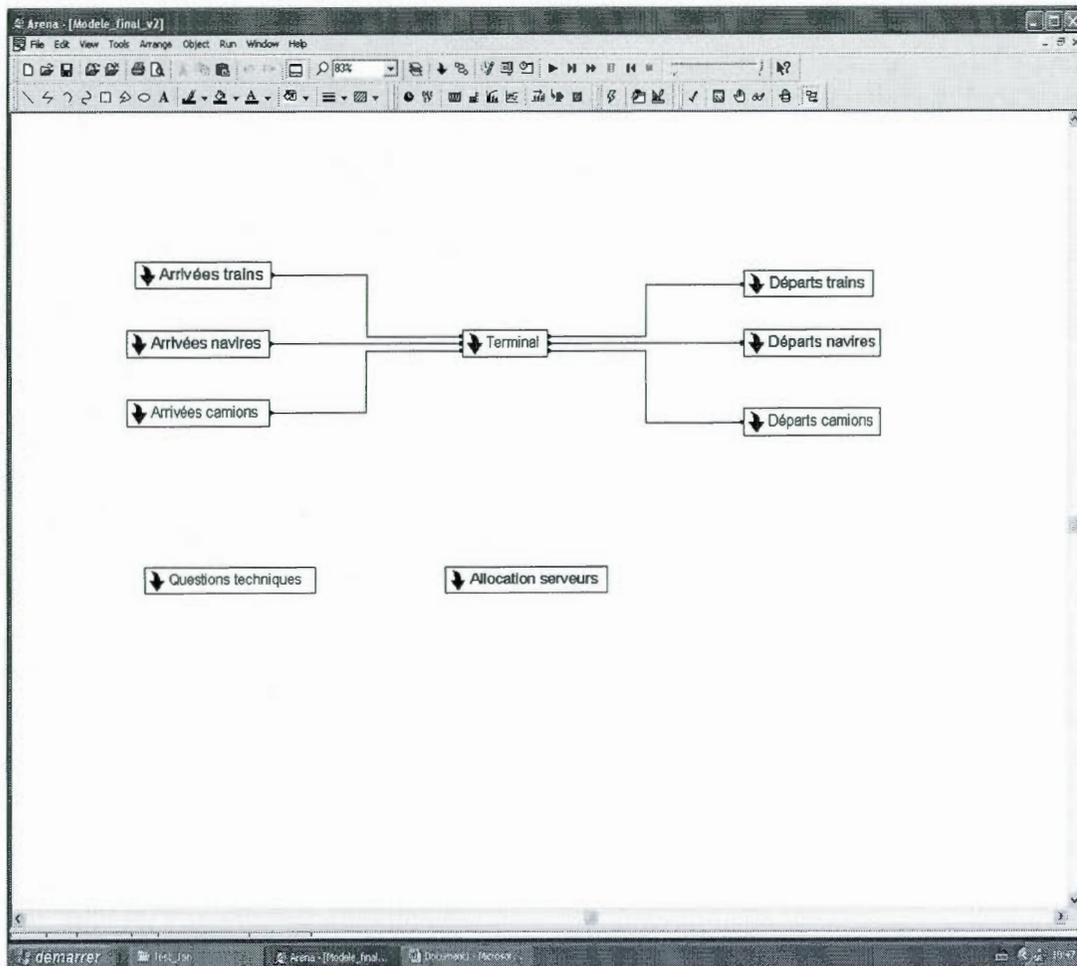


Figure 6.2 Modèle général de la simulation.

6.4.2 Arrivée des navires et génération des arrivées

Le sous-modèle d'arrivée des navires est composé de deux autres sous-modèles, soit les sous-modèles de génération des arrivées de navires et d'allocation de quai et de grues de quai. Ce modèle est relativement simple, puisqu'il se limite aux deux sous-modèles précédemment mentionnés. Le premier, qui constitue un des points de départ de la simulation, génère des navires auxquels le second attribue un quai et des grues de quai.

La figure 6.3, illustre le sous-modèle de génération des arrivées de navires. Les deux premiers modules situés à la gauche du schéma sont les modules de création des navires. Ces modules utilisent une distribution qui leur a été attribuée afin de générer de façon aléatoire

l'arrivée des navires de deux différentes lignes de transport maritime de conteneurs. Les distributions utilisées pour générer ces arrivées, comme l'ensemble des distributions statistiques utilisées dans le simulateur, seront présentées dans le chapitre suivant portant sur la calibration et la validation de la simulation.

Les deux modules qui suivent immédiatement les modules de création sont des modules de retenue. Un module de retenue est utilisé pour, comme son nom l'indique, retenir une entité. Il existe trois types de modules de retenue. Le premier type relâche l'entité à la réception d'un signal, le second type la relâche lorsqu'une condition est satisfaite et le dernier retient l'entité jusqu'à ce qu'un module de retrait retire l'entité de la file d'attente du module de retenue. Dans le cas présent, le second type de module de retenue est utilisé. Lorsqu'une entité se présente à ce module, il vérifie si le nombre de navire à quai est inférieur à deux. Si tel est le cas, le navire est relâché et poursuit le processus. Dans le cas contraire, il est retenu jusqu'à ce que la condition s'avère vraie. Cette condition est nécessaire afin de s'assurer que le nombre de navires à quai n'excède pas le nombre de navires en service sur les différentes lignes maritimes qui fréquentent le terminal.

Une fois qu'un navire est relâché par un module de retenue, les modules d'affectation qui suivent, assignent des attributs au navire et mettent à jour certaines variables du système. Les attributs assignés aux navires sont le nombre de conteneurs à décharger, le nombre de conteneurs à charger, le temps d'arrivée du navire ainsi que la ligne à laquelle il appartient. De plus, une variable qui tient le compte du nombre de navires à quai de cette ligne est incrémentée de un.

Le cheminement sera ensuite différent selon la ligne à laquelle le navire appartient. En ce qui concerne les navires de la ligne numéro deux, à leur sortie du premier module d'affectation, ils sont dirigés vers un autre module d'affectation qui leurs affecte un rang de navire, selon la présence ou non d'un autre navire de la même ligne à quai. En effet, si un navire de la seconde ligne est à quai au même moment, le nouvel arrivant se voit attribué le rang de navire deux. Les navires convergent ensuite vers un module de compte et un module d'affectation qui assigne la valeur actuelle du compteur comme nom au navire.

Pour les navires de la ligne un, la procédure est différente. Cette différence est due à la distribution statistique utilisée pour représenter les arrivées de navires de la ligne. En effet, cette distribution peut générer occasionnellement des valeurs de zéro pour le temps entre les arrivées de navires, ce qui représente l'arrivée simultanée de deux navires. Ces arrivées simultanées avaient pour effet une erreur dans la simulation, puisque deux navires se retrouvaient à quai simultanément et possédaient le même rang de navire. Le module de délai qui suit le module d'affectation retient les navires pour une période de 0,0005 heure. De cette façon, la variable qui compte les navires de la première ligne est mise-à-jour avant que le second navire se présente aux modules d'affectation qui affectent les rangs de navire. Ainsi, la problématique précédemment décrite est évitée. Le module de décision, qui suit le module de délai, dirige les navires vers les modules d'affectations, selon qu'il s'agisse du premier ou du second navire. À leur sortie du module d'affectation, la suite du processus est la même que les navires de la ligne deux.

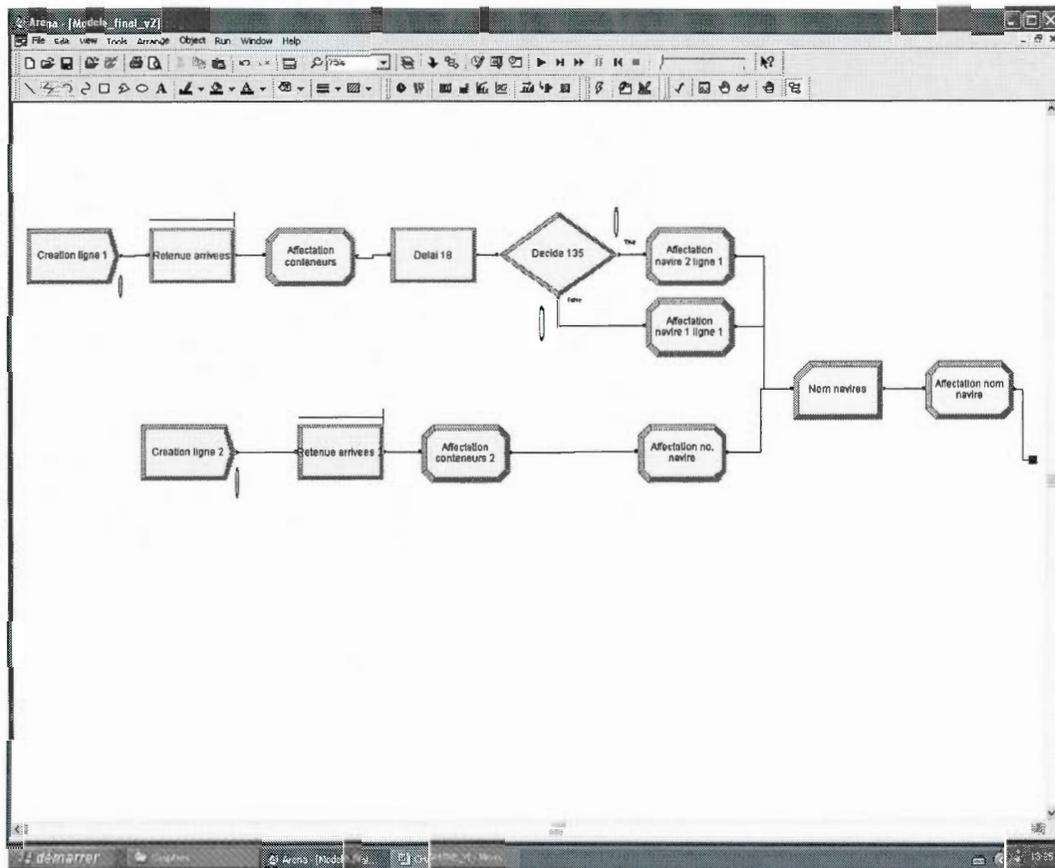


Figure 6.3 Sous-modèles de génération des arrivées de navire.

6.4.3 Allocation de quai

L'étape suivante, à l'arrivée d'un navire, est l'affectation d'un quai. Pour ce faire, les navires doivent d'abord passer par un module de retenue. Bien que le terminal utilisé comme étude de cas pour l'implantation possède quatre quais, il a été choisi de limiter le nombre de quai dans le modèle à deux, puisque le nombre de grues de quai limite le nombre de navires qui peuvent être traités simultanément à deux. Ainsi, le module de retenue retient les navires lorsque le nombre de navire à quai est égal à deux.

Ensuite, un module de délai, qui porte le nom de délai 17 sur la figure 6.4, retient les navires pour une période de 0,0005 heure avant qu'ils se dirigent vers les modules de décision et d'affectation qui suivent. Comme dans le cas du sous-modèle d'arrivée des navires, ce délai a

pour objectif d'éviter que les entités passent par des modules de décisions sans que les variables aient été mises-à-jour.

La suite de modules de décision et d'affectation qui suit est utilisée afin de déterminer si le navire est l'unique représentant de sa ligne ou s'il se présente alors qu'un navire de sa ligne est déjà amarré au terminal. Le premier module de décision trie les navires selon la ligne tandis que les seconds modules de décision vérifient s'il est le premier ou le second de sa ligne. Les modules d'affectation qui suivent allouent ensuite un attribut aux navires afin de les différencier s'ils proviennent de la même ligne, cet attribut se nomme le rang du navire.

Une fois que le navire est identifié, un module de séparation crée des copies du navire, lesquels seront ensuite dirigées vers un module d'affectation qui leurs affecte un nouveau type d'entité, soit un conteneur. Le nombre de duplicata est déterminé par l'attribut «nombre de conteneurs à décharger» qui a été attribué au navire préalablement. Ces conteneurs se dirigent ensuite vers le sous-modèle des grues de quai où la simulation des opérations de déchargement des navires débute. Une fois que les conteneurs sont créés, l'entité originale, soit le navire arrivant, est encore une fois séparée. Le duplicata ainsi créé se dirige vers le bas de la fenêtre où des grues de quai seront attribuées au navire, tandis que l'original poursuit sa route vers un module de décision qui trie les navires selon la ligne à laquelle ils appartiennent. Bien qu'un duplicata du navire ait été créé, la simulation considère qu'il y a un seul navire présent au terminal. En effet, le duplicata agit à titre d'entité de contrôle pour l'allocation des grues de quai. Une entité de contrôle est une entité qui existe seulement pour représenter des prises de décision, mais qui n'existe pas réellement dans le système physique. Les modules d'affectation qui suivent servent à mettre à jour une variable qui détermine le nombre de navires à quai de chacune des lignes. Le navire poursuit ensuite sa route vers un module de retenue qui retiendra le navire jusqu'à ce que les opérations de déchargement et de chargement de celui-ci soient complétées.

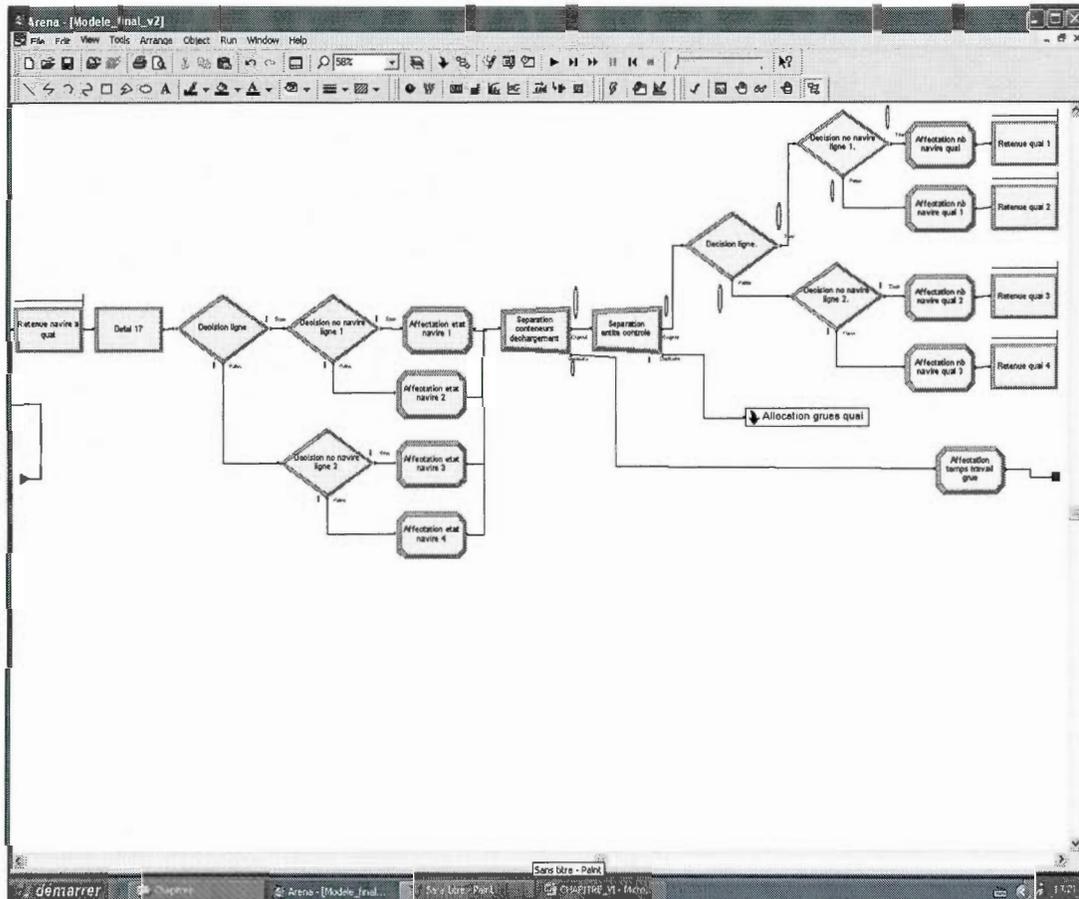


Figure 6.4 Sous-modèle d'allocation des quais.

6.4.4 Allocation des grues de quai

La première étape de l'allocation de grues de quai consiste à déterminer si un navire utilise déjà certaines grues ou si elles sont toutes libres. Pour ce faire, l'entité de contrôle passe par un module de décision qui vérifie si le nombre de navires à quai est égal à zéro. Dans les cas où la condition est fautive, l'entité est dirigée vers un sous-modèle de réallocation des grues de quai aux navires. Si la condition est vraie, le navire se dirige vers les modules de décisions suivants qui trient les navires en fonction de la ligne et du rang, afin qu'un nombre de grues lui soit assigné en fonction de ces caractéristiques. L'assignation des grues de quai aux navires se fait par la mise à jour d'une variable qui définit le nombre de grues de quai allouées à chacun des navires. Une fois cette variable mise à jour, l'entité de contrôle se dirige vers un module de retenue, qui la retient pour une période de huit heures, ou jusqu'à

l'arrivée d'un autre navire. L'entité de contrôle est retenue pour une période de huit heures, puisque le déploiement de la main d'œuvre est effectué pour des périodes de huit heures. Le terminal évalue donc l'allocation des grues de quai à cet intervalle puisque l'allocation des grues de quai aura un impact sur le nombre d'opérateurs de grues nécessaire. Si aucun navire n'arrive durant les huit heures, le navire retenu est relâché, il est trié par des modules de décisions, en fonction de sa ligne d'appartenance et de son rang, et les modules d'affectation qui suivent incrémentent une variable qui calcule les heures travaillées par les grues de quai, afin de calculer la productivité des opérations sur le navire lorsqu'elles seront complétées. Le navire suit ensuite les connections qui le retournent au module de décision en amont du processus d'allocation des grues de quai. La modélisation de ce processus est illustrée à la figure 6.5.

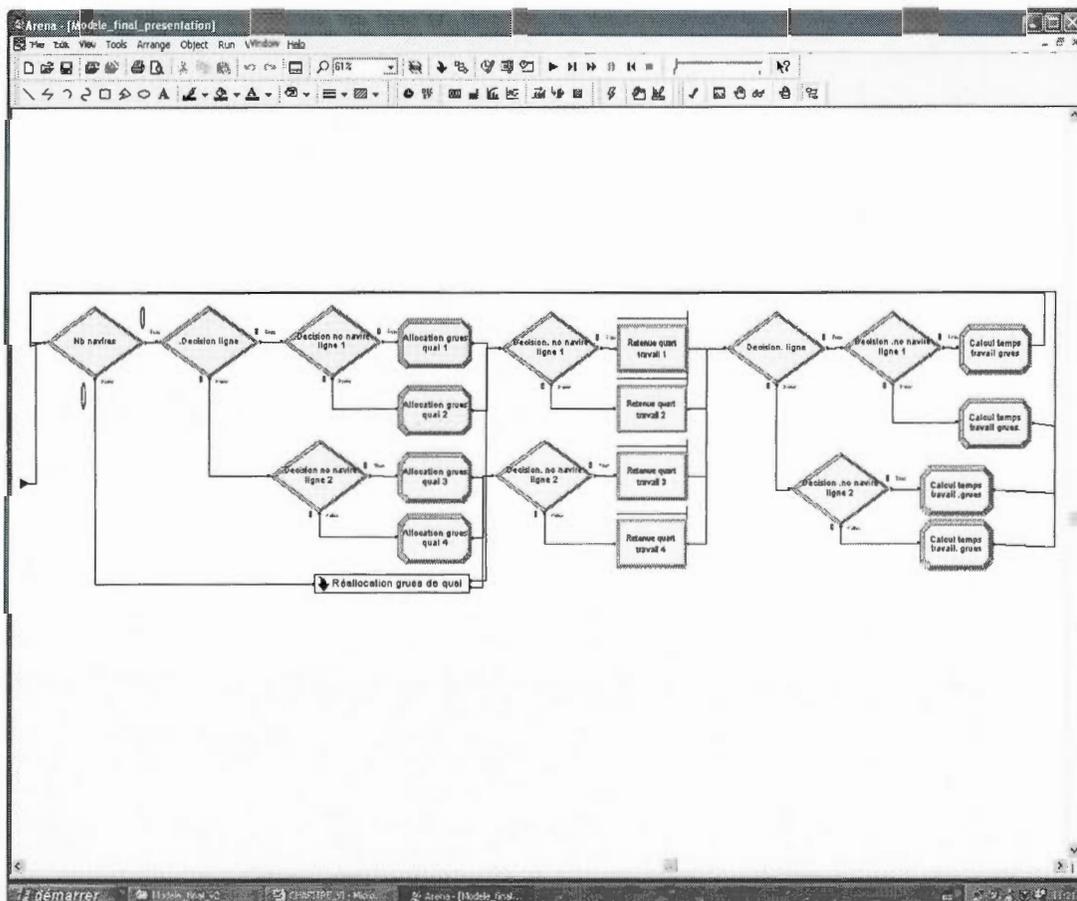


Figure 6.5 Allocation des grues de quai.

6.4.4.1 Réallocation de grues de quai

La première étape de la réallocation des grues de quai est de déterminer si les navires proviennent de la même ligne ou s'ils proviennent de lignes différentes, ce qui est généralement le cas. Lorsque les navires arrivent au processus de réallocation des grues de quai, un module de décision évalue le nombre de navire de la ligne 1 à quai. Pour ce faire une variable qui représente ce nombre est interrogée et si la réponse est égale à deux, les navires sont dirigés vers le sous-modèle identifié par l'étiquette « Réallocation grues de quai 1 » sur la figure 6.6. Si la réponse est équivalente à un, donc qu'il y a un navire de chaque ligne à quai, les navires sont dirigés vers « Réallocation grues de quai 2 » et vers l'autre sous-modèle si la réponse est égale à zéro. Cette dernière réponse signifie que les deux navires à quai appartiennent à la ligne numéro deux. De plus, un compteur et un module de disposition des entités ont été ajoutés au cas où la variable aurait une valeur qui ne correspondrait à aucune des possibilités. Dans ces cas, la simulation enregistre une erreur.

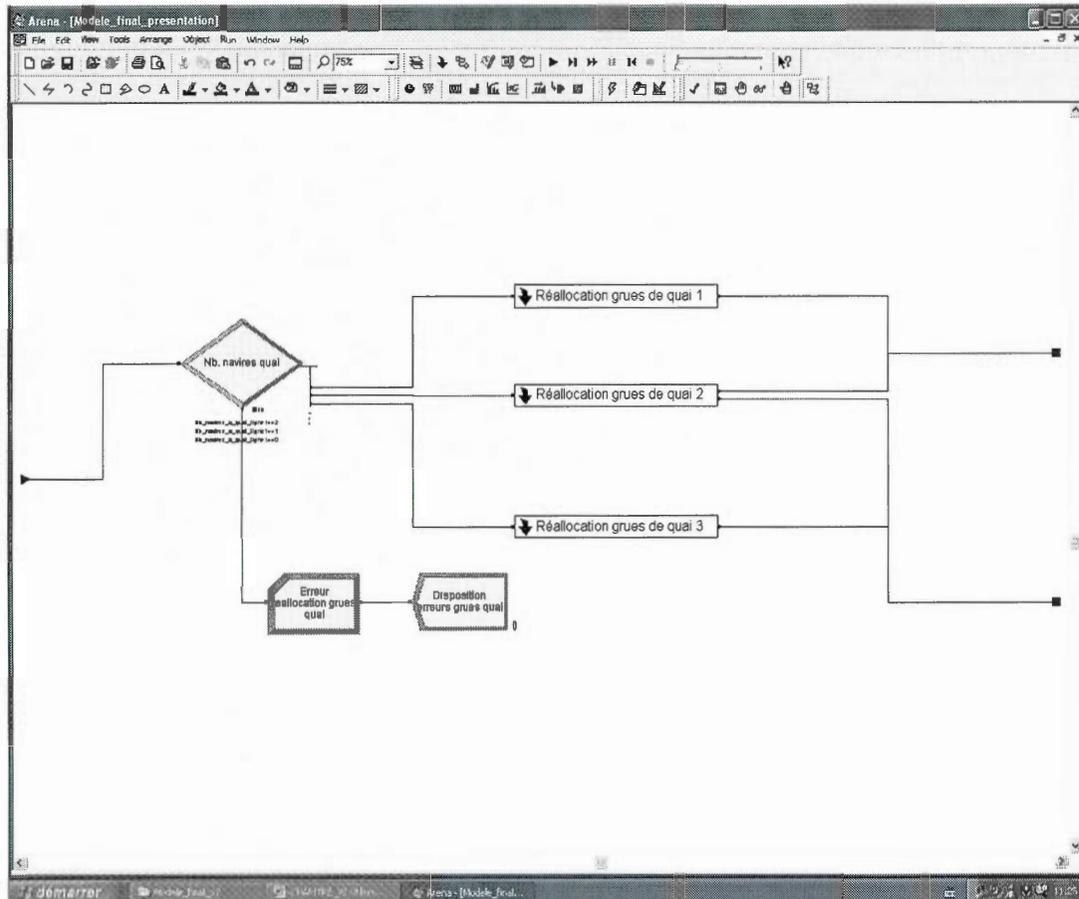


Figure 6.6 Première étape du processus de réallocation des grues de quai.

6.4.4.2 Sous-modèles de réallocation des grues de quai

La figure 6.7 présente le sous-modèle de réallocation « Réallocation grues de quai 1 ». La première étape de ce sous-modèle est de trier les navires en fonction de leur rang. En effet, connaissant le rang du navire qui a mis en branle le processus de réallocation, le simulateur pourra ainsi retirer l'autre navire du sous-modèle d'allocation des grues de quai, pour le soumettre au processus de réallocation. Pour ce faire, un module de décision dirige d'abord les navires vers un module de recherche en fonction de leur rang. Un module de recherche est un module qui permet d'effectuer une recherche dans une file d'attente pour identifier une entité particulière en fonction d'un attribut. Dans le cas présent, le module de recherche, qui suit le module de décision, identifie ensuite le navire ayant le rang contraire, dans la file d'attente du module de retenue des navires du processus d'allocation des grues de quai. Par

précaution, un compteur et un module de disposition ont été ajoutés afin de relever une erreur potentielle dans la condition de recherche du module de recherche. Lorsque le module de recherche trouve le navire recherché, il l'identifie et le module de retrait qui suit le retire de la file d'attente et le dirige vers un module d'affectation. Ce module d'affectation met à jour la variable qui garde le compte des heures travaillées par les grues de quai.

L'objectif de la première étape de ce processus consiste à identifier les navires et mettre à jour les variables du système. La deuxième étape de ce processus procède à la réallocation des grues de quai. Tout d'abord, les navires passent par un module de décision qui les dirige vers des modules d'affectation en fonction de leur rang. À ce module, la charge de travail restante de chacun des navires est calculée et un attribut correspondant à cette charge de travail leur est assigné. La charge de travail restante d'un navire correspond au nombre de conteneurs restant à décharger du navire auquel on ajoute le nombre de conteneurs qu'il reste à charger sur le navire.

Les modules de groupement et de séparation, qui suivent les modules d'affectation, visent à assurer qu'une des deux entités ne poursuive pas son chemin, sans que le calcul de la charge de travail restante de l'autre ne soit fait. Sans ces modules, la charge de travail restante du premier navire est comparée à la charge de travail restante du second navire lors de son dernier passage au module d'affectation. En conséquence, la comparaison n'est pas représentative de la charge actuelle de travail des navires. Cette situation est due à une particularité d'*ARENA*, qui poursuit le cheminement d'une entité jusqu'à ce qu'elle atteigne un module qui la retient ou lui impose un délai. Par contre, l'utilisation des modules de groupement et de séparation permet d'éviter cette situation.

Une fois que les entités sont séparées, un module de décision compare leur charge de travail restante et les dirige vers des modules de décision et d'affectation qui les trient et assignent deux grues de quai à celle dont la charge de travail restante est la plus importante. Lorsque l'affectation est faite, les navires quittent le sous-modèle et retournent vers le modèle d'allocation des quais et des grues de quai, où ils seront retenus pour huit heures.

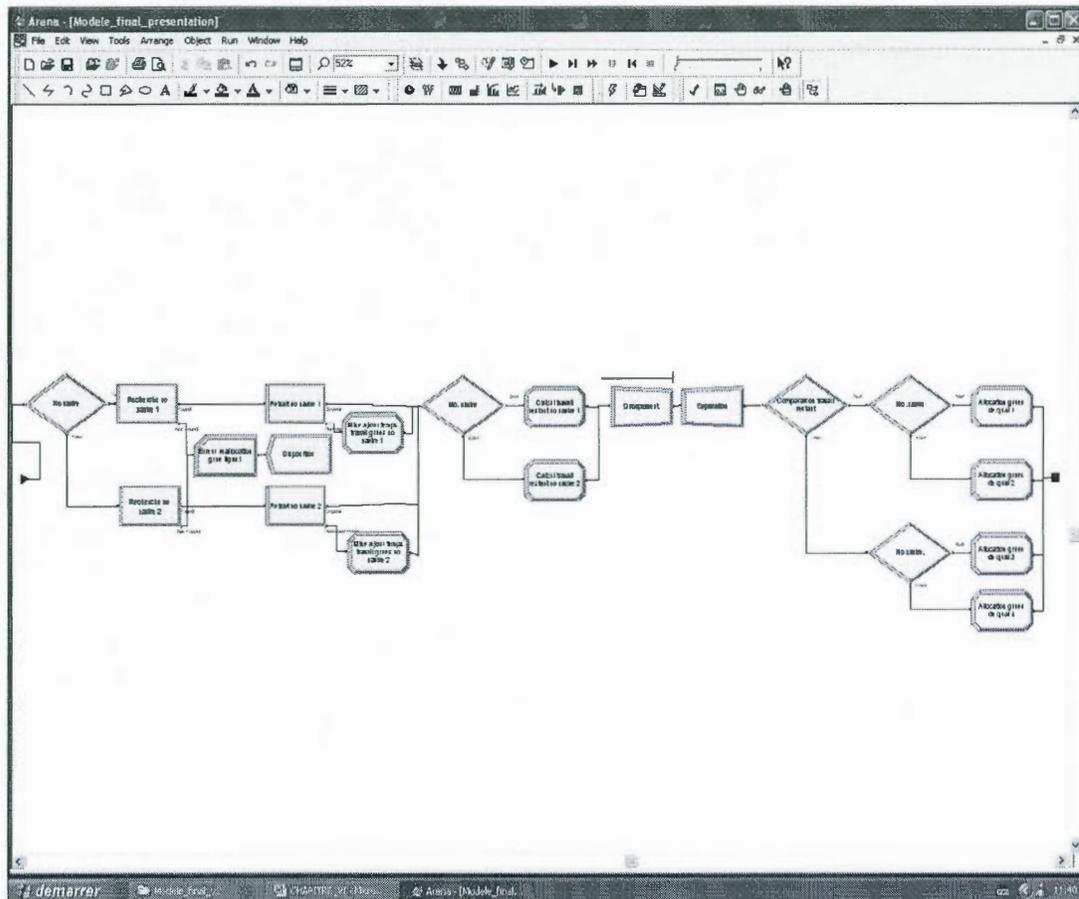


Figure 6.7 Sous-modèle « Réallocation des grues de quai 1 »

Le sous-modèle « Réallocation grues de quai 3 » est identique au sous-modèle « Réallocation grues de quai 1 », à l'exception que les tests logiques des différents modules s'appliquent aux navires de la ligne 2. Quant au sous-modèle « Réallocation grues de quai 2 », la logique est la même, à l'exception qu'il doit tenir compte d'un plus grand nombre de possibilités d'identité des navires, puisqu'il traite les cas où deux navires sont à quai, mais qu'ils proviennent de lignes différentes. Les possibilités sont plus nombreuses dû au rang des navires qui doit être pris en compte parallèlement à la ligne d'appartenance du navire.

Les différents modèles et sous-modèles présentés jusqu'à maintenant représentent le premier tiers du modèle d'arrivée des navires présenté au chapitre précédent (voir figure 5.3). En effet, ces modèles représentant l'arrivée des navires, l'allocation des quais et l'allocation des grues

de quai. En se référant à la figure 5.3, il peut être constaté que l'étape suivante est l'allocation des serveurs aux navires pour les opérations de déchargement.

6.4.5 Allocation des serveurs

Bien que dans les divers modèles et sous-modèles de la logique de la simulation, présentés au chapitre précédent, l'allocation des serveurs soit présentée comme plusieurs décisions indépendantes, l'implantation de ces décisions dans le simulateur ne peut être faite de cette façon. En effet, celles-ci doivent être intégrées, afin de s'assurer que le nombre de serveurs alloués n'excédera pas le nombre de serveurs disponibles. L'approche utilisée pour le processus d'allocation des serveurs consiste à définir l'état du système à l'aide de variables globales et de comparer l'état actuel avec les diverses possibilités d'états contenues dans un fichier texte externe à la simulation.

La première variable indique le nombre de navires qui se trouvent aux quais du terminal. Ensuite, une série de variables définissent l'état des navires en fonction de leurs lignes d'appartenance et de leurs rangs. L'état d'un navire sera égal à un si le navire décharge des conteneurs, à deux s'il charge des conteneurs et à zéro s'il n'y a pas de navire de cette ligne et de ce rang à quai. En effet, les variables d'état des navires sont au nombre de quatre, la première définit l'état des navires de la première ligne et de rang un, la seconde définit l'état des navires de la première ligne de rang deux et la troisième et la quatrième variable sont les mêmes, mais s'appliquent aux navires de la deuxième ligne. Le nombre de grues de quai allouées à chaque navire est aussi représenté par des variables globales, tandis que les deux dernières variables sont utilisées pour définir la présence (1) ou non (0) d'un train, ainsi que le nombre de serveurs requis pour le traitement des camions (0, 1 ou 2). À chacune des possibilités d'état du terminal, une allocation des serveurs est ajoutée. Cette allocation est déterminée en fonction des règles de décision qui ont été définies dans les divers modèles logiques du chapitre précédent (voir les figures 5.5, 5.7, 5.11, 5.14 et 5.15).

Par contre, la règle stipulant que le train laissera le serveur aux camions si 75% du chargement du train est complété n'a pas été implantée. En effet, l'implantation de cette règle se faisait difficilement avec l'implantation actuelle du processus d'allocation des serveurs,

puisqu'il aurait été nécessaire d'inclure une variable définissant si le chargement du train excède 75% du train ou non, dans le fichier externe définissant les états du terminal. En conséquence, le nombre d'états possibles du terminal aurait été doublé. Cette décision aura peu d'impact sur les résultats de la simulation, puisqu'un seul état du terminal peut mener à un manque de serveurs. En effet, il y aura un manque de serveurs lorsque deux navires déchargent, que des opérations de déchargement ou de chargement des trains s'effectuent et que deux serveurs sont nécessaires pour le traitement des camions. Dans ce cas, il manque un serveur. Il a été choisi de prioriser les trains au détriment des camions, au lieu d'appliquer la règle du 75% de chargement des trains. Ainsi, lorsque cette situation se présente, un seul serveur est affecté aux camions jusqu'au prochain déploiement des serveurs.

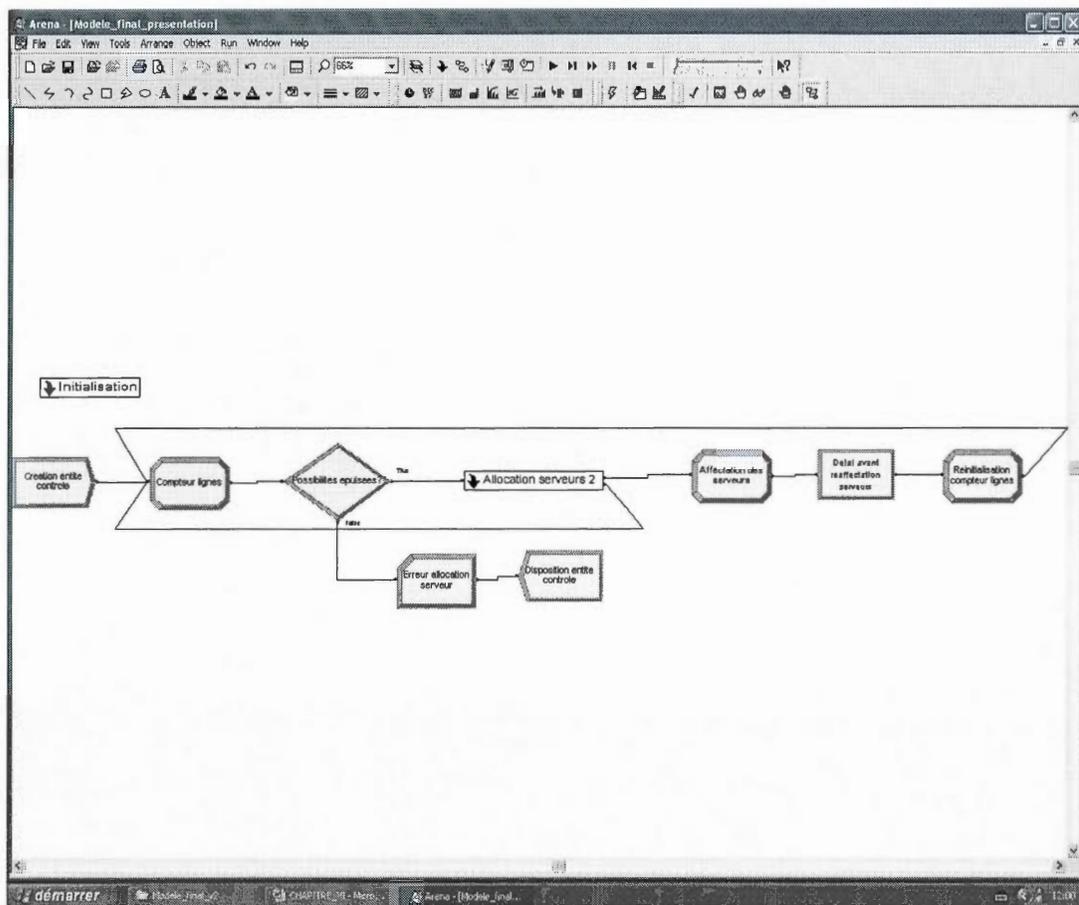


Figure 6.8 Modèle général d'allocation des serveurs

La figure 6.8 présente le modèle général d'allocation des serveurs. Le module de création qui se trouve en amont du processus est utilisé pour créer une entité de contrôle au début de la simulation. Cette entité cyclera à travers le modèle afin de comparer l'état actuel aux différentes possibilités d'état du système et d'allocation des serveurs. Les deux modules suivants sont utilisés à des fins de contrôle. En effet, le module d'affectation incrémente une variable qui indique à quelle possibilité l'état actuel est comparé. Le module de décision interroge cette variable afin de s'assurer qu'elle est inférieure au nombre de possibilités existantes. Si la variable est supérieure à cette valeur, l'entité de contrôle est dirigée vers un compteur qui enregistre l'erreur et elle se dirige ensuite vers un module de disposition. Lorsque la variable est inférieure au nombre de possibilités existantes, elle est dirigée vers le sous-modèle qui porte l'étiquette « Allocation serveurs 2 », où la comparaison entre les variables globales de définition du système et les possibilités qu'elles peuvent prendre sont faites pour chacune de ces variables globales. Cette comparaison se fait à l'aide de modules de décision qui comparent les valeurs des variables de définition du système et les variables d'états possibles. Tel qu'illustré sur la figure 6.9, lorsque la réponse s'avère fautive, l'entité de contrôle est dirigée vers la sortie inférieure du sous-modèle qui la redirige vers le premier module du modèle général d'allocation des serveurs. Lorsqu'une concordance entre l'état actuel du système et l'état défini est obtenue, l'entité de contrôle sort du sous-modèle par la branche du haut et se dirige au module d'allocation qui suit. À ce module, l'allocation des serveurs est faite selon la possibilité retenue et l'entité est ensuite retenue dans un module de délai pour une période de deux heures. À la fin de cette période, elle est relâchée, elle traverse un module d'affectation qui remet le compteur de cycles à zéro et le processus d'allocation reprend.

Cette réallocation périodique est effectuée afin de représenter les réallocations de serveurs qui se font en temps réel dans les terminaux maritimes de conteneurs. Ces réallocations de serveurs sont effectuées de façon à allouer la capacité des serveurs du terminal aux différentes tâches à accomplir, que ce soit les opérations sur les navires, les trains ou les camions. En effet, si, par exemple, un retard trop important s'accumule sur les opérations de chargement des wagons de chemin de fer, il se peut que les gestionnaires du terminal décident de retirer de la capacité sur les opérations de chargement des camions pour l'affecter

au chargement des trains. Concrètement, cela signifie que des serveurs affectés au chargement des camions seront affectés au chargement des trains. Par contre, puisqu'une réallocation en temps réel est difficilement réalisable dans le cadre de cette simulation, une période de temps fixe a dû être choisie. Un délai de deux heures permet un équilibre entre la représentativité de la simulation et l'effort de traitement à la réalisation des rondes de simulation.

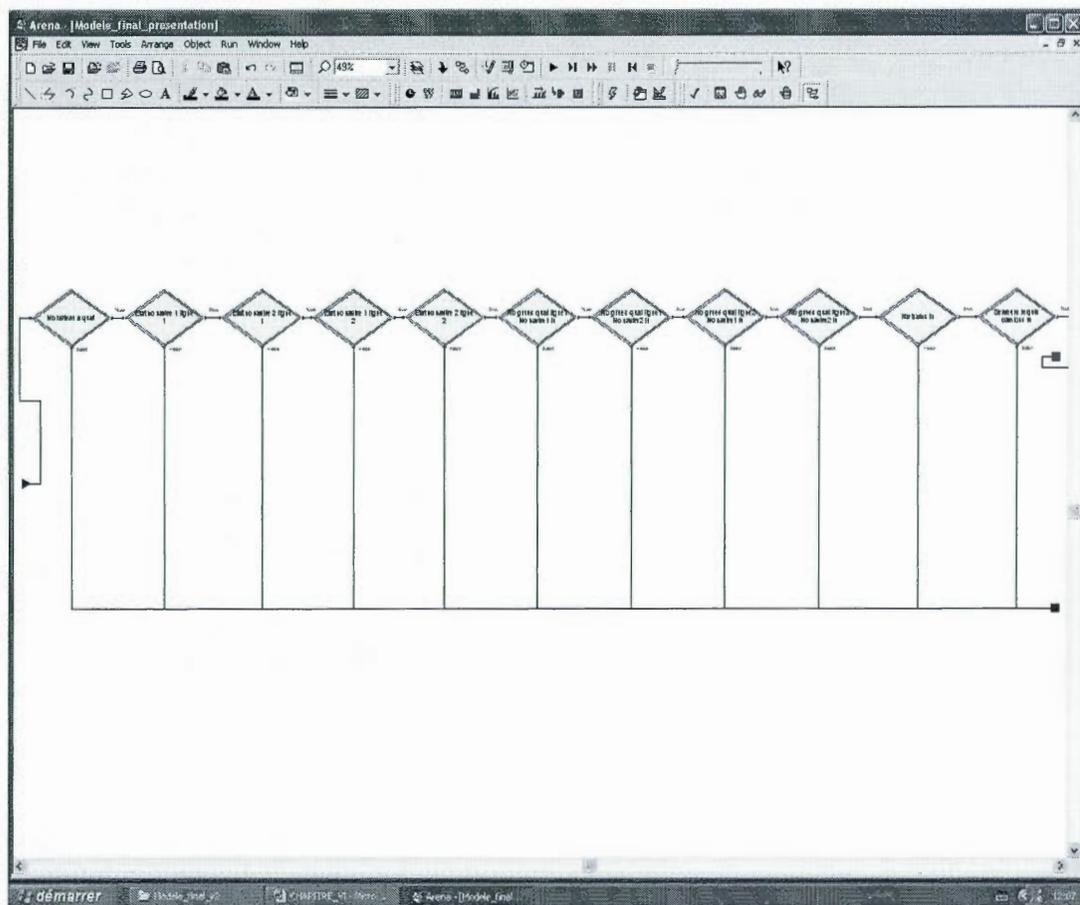


Figure 6.9 Sous-modèle «Allocation des serveurs 2»

Tel que mentionné auparavant, à chaque cycles effectués par l'entité de contrôle, une variable est incrémentée, afin d'identifier les différentes possibilités. Par contre, afin de comparer l'état actuel du système aux différentes possibilités, des valeurs doivent être associées aux variables de comparaison utilisées dans le sous-modèle «Allocation des serveurs 2». C'est la

fonction que remplit le sous-modèle d'initialisation du modèle d'allocation des serveurs (figure 6.10).

Au début de la simulation, une entité de contrôle est créée afin de lire les différentes possibilités d'état du terminal et les allocations des serveurs qui y sont associées. Cette entité passe d'abord par un module d'affectation qui incrémente une variable qui sert d'index d'identification à chacun des états du terminal définis dans le fichier texte externe à la simulation. Ensuite, un module de décision s'assure que le nombre de cycles effectués par l'entité est inférieur aux nombres de lignes du fichier texte. Lorsque toutes les lignes du fichier sont lues, la condition du module de décision devient fausse et l'entité est dirigée vers un module de disposition. Dans les cycles précédents, l'entité de contrôle se dirige vers un module de lecture de fichiers externes, où une valeur est associée aux variables de définition du système, pour l'index de lecture courant.

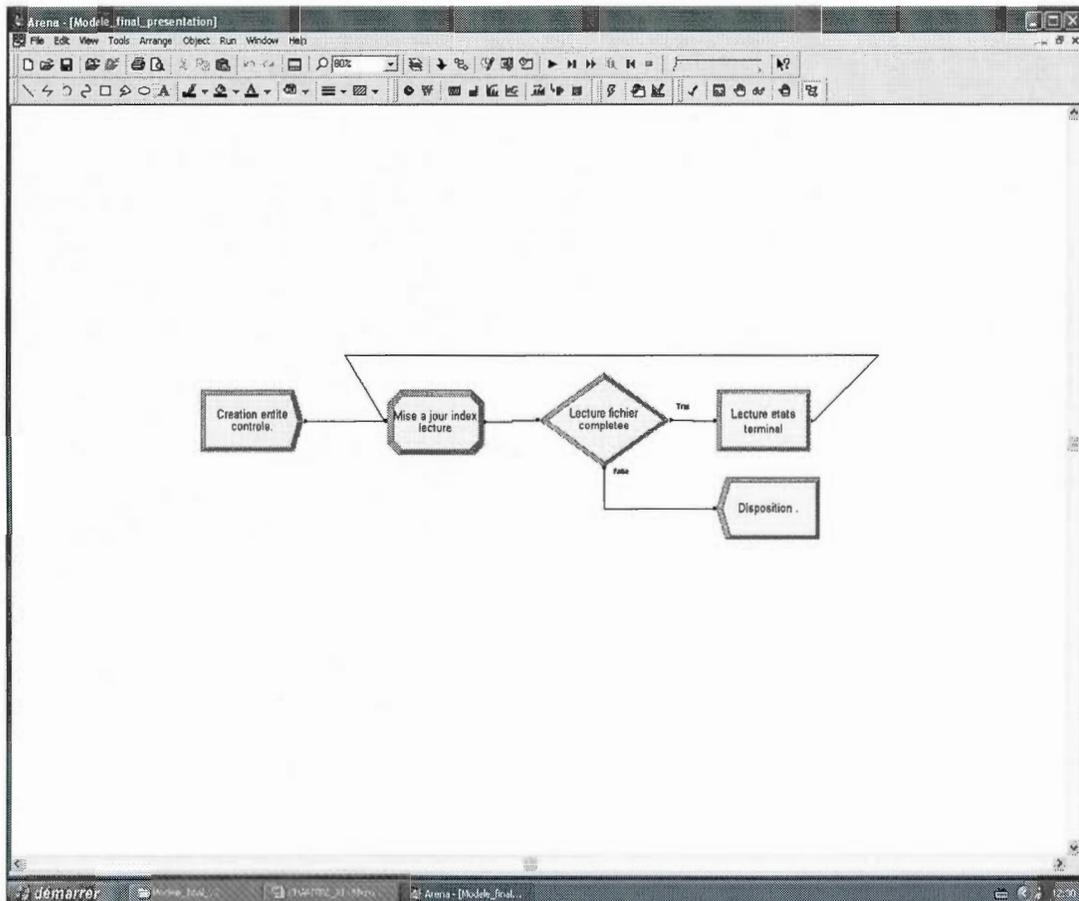


Figure 6.10 Initialisation de l'allocation des serveurs.

Ainsi, lorsque l'entité de contrôle cycle dans le sous-modèle «Allocation des serveurs 2», elle se réfère à la valeur des variables pour l'index équivalent à la variable qui définit son numéro de cycle.

6.4.6 Opérations sur les navires

Le modèle d'opérations sur les navires est un sous-modèle de la section «Terminal» du modèle général de la simulation présenté à la figure 6.2. C'est à l'intérieur de ce sous-modèle que sont représentées les opérations de déchargement et de chargement des navires. En se référant à la figure 5.6 du chapitre précédent, il peut être constaté que suite à la saisie du plan de chargement, l'étape suivante du processus de déchargement est le déchargement des conteneurs du navire par les grues de quai. C'est pourquoi, les divers sous-modèles du

modèle d'opérations sur les navires seront présentés dans l'ordre suivant : «Grues de quai», «Déchargement» et «Chargement».

6.4.6.1 Grues de quai

Suite à leur création dans le modèle d'allocation des quais, les conteneurs sont dirigés vers le sous-modèle des grues de quai, qui est représenté à la figure 6.11. Les conteneurs sont d'abord séparés selon leur ligne d'appartenance, la ligne un vers le haut et la ligne deux vers le bas. Ensuite, un module de retenue s'assure que la somme des conteneurs en file d'attente aux diverses grues est inférieure ou égale à quinze. Cette condition a pour objectif d'éviter que les conteneurs soient dirigés vers une grue et qu'une réallocation des grues aux navires se fasse alors que des conteneurs sont toujours en file d'attente pour une grue qui est maintenant allouée à un autre navire. Le module de retenue qui suit le premier s'assure qu'un navire est bien retenu dans le module de retenue du processus d'allocation des grues de quai. En effet, si un conteneur est relâché alors que la réallocation des grues de quai n'est pas terminée, celui-ci peut être alloué à la mauvaise grue ou causer une erreur qui fait échouer la simulation.

La suite du processus consiste à déterminer quelle grue traitera le conteneur et à effectuer ce traitement. Un module de décision trie les conteneurs en fonction de leur rang et les modules d'affectation qui suivent assignent un attribut au conteneur qui correspond au nombre de grues de quai qui ont été allouées à son navire d'appartenance. Ensuite, selon le nombre de grues qui ont été allouées à ce navire, le conteneur sera dirigé vers des modules de décision, qui dirigeront les conteneurs vers la grue à la charge de travail minimale entre les grues allouées au navire. Ainsi, pour les navires de la ligne un, si le nombre de grues est égal à trois, les conteneurs sont dirigés vers le module de décision situé au haut de la figure 6.11. Ce module choisit la grue avec la charge de travail minimale entre les trois grues. Lorsque le nombre de grues est égal à deux, un module de décision choisit la grue à la charge de travail minimale entre les grues un et deux, et lorsqu'une seule grue est allouée au navire, les conteneurs sont dirigés directement vers la grue trois. Pour ce qui des navires de ligne deux, le principe est le même, à l'exception que le nombre maximal de grues allouées à ces navires est de deux. Finalement, lorsque les conteneurs ont été traités par une grue de quai, un

module de décision les dirige vers le sous-modèle de chargement ou de déchargement selon la valeur de leur attribut nommé import/export. Lorsque la valeur est égale à deux, les conteneurs sont dirigés vers le chargement, tandis que lorsque la valeur est égale à un, ils sont dirigés vers le déchargement.

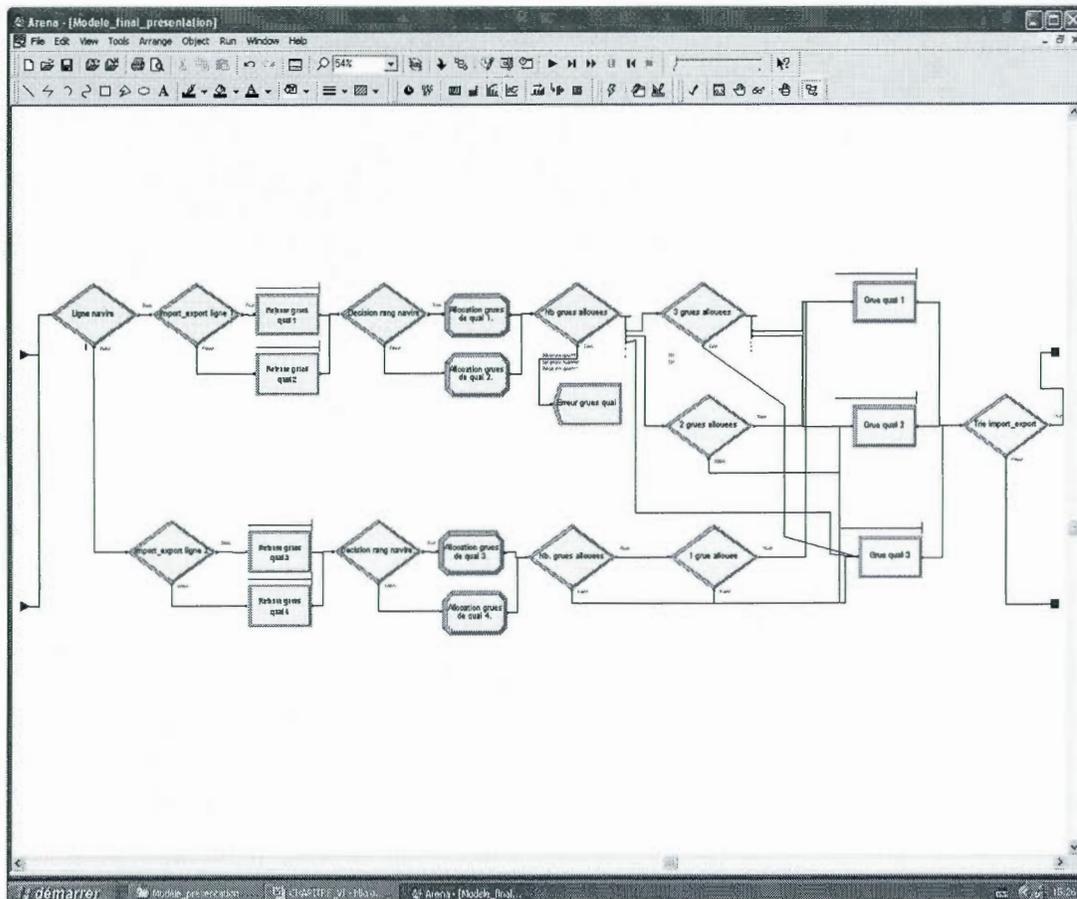


Figure 6.11 Sous-modèle des grues de quai.

6.4.6.2 Déchargement

Lorsque les conteneurs entrent dans le sous-modèle de déchargement des navires, le premier module rencontré est un module de décision qui les trie en fonction de leur navire d'appartenance. Ensuite, un module d'affectation est utilisé pour incrémenter une variable qui représente le nombre de conteneurs déchargés du navire. Les modules de décisions qui suivent, évaluent la condition d'égalité entre la valeur de cette variable et l'attribut des

conteneurs qui représente le nombre de conteneurs à décharger de leur navire d'appartenance. Tant que cette condition est fausse, les conteneurs sont dirigés vers un module de délai. Ce délai sert à représenter le temps de transport entre la grue et la pile de conteneurs, bien que le nombre de véhicules de transport interne soit assumé comme infini, un temps de transport doit quand même être attribué aux conteneurs, puisque ce transport doit quand même être effectué. Une fois ce délai passé, le module suivant assigne un attribut qui définit le temps nécessaire au serveur pour le transfert du conteneur dans la pile. Finalement, un compteur enregistre le nombre de conteneurs qui ont été déchargés et les conteneurs sortent de ce sous-modèle pour se diriger vers le sous-modèle qui représente les opérations des serveurs.

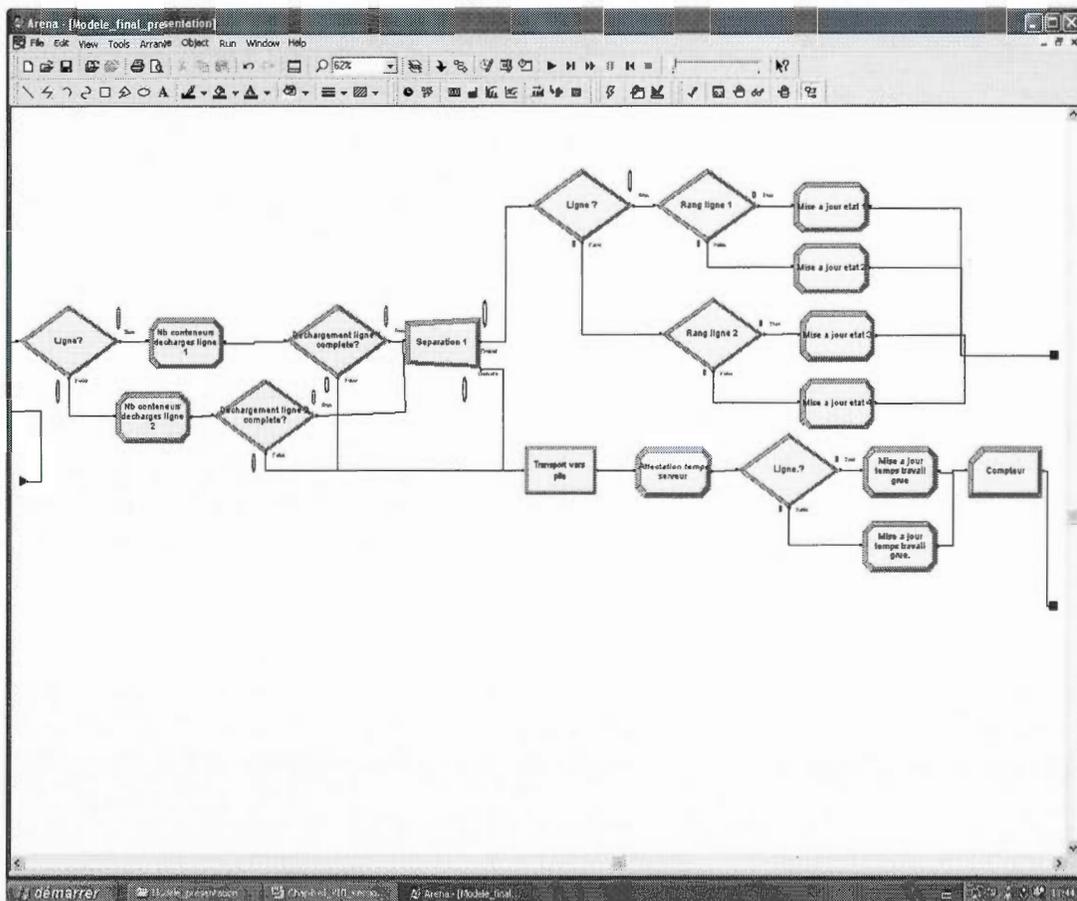


Figure 6.12 Déchargement des navires

Par contre, lorsque la condition d'égalité entre le nombre de conteneurs à décharger et le nombre de conteneurs déchargés est vraie, un duplicata du conteneur suit le même chemin

que les autres conteneurs, tandis que l'original prend une autre direction. À partir de ce point, l'original est utilisé comme entité de contrôle pour déclencher les opérations de chargement du navire. Le conteneur, qui agit comme entité de contrôle, se dirige vers la branche du haut du module de séparation. Il est trié par les modules de décision qui identifient d'abord la ligne d'appartenance et ensuite le rang, et les modules d'affectation changent la variable d'état du navire pour qu'il soit en chargement. De plus, une variable définissant le nombre de conteneurs chargés sur ce navire est réinitialisée. L'entité de contrôle quitte ensuite le sous-modèle de déchargement des navires et se dirige vers le sous-modèle de chargement des navires.

6.4.6.3 Chargement

Tel qu'il peut être constaté sur la figure 5.8 du chapitre précédent, le processus de chargement des navires débute à la pile de conteneurs de la zone de stockage du terminal. C'est ce qui explique pourquoi le sous-modèle de chargement des conteneurs du simulateur présenté à la figure 6.13 comprend deux parties. En effet, la partie du haut représente les étapes du processus qui doivent être effectuées avant que le conteneur soit chargé sur le navire, tandis que la partie du bas représente les étapes qui suivent le chargement du conteneur sur le navire.

L'entité de contrôle issue du sous-modèle de déchargement des navires se présente dans le sous-modèle de chargement des navires par le point d'entrée supérieur. Il se dirige ensuite vers un module de séparation où un nombre de duplicatas équivalent au nombre de conteneurs à charger sur le navire sera créé. Le nombre de conteneurs à charger sur le navire est «connu» pour l'entité de contrôle, puisque cette dernière possède un attribut définissant ce nombre. Une fois les conteneurs à charger créés, l'entité de contrôle se dirige vers un module de disposition.

Quant aux conteneurs issus du module de séparation, ils sont dirigés vers un module de décision qui les dirigera vers le haut du modèle selon une probabilité de 55% et vers le bas le reste du temps. Cette probabilité provient d'une estimation de la distribution des conteneurs par modes de transport fournie par les dirigeants du terminal utilisé pour implanter la

simulation. En effet, selon eux 55% des conteneurs chargés sur les navires sont acheminés au terminal par train, tandis que les 45% restants sont acheminés par camion. L'évaluation de la distribution est la même en ce qui concerne les conteneurs déchargés. La suite de la description concerne seulement le traitement effectué sur les conteneurs issus de la branche de droite du module de décision. Par contre, le traitement sera le même pour les conteneurs issus de la branche du bas du module de décision, à l'exception que l'inventaire de conteneurs arrivés par camion est diminuer et non l'inventaire de conteneurs arrivées par train.

Ainsi les conteneurs dirigés vers le haut passent ensuite par un module de recherche qui identifie un conteneur à exporter dans la zone de stockage du terminal. Ce conteneur est ensuite retiré de la zone de stockage par le module de retrait et il est ensuite dirigé vers un module de disposition. Ce dernier est détruit, puisque le conteneur ayant déclenché le retrait de la zone de stockage est utilisé pour la suite du processus de chargement. La raison d'être de ce retrait est de diminuer l'inventaire de conteneurs du terminal. Dans les cas où l'inventaire de conteneurs est insuffisant, le résultat de la recherche du module l'ayant effectué sera négatif. En conséquence, l'entité qui a déclenché la recherche ressortira du module par la branche du bas. Lorsque le nombre de conteneurs en inventaire est suffisant, le conteneur ayant déclenché la recherche se dirige ensuite vers un module d'affectation où on lui accorde un attribut qui stipule qu'il s'agit d'un conteneur qui doit être chargé sur un navire. De plus, un autre attribut détermine le temps nécessaire pour l'opération de retrait du conteneur de la pile par le serveur et une variable, représentant le nombre de conteneurs acheminés au terminal par train, est diminué de un. Les conteneurs quittent ensuite le sous-modèle de chargement des navires et se dirigent vers le sous-modèle qui représente les serveurs. Afin de simplifier la compréhension, la suite du sous-modèle de chargement des navires sera décrite avant de décrire le sous-modèle des serveurs. Pour le moment, retenons que les conteneurs qui se présentent à ce sous-modèle subissent un traitement qui simule le temps nécessaire aux serveurs pour saisir un conteneur dans la cour et le charger sur un véhicule de transport interne.

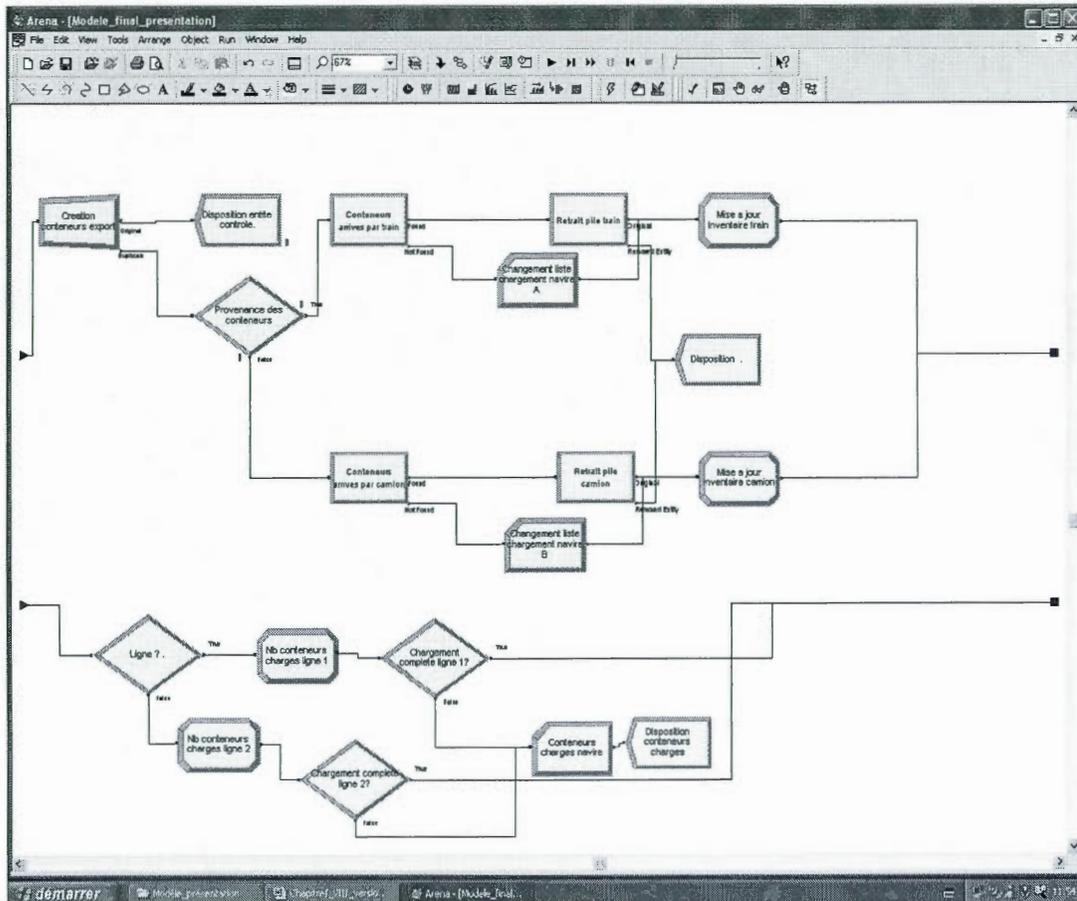


Figure 6.13 Chargement des navires.

Suite à leur traitement par le sous-modèle des serveurs, les conteneurs passent par la suite par le sous-modèle des grues de quai avant de revenir au sous-modèle de chargement des navires. Ce passage par le sous-modèle des grues de quai simule le chargement des conteneurs sur le navire. La suite du sous-modèle de chargement des navires est nécessaire pour comptabiliser les conteneurs chargés et déclencher le processus de départ des navires lorsque le chargement est complété. Lorsqu'ils reviennent, les conteneurs arrivent par le point d'entrée du bas du sous-modèle. À leur arrivée, ils sont triés selon leur ligne d'appartenance par un module de décision et ils incrémentent une variable qui représente le nombre de conteneurs chargés sur le navire. L'incrément est fait par les modules d'affectation qui suivent le module de décision. La suite consiste à déterminer si le chargement du navire est complété en comparant la valeur de la variable pour le nombre de conteneurs chargés et l'attribut des conteneurs qui indique le nombre de conteneurs à charger. Lorsque le nombre de conteneurs chargés est égal

au nombre à charger, donc que le chargement est complété, le conteneur est dirigé vers le sous-modèle de départs des navires, autrement il est compté et détruit.

6.4.7 Serveurs

Avant de voir ce qu'implique le départ d'un navire dans la simulation, il importe de revenir sur le sous-modèle qui représente les opérations des serveurs. En effet, les serveurs sont impliqués dans les processus de déchargement et de chargement des conteneurs, ainsi que dans les opérations de chargement et de déchargement des autres modes de transport.

Peu importe le mode de transport duquel les conteneurs proviennent, le principe général est le même pour les opérations des serveurs. En effet, le conteneur arrive à un module de retenue, qui le retient jusqu'à ce que le nombre de serveurs occupés à traiter des conteneurs soit inférieur au nombre de serveurs qui ont été alloués à ce type d'opération. Un module d'affectation augmente ensuite le nombre de serveurs occupés au passage du conteneur et ce dernier se dirige ensuite vers un module de procédé qui représente les opérations des serveurs. À son arrivé à ce module, le conteneur saisit un serveur au hasard dans un ensemble, rendant ainsi ce serveur non disponible pour les autres conteneurs. Le serveur sera retenu pour la période correspondant à la valeur de l'attribut «temps de travail serveur» qui a été attribuée préalablement au conteneur. À la fin de cette période, le conteneur relâche le serveur qui redevient disponible pour un autre conteneur. Ensuite, le conteneur passe par un module d'affectation qui diminue de un le nombre serveurs occupés pour les opérations sur le mode de transport.

La saisie des serveurs dans l'ensemble de serveurs se fait au hasard, dû à une particularité du logiciel *ARENA*. En effet, lorsqu'un ensemble est créé, la règle pour saisir un membre de cet ensemble doit être choisie parmi les règles existantes dans le logiciel. C'est pourquoi des modules d'affectation et des variables définissant le nombre de serveurs occupés ont du être utilisés pour implanter le sous-modèle d'opérations des serveurs. Le choix du serveur au hasard a été utilisé puisque les autres règles de sélection auraient entraînés des choix de serveurs par ordre de préférence ou auraient eu le même effet qu'une sélection au hasard. Le choix des serveurs par ordre de préférence aurait été intéressant si la règle de préférence avait

pu être liée à l'état du terminal. En effet, ceci aurait permis de choisir les serveurs en fonction de leur allocation. Par exemple, un serveur pour décharger les trains aurait été choisi parmi les serveurs alloués aux trains. Cependant ce n'est pas le cas, donc la règle de saisie au hasard s'avère la plus intéressante dans cette situation.

La figure 6.14 présente une photo de l'écran du sous-modèle des opérations des serveurs. Le premier groupe de modules au haut de l'écran représente les opérations des serveurs affectés aux trains, tandis que celui du bas représente les opérations sur les camions et celui du milieu les opérations sur les conteneurs des navires.

En ce qui a trait aux opérations sur les navires, le cheminement des conteneurs suit le principe général, mais ces derniers sont préalablement triés en fonction de la ligne d'appartenance et du rang d'arrivée de leur navire de provenance. Selon qu'ils soient déchargés ou chargés sur un navire, les conteneurs se dirigeront ensuite vers le sous-modèle d'inventaire de la zone de stockage du terminal, dans le premier cas, ou vers le sous-modèle des grues de quai dans le second cas. La raison de ces cheminements est qu'un conteneur déchargé du navire est ensuite entreposé dans une pile jusqu'à ce qu'il soit transféré vers un autre mode de transport, tandis qu'un conteneur retiré de la pile est ensuite transporté jusqu'aux grues de quai pour être chargé sur le navire.

Les conteneurs déchargés des camions ou à charger sur un camion suivent eux aussi le même type de cheminement. Un module de transfert supplémentaire à cette partie du sous-modèle est utilisé pour diminuer le nombre de connexions dans le modèle. Les conteneurs qui sortent de ce module proviennent du processus de chargement des camions. À leur sortie du sous-modèle d'opérations des serveurs, les conteneurs sont dirigés vers un module de décision qui les trie selon qu'ils soient chargés sur un camion ou déchargés d'un camion.

Le cas des opérations sur les trains est plus particulier. En effet, les conteneurs sont manipulés deux fois dans chacun des processus de chargement et de déchargement, une fois près de la pile et une fois près du train (voir le chapitre III qui détaille le processus de déchargement et de chargement des trains). C'est pourquoi la partie du sous-modèle

d'opérations des serveurs qui représente les opérations sur les trains est plus complexe. Suite à leur sortie du module de procédé et la mise à jour du nombre de serveurs occupés, les conteneurs sont triés par un module de décision selon qu'ils fassent partie du processus de déchargement ou de chargement des trains. Un autre module de décision les trie ensuite selon qu'il s'agisse de leur premier passage aux serveurs ou leur second. S'il s'agit du premier, le conteneur est retourné au sous-modèle correspondant d'opérations sur les trains où la suite du processus le fera revenir au sous-modèle d'opération des serveurs.

S'il s'agit d'un conteneur déchargé d'un train, il est dirigé vers le module de décision du haut. Ce module de décision le dirigera vers les modules de transfert s'il s'agit de son second passage et vers la sortie du sous-modèle d'opérations des serveurs s'il s'agit de son premier passage. Dans ce dernier cas, le conteneur est redirigé vers le sous-modèle de déchargement des trains, tandis que dans le premier cas, il est dirigé vers le sous-modèle d'inventaire de la zone de stockage du terminal.

Par contre, si le conteneur est un conteneur qui doit être chargé sur un train, le module de décision le dirigera vers le module de délai s'il s'agit de son premier passage et vers le module de transfert s'il s'agit de son second passage. Dans ce dernier cas, le conteneur est redirigé vers le processus de chargement des trains par les modules de transfert. Dans le premier cas, le délai appliqué au conteneur représente le temps de transport entre la pile de conteneurs de la zone de stockage du terminal et le train sur lequel les conteneurs seront chargés. Ensuite, le module d'affectation attribut un temps de travail pour le second passage du conteneur aux serveurs et met à jour l'attribut qui indique le numéro de passage du conteneur aux serveurs. Les modules de transfert qui suivent dirigent le conteneur vers le module de transfert situé en amont de cette partie du sous-modèle, afin qu'il soit traité une seconde fois par les serveurs.

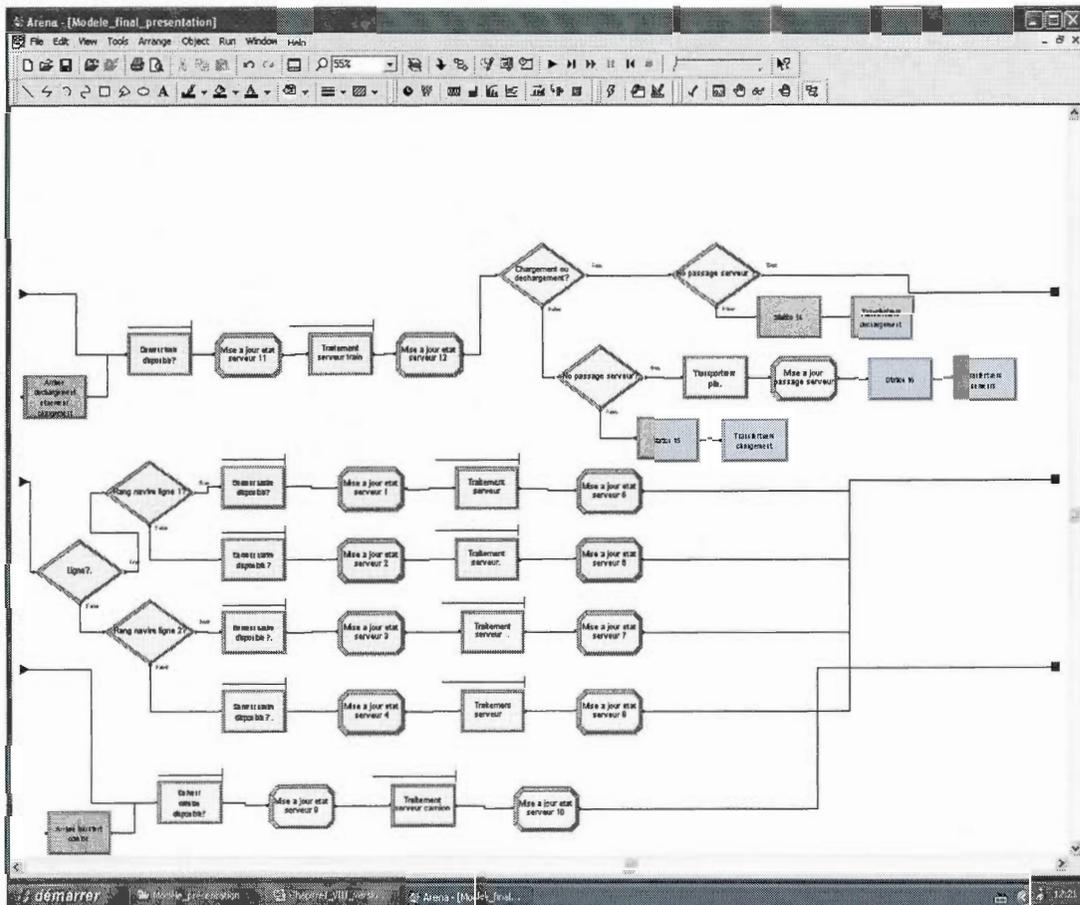


Figure 6.14 Sous-modèle des opérations des serveurs.

6.4.8 Départ des navires

En se rapportant à la figure 5.3, qui représente le design du simulateur pour l'arrivée et le départ des navires, il peut être remarqué que les seules étapes qui n'ont pas été couvertes sont les dernières étapes du modèle, soit la libération des grues de quai, des serveurs et du quai, ainsi que le départ du navire. Ces étapes sont représentées par deux sous-modèles à l'intérieur de la simulation, soit le sous-modèle de libération du quai et des grues de quai et le sous-modèle de départ du navire.

6.4.8.1 Libération du quai et des grues de quai

En se rapportant à la description du sous-modèle de chargement des navires, il peut être constaté que le conteneur qui quitte le sous-modèle lorsque le chargement est complété se

dirige vers le sous-modèle de libération du quai et des grues de quai. À son arrivée, le conteneur est trié par un module de décision selon sa ligne d'appartenance. Ensuite, un module de recherche identifie le navire sur lequel le conteneur a été chargé, et le module de retrait qui suit retire le navire de sa file d'attente dans le sous-modèle d'allocation des grues de quai. L'entité retirée de la file d'attente est ensuite triée selon son rang par un module de décision et un module d'affectation ajoute les dernières heures travaillées par les grues de quai sur ce navire au nombre d'heures totales travaillées sur ce navire. Cette entité est ensuite détruite par le module de disposition. Quant à l'entité qui a initié la recherche, elle se dirige ensuite vers un autre ensemble de modules recherche-retrait afin de retirer le navire de la file d'attente du sous-modèle d'allocation des quais. L'entité retirée est détruite, tandis qu'un délai de 0,0001 seconde est appliqué à l'entité originale. Ce délai est nécessaire dû à une particularité du logiciel *ARENA* qui a été évoqué à la section 6.4.4.2. Dans le cas présent, sans le délai, les statistiques sur les heures travaillées par les grues de quai sur un navire sont remises à zéro avant la mise à jour qui suit le retrait des navires du sous-modèle d'allocation des grues de quai. Suite à ce délai, l'entité est triée selon le rang de son navire d'appartenance et le module d'affectation qui suit remet à zéro les variables définissant l'état du navire ainsi que le nombre de grues allouées. Le dernier module du sous-modèle assigne un temps de départ au navire. L'entité se dirige ensuite vers le sous-modèle de départ des navires. Tel qu'il peut être constaté sur la figure 6.15, le processus de libération des quais et des grues de quai est le même pour les navires des deux lignes, mais il doit être séparé puisque ce ne sont pas les mêmes variables et files d'attente qui sont affectées par le processus.

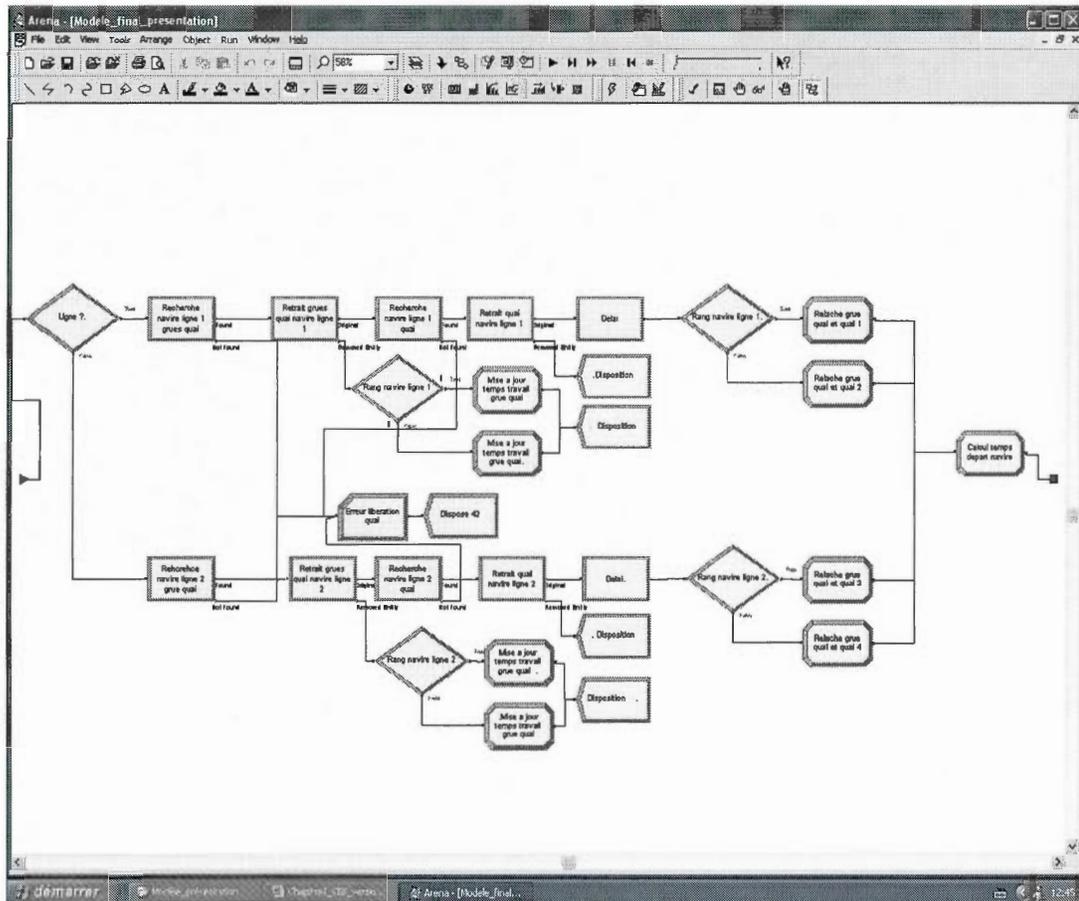


Figure 6.15 Libération du quai et des grues de quai.

6.4.8.2 Départ des navires

Le sous-modèle de départ des navires complète le modèle d'arrivée des navires de la figure 5.3 du chapitre précédent. L'implantation du départ des navires dans la simulation a des objectifs multiples. Tout d'abord, les statistiques sur les opérations de déchargement et de chargement des navires doivent être compilées, ensuite certaines variables doivent être réinitialisées pour les navires suivants et, finalement, le système doit disposer de l'entité, puisque le nombre d'entité qui existe simultanément dans la simulation est limité.

Lorsqu'une entité se présente dans le sous-modèle de départ des navires, elle passe par un compteur qui enregistre les départs de navires. Puis, un module d'affectation met à jour une variable qui calcule le temps passé à quai du navire. Un module d'écriture inscrit ensuite une

série de statistiques dans un fichier *Excel* externe à la simulation. Les informations qui y sont inscrites sont : la ligne d'appartenance du navire, le temps passé à quai par le navire, le nombre de conteneurs qui ont été déchargés et chargés, les heures travaillées par les grues de quai sur ce navire, ainsi que le temps d'arrivée et de départ du navire.

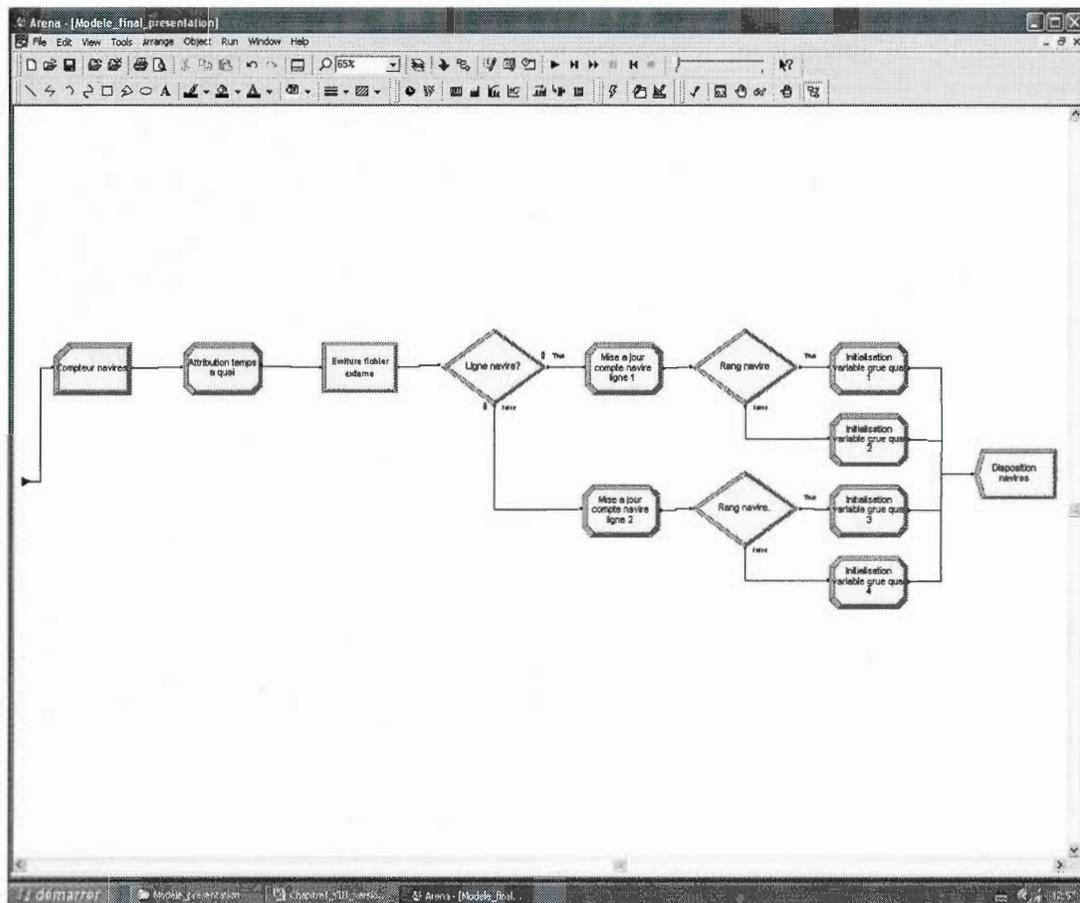


Figure 6.16 Départ des navires.

Les modules de décisions et d'affectation qui suivent sont utilisés pour ajuster des variables avant le départ du navire. Tout d'abord, diminuer de un la variable qui définit le nombre de navires dans le système de la ligne d'appartenance du navire qui quitte le terminal et, ensuite, remettre à zéro les statistiques sur le nombre d'heures travaillées par les grues de quai sur le navire.

6.4.9 Arrivée des trains

L'ensemble des sous-modèles du simulateur présentés jusqu'à maintenant portaient principalement sur la simulation des activités qui concernent les navires, de l'arrivée jusqu'au départ. Par contre, un terminal maritime de conteneurs constitue une plateforme de transfert entre divers modes de transport. C'est pourquoi la simulation doit aussi tenir compte des autres modes de transport impliqués dans la chaîne de transport intermodal.

Un premier mode de transport impliqué dans cette chaîne est le train. La figure 6.17 présente le sous-modèle d'arrivée des trains. Les trains sont créés de façon aléatoire par un module de création des entités. Les entités créées sont par la suite comptées avant qu'un nom, un temps d'arrivée, ainsi qu'un nombre de conteneurs à décharger et à charger leurs soient assignés.

Tel que mentionné à la section 6.1, les arrivées de trains sont générées de façon aléatoire, même si les trains arrivent quotidiennement au port selon un horaire prédéfini. Rappelons que l'élément aléatoire provient du fait que la livraison des wagons sur le terminal n'est pas effectuée par les transporteurs ferroviaires à leur arrivée au port, mais bien par le port, qui possède ses propres locomotives qu'il utilise à cette fin.

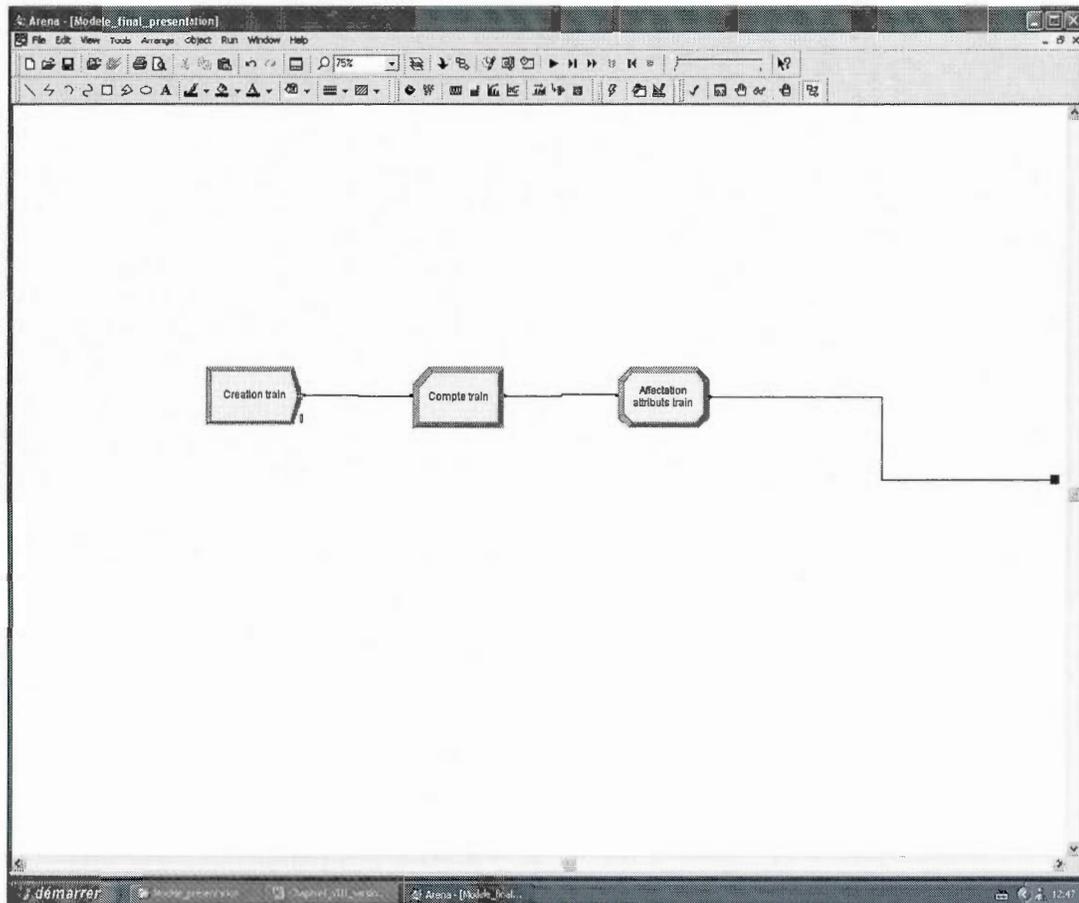


Figure 6.17 Arrivée des trains

6.4.10 Allocation d'une voie ferrée aux trains

À l'instar des navires, la capacité de réception des trains est aussi limitée. En effet, tel que mentionné à la section 6.3 de ce chapitre, le terminal utilisé pour l'implantation de la simulation est muni de quatre voies ferrées qui lui permettent de recevoir jusqu'à 10 000 pieds de wagons.

La simulation de ce processus se fait à l'aide de modules de retenue des trains. Le premier module de retenue, situé à la gauche sur la figure 6.18, vise à assurer que la somme des entités retenues par les deux autres modules de retenue est égal ou inférieure à quatre. Cette condition est nécessaire afin de respecter le nombre de voies ferrées du terminal. Le module de retenue suivant, quant à lui, assure qu'un seul train est traité à la fois. Il retient donc les

trains jusqu'à ce que le nombre d'entités dans la file d'attente du dernier module de retenu soit inférieur à un. Entre ces deux modules, un module d'affectation réinitialise les variables qui représentent le nombre de conteneurs chargés et déchargés du train. Un module de séparation crée des duplicatas du train qui sont transformés en conteneurs par le module d'affectation qui suit. Ces duplicatas représentent les conteneurs à décharger de ce train. Le module d'affectation leurs assigne aussi une suite d'attributs qui sont le numéro de passage aux serveurs, le temps de travail des serveurs à ce premier passage, ainsi que la destination du conteneur, dans ce cas-ci, un navire.

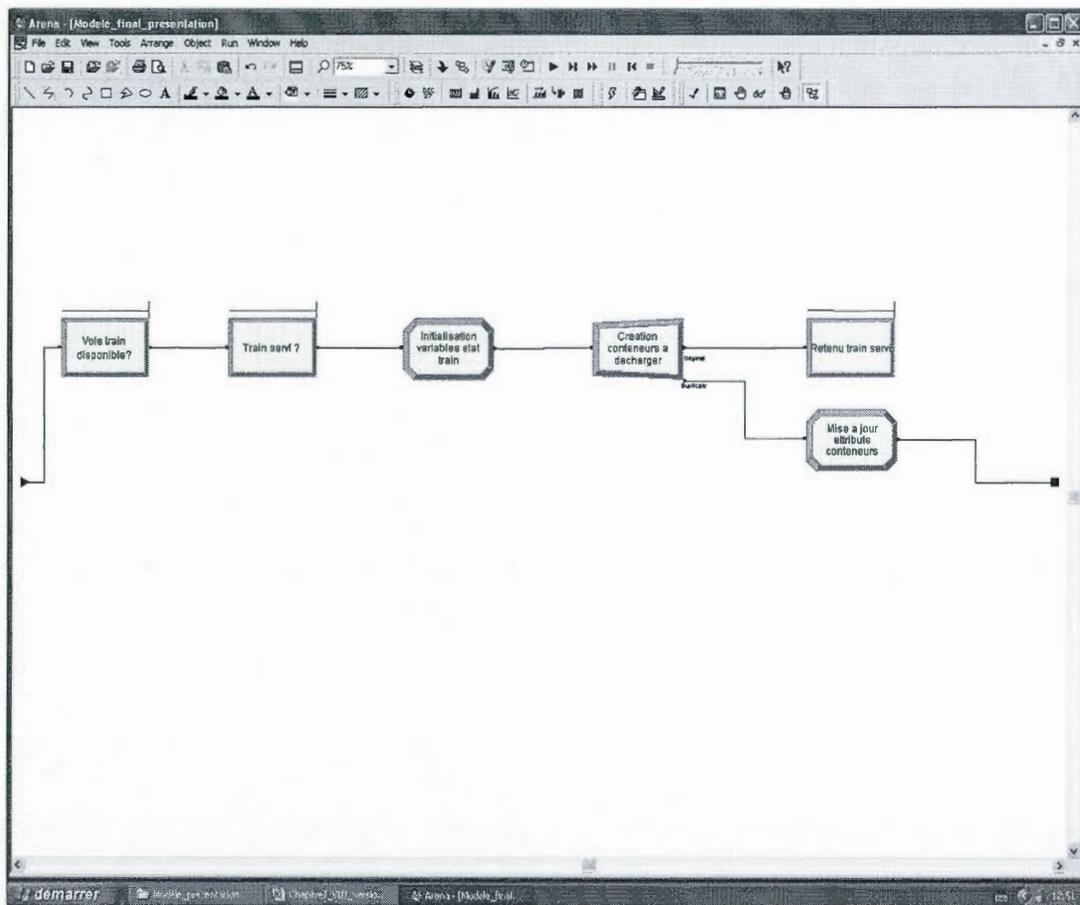


Figure 6.18 Allocation d'une voie ferrée aux trains.

6.4.11 Déchargement des trains

Suite à l'affectation d'une voie au train, les conteneurs sont dirigés vers le sous-modèle d'opération des serveurs. À ce sous-modèle, ils sont traités une première fois, ce qui représente la première partie du processus de déchargement des trains illustré à la figure 5.9 du chapitre précédent. À leur sortie de ce modèle, les conteneurs sont dirigés vers le sous-modèle de déchargement des trains, illustré à la figure 6.19 de ce chapitre.

Les conteneurs passent tout d'abord par un module de délai qui les retient pour une période de temps qui représente le transport du conteneur entre le train et la pile de la zone de stockage. Un module d'affectation incrémente ensuite la variable qui représente le nombre de conteneurs déchargés du train. Le module de décision qui suit vérifie si le nombre de conteneurs déchargés est égal au nombre de conteneurs à décharger du train. Lorsque cette condition est fautive, ce qui signifie que le déchargement du train n'est pas complété, les conteneurs sont dirigés vers un module d'affectation qui leur assigne un nouveau temps de traitement par les serveurs et modifie l'attribut du nombre de passage des conteneurs aux serveurs. Ce nouveau temps de traitement est nécessaire, afin de représenter le transfert du conteneur depuis le véhicule de transport interne vers la pile. Rappelons que ce véhicule est utilisé pour le transport du conteneur du train vers la pile. Les modules de transfert qui suivent dirigent le conteneur au sous-modèle d'opération des serveurs. Lorsque la condition est vraie, un duplicata du conteneur est créé et l'original est dirigé vers un autre module de séparation. Le duplicata, quant à lui, suit le même chemin que les autres conteneurs vers les serveurs. Au second module de séparation, les conteneurs qui seront chargés sur le train sont créés. Ces conteneurs se dirigent vers le processus de chargement des trains, tandis que l'original est détruit par un module de disposition.

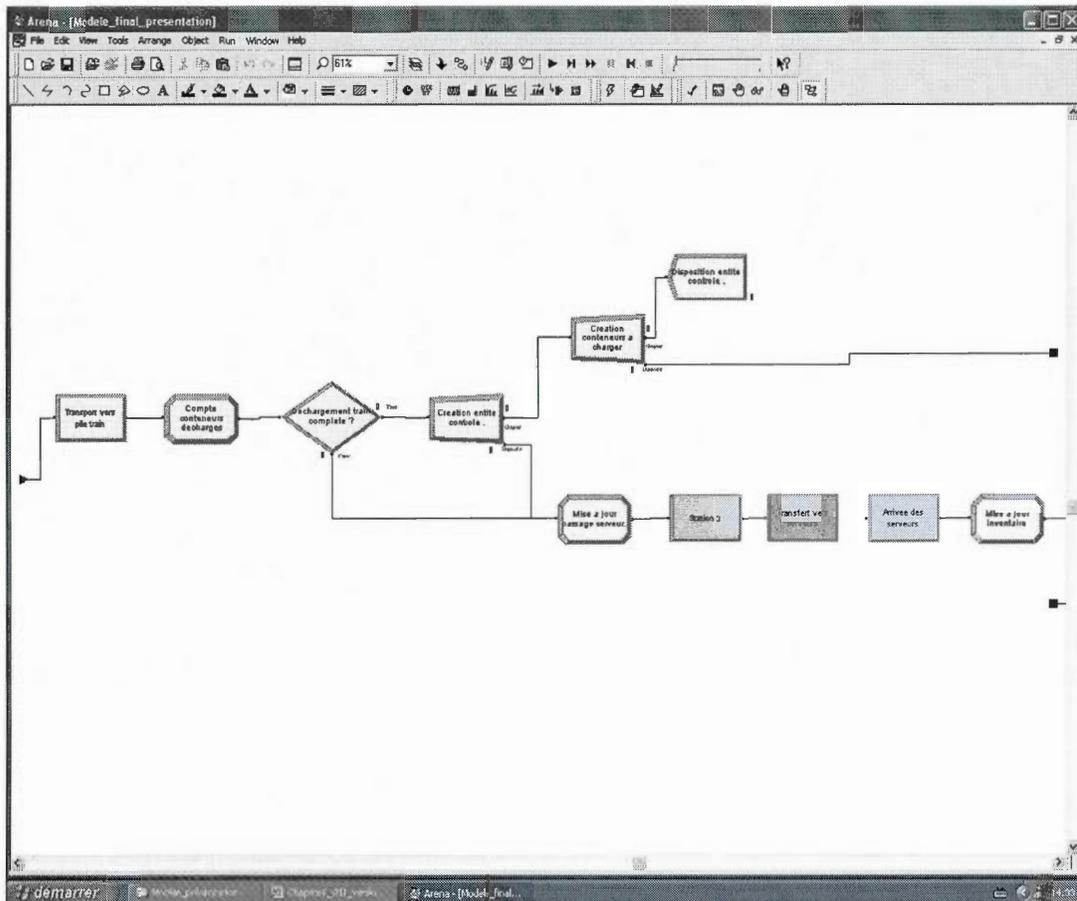


Figure 6.19 Déchargement des trains.

Tel qu'il peut être remarqué sur la figure 6.19, le sous-modèle de déchargement des trains comporte aussi un module de transfert d'arrivée, ainsi qu'un module d'affectation. Lorsque les conteneurs ont effectué leur second passage au sous-modèle d'opération des serveurs, ils arrivent au sous-modèle de déchargement des trains via ce module de transfert et le module d'affectation ajuste l'inventaire de conteneurs de la zone de stockage. Le conteneur est ensuite dirigé au sous-modèle d'inventaire.

6.4.12 Chargement des trains

Le processus de chargement des trains, dans la simulation, débute avec un ensemble de modules recherche-retrait. Cet ensemble est utilisé pour retirer de la zone de stockage les conteneurs qui sont chargés sur le train. C'est pourquoi ils sont ensuite détruits par un module

de disposition. Les originaux passent par la suite par un module d'affectation, où un temps de travail du serveur leur est assigné, ainsi qu'un attribut qui les définit comme conteneurs à charger sur train et qui spécifie qu'il s'agit de leur premier passage au sous-modèle d'opération des serveurs. C'est d'ailleurs vers ce dernier qu'ils sont transférés par les modules de transfert.

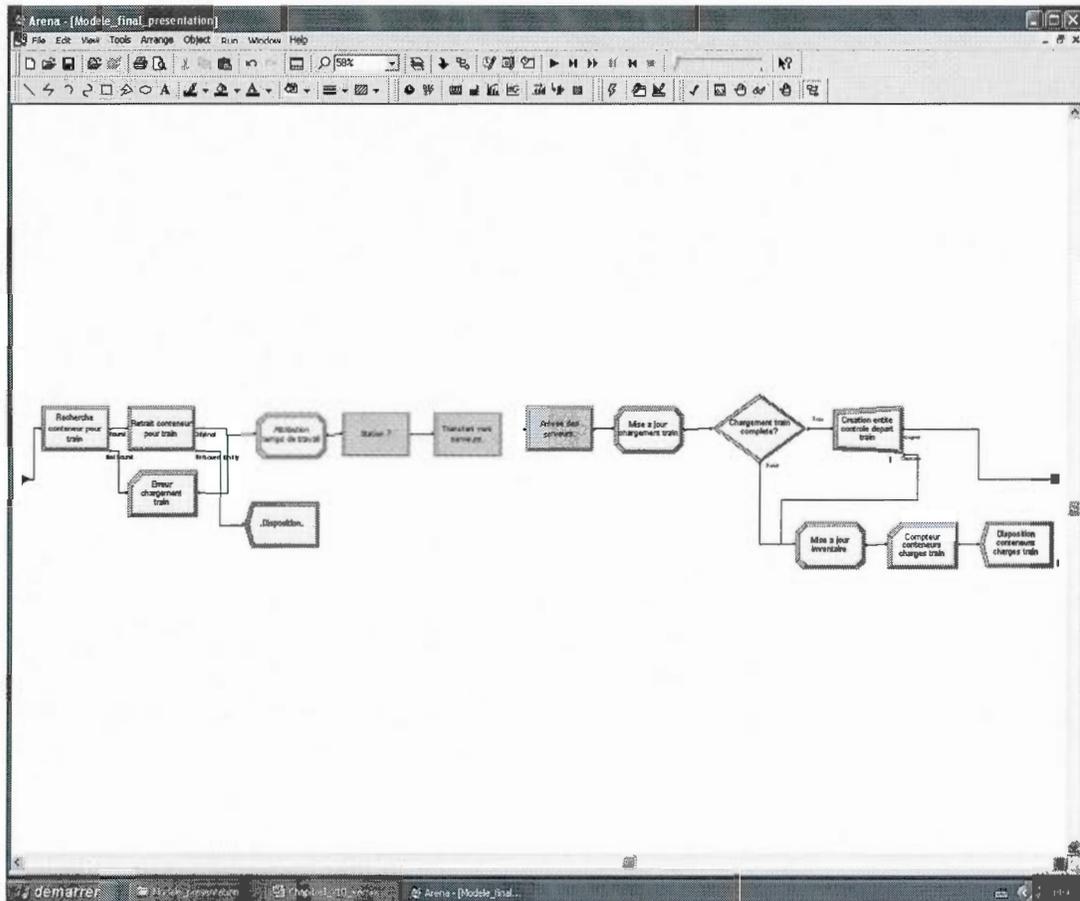


Figure 6.20 Chargement des trains.

Suite à un premier passage aux serveurs, les conteneurs sont redirigés vers le sous-modèle de chargement des trains par des modules de transfert. Le troisième module de transfert, nommé «Arrivée des serveurs», constitue le point d'arrivée de ces entités. Le module d'affectation augmente de un le nombre de conteneurs chargés sur le train, avant qu'un module de décision teste si ce nombre est égal au nombre de conteneurs à charger. Lorsqu'il s'agit du dernier

conteneur, il est séparé et l'original initie ensuite le processus de libération de la voie ferrée. Le duplicata, de son côté, suit le même chemin que les autres conteneurs et il diminue l'inventaire de conteneurs via un module de disposition, avant d'être détruit par un module de disposition.

6.4.13 Libération de la voie ferrée

La figure 6.21 illustre le sous-modèle de libération de la voie ferrée. Le dernier conteneur chargé sur le train initie ce processus.

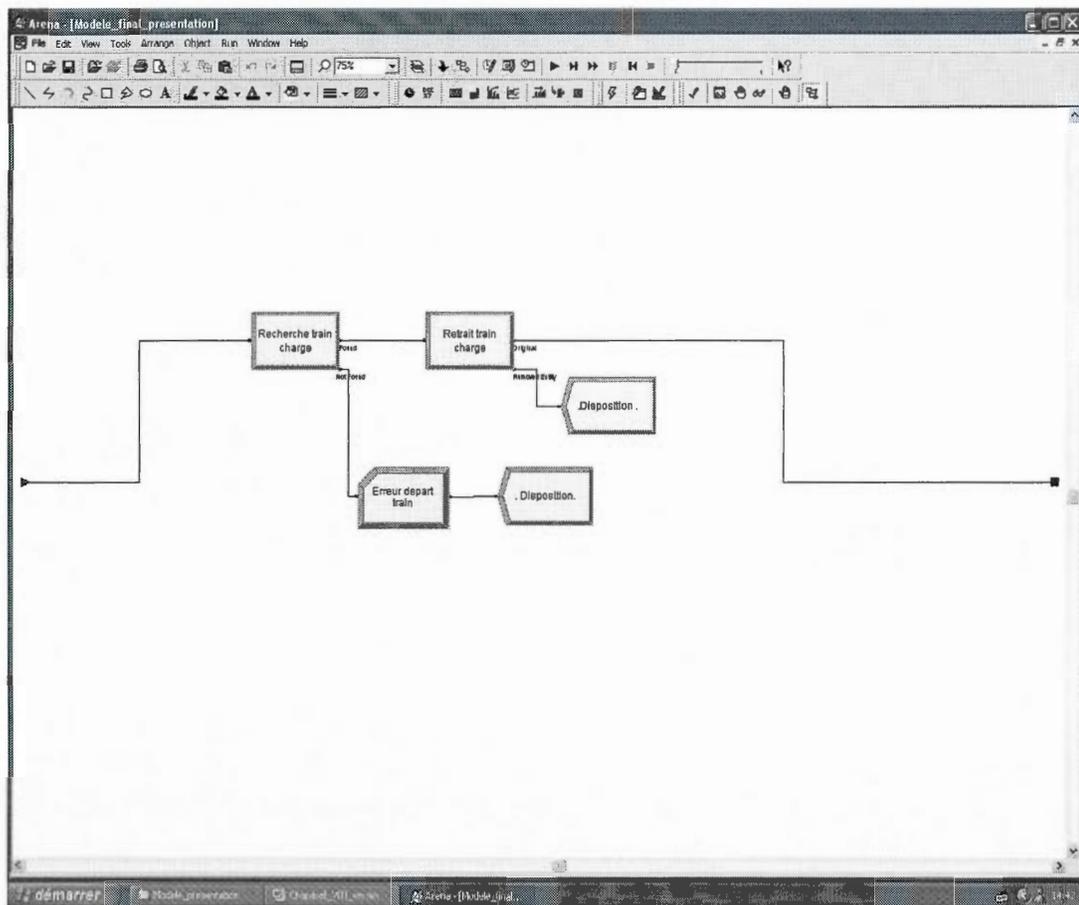


Figure 6.21 Libération de la voie ferrée

Ce sous-modèle est relativement simple. Un module de recherche identifie d'abord le train qui est ensuite retiré de la file d'attente du module de retenue du processus d'allocation des

voies ferrées aux trains. L'entité retirée est ensuite détruite par un module de disposition, tandis que l'original poursuit son cheminement vers le sous-modèle de départ des trains. Un compteur ainsi qu'un module de disposition ont été ajoutés afin de relever une erreur qui se produirait dans ce processus.

6.4.14 Départ des trains

Lors du départ d'un train, le temps qui a été nécessaire à son traitement par le terminal est calculé et lui est assigné comme attribut, avant qu'un module d'écriture inscrive cette donnée ainsi que le nombre de conteneurs qui ont été déchargés et chargés sur ce train dans un fichier *Excel* externe à la simulation. Finalement, un module de disposition détruit l'entité.

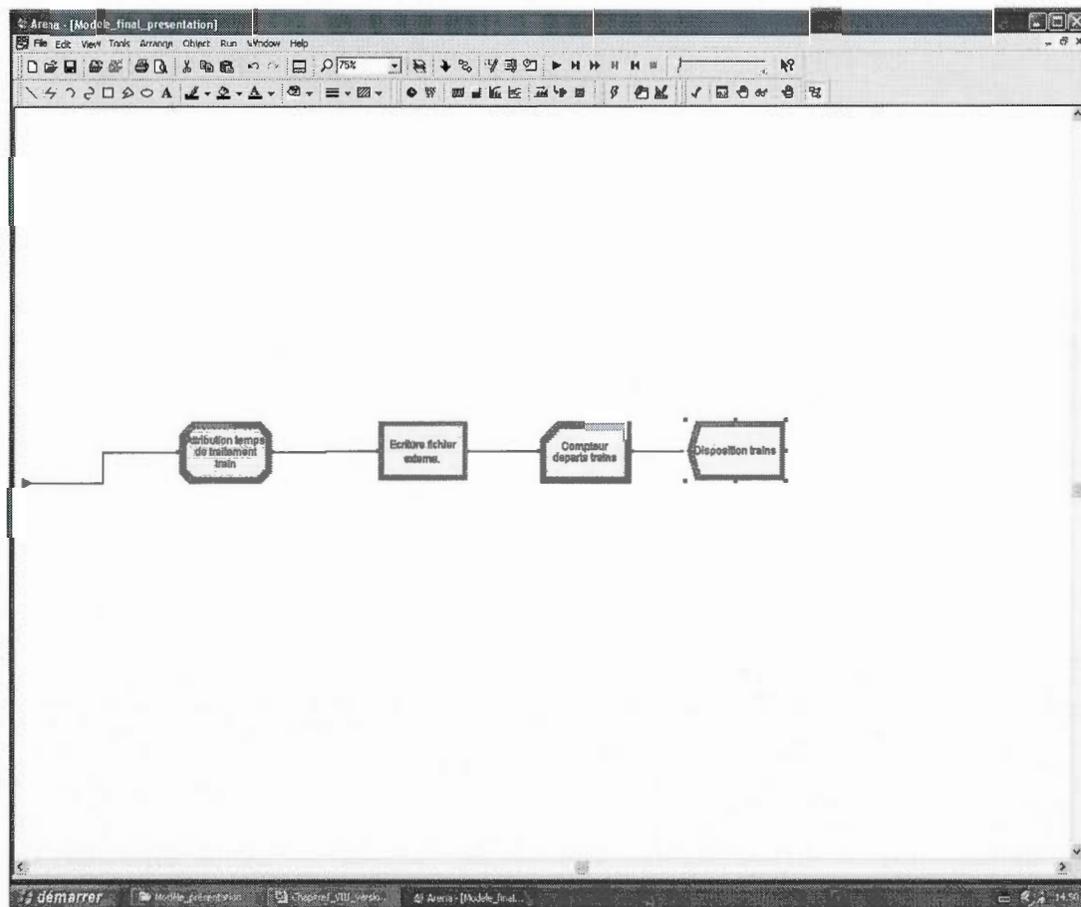


Figure 6.22 Départ des trains.

6.4.15 Arrivée des camions

L'autre mode de transport avec lequel le terminal doit traiter est le camion. La simulation des arrivées de camions au terminal revêt un caractère particulier, puisque contrairement aux autres modes de transport, les opérations sur les camions ne se font pas en tout temps. En effet, les camions sont reçus au terminal du lundi au vendredi entre huit heures et seize heures, tel que mentionné à la section 6.3.2.

Tel que mentionné à la section 6.1 de ce chapitre, une hypothèse a été posée en ce qui a trait à l'arrivée des camions au terminal, dû à un manque de données réelles. En effet, il a été postulé à la section 5.2 du chapitre précédent, que tous les camions qui se présentent au terminal déchargent un conteneur à l'arrivée et chargent un autre conteneur avant de quitter le terminal. En réalité, une proportion de camions se présente au terminal chargé d'un conteneur et repart vide. Le contraire se produit aussi. Par contre, puisqu'aucunes données n'étaient disponibles à ce sujet, cette hypothèse a été posée. De plus, ce manque de données a nécessité de générer les arrivées de camions selon une moyenne quotidienne estimée par les dirigeants du terminal. En réalité, le nombre de camions qui se présente au terminal quotidiennement est lié à l'arrivée des navires. Plus précisément, le nombre de conteneurs livrés au terminal augmentera en se rapprochant de la date d'arrivée prévue du navire. Une proportion importante des conteneurs arrivera donc au terminal dans les derniers jours précédant l'arrivée du navire. La situation est inversée en ce qui concerne la cueillette des conteneurs déchargés des navires. En effet, une proportion importante des conteneurs sera cueillie dans les premiers jours suivant la fin des opérations de déchargement du navire et cette proportion diminuera les jours suivants, jusqu'à ce que la totalité des conteneurs soit cueillie.

Les sous-sections 6.4.15.1 et 6.4.15.2 présentent l'implantation effectuée pour simuler l'arrivée des camions au terminal, tandis que la sous-section 6.4.15.3 explique l'implantation qui aurait pu être effectuée si des données suffisantes avaient été disponibles.

6.4.15.1 Horaire des camions

Afin de représenter ces arrivées qui doivent tenir compte de la journée de la semaine et de l'heure de la journée, un sous-modèle définissant ces variables à du être créé. Ce modèle est illustré à la figure 6.23.

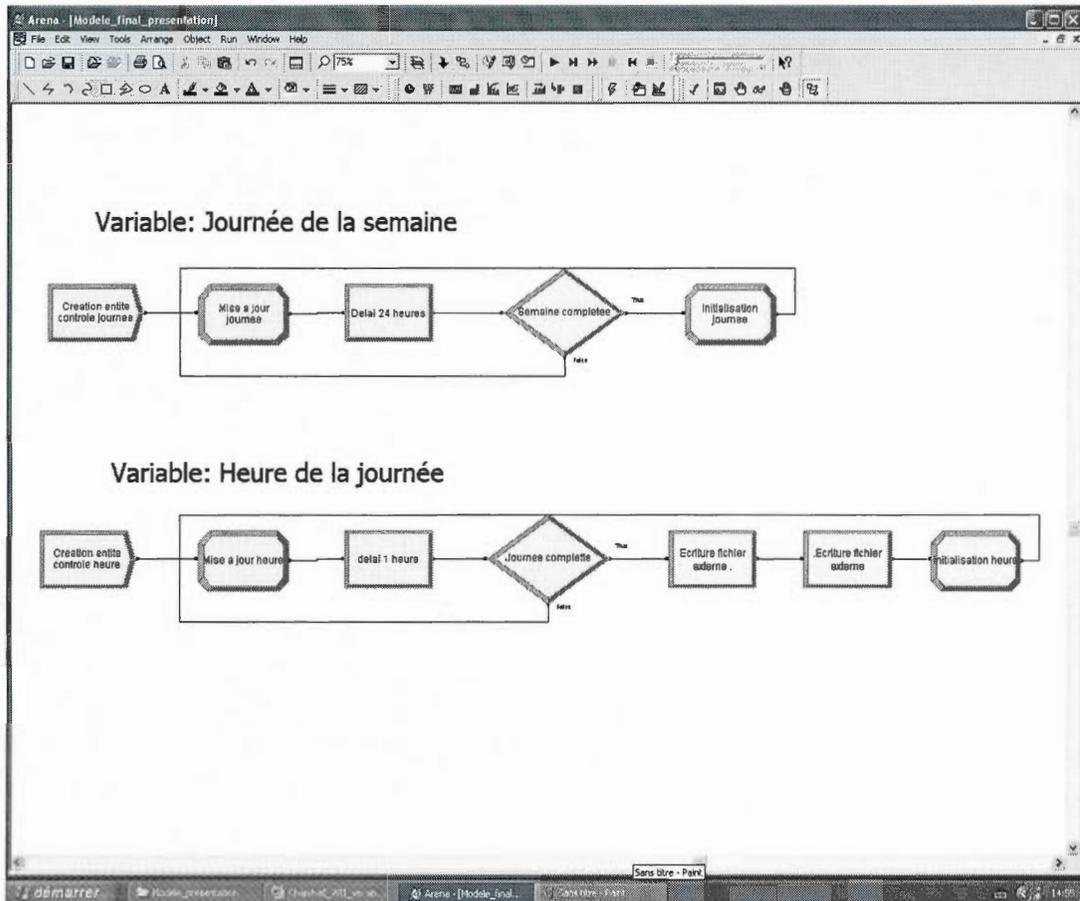


Figure 6.23 Horaire des camions.

D'abord, le sous-modèle est composé de deux parties. La partie du haut est utilisée pour la définition des journées, tandis que la partie du bas est utilisée pour la définition de l'heure de la journée.

Pour la définition des journées, une entité de contrôle est créée au début de la simulation. La variable «journée de la semaine» a initialement une valeur de zéro. Le module d'affectation

qui suit le module de création est utilisé pour incrémenter de un cette variable. Un module de délai retient ensuite l'entité pour une période de vingt-quatre heures et la relâche lorsque cette période est écoulée. Puis, le module de décision vérifie que la valeur de la variable est inférieure à sept, dans lequel cas l'entité est retournée vers le module d'affectation en amont du sous-modèle. Lorsque la variable atteint une valeur de sept, l'entité de contrôle est dirigée vers le module d'affectation en aval du sous-modèle, où une valeur de zéro est attribuée à la variable «journée de la semaine» avant que le module d'affectation en amont la modifie pour une valeur de un.

Pour ce qui est de la définition de l'heure de la journée, le principe est le même, à l'exception que le délai est de une heure et la valeur maximale que peut atteindre cette variable est de vingt-quatre. De plus, des modules d'écriture ont été ajoutés afin d'inscrire le niveau d'inventaire ainsi que le nombre de camion qui se sont présentés au terminal à la fin de chaque journée.

6.4.15.2 Arrivée des camions

L'arrivée des camions dans un terminal maritime de conteneurs est caractérisée par des phénomènes cycliques. En effet, une journée typique est généralement constituée de trois périodes de pointe d'arrivées des camions. Une première à l'ouverture du terminal le matin à huit heures, une seconde en début d'après-midi vers treize heures et une dernière moins importante en fin d'après-midi vers quinze heures. Cette distribution des arrivées des camions au terminal a d'ailleurs été confirmée par l'étude de Bebenek (2006).

Afin de représenter cette distribution des arrivées, une entité est créée en début de simulation et elle sera retenue jusqu'à ce que deux conditions soient validées simultanément. La première est que la journée de la semaine soit comprise entre deux et six (lundi et vendredi) et la seconde, que l'heure de la journée soit comprise entre huit heures et seize heures. Dans le sous-modèle, ces conditions sont vérifiées par des modules de retenu qui retiennent les entités jusqu'à ce qu'elles soient vraies (figure 6.24). Lorsque les deux conditions sont vérifiées, l'entité est séparée et une arrivée de camions est constituée par le duplicata. L'entité originale, quant à elle, est dirigée vers un module de décisions, qui la dirigera vers l'un ou

l'autre des modules de délai en fonction de l'heure de la journée. En effet, si la variable «heure de la journée» est égale à huit ou treize, le délai sera plus court, afin que les arrivées de camions soient plus rapprochées, tandis que si la variable est égale à quinze, le délai sera plus long. Ce délai sera encore plus important si la variable a une valeur autre que huit, treize ou quinze.

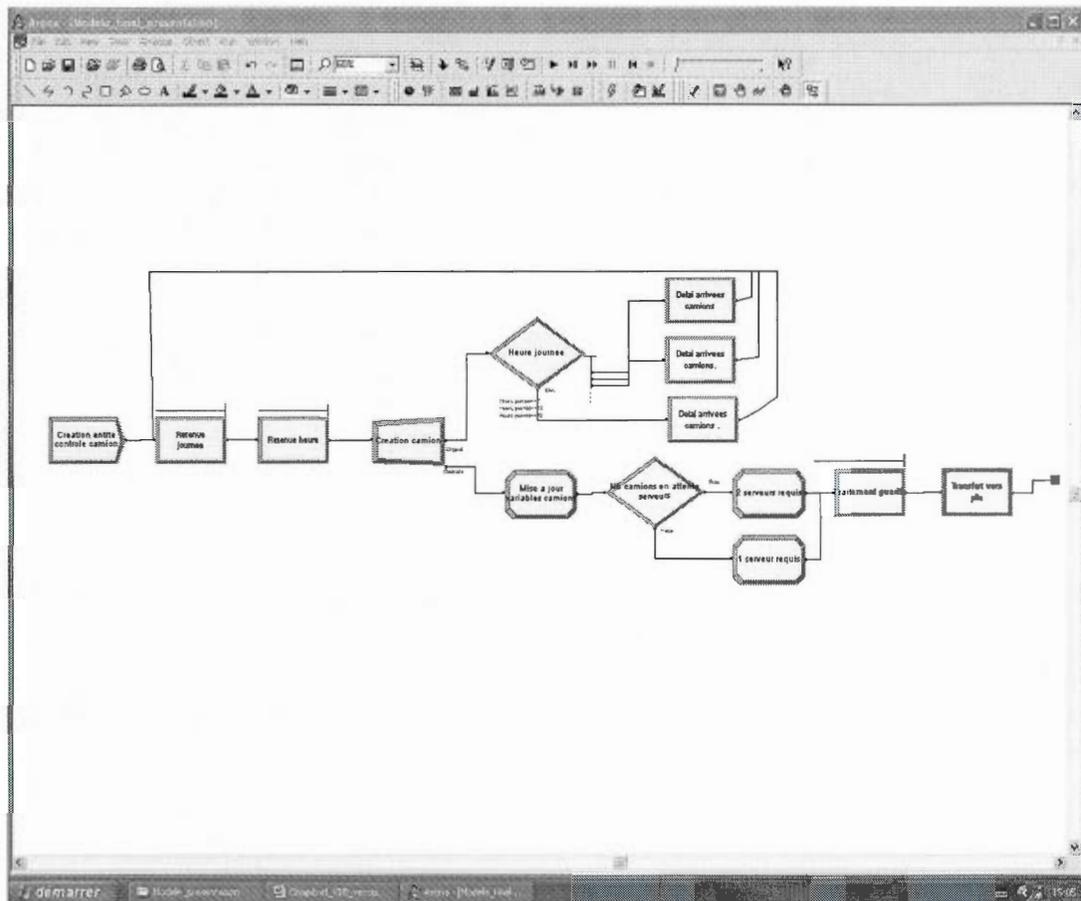


Figure 6.24 Arrivée des camions.

Lorsqu'un camion est créé par le module de séparation, un module d'affectation lui attribue un temps de traitement par les serveurs, ainsi qu'un attribut qui indique qu'il s'agit d'un camion chargé qui doit être déchargé. De plus, le module d'affectation incrémente la variable qui enregistre le nombre d'arrivées de camions pour la journée, ainsi qu'une variable qui mesure le nombre de camions qui se trouvent à l'intérieur du terminal. Si cette dernière

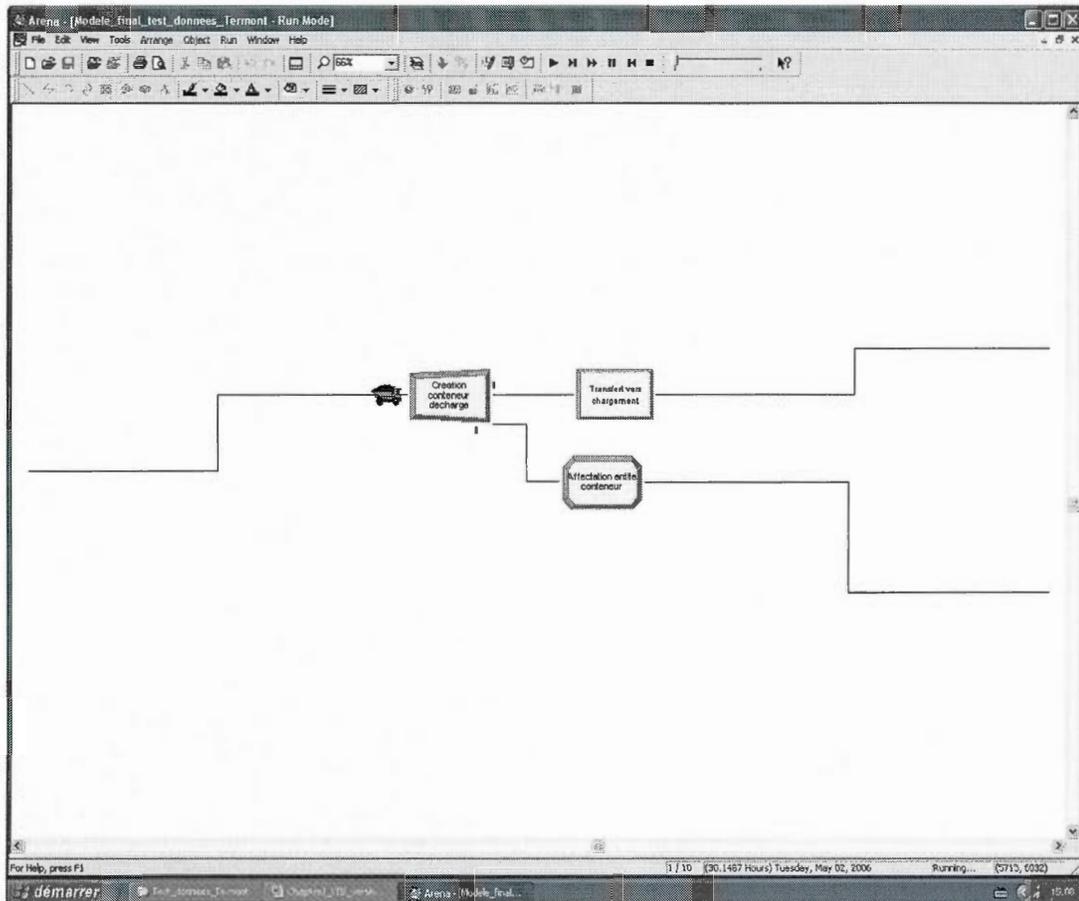
variable est supérieure à vingt-cinq, le nombre de serveurs requis pour les opérations sur les camions sera augmenté à deux. Ainsi, lors de la prochaine réallocation des serveurs, un serveur supplémentaire sera affecté aux camions. Autrement, le nombre de serveurs requis est maintenu à un. Le module de procédé qui suit représente les opérations de la guérite, tandis que le module de délai qui le suit représente le temps de voyage du camion jusqu'à la pile de conteneurs. Suite à ces délais, le camion se dirige vers le sous-modèle d'opération des serveurs où il sera traité et ensuite redirigé vers le sous-modèle de déchargement des camions.

6.4.15.3 Arrivées des camions avec horaire des navires

Tel que mentionné à la sous-section 6.4.15, l'implantation précédemment présentée constitue une limite du modèle de simulation développé. Afin de remédier à cette limite, des données réelles concernant les arrivées de camions auraient été nécessaires, pour estimer la répartition des arrivées des camions en fonction des arrivées de navires.

L'implantation de ces arrivées aurait nécessité de modifier le sous-modèle d'arrivée des navires. En effet, afin de lier les arrivées de camions aux arrivées de navires, un horaire d'arrivée des navires doit être généré. Cet horaire peut être généré à l'extérieur de la simulation et transcrit dans un fichier texte lu par la simulation, comme il a été fait pour le processus d'allocation des serveurs (voir sous-section 6.4.7). À partir de cet horaire, les arrivées de camions au terminal sont générées en fonction de la date d'arrivée prévue du navire. La génération de ces arrivées consiste à appliquer la distribution obtenue à partir des données réelles au nombre de conteneurs à charger sur le navire. Ce nombre de conteneurs est généré de la même façon qu'il a été présenté à la sous-section portant sur les arrivées de navires, soit en utilisant les distributions extraites des données réelles. Par contre, afin de ne pas perdre l'aspect aléatoire des arrivées de navires, un module de délai doit être placé suite à la création des navires, afin de représenter les variations qui se produisent en réalité par rapport à l'horaire prévu par le transporteur maritime.

Pour ce qui est des cueillettes de conteneurs suite à l'arrivée des navires, la génération des arrivées de camions est plus simple, puisqu'il s'agit d'appliquer la distribution obtenue des données réelles, jusqu'à ce que tous les conteneurs soient livrés.



6.25 Déchargement des camions.

6.4.16 Déchargement des camions

Le sous-modèle de déchargement des camions est relativement simple. En effet, il est composé d'un module de séparation, qui est utilisé pour générer le conteneur déchargé du camion, d'un module d'affectation qui change le type de l'entité dupliquée pour en faire un conteneur et d'un module de délai qui représente le temps de voyage du camion entre son point de déchargement et de chargement sur le terminal. De plus, le passage de l'entité au module d'affectation incrémente l'inventaire de conteneurs du terminal. Le conteneur

nouvellement créé se dirige d'ailleurs vers le sous-modèle d'inventaire de la zone de stockage suite à sa sortie du sous-modèle de déchargement. Ce dernier sous-modèle est représenté à la figure 6.25.

6.4.17 Chargement des camions

La figure 6.26 représente le processus de chargement des camions. L'ensemble de modules recherche retrait, situé à la gauche de la figure, est utilisé pour soustraire de l'inventaire le conteneur qui sera chargé sur le camion. Une fois retiré de l'inventaire, le conteneur se fait assigner un temps de travail pour le traitement par les serveurs, ainsi qu'un attribut qui spécifie qu'il s'agit d'un conteneur à charger sur un camion. Il est ensuite dirigé vers le sous-modèle d'opération de serveurs par les modules de transfert qui suivent le module d'affectation. Suite à son traitement par les serveurs, le conteneur revient au sous-modèle de chargement des camions par le point d'entrée inférieur à gauche de la figure.

Les combinaisons de modules d'affectation et de compteurs situés en parallèle ont la même fonction. Le premier compte les entités qui passent tandis que le second attribue un numéro de chargement équivalent à la valeur du compteur. Ainsi, lorsqu'un camion et un conteneur en file d'attente au module de groupement ont le même numéro de chargement ils sont groupés et le chargement du camion est complété. Le camion chargé quitte ensuite ce sous-modèle et se dirige vers le sous-modèle de départ des camions.

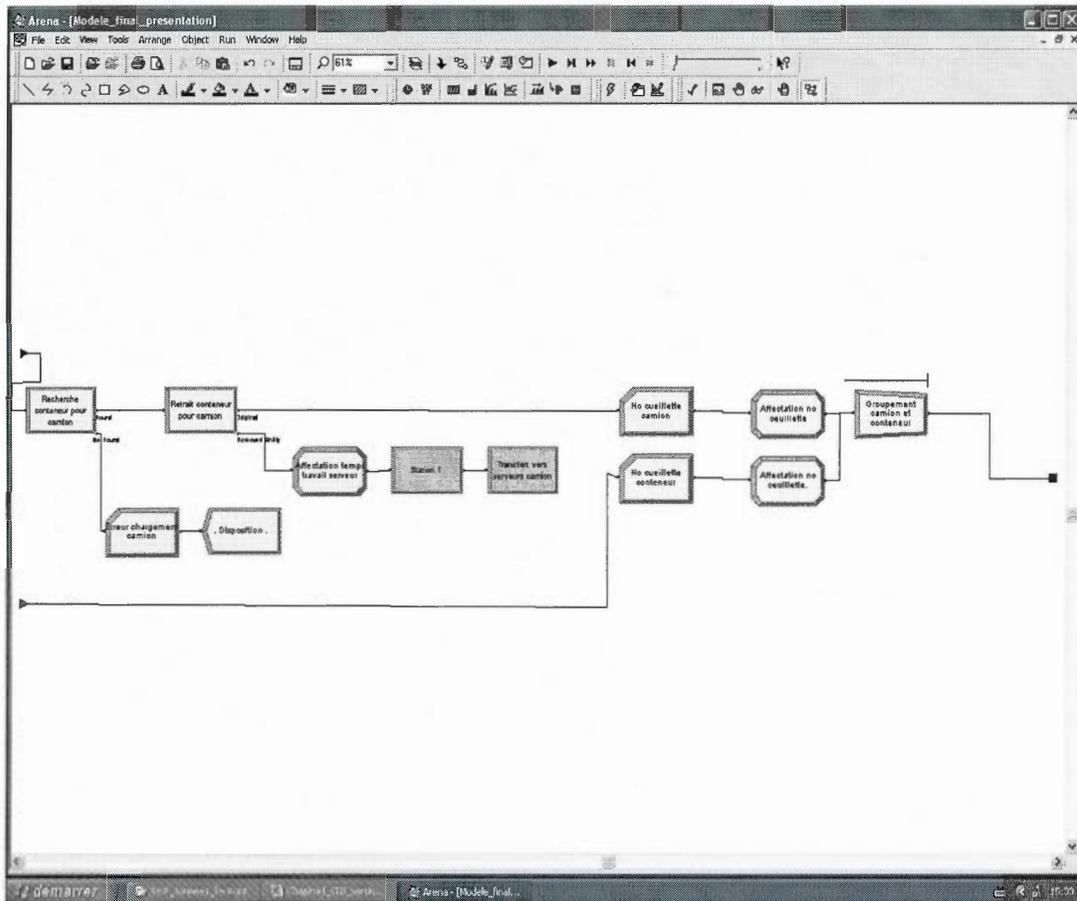


Figure 6.26 Chargement des camions.

6.4.18 Départ camions

Le sous-modèle de départ des camions, qui est représenté à la figure 6.27, comporte peu de modules. Le tout premier module d'affectation diminue de un la valeur de la variable qui représente le nombre de camions présent à l'intérieur du terminal. Le module suivant compte le nombre total de camions qui ont quitté le terminal au cours de la simulation. Finalement, un dernier module dispose du camion.

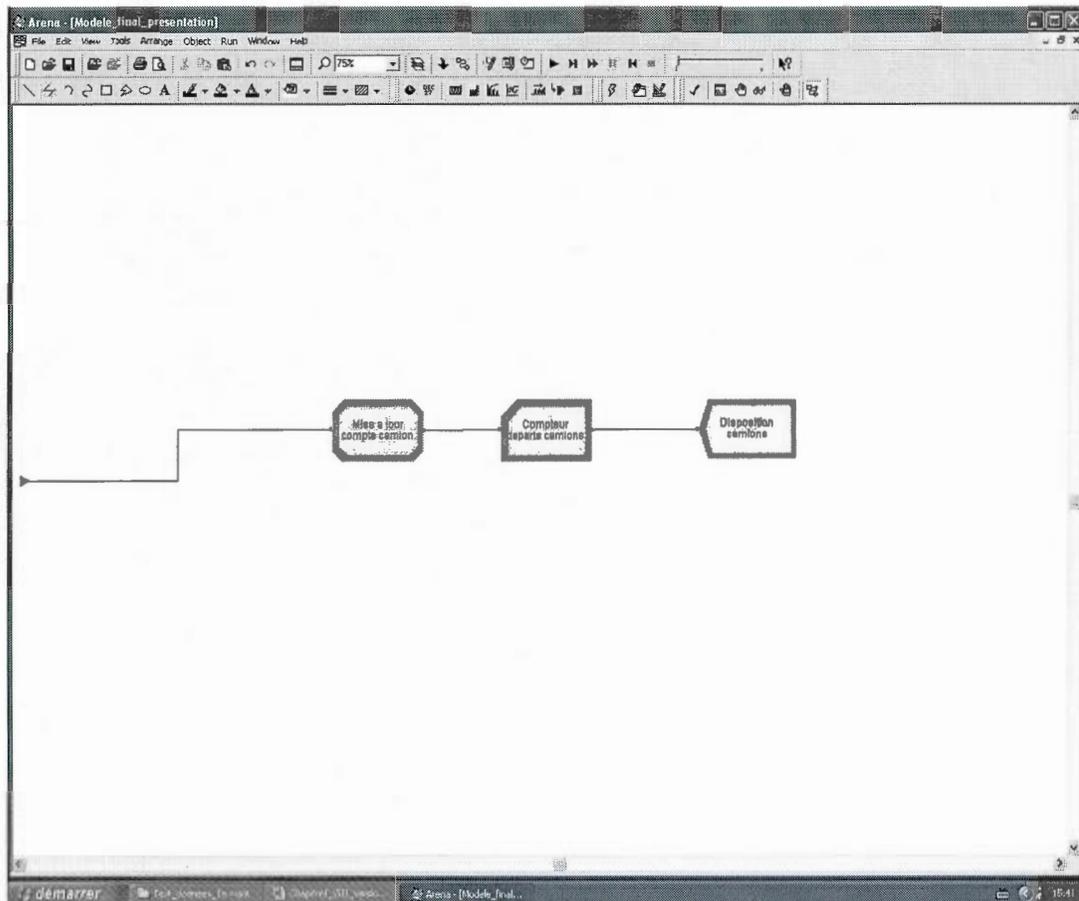


Figure 6.27 Départ des camions.

6.4.19 Inventaire de la zone de stockage du terminal

Le sous-modèle d'inventaire de la zone de stockage du terminal utilise des modules de retenue pour représenter les différentes catégories de conteneurs en provenance et à destination des divers modes de transport. Ces modules sont au nombre de quatre. Le module supérieur de la figure 6.28 reçoit les conteneurs en provenance du sous-modèle de déchargement des camions, tandis que celui du bas, les conteneurs en provenance du sous-modèle de déchargement des trains. Les conteneurs déchargés des navires, quant à eux, arrivent par le point d'entrée du milieu du sous-modèle. Ces conteneurs sont ensuite distribués vers les deux autres modules de retenue par un module de décision envoie 55% des conteneurs vers les départs par train et les 45% restants vers les départs par camion. Cette distribution des conteneurs vise encore une fois à respecter les proportions estimées par les

dirigeants du terminal qui constitue l'étude de cas de cette simulation. Les modules d'affectation situés à la suite du module de décision attribuent le mode de départ des conteneurs et incrémentent l'inventaire de conteneurs. Les modules de création situés près des modules de retenue sont utilisés au début de la simulation afin de générer l'inventaire de départ.

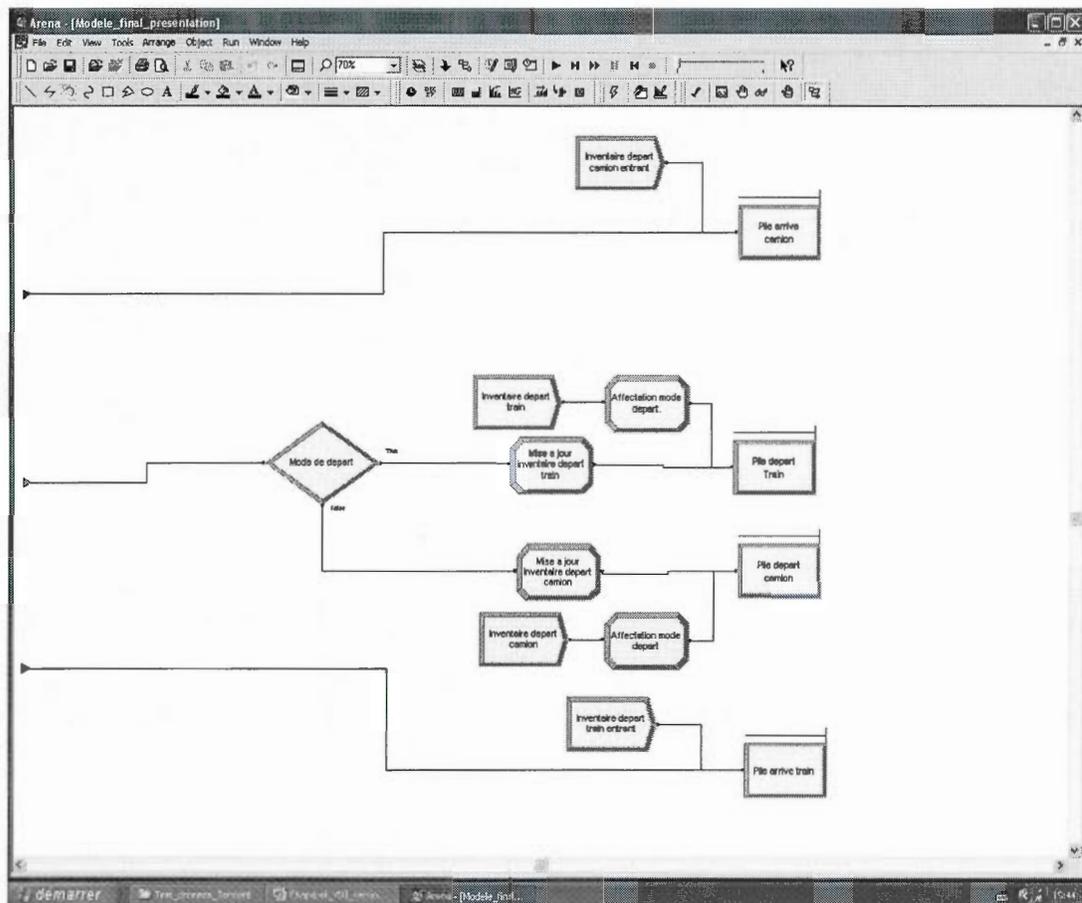


Figure 6.28 Inventaire de la zone de stockage du terminal.

6.5 Conclusion

Ce chapitre a montré de quelle façon le design d'un simulateur développé au chapitre précédent a été implémenté pour simuler les activités d'un terminal portuaire de la côte Est canadienne à l'aide du logiciel de simulation *ARENA*. Le chapitre suivant utilisera ensuite

cette implantation afin de faire des expérimentations sur le simulateur. Par contre, avant d'expérimenter, les données utilisées seront présentées afin de valider le modèle développé.

CHAPITRE VII

VALIDATION

Suite à l'implantation de la simulation présentée au chapitre précédent, ce chapitre a deux principaux objectifs. Dans un premier temps, il vise à présenter les données qui ont été utilisées pour la mise en œuvre de la simulation et, dans un deuxième temps, il vise à valider l'implantation en présentant quelques tests effectués sur le simulateur. L'organisation du chapitre est la suivante : la section 7.1 présente les données utilisées pour effectuer les rondes de simulation ainsi que la provenance de ces données, la section 7.2 présente les ajustements et les tests effectués afin de calibrer et de valider le modèle, tandis que la section 7.3 conclue avec des commentaires sur les résultats obtenus des rondes de simulation de la validation et présente des améliorations qui pourraient être apportées au simulateur afin de le rendre plus précis et plus représentatif.

7.1 Analyse des données

Les données utilisées pour implanter la simulation proviennent de deux sources principales. Les rapports de production produits suite aux départs des navires constituent la première source, tandis que des estimations des temps de travail proposées par les dirigeants du terminal constituent la seconde source. En effet, bien que les rapports de production aient permis d'extraire une quantité importante d'informations, celles-ci se sont avérées insuffisantes pour mener à terme la simulation.

Les données obtenues de la première source portent sur les opérations de déchargement et de chargement des navires. Ces données sont : les dates d'arrivée et de départ des navires, le nombre de conteneurs déchargés et chargés sur le navire au terminal, le nombre d'heures travaillées par chacune des grues sur le navire ainsi que le nombre de conteneurs déchargés et chargés par chaque grue. Les données utilisées proviennent des rapports de productivité des navires pour les mois de juin, juillet et août de l'année 2006. Bien qu'une quantité de données plus importante de données aurait été intéressante afin d'observer s'il existe des effets de

saisonnalité, il a été choisi de retenir ces trois mois d'opération, puisque le terminal a subi d'importants changements au cours de l'année 2006, qui ont perturbé de façon importante le cours normal des opérations. Il a été jugé que ces trois mois sont plus représentatifs de la situation normale du terminal, puisque la situation s'est stabilisée avant et au cours de cette période.

Quant aux données obtenues de la seconde source, il s'agit d'estimations des dirigeants sur les opérations de la zone d'opération terrestre du terminal. En effet, ceux-ci ont estimé le nombre moyen de camions servis par le terminal chaque jour, la quantité de conteneurs déchargés et chargés sur les trains quotidiennement, ainsi que la distribution des conteneurs vers et en provenance des autres modes de transport.

Les prochains paragraphes visent à présenter les différentes distributions statistiques utilisées pour représenter les activités du terminal. Puisque certaines données n'étaient pas disponibles, des hypothèses ont été posées pour certaines distributions utilisées. Dans chacun de ces cas, les hypothèses posées seront présentées et les données qui auraient dues être utilisées pour déterminer ces distributions seront expliquées.

7.1.1 Choix des distributions aléatoires

Afin de simuler le temps nécessaire aux différents équipements du terminal pour manutentionner les conteneurs, les données issues des rapports de production ont été analysées à l'aide du logiciel *ARENA Input Analyzer*. Ce logiciel est un outil inclus dans la version 8.1 du logiciel *ARENA*. L'utilisation du *Input Analyzer* permet de comparer une série de données à un ensemble de distributions aléatoires afin d'identifier celle qui représente le mieux les données observées. Le logiciel trace d'abord un histogramme à partir des données, pour ensuite évaluer la concordance des données et des distributions aléatoires.

Dans le but de mesurer cette concordance, deux mesures sont utilisées par l'outil d'analyse. Dans un premier temps l'erreur carrée moyenne par rapports aux données réelles est calculée pour chacune des distributions. Cette mesure correspond à la moyenne des écarts entre la

fréquence relative observée dans chacune des cellules de l'histogramme et la fréquence relative de la distribution correspondante (Kelton et col. 2004).

Dans un second temps, le degré de correspondance pour chacune des distributions est calculé à l'aide du test de Kolmogorov-Smirnov. Le résultat de ce test est une valeur située entre un et zéro pour un paramètre p qui permet de tester l'hypothèse nulle (H_0) qui affirme que deux distributions sont issues de la même fonction de distribution aléatoire. Une valeur de p inférieure à 0,05 indique une faible concordance entre les données et la distribution, tandis qu'une valeur supérieure à 0,10 est considérée comme démontrant une bonne correspondance entre les deux séries de données et valide H_0 . Il est important de mentionner que le test de Kolmogorov-Smirnov ne constitue pas une preuve de la concordance des données, mais une absence de preuve du contraire (Kelton et col. 2004). C'est pourquoi le choix des distributions ne s'appuie pas seulement sur cette valeur, mais aussi sur l'erreur carrée moyenne. Pour l'ensemble des distributions retenues, la valeur du paramètre p était supérieure à 0,15.

7.1.2 Arrivée des navires

Afin de simuler une année complète d'opérations, il s'avère nécessaire de générer aléatoirement des arrivées de navires, puisque les données provenant du terminal couvrent une période de trois mois. Pour ce faire, les temps entre les arrivées des navires, issus des données du terminal, ont été analysés à l'aide de l'outil d'analyse du logiciel de simulation, afin d'en tirer des distributions aléatoires. Les tableaux 7.1 et 7.2 présente l'erreur carrée moyenne obtenue pour chacune des distributions associées aux données. La distribution ayant obtenue l'erreur carrée moyenne le plus faible a été retenue, dans chacun des cas, puisque plusieurs distributions ont affiché une valeur de p supérieure à 0,15 pour le test de Kolmogorov-Smirnov. Les temps entre les arrivées des navires de la ligne un sont donc simulés par une distribution aléatoire normale ayant une moyenne de 160 heures et un écart-type de 60 heures. Tandis que les temps entre les arrivées de navire de la ligne deux seront représentés par une distribution aléatoire triangulaire ayant pour minimum 84 heures, 173 heures pour mode et 244 heures pour maximum.

Fonction	Erreur carrée
Normale	0.00888
Beta	0.01760
Uniforme	0.03080
Triangulaire	0.03300
Exponentielle	0.05700
Erlang	0.05700
Gamma	0.09380
Weibull	0.09500
Lognormale	0.14000

Tableau 7.1 Erreurs carrées moyennes des distributions pour le temps entre les arrivées de navire de la ligne1.

Fonction	Erreur carrée
Triangulaire	0.0459
Normale	0.0553
Uniforme	0.0893
Beta	0.0996
Exponentielle	0.1360
Erlang	0.1360
Weibull	0.1800
Gamma	0.1850
Lognormale	0.2360

Tableau 7.2 Erreurs carrées moyennes des distributions pour le temps entre les arrivées de navire de la ligne2.

7.1.3 Temps de traitement des grues de quai

L'estimation des temps nécessaires aux grues pour charger ou décharger un conteneur a été faite à partir de la première source de données. En effet, les productions moyennes des navires (en conteneurs/heure) ont été transformées en temps moyens (en heures) pour le mouvement d'un conteneur. À partir de ces temps moyens, des distributions aléatoires ont été associées à chacune des grues à l'aide de l'outil d'analyse du logiciel de simulation. Les temps de traitement estimés sont exprimés en heures, puisque l'unité de base de la simulation est l'heure.

Numéro de la grue	Fonction
1	$0.03 + \text{LOGN}(0,0116; 0,00532)$
2	$0.02 + \text{LOGN}(0,131; 0,00186)$
3	$0.03 + 0.02 * \text{BETA}(8,7; 8,49)$

Tableau 7.3 Fonctions des distributions aléatoires des grues de quai.

Le temps de traitement associé au mouvement d'un conteneur varie d'une grue à l'autre. En effet, la grue numéro deux affiche des temps de traitement moyens plus rapides que les deux autres grues. Cette différence provient du fait qu'il s'agit d'une grue beaucoup plus récente que les deux premières. Cette dernière a été acquise en 2004 par le terminal tandis que les

deux autres ont été acquises il y a plus de vingt ans. L'équation représentant la fonction de distribution aléatoire associée à chacune des grues est présentée dans le tableau 7.3.

Fonction	Erreur carrée
Lognormale	0.0208
Erlang	0.0314
Gamma	0.0315
Weibull	0.0493
Triangulaire	0.0593
Beta	0.0640
Normale	0.0734
Uniforme	0.1490
Exponentielle	0.1510

Tableau 7.4 Erreurs carrées moyennes des distributions pour le temps de traitement de la grue 1.

Fonction	Erreur carrée
Lognormale	0.000153
Normale	0.000725
Weibull	0.001080
Beta	0.001090
Erlang	0.026600
Gamma	0.027100
Triangulaire	0.125000
Uniforme	0.309000
Exponentielle	0.403000

Tableau 7.5 Erreurs carrées moyennes des distributions pour le temps de traitement de la grue 2.

Les tableaux 7.4, 7.5 et 7.6, présentent les erreurs carrées moyennes pour chacune des distributions associées aux données sur les temps de travail des grues de quai. Puisque, dans chaque cas, plusieurs distributions ont obtenu une valeur de p supérieure à 0,15 pour le test de Kolmogorov-Smirnov, nous avons choisi d'utiliser la distribution possédant l'erreur carrée moyenne la plus faible pour représenter les temps de traitement des grues. Ces distributions ont été, ensuite, testées dans quelques rondes de simulation initiales qui ont permis de valider leur représentativité du système (voir sous-section 7.2).

Fonction	Erreur carrée
Beta	0.0061
Erlang	0.0111
Gamma	0.0114
Normale	0.0125
Lognormale	0.0141
Weibull	0.0160
Triangulaire	0.0855
Uniforme	0.2560
Exponentielle	0.3320

Tableau 7.6 Erreurs carrées moyennes des distributions pour le temps de traitement de la grue 3.

7.1.4 Plans de chargement des navires

Puisque les données obtenues du terminal ne couvrent qu'une période de trois mois, il a été nécessaire de générer des plans de chargement des navires pour les simulations dont la durée dépasse cette période. Ainsi, des distributions aléatoires ont été déterminées pour le nombre de conteneurs à décharger des navires provenant des lignes un et deux, de même pour le nombre de conteneurs à charger sur ces groupes de navires. Le tableau 7.7 présente les distributions retenues pour chacun des plans de chargement des navires.

Plan de chargement	Fonction
Nombre de conteneurs à décharger navires ligne 1	NORM (1.12e + 3; 154)
Nombre de conteneurs à décharger navires ligne 2	NORM (310; 109)
Nombre de conteneurs à charger navires ligne 1	$816 + 435 * \text{BETA} (0,542; 0,551)$
Nombre de conteneurs à charger navires ligne 2	$332 + \text{WEIB} (51,8; 0,7)$

Tableau 7.7 Fonctions des distributions aléatoires pour les plans de chargement des navires.

Par contre, certaines modifications ont été apportées à ces distributions. En effet, la valeur obtenue à chaque arrivée de navire est arrondie à l'entier le plus près, puisqu'il s'agit de distributions continues, tandis que les quantités de conteneurs doivent être discrètes. De plus, les premiers tests sur le simulateur ont montré que la distribution utilisée pour le nombre de conteneurs à charger sur les navires de la ligne deux pouvait occasionnellement (plus ou moins une fois par 100 navires générés) retourner des valeurs supérieures à 600 conteneurs. Ces valeurs sont difficilement applicables, puisque la taille des navires sur cette ligne ne permet pas de transporter un nombre de conteneurs aussi important. En effet, bien que la capacité des navires sur la seconde ligne soit de 1 000 EVP, la valeur la plus importante retrouvée parmi les données réelles est de 581. Cette donnée constitue un nombre total de conteneurs sur le navire et ne tient pas compte de la taille des conteneurs (20 ou 40 pieds). Exprimée en EVP, cette quantité représente 1005 EVP (157 x 20' et 424 x 40').

Fonction	Erreur carrée
Normale	0.0210
Beta	0.0290
Uniforme	0.0308
Triangulaire	0.0330
Exponentielle	0.1030
Erlang	0.1030
Weibull	0.1260
Gamma	0.1590
Lognormale	0.2340

Tableau 7.8 Erreurs carrées des distributions pour le nombre de conteneurs à décharger des navires de la ligne 1.

Fonction	Erreur carrée
Beta	0.0249
Uniforme	0.0308
Exponentielle	0.0691
Erlang	0.0691
Normale	0.0718
Gamma	0.1030
Triangulaire	0.1040
Weibull	0.1080
Lognormale	0.1430

Tableau 7.10 Erreurs carrées des distributions pour le nombre de conteneurs à charger sur les navires de la ligne 1.

Fonction	Erreur carrée
Uniforme	0.0361
Normale	0.0507
Triangulaire	0.0620
Exponentielle	0.1060
Erlang	0.1060
Beta	0.1160
Gamma	0.1500
Weibull	0.1510
Lognormale	0.1960

Tableau 7.9 Erreurs carrées des distributions pour le nombre de conteneurs à décharger des navires de la ligne 2.

Fonction	Erreur carrée
Weibull	0.00731
Gamma	0.0214
Erlang	0.0242
Exponentielle	0.0242
Lognormale	0.0598
Beta	0.0752
Triangulaire	0.2020
Normale	0.2040
Uniforme	0.2860

Tableau 7.11 Erreurs carrées des distributions pour le nombre de conteneurs à charger sur les navires de la ligne 2.

Les tableaux 7.8 à 7.11 présentent les erreurs carrées moyennes pour chacune des distributions appliquées aux données obtenues du terminal en ce qui a trait aux quantités de conteneurs sur les navires. Le choix de la distribution s'est fait selon les mêmes critères utilisés pour les temps de travail des grues de quai, plusieurs distributions ayant obtenues une valeur supérieure à 0,15 pour le paramètre p du test de Kolmogorov-Smirnov.

7.1.5 Temps de travail des serveurs

Les données précédemment présentées proviennent toutes de données réelles recueillies par le terminal à des fins de contrôle des opérations. Par contre, certains temps de travail ne peuvent être générés à partir de données existantes, puisque le terminal ne garde pas de données de la sorte dans ses rapports de production. C'est le cas des temps de travail des serveurs utilisés pour la manutention des conteneurs. Afin de palier à ce manque de données, il a été choisi de poser l'hypothèse que le temps de traitement des serveurs peut être déterminé en liant le nombre de grues de quai affectées aux navires et le nombre de serveurs alloués pour le traitement des conteneurs déchargés et/ou chargés sur ces navires.

Plus précisément, il a été choisi d'utiliser une distribution de type triangulaire avec comme paramètres des temps issus d'approximation utilisant les productions moyennes des grues de quai et le nombre de serveurs affectés aux navires. Plus précisément, les productivités brutes observées ont été multipliées par les différentes possibilités d'affectation de grues de quai (1, 2 ou 3), pour ensuite diviser les nombres de serveurs requis pour chacune de ces affectations par le nombre de conteneurs à l'heure qui doivent être traités. Le tableau 7.12 présente les valeurs obtenues pour ce premier cas d'utilisation des serveurs.

Nombre de grues de quai	Nombre de serveurs requis	Minimum	Mode	Maximum
1	4	0,130	0,180	0,220
2	6	0,100	0,136	0,167
3	8	0,089	0,121	0,148

Tableau 7.12 Minimum, mode et maximum pour une distribution aléatoire triangulaire des temps de travail des serveurs lors du déchargement des navires.

Le nombre de conteneurs à traiter par les serveurs provient des données sur la production horaire brute des grues de quai. La production brute représente le nombre moyen de conteneurs déchargés par heure. La différence avec la production nette est que cette dernière soustrait au temps de travail les délais occasionnés pour l'ouverture des cales des navires, la cueillette des ancrages de soutien des conteneurs (*twist lock pins*) et autres délais dont le terminal n'est pas responsable. Il a été choisi d'utiliser les données de la production brute, puisqu'ils représentent plus fidèlement le nombre de conteneurs qui doivent être manutentionnés par les serveurs pour une période d'une heure. À partir de ces données, le maximum, le minimum et le mode ont été identifiées, afin de calculer les temps de travail. Ces données représentent respectivement 30, 18 et 22 conteneurs par heure.

En ce qui a trait à l'estimation des temps de travail des serveurs lors du chargement des navires, le calcul effectué est le même, à l'exception que le nombre de serveurs utilisés a été ajusté pour refléter la réalité. Les résultats obtenus sont présentés au tableau 7.13.

Nombre de grues de quai	Nombre de serveurs requis	Minimum	Mode	Maximum
1	1	0,033	0,045	0,055
2	2	0,033	0,045	0,055
3	4	0,044	0,066	0,074

Tableau 7.13 Minimum, mode et maximum pour une distribution aléatoire triangulaire des temps de travail des serveurs lors du chargement des navires.

Pour ce qui est des temps de travail des serveurs lors des opérations de chargement et de déchargement des trains, le minimum, le maximum et le mode ont été calculés à partir d'estimations des dirigeants du terminal. En effet, d'après leur expérience, la manutention de 300 conteneurs pour un quart de travail de huit heures représente une bonne production. Il a donc été choisi de partir de cette production pour établir le minimum, le maximum et le mode. Cette production représente en termes de conteneurs par heure une production de 37,5 conteneurs/heure. Puisque, des quatre serveurs nécessaires à ces opérations, deux travaillent directement sur le train, leur production moyenne individuelle est de 18,75 conteneurs/heure. Cette donnée a donc été retenue comme production maximale. À partir de celle-ci, il a été statué, avec les dirigeants du terminal, qu'une production de 16 conteneurs/heure pour le

mode et de 12 conteneurs/heure pour le minimum semblait réalistes. Ces données ont ensuite permis de calculer les temps de travail des serveurs de la même manière que dans le cas des serveurs travaillant sur les conteneurs des navires. Les données obtenues sont les suivantes : 0,054 heures pour le temps minimum, 0,0625 heures pour le mode et 0,084 heures pour le temps maximum.

Le nombre moyen de camions pour une journée de travail représentant environ 300 camions, il a été choisi d'utiliser les mêmes données pour le temps de travail des serveurs affectés aux camions. Par contre, il importe de mentionner que ce nombre représente les mouvements de camions et non le nombre physique de camions. Plus précisément, un camion se présentant au terminal et déchargeant un conteneur et en chargeant un autre avant de quitter est considéré comme deux mouvements de camions. Puisque la distribution aléatoire triangulaire des trains repose sur la manutention de 300 conteneurs dans une journée et que le nombre moyen de camions à traiter par jour est d'environ 300, il semble logique, à première vue, d'utiliser les mêmes temps de traitement.

Tel que mentionné en introduction de cette section, les distributions calculées proviennent d'une hypothèse sur l'utilisation des serveurs lors des opérations sur les navires. Afin d'obtenir des distributions plus représentatives des opérations réelles, deux possibilités peuvent être envisagées. Dans un premier temps, une première possibilité consiste à effectuer des mesures sur place du temps d'opérations des serveurs, pour ensuite associer une distribution à ces données. Dans un second temps, la distribution aurait pu être déterminée à partir de rapports de production semblables à ceux effectués pour les navires. En effet, ces rapports de production indiquent le nombre conteneurs déchargés et chargés ainsi que le nombre d'heures travaillées. Ainsi, la productivité moyenne des opérations sur les trains aurait pu être calculée, et le temps de travail d'un serveur pour un mouvement de conteneur estimé.

7.1.6 Temps de déplacement des camions à l'intérieur du terminal

Bien qu'il ait été choisi d'assumer que le nombre de véhicules de transport interne est illimité afin de simplifier le développement de la simulation, le transport des conteneurs par ceux-ci

doit quand même être représenté par un délai. Ainsi, tel qu'il a été vu au chapitre précédent, un délai est appliqué aux conteneurs, mais aucune ressource n'est saisie.

Le transport des conteneurs par les véhicules de transport interne est nécessaire à divers processus du terminal. En effet, on retrouve des transports dans les processus de déchargement et de chargement des navires et des trains. De plus, les camions provenant de l'extérieur du terminal doivent aussi se déplacer à l'intérieur du terminal. Ces déplacements sont nécessaires suite au passage du camion par la guérite, pour se rendre à l'emplacement désigné de son conteneur, et suite au déchargement de son conteneur, pour se rendre à l'emplacement où un autre conteneur sera chargé.

Afin de représenter ces temps de déplacements, une distribution aléatoire triangulaire est utilisée, puisqu'aucune donnée sur ces temps n'était disponible. Les paramètres de cette distribution sont de 0.025, 0.033 et 0.067, qui représentent respectivement le minimum, le mode et le maximum de cette distribution. Ces temps sont en heures et proviennent d'estimations des dirigeants du terminal selon lesquels, puisque la taille du terminal est limitée, ces temps de transport tournent autour de deux minutes et peuvent rarement dépasser quatre minutes, même lorsque la circulation est importante sur le terminal. Les données exprimées en heures représentent les temps en minutes précédemment évoqués, à l'exception du minimum qui correspond à une minute et trente seconde

7.1.7 Temps de traitement des camions à la guérite

Puisque aucune donnée n'était disponible pour le traitement des camions à la guérite, une distribution aléatoire triangulaire est utilisée pour déterminer ce temps. Les paramètres de la distribution choisie proviennent d'estimations obtenues suite à la rencontre des dirigeants du terminal. D'après leur expérience, un camion prend généralement deux minutes à la guérite à son arrivée au terminal. Lorsque des complications dues à des documents manquants ou déficients se produisent ce temps peut augmenter jusqu'à cinq minutes, mais ces cas sont rares aux dires des dirigeants. Il a donc été choisi d'utiliser un mode de deux minutes et un maximum de cinq minutes pour représenter le temps de traitement à la guérite. Pour ce qui est du minimum, un temps d'une minute et trente seconde a été retenu. La conversion de ces

temps en heures permet d'obtenir pour le minimum, le mode et le maximum, les temps suivants : 0,025 heure, 0,333 heure et 0,083 heure.

7.1.8 Arrivée des camions

Tel qu'il a été vu au chapitre précédent, afin de représenter les périodes d'activités importantes se produisant à des périodes précises de la journée, des modules de délai retiennent une entité de contrôle qui cycle dans le sous-modèle d'arrivée des camions pour créer des duplicatas qui constituent les arrivées proprement dites (voir figure 6.24).

Ainsi, ce sont les temps des différents délais qui constituent les temps entre les arrivées des camions. Tel qu'il peut être observé sur la figure 6.24, le sous-modèle est constitué de trois modules de délai. Le module supérieur représente le délai à appliquer à l'entité de contrôle lorsque l'heure de la journée est équivalente à sept heures ou à treize heures. Dans ces cas, le délai a initialement été représenté par une distribution triangulaire ayant pour mode 0,020 heure. Cette moyenne provient d'une estimation selon laquelle environ un tiers des camions se présentent le matin à l'ouverture du terminal, un autre tiers se présentent vers treize heures en après-midi, tandis que le tiers restant est répartie entre la période de pointe de quinze heures en après-midi et le reste de la journée. De plus, puisqu'il est assumé que tout les camions déchargent et chargent un conteneur, le nombre moyen de camions se présentant réellement au terminal à chaque jour, peut être estimé à 150 au lieu de 300. Donc, puisque le délai doit permettre la génération d'un tiers de 150 camions, soit 50, le mode utilisé représente une heure divisée en 50 intervalles de temps. Le maximum et le minimum proviennent d'une variation de plus ou moins cinq camions durant l'heure, ce qui donne un intervalle maximal de 0,022 heure et un minimum de 0,018 heure.

Pour ce qui est des autres périodes de la journée, il a été choisi de répartir les 50 arrivées restantes de la façon suivante : 20 pour la période de pointe de quinze heures et 30 pour le restant de la journée. Ainsi, la distribution utilisée pour la période pointe de quinze heures est triangulaire et possède les paramètres suivants : 0,050 heure pour le mode (une heure/20 arrivées), 0,040 heure pour le minimum (une heure/25 arrivées) et 0,067 pour le maximum (une heure/15 arrivées). Les paramètres de la distribution aléatoire triangulaire pour

représenter le temps entre les arrivées pour le restant de la journée sont : 0,200 heure pour le mode (six heures/30 arrivées), 0,180 heure pour le minimum (six heures/35 arrivées) et 0,240 heure pour le maximum (six heures/25 arrivées).

Bien que ces estimations se basent sur un nombre moyen de camions par jour, les effets aléatoires des temps inter arrivées auront pour effet de faire varier ce nombre. De plus, la répartition estimée de ces arrivées provient des discussions avec les dirigeants des terminaux.

7.1.8.1 Arrivées des camions avec horaire des navires

En se rapportant à la section 6.4.15 du chapitre précédent, il peut être constaté que l'implantation effectuée du processus d'arrivée des camions s'est faite sous certaines hypothèses. Par contre, une alternative à cette implantation a été proposée. Cette sous-section vise à présenter les données nécessaires à l'implantation de cette alternative.

Plusieurs données sont nécessaires pour lier les arrivées de camions aux arrivées de navires. Tout d'abord, des relevés du nombre quotidien de camions qui se présentent au terminal sont nécessaires pour déterminer les variations du trafic au terminal. Ensuite, le navire sur lequel sera chargé le conteneur transporté et/ou le navire duquel provient le conteneur cueilli. Finalement, les dates d'arrivées prévues des navires au terminal sont nécessaires pour lier ces données. À partir de ces données, la proportion de conteneurs qui arrivent au terminal en fonction de la date d'arrivée prévue du navire, ainsi que les variations de cette proportion, peut être estimée et appliquée à la simulation. Les mêmes estimations peuvent être effectuées pour les conteneurs cueillis au terminal par les camions.

7.1.9 Arrivée des trains

Les lignes maritimes qui fréquentent le terminal de la côte Est canadienne utilisé pour l'implantation de la simulation sont servies par un des deux transporteurs ferroviaires majeurs canadiens. Afin de modéliser les arrivées de trains au terminal, il a été choisi d'utiliser une distribution triangulaire ayant un mode de 24 heures, un minimum de 22 heures et un maximum de 26 heures. La distribution triangulaire a été choisie puisqu'aucunes données

n'étaient disponibles sur les arrivées et départs de trains. Le mode de 24 heures provient du fait que le transporteur ferroviaire achemine un train par jour au port. Par contre, l'heure d'arrivée des wagons sur le terminal est soumise à des variations ce qui ne permet pas d'utiliser un horaire fixe. Puisque selon les dirigeants du terminal ces variations ne sont pas très importantes, un écart de deux heures par rapport au mode a été appliqué pour le minimum et le maximum. Ces variations proviennent du fait que ce ne sont pas les transporteurs ferroviaires qui effectuent la livraison des wagons aux terminaux, mais bien le port qui possède ses propres locomotives.

7.1.10 Plan de chargement des trains

Afin de déterminer le nombre de conteneurs à décharger et à charger sur les trains, il a d'abord été tenté d'estimer ces nombres à partir des estimations fournies par les dirigeants du terminal. En effet, ceux-ci estiment qu'environ 60% des 5 000 pieds de wagons, livrés au port quotidiennement, sont destinés au terminal. Par contre, il s'avère difficile de convertir ces quantités en nombre de conteneurs. Une estimation préliminaire a donc été faite, mais celle-ci, comme l'ensemble des estimations faites jusqu'à présent, doit être confirmée par les rondes de simulation de calibration et de validation.

En se basant sur l'estimation de 60% des wagons du train quotidien, il peut être estimé que 3 000 pieds de wagons sont destinés au terminal. En postulant une longueur des wagons de 60 pieds, on obtient un nombre de 50 wagons. Selon les dirigeants du terminal, la majorité des wagons utilisés pour le transport des conteneurs sont des wagons à double hauteur de chargement (*double stack railcars*). En se basant sur la configuration de chargement la plus répandue pour ce type wagons, soit deux conteneurs de 20 pieds à l'étage inférieur et un conteneur de 40 pieds à l'étage supérieur, on obtient un nombre moyen de conteneurs par wagons de trois, donc un nombre moyen de 150 conteneurs par train.

La distribution aléatoire implantée pour le nombre de conteneurs à décharger et à charger des trains est une distribution de Poisson ayant pour moyenne 150 conteneurs. La distribution de Poisson a été utilisée puisqu'il s'agit d'une distribution discrète qui, selon Kelton et col. (2004), est généralement utilisée pour représenter des tailles de lots aléatoires.

7.1.10.1 Plan de chargement de trains à l'aide de données réelles

À l'instar du cas des arrivées de camions, les distributions utilisées pour générer les plans de chargement des trains proviennent d'une hypothèse posée afin de remédier au manque de données réelles. Dans le but de supprimer cette limite du simulateur, des données réelles sur les quantités de conteneurs déchargés et chargés sur les trains auraient été nécessaires. Ainsi, les données auraient pu être traitées par le logiciel *ARENA Input Analyzer* et des distributions plus représentatives de ces quantités auraient pu être utilisées.

7.2 Calibration et validation

Afin de valider et de calibrer le modèle, deux scénarios ont été simulés. Le premier utilise des données sur les arrivées et la distribution des conteneurs sur le navire et reproduit les opérations du terminal pour une période de trois mois. Le second utilise des distributions statistiques dérivées des données du terminal pour simuler une année complète d'opérations du terminal. L'objectif de ces scénarios est de permettre de calibrer les paramètres du simulateur dans un premier temps, et de démontrer la stabilité et la validité du modèle dans un deuxième temps. En effet, le premier scénario permet de comparer les résultats obtenus du simulateur aux données réelles obtenues du terminal. Le second scénario, quant à lui, a pour objectif de démontrer la stabilité du modèle en démontrant la consistance des données par une simulation d'une année complète d'opérations. Chacun de ces scénarios a été simulé à dix reprises, les résultats présentés proviennent de moyennes calculées à partir de ces dix rondes de simulation.

7.2.1 Test sur les données réelles

Afin de valider et de calibrer le simulateur, les premiers tests effectués ont été exécutés en utilisant les dates d'arrivée des navires et le nombre de conteneurs à décharger et charger sur ceux-ci, provenant des rapports de production des navires fournis par le terminal. Ces données proviennent de trois mois d'opérations du terminal. Il a été choisi d'utiliser seulement trois mois, puisque des changements importants au niveau des lignes maritimes servies par le terminal ont nécessités des ajustements de la part du terminal et des lignes maritimes. En effet, les deux services qui fréquentent le terminal sont de nouveaux services

qui ont été développés deux et trois mois avant la période couvrant les données utilisées. Ainsi, les distributions de conteneurs sur les navires et les temps de travail obtenus sur ces rapports de production montraient des variations beaucoup plus importantes que les trois mois utilisés. Il a donc semblé plus juste d'utiliser ces données qui représentent mieux la situation normale du terminal.

7.2.2 Ajustements à l'implantation générale du simulateur

Afin de tester le simulateur avec des arrivées et des chargements de conteneurs sur les navires réels, certains ajustements ont dû être effectués sur l'implantation générale présentée au chapitre précédent. La figure 7.1 présente le sous-modèle d'arrivée des navires incluant ces ajustements.

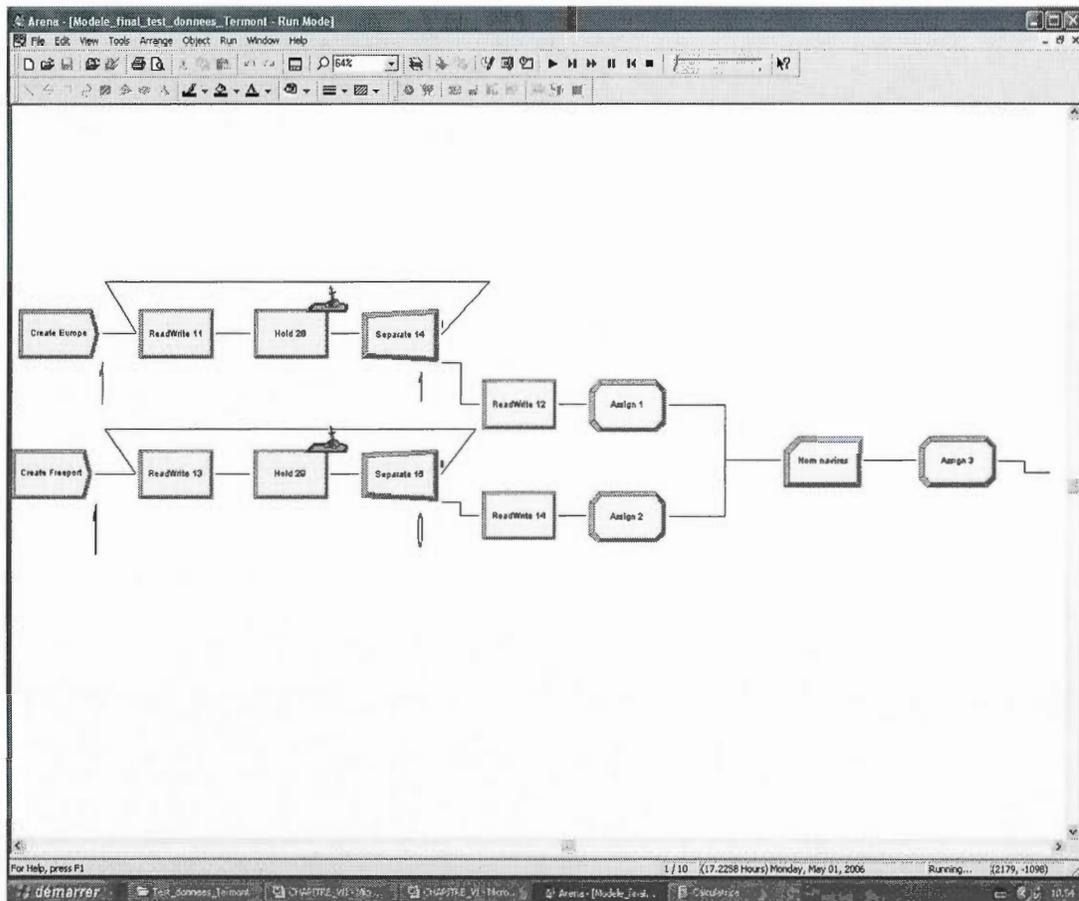


Figure 7.1 Sous-modèle d'arrivée des navires ajusté pour tester le simulateur avec les données réelles.

Les ajustements effectués servent à lire les temps d'arrivée des navires qui sont inscrits dans un fichier externe à la simulation. Donc, les modules de création situés à gauche de la figure 7.1 créent une entité de contrôle, qui lit le premier temps d'arrivée inscrit dans le fichier à l'aide du module de lecture qui suit le module de création. Ensuite, un module de retenue les retient jusqu'à ce que le temps actuel de la simulation soit égal au temps d'arrivée du navire. Lorsque l'entité de contrôle est relâchée, un duplicata de l'entité de contrôle est relâché et l'original retourne lire le prochain temps d'arrivée dans le fichier externe. La nouvelle entité créée par le module de séparation est acheminée vers un module de lecture qui lit les nombres de conteneurs à décharger et à charger sur le navire. Le module d'assignation suivant attribut un temps d'arrivée au navire et le compteur et le module d'assignation qui suivent lui attribuent un nom.

7.2.3 Ajustements aux distributions aléatoires estimées

Une fois les distributions aléatoires préliminaires implantées, des rondes de simulations ont été effectuées afin de calibrer les paramètres de ces distributions. Les paragraphes qui suivent ont pour objectif de présenter les ajustements effectués sur ces paramètres.

7.2.3.1 Temps de travail des serveurs

Les premiers tests effectués sur le simulateur ont révélé certaines lacunes au niveau des distributions aléatoires des temps de travail des serveurs.

Le premier cas est celui des serveurs affectés au déchargement et au chargement des navires. En effet, même en utilisant les paramètres les plus faibles des tableaux 7.12 et 7.13, le temps de déchargement et de chargement des navires affichait constamment des valeurs trop élevées. Des relevés statistiques des temps de début et de fin des opérations des grues de quai ont permis de constater que l'estimation des temps de travail des grues n'était pas la cause de ces valeurs trop élevées. L'observation du comportement du modèle a révélé que les distributions des temps de travail des serveurs sont la cause de ces valeurs trop élevées. En effet, suite à la fin du déchargement du navire par les grues de quai, le traitement des conteneurs par les serveurs nécessitait plusieurs heures supplémentaires. De plus, le

processus de chargement des navires était ponctué de plusieurs périodes de temps où les grues de quai se trouvaient en attente de conteneurs à charger. Afin de régler ces paramètres, une approche de type essai-erreur a été utilisée. En effet, les valeurs des différents paramètres des distributions aléatoires triangulaires ont été modifiés, jusqu'à ce que le traitement des conteneurs par les serveurs, suite à la fin du déchargement du navire par les grues de quai, soit inférieur à une heure. En ce qui a trait au temps de travail des serveurs pour le chargement des navires, il a été modifié jusqu'à ce que les temps de chargement des navires soient similaires aux temps obtenus sur les rapports de production du terminal. Les paramètres obtenus suite à ces tests sont de 0.075, 0.112 et de 0.142 pour le minimum, le mode et le maximum de la distribution aléatoire triangulaire du temps de travail des serveurs lors du déchargement des navires. Pour ce qui est de ces paramètres lors des opérations de chargement des navires, ils sont respectivement de 0.035, 0.0475 et de 0.0595.

Le second cas de temps de traitement des serveurs est celui des opérations de déchargement et chargement des trains. Dans ce cas, les tests effectués sur le simulateur ont démontré des temps de traitement des trains similaires au temps réellement obtenus pour le déchargement et le chargement d'un train.

Finalement, pour ce qui est du temps de travail des serveurs sur les camions, les tests préliminaires ont démontré des temps beaucoup trop importants. En effet, les temps de séjour moyens des camions à l'intérieur du terminal dépassaient une heure, ce qui est beaucoup plus important que le temps de séjour moyen estimé par les dirigeants du terminal qui évaluent ce temps entre vingt et trente minutes. À l'instar des temps de travail des serveurs pour les opérations sur les navires, une approche de type essai-erreur a été utilisée. Il en a été conclu que les paramètres appropriés pour le temps de travail des serveurs sur les camions sont de 0.027 pour le minimum, 0.0313 pour le mode et 0.042 pour le maximum de la distribution aléatoire triangulaire.

7.2.3.2 Plan de chargement des trains

L'utilisation de l'estimation formulée à la section 7.1.10 de ce chapitre s'est rapidement révélée inadéquate. En effet, en utilisant une moyenne de 150 conteneurs, l'inventaire de

conteneurs du terminal affichait des résultats improbables atteignant des valeurs supérieures à 10 000 conteneurs en inventaire à certaine période, pour un terminal qui possède une capacité maximale de 7 200 conteneurs. Ainsi, suite à divers tests sur les moyennes de la distribution de Poisson pour le nombre de conteneurs à décharger et à charger sur les trains, il a été conclu que la valeur de la moyenne devrait être de 114 pour le nombre de conteneurs à décharger et de 110 pour le nombre de conteneurs à charger. En effet, ces moyennes permettent d'obtenir un taux d'utilisation de la capacité de la cour oscillant autour de 70%, ce qui représente le taux estimé par les dirigeants du terminal.

7.2.4 Premier scénario : utilisation des données réelles du terminal

Afin de tester le simulateur, une période d'opération de trois mois a été simulée. Pour ce scénario, les arrivées de camions et de trains ont été générées de façon aléatoire, tandis que les arrivées de navires, ainsi que leur plan de chargement proviennent des rapports de production fournis par le terminal de la côte Est canadienne. L'inventaire initial de conteneurs a été à 4250, afin d'éviter une pénurie de conteneurs pour l'un ou l'autre des modes de transport. La condition d'arrêt de la simulation est un temps prédéterminé. Ce temps a été fixé à 2304 heures, ce qui représente 96 jours, afin de s'assurer que l'ensemble des opérations sur les 25 navires soient complétées lors de l'arrêt de la simulation.

7.2.4.1 Zone d'opérations portuaires

Pour la période simulée, 25 navires se sont présentés au terminal, 13 de ceux-ci opéraient sur la première ligne, tandis que les 12 autres opéraient sur la seconde. Le tableau 7.14, présente les temps de travail réels et simulés des grues de quai sur chacun de ces navires ainsi que la productivité obtenue. La productivité des opérations est mesurée par le nombre moyen de mouvements de conteneurs par heures de travail des grues de quai.

No. navire	Ligne	Temps travail grues quai réel	Temps travail grues quai simulé	Productivité réelle	Productivité simulée
1	1	108,20	98,89	22,48	24,59
2	2	19,25	17,46	24,16	26,63
3	1	87,75	82,63	23,70	25,17
4	1	74,30	64,85	21,90	25,09
5	2	36,75	31,51	20,95	24,44
6	2	31,30	27,81	23,80	26,79
7	1	102,95	103,75	23,05	22,87
8	2	28,00	31,83	28,21	24,42
9	1	89,30	119,16	24,00	17,98
10	1	72,34	72,83	25,32	25,16
11	2	31,00	26,10	22,26	26,43
12	1	103,08	100,79	24,59	25,15
13	2	25,50	26,98	28,31	26,76
14	1	86,34	88,40	25,91	25,28
15	2	30,10	32,89	25,58	23,41
16	1	94,50	92,73	23,93	24,38
17	2	32,34	28,38	23,44	26,71
18	1	91,25	91,79	24,35	24,21
19	2	21,80	22,89	27,98	26,64
20	1	96,40	109,36	23,53	20,74
21	2	33,20	33,99	24,91	24,40
22	1	92,50	80,05	21,32	24,63
23	2	24,90	25,35	23,49	23,07
24	1	80,75	80,52	24,93	25,00
25	2	27,50	29,11	25,27	23,88
Productivité moyenne :				23,99	24,57

Tableau 7.14 Comparaison des données réelles et des résultats de la simulation pour le temps de travail des grues de quai et la productivité des opérations de chargement et de déchargement des navires.

Tel que mentionné en introduction de la section 7.2, ces données représentent les moyennes obtenues des dix rondes de simulation effectuées pour ce scénario. Ainsi, la productivité moyenne pour l'ensemble des rondes a été de 24,57 mouvements de conteneurs par heure. Cette moyenne présente une variance de 3,84, ce qui représente un écart-type de 1,96 mouvement de conteneurs par heure. La figure 7.2 présente sous forme graphique les productivités moyennes obtenues des rondes de simulation et les productivités réelles observées pour chacun des navires.

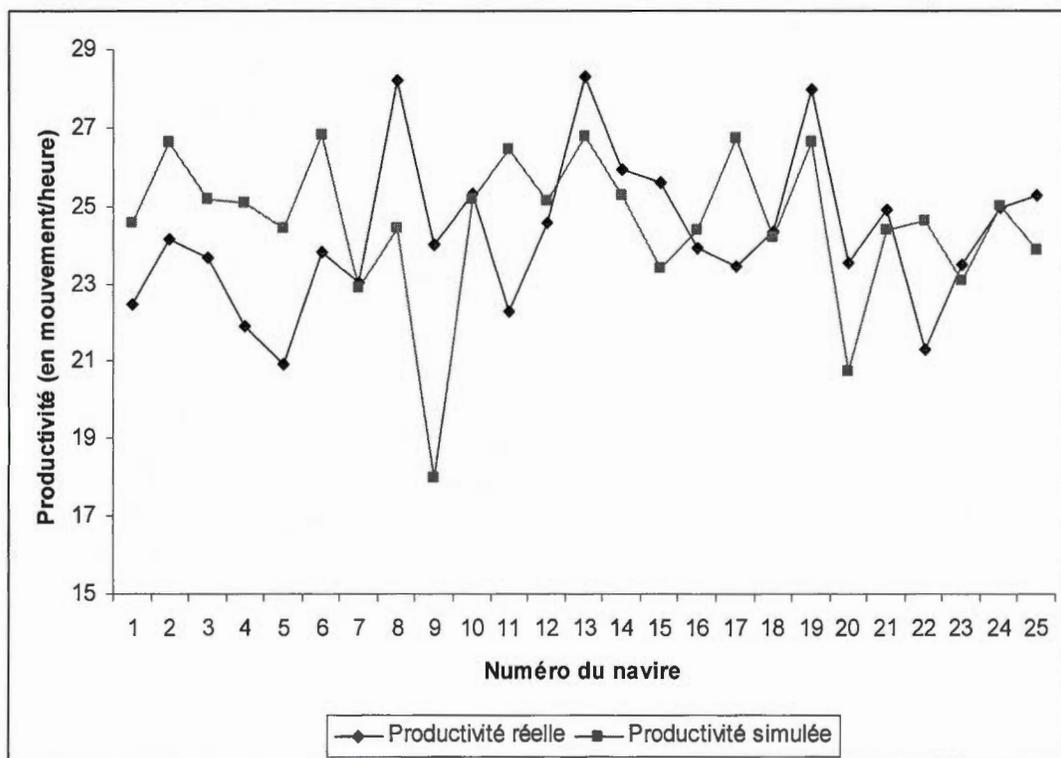


Figure 7.2 Productivité réelle et simulée des opérations de déchargement et de chargement des navires.

Tel qu'il peut être observé sur le graphique, les productivités obtenues des rondes de simulation sont près des données réelles, à l'exception du navire numéro neuf, qui présente une productivité simulée de 17,98 conteneurs/heure, tandis que la donnée réelle est de 24,00 conteneurs/heure.

7.2.4.2 Zone d'opérations terrestres

En ce qui concerne les résultats pour les camions, bien qu'aucune donnée réelle n'était disponible, une estimation du nombre moyen de camion par jour a été fournie par les dirigeants du terminal. En effet, ces derniers estimaient ce nombre à 300, estimation qui a été ramenée à 150 suite au postulat que tout les camions qui se présentent au terminal décharge un conteneur et en charge un autre avant de quitter. Suite aux rondes de simulation, le nombre moyen de camions obtenu est de 143,84 camions par jour. La variance associée à cette statistique est de 9,14, donc l'écart-type est de 3,02.

Le temps moyen des camions dans le terminal peut être estimé en additionnant les valeurs obtenues pour l'attente aux serveurs et les modes des distributions triangulaires représentant les temps de travail des serveurs, le temps de traitement de la guérite et les temps de déplacement à l'intérieur du terminal. Pour ce qui est du temps d'attente moyen avant d'être déchargé ou chargé par un serveur, la moyenne obtenue des dix rondes de simulation est de 0,3980 heures, ce qui représente 23,88 minutes. Dû au postulat évoqué au paragraphe précédent, cette moyenne doit être doublée puisque tous les camions doivent être traités deux fois chacun par les serveurs. De plus, le mode du temps de traitement des serveurs doit être ajouté pour chacun des passages. Celui-ci a une valeur de 0,0313 heure, tandis que sa valeur pour le temps de traitement des camions à la guérite est de 0,033 heure. Finalement, le mode de la distribution aléatoire triangulaire, représentant les temps de déplacement des camions à l'intérieur du terminal, doit être ajouté au total obtenu jusqu'à maintenant. Celui-ci a une valeur de 0,033 heure et doit être doublé, puisque les camions doivent se déplacer de la guérite à leur point de déchargement sur le terminal et de ce point à leur point de chargement, une fois qu'ils sont déchargés.

Le total de ces temps donne un temps de séjour moyen des camions à l'intérieur du terminal de 0,9906 heure, ce qui correspond à 59,436 minutes. Par contre, ce temps tient compte du fait que les camions déchargent un conteneur avant d'en charger un autre. Donc, un camion qui ne ferait qu'une ou l'autre des opérations pourrait réduire de moitié son temps de séjour moyen à l'intérieur du terminal, ce qui correspond à une valeur de 29,718 minutes. Ce temps est beaucoup plus près du temps de séjour moyen estimé par les dirigeants du terminal qui

estiment ce temps à environ 25 minutes. De plus, le calcul utilise le mode des temps de travail des serveurs, des temps de déplacement à l'intérieur du terminal et du temps de traitement à la guérite. Ces évaluations ne représentent pas nécessairement le temps moyen de chacune des activités qu'elles représentent. En effet, tel qu'il a été vu pour le cas du nombre moyen de camions se présentant au terminal, un calcul basé uniquement sur le mode des distributions aléatoires triangulaires aurait eu comme résultat un nombre de camions par jour équivalent à 150, tandis que la moyenne prélevée des dix rondes de simulation est de 143,84 camions par jours. Donc, cette estimation du temps moyen de séjour des camions à l'intérieur du terminal peut surestimer ou sous-estimer la valeur exacte de ce temps.

En ce qui a trait aux arrivées de trains, un total de 958 trains s'est présenté au terminal lors des dix rondes de simulation, ce qui représente une moyenne de 95,8 trains par ronde. Cette moyenne correspond à l'horaire actuellement en vigueur au port. En effet, selon cet horaire, un mouvement de train (une arrivée et un départ) par jour est effectué. Chacune des rondes de simulation ayant une durée de 96 jours, la moyenne obtenue correspond à l'horaire établie par le transporteur ferroviaire. Le tableau 7.15 présente les moyennes ainsi que la variance et l'écart-type obtenus pour les temps de traitement des trains et le nombre de conteneurs à décharger et à charger sur le train.

	Temps de traitement	Nb. conteneurs à décharger	Nb. conteneurs à charger
Moyenne	8,488834748	114,0563674	110,2181628
Variance	0,589009696	103,3343325	109,95549
Écart-type	0,767469671	10,1653496	10,48596634

Tableau 7.15 Temps de traitement et plan de chargement moyens des trains pour le premier scénario.

Tel qu'il peut être observé, le nombre de conteneurs moyens à décharger et à charger sur les trains sont cohérents avec les moyennes utilisées pour la génération des plans de chargement. En effet, ces plans étaient générés en utilisant des distributions de Poisson ayant pour moyenne 114 et 110 conteneurs. Le temps de traitement moyen obtenu pour un cycle d'opération (déchargement et chargement) sur les trains est de 8,49 heures, ce qui représente un petit peu plus qu'un quart de travail. Peu de conclusions peuvent être tirées de ces

données. En effet, lors des entretiens avec les dirigeants du terminal, ceux-ci ont affirmé qu'il s'avère difficile d'estimer le temps de traitement des trains, car la productivité de ces opérations varie grandement. Selon eux, lorsque le nombre de conteneurs à manutentionner est élevé, les opérateurs des équipements de manutention ont tendance à se décourager et à offrir un rendement moins élevé. À l'opposé, un faible nombre de manutentions à effectuer a pour effet de motiver les opérateurs, qui y voient une possibilité de terminer le travail plus tôt. Bien qu'ils aient jugé difficile d'évaluer la productivité des opérations sur les trains, les dirigeants ont quand même affirmés que la manutention de 300 conteneurs en un quart de travail de huit heures représente une très bonne production. Sur cette base, il peut être affirmé qu'avec une production moyenne d'environ 225 conteneurs par huit heures, les résultats obtenus par le simulateur sont réalistes.

7.2.4.3 Zone de stockage du terminal

En ce qui concerne la zone de stockage du terminal, les résultats des rondes de simulation sont présentés sous forme abrégée dans le tableau 7.16. Tel qu'il peut y être observé, l'inventaire moyen du terminal est de 4488,56 conteneurs. Cette moyenne représente un taux d'occupation moyen de la capacité de stockage de 62,34%. Les dirigeants du terminal estimaient ce taux à 70%, ce qui est supérieur au taux obtenu suite aux dix rondes de simulation effectuées. Par contre, ce taux d'occupation peut être dû à la durée des rondes de simulation. En effet, puisque seulement trois mois d'opérations sont simulés, il se peut qu'une perturbation temporaire du système ne puisse être absorbée complètement par celui-ci. Plus précisément, quelques arrivées de navires rapprochées peuvent avoir pour effet de diminuer temporairement le niveau d'inventaire, alors que la simulation se termine. Donc, le système n'a pas nécessairement le temps de se rééquilibrer avant la fin de la ronde de simulation. Le second scénario, qui simule une année complète d'opérations sera plus concluant au niveau du taux moyen d'occupation de la zone de stockage du terminal. Par contre, pour le moment, il peut être observé que la simulation est relativement cohérente avec les estimations des dirigeants du terminal. De plus, le temps moyen à l'intérieur du système des conteneurs pour les dix rondes de simulation s'est élevé à 140,30 heures, ce qui représente une durée moyenne de séjour de 5,85 jours.

Inventaire moyen du terminal	
Moyenne	4488,56
Variance	84287,45
Écart-type	290,32

Tableau 7.16 Inventaire moyen des dix rondes de simulation du premier scénario.

Finally, le tableau 7.17 présente le taux d'utilisation des différents équipements du terminal. Bien qu'aucunes données ou estimés de ces taux n'aient été fournis, ces résultats s'avèrent intéressants à titre comparatif d'un scénario à l'autre. Il importe de mentionner que ces taux d'utilisation concernent l'ensemble de la simulation, donc qu'ils représentent le taux d'utilisation sur la période simulée, contrairement à un taux d'occupation qui représenterait le taux d'utilisation lorsque l'équipement est attribué à une tâche. Par exemple, dans le cas des grues de quai, il s'agit du temps travaillé sur l'ensemble de la simulation et non seulement lorsqu'il y a des navires à quai.

Équipements	Taux d'utilisation
Grue 1	0,2403
Grue 2	0,2129
Grue 3	0,1818
Guérite	0,2100
Serveur 1	0,1908
Serveur 2	0,1904
Serveur 3	0,1902
Serveur 4	0,1901
Serveur 5	0,1906
Serveur 6	0,1893
Serveur 7	0,1898
Serveur 8	0,1901
Serveur 9	0,1899
Serveur 10	0,1895
Serveur 11	0,1902
Serveur 12	0,1911
Serveur 13	0,1907
Serveur 14	0,1899
Serveur 15	0,1904

Tableau 7.17 Taux d'utilisation des équipements du terminal.

Les taux d'utilisation similaires des serveurs s'expliquent par l'implantation qui a été faite du processus d'allocation des serveurs. En effet, tel qu'expliqué à la section 6.4.7 du chapitre précédent, les serveurs sont saisis au hasard, parmi un ensemble, par les conteneurs qui se présentent au sous-modèle d'opération des serveurs. Ainsi, la règle de sélection, qui est une règle incluse dans le logiciel, est constituée de telle sorte que tous les serveurs ont une chance égale d'être choisis. Donc, les taux d'utilisation devraient normalement être très semblables d'un serveur à l'autre. De plus, en ce qui concerne les grues de quai, le taux d'utilisation plus faible de la grue 3 s'explique par l'implantation du sous-modèle d'opération des grues de

quai (voir sous-section 6.4.6.1). En effet, tel qu'il peut être observé sur la figure 6.12, lorsqu'un navire utilise seulement deux grues de quai, les grues 1 et 2 sont automatiquement utilisées pour les opérations sur ce navire. Donc, lorsqu'un navire de la seconde ligne est le seul navire à quai au cours d'une ronde de simulation, les grues 1 et 2 sont utilisées, tandis que la grue numéro 3 est utilisée seulement lorsqu'il s'agit d'un navire de la première ligne ou lorsqu'il y a plus d'un navire à quai.

7.2.5 Deuxième scénario : simulation d'une année complète d'opérations

Afin de s'assurer de la validité et de la stabilité de la calibration effectuée à l'aide des rondes précédentes, une autre série de dix rondes de simulation a été effectuée, mais la durée a été prolongée à une année complète d'opérations. Les données utilisées pour effectuer les rondes de simulation sont les mêmes que dans le cas précédent, à l'exception des arrivées de navires.

En effet, seulement trois mois de données étaient disponibles. Donc, les arrivées de navires ont été générées de façon aléatoire en utilisant les distributions identifiées à la section 7.1.2. Par contre, un ajustement a dû être effectué pour le temps entre les arrivées de navires de la première ligne. Puisque la distribution utilise une loi normale ayant pour moyenne 160 heures et pour écart-type 60 heures, une valeur située à trois écart-type de la moyenne peut être négative. Puisque le temps entre les arrivées de navires ne peut être négatif, la simulation applique donc automatiquement la valeur zéro au temps entre l'arrivée des deux navires. Cette situation a pour effet de créer une erreur dans la simulation, qui s'arrête et affiche un message d'erreur. Afin de remédier à cette situation, le temps entre les arrivées de navires de la première ligne est donc représenté par une règle de décision qui choisit la valeur maximale entre une heure et la valeur que procure la distribution normale. Ainsi, l'erreur produite par deux arrivées simultanées de navires d'une même ligne est évitée. De plus, l'impact de deux arrivées de navires dans une fenêtre d'une heure est le même que l'arrivée de deux navires simultanément, puisque moins de 100 conteneurs peuvent être déchargés durant cette heure.

Comme dans le cas précédent, dix rondes de simulation ont été effectuées, mais la durée de chacune des rondes était de 8760 heures, ce qui représente 365 jours, soit une année

complète. Les paragraphes suivants présentent les résultats obtenus de ces rondes de simulation.

7.2.5.1 Zone d'opérations portuaires

Pour l'ensemble des rondes de simulation, un total de 1058 navires a été généré. De ce nombre, 539 provenaient de la première ligne, tandis les 519 autres provenaient de la seconde ligne. Le tableau 7.18 présente les moyennes ainsi que les variances et les écart-type tirés des simulations pour les navires de la première ligne, tandis que le tableau 7.19 présente ces résultats pour les navires de la seconde ligne.

	Temps à quai	Nb. conteneurs à décharger	Nb. conteneurs à charger	Temps de travail grues de quai	Productivité
Moyenne	34,79034197	1115,90538	1034,58256	93,62828958	22,87823381
Variance	67,74404517	24789,36464	20442,61538	212,788891	2,938010115
Écart- type	8,230677079	157,4463865	142,9776744	14,58728525	1,714062459

Tableau 7.18 Moyenne, variance et écart-type des statistiques des navires de la première ligne pour la simulation d'une année complète d'opérations.

	Temps à quai	Nb. conteneurs à décharger	Nb. conteneurs à charger	Temps de travail grues de quai	Productivité
Moyenne	19,06790724	303,8689788	398,1252408	11,61125136	22,08317886
Variance	51,99782342	13013,40751	6196,368454	703,4009617	7,823575638
Écart- type	7,210951631	114,0763232	78,71701502	26,52170737	2,797065541

Tableau 7.19 Moyenne, variance et écart-type des statistiques des navires de la deuxième ligne pour la simulation d'une année complète d'opérations.

Une première observation qui peut être tirée de ces tableaux est que la productivité moyenne des opérations sur les navires a diminuée par rapport au scénario précédent. De plus, cette moyenne est inférieure aux données réelles obtenues, qui affichent une moyenne de 23,99 conteneurs/heure. Par contre, dans les deux cas la moyenne obtenue se situe à moins d'un

écart type de la moyenne réelle. En conséquence, il peut être affirmé que les résultats obtenus ne discréditent pas la validité de la simulation.

7.2.5.2 Zone d'opérations terrestres

Pour ce qui est du nombre moyen de camions qui se présentent au terminal quotidiennement, les résultats obtenus sont très similaires aux résultats obtenus pour la période de trois mois. En effet, le nombre moyen de camions s'est élevé à 143,68 camions/jours, tandis que la variance et l'écart-type ont été respectivement de 8,27 et 2,97. La principale constatation qui peut être tirée de ces résultats est que la simulation des opérations sur une plus longue période a permis de réduire un peu la variance et l'écart-type des résultats.

La plus grande durée de la période de simulation a aussi permis d'accumuler un plus grand nombre de données sur les camions, ce qui permet d'obtenir un temps moyen dans le système pour ces derniers. Cette valeur s'avère plus faible que la valeur calculée à partir des résultats du premier scénario simulé. En effet, pour le scénario présent, cette valeur s'est élevée à 0,8158 heure comparativement à la valeur de 0,9906 heure calculée pour le premier scénario. La moyenne obtenue pour le scénario présent représente un temps moyen de 48,95 minutes, qui peut être ramenée à 24,48 minutes en tenant compte du postulat posé quant aux arrivées de camions. De plus, cette situation confirme ce qui a été avancé à la section précédente sur le temps à l'intérieur du terminal des camions. En effet, en reproduisant le même calcul que celui qui a été effectué pour le scénario précédent, la valeur du temps moyen dans le terminal des camions aurait été de 0,9806 heure, ce qui représente 58,84 minutes par camion, valeur qui peut être ramené à 29,42 minutes.

Au niveau des trains, un total de 3650 trains a été traité par le terminal au cours des dix rondes de simulation, ce qui représente une moyenne de 365 trains par ronde. Comme dans le cas précédent, cette moyenne respecte l'horaire de train établi par le transporteur ferroviaire. Les résultats concernant le temps de traitement et le plan de chargement des trains sont présentés au tableau 7.20. Ces résultats sont similaires aux résultats du scénario précédent qui sont présentés au tableau 7.15. En conséquence, il ne peut pas en être tiré de conclusions différentes de celles présentées précédemment.

	Temps de traitement	Nb. conteneurs à décharger	Nb. conteneurs à charger
Moyenne	8,509816014	113,9106849	109,9027397
Variance	0,589423563	116,5483374	115,3440594
Écart-type	0,767739254	10,79575553	10,73983516

Tableau 7.20 Temps de traitement et plan de chargement moyens des trains pour la simulation d'une année complète d'opération.

7.2.5.3 Zone de stockage du terminal

Tel que mentionné en 7.2.4.3, les résultats d'une année complète d'opération devrait être en mesure d'avoir une meilleure idée du taux d'utilisation de la capacité de stockage. En effet, une période plus grande permet de minimiser l'impact de variations importantes temporaires du niveau des stocks. Avec une moyenne de 4909,44 conteneurs dans la zone de stockage du terminal, la simulation d'une année complète d'opération permet d'obtenir un taux d'utilisation de cette zone beaucoup plus près de l'estimation formulée par les dirigeants du terminal. En effet, ce niveau moyen d'inventaire représente un taux d'utilisation de la capacité de 68,19%, comparativement à une estimation de 70%. Le tableau 7.21 présente cette moyenne ainsi que la variance et l'écart-type qui y sont associés. Le temps moyen de séjour des conteneurs sur à l'intérieur du terminal a légèrement augmenté par rapport au scénario précédent, sa valeur actuelle est de 176,51 heures, ce qui représente un séjour moyen de 7,35 jours.

Inventaire moyen du terminal	
Moyenne	4909,44
Variance	2534889,931
Écart-type	1592,133767

Tableau 7.21 Inventaire moyen des dix rondes de simulation d'une année complète d'opérations du terminal.

En termes d'utilisation des ressources, une très faible augmentation des taux d'utilisation des équipements du terminal peut être observée au tableau 7.22. Par contre, cette augmentation est trop faible qu'une augmentation de la durée de la simulation mène à des taux d'utilisation des équipements plus élevés.

Équipements	Taux d'utilisation
Grue 1	0,2609
Grue 2	0,2184
Grue 3	0,1891
Guérite	0,2078
Serveur 1	0,1936
Serveur 2	0,1939
Serveur 3	0,1935
Serveur 4	0,1934
Serveur 5	0,1934
Serveur 6	0,1935
Serveur 7	0,1936
Serveur 8	0,1932
Serveur 9	0,1931
Serveur 10	0,194
Serveur 11	0,1931
Serveur 12	0,1937
Serveur 13	0,1933
Serveur 14	0,1936
Serveur 15	0,1929

Tableau 7.22 Taux d'utilisation des équipements du terminal.

7.3 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de démontrer la validité du modèle de simulation qui a été développé dans le cadre de ce projet de recherche. À la lumière des tests effectués et des comparaisons avec les données réelles et les estimations obtenues des dirigeants d'un terminal portuaires de conteneurs de la côte Est canadienne, la simulation a démontré sa capacité à représenter les opérations d'un terminal à un niveau macro de simulation. En effet, tel que mentionné dans le chapitre V, portant sur le design du simulateur, l'objectif de cette

simulation est de représenter les opérations d'un terminal afin d'être utilisé comme outil d'analyse pour mesurer l'impact qu'aurait l'application de système de transport intelligent aux terminaux de la côte Est canadienne. L'application de la simulation au niveau macro des opérations du terminal permettant un aide à la décision aux niveaux de planification stratégique et tactique du terminal. L'étape suivante consiste à démontrer les applications qui peuvent être faites d'un tel système. Celle-ci constitue le sujet du chapitre suivant qui présente des exemples de tests qui peuvent être effectués sur le simulateur et les conclusions qui peuvent découler de ces tests.

Par contre, avant de démontrer ces applications, il importe de revenir sur certains points du modèle de simulation. En effet, celui-ci possède certaines limites qui peuvent relativiser les conclusions qui en sont tirées. Tout d'abord, tel qu'il a été démontré dans les sous-sections 7.2.4.1 et 7.2.5.1, qui portent sur la zone d'opérations portuaire du terminal, les résultats obtenus du simulateur sont très fidèles aux données obtenues du terminal. Par contre, il ne peut pas en être dit autant des résultats obtenus pour la zone d'opérations terrestres. En effet, les hypothèses posées pour représenter les arrivées de camions et de trains proviennent d'estimations des dirigeants du terminal qui, de leur propre aveux, ont admis avoir de la difficulté à évaluer certains temps d'opération, particulièrement dans le cas des opérations sur les trains. Bref, il peut être conclu de ces observations que les résultats des tests doivent être interprétés avec plus de précautions pour la zone d'opérations terrestres, comparativement aux autres zones du terminal.

Suite à ces observations, des avenues de développements potentielles du simulateur peuvent être identifiées. Une première avenue serait d'obtenir de meilleures estimations pour les arrivées et les temps d'opérations de la zone d'opérations terrestres. Ainsi, la précision du modèle pourrait être augmentée. De plus, une autre voie de développement serait de préciser l'objet du simulateur en simulant à un niveau plus précis les opérations du terminal.

CHAPITRE VIII

EXPÉRIMENTATIONS

Se basant sur le calibrage et la validation de la simulation effectués au chapitre précédent, ce chapitre a pour objectif de démontrer des exemples d'analyses qui peuvent être effectuées à l'aide du simulateur développé dans les chapitres précédents. Par contre, tel qu'il sera relevé tout au long du chapitre, les résultats de certains tests doivent être interprétés avec précautions, dû aux hypothèses formulées dans les chapitres précédents quant aux arrivées de camions au terminal et aux plans de chargement des trains. Trois analyses différentes seront présentées. Dans un premier temps, la section 8.1 présente le cadre de référence utilisé pour analyser les différents tests sur le simulateur. Ensuite, la section 8.2 présente une analyse visant à mesurer l'impact de plusieurs arrivées de navires au terminal à l'intérieur d'une fenêtre de 24 heures. Puis, un scénario simulant un bris majeur d'une grue de quai est simulé à la section 8.3. La section 8.4 mesure l'impact, sur les opérations et la performance du terminal, de l'ajout d'une quatrième grue de quai. Finalement la section 8.5 conclue le chapitre avec un rappel du chapitre et des commentaires sur les résultats obtenus.

8.1 Cadre de référence

Avant d'effectuer quelque analyse qu'il soit, il importe de définir le point de référence qui sera utilisé pour analyser les résultats des tests effectués sur le simulateur. Dans le cas présent, le point de référence utilisé sera la simulation de trois mois d'opération utilisant les données fournies par le terminal portuaire de conteneurs de la côte Est canadienne. En effet, ces données offrent un point de comparaison plus stable que la simulation d'une année complète d'opération, puisque les données sur les arrivées de navires et le nombre de conteneurs chargés et à charger sur ceux-ci sont connus.

8.2 Premier test : Arrivées simultanées de navires

Ce premier test vise à mesurer l'impact sur les opérations et la performance du terminal de l'arrivée de plusieurs navires à l'intérieur d'une fenêtre de 24 heures. En effet, un tel scénario pourrait se produire dans un cas ou une tempête, un bris ou un autre événement quelconque aurait pour effet de causer le retard d'un navire sur l'horaire normal. Plus précisément, les changements apportés au plan initial d'arrivée des navires sont expliqués dans les lignes suivantes. Avant la modification du fichier d'arrivée des navires, un navire de la seconde ligne se présente 464 heures après le début de la simulation, tandis qu'un navire de la première ligne se présente 479 heures après le début de la simulation, soit 15 heures après l'arrivée du navire de la seconde ligne. Afin de générer une perturbation du système causée par des arrivées simultanées, l'arrivée d'un navire de la première ligne a été ajoutée 464 heures après le début de la simulation, tandis qu'une arrivée de navire de la seconde ligne a été ajoutée 479 heures après le début de la simulation. Ainsi, un navire de chacune des lignes arrive au terminal 464 heures après le début de la simulation et la même situation se produit 15 heures plus tard, 479 après le début de la simulation. Le nombre de conteneurs à décharger des navires ajoutés, ainsi que le nombre de conteneurs à y charger, sont équivalents aux moyennes obtenues pour leurs lignes respectives. Aucun ajustement à l'implantation de la simulation n'a été nécessaire pour ce test, à l'exception de la modification de l'horaire d'arrivée des navires. La simulation à une durée de 2304 heures et dix rondes ont été effectuées, afin d'obtenir les résultats présentés dans les paragraphes qui suivent.

8.2.1 Zone d'opérations portuaires

Pour chacune des rondes de simulation, un total de 27 navires s'est présenté au terminal. De ce nombre, 14 proviennent de la première ligne, tandis que les 13 restants proviennent de la seconde ligne. Le tableau 8.1 présente le temps à quai et la productivité obtenus pour chacun des navires. Les navires 7 et 8 n'ont pas de données autres que les données de la simulation avec retards, puisqu'il s'agit des navires ajoutés au plan initial d'arrivée des navires. Tel qu'il peut être observé dans le tableau, les résultats obtenus pour les rondes de simulation qui incluent les arrivées simultanées de navires sont très similaires aux résultats obtenus pour la simulation des opérations du terminal effectuée au chapitre précédent. En effet, mis-à-part les

navires 6, 7, 8 et 9, qui affichent des temps de travail des grues de quai plus importants et, par le fait même, des productivités plus faibles que les autres navires de leurs lignes respectives, les données obtenues sont très similaires. Ces résultats peuvent s'expliquer par la congestion du terminal qu'a pu causer l'arrivée simultanée des navires. En effet, le nombre de conteneurs plus importants à traiter peut congestionner temporairement les serveurs, ce qui peut ralentir les opérations de déchargement et de chargement des navires. De plus, les navires 6 et 9 démontrent aussi une légère augmentation du temps à quai ainsi qu'une diminution de la productivité des opérations, qui peut s'expliquer par les mêmes raisons que celles évoquées précédemment. Par contre, une stabilité du reste de la simulation peut être observée. Cette stabilité s'explique par le fait que les arrivées de navires sont relativement espacées dans le temps, ainsi, lorsque le navire suivant se présente, les navires arrivés simultanément ont tous été traités.

No. navire	Ligne	Temps travail grues quai réel	Temps travail grues quai simulé	Temps travail grues quai avec retard	Productivité réelle	Productivité simulée	Productivité simulée avec retard
1	1	108,2	98,89	98,89	22,48	24,59	24,59
2	2	19,25	17,46	17,46	24,16	26,63	26,63
3	1	87,75	82,63	82,63	23,7	25,17	25,17
4	1	74,3	64,85	64,85	21,9	25,09	25,09
5	2	36,75	31,51	31,51	20,95	24,44	24,44
6	2	31,3	27,81	29,57	23,8	26,79	25,19
7	2			42,74			16,32
8	1			123,18			17,44
9	1	102,95	103,75	116,16	23,05	22,87	20,55
10	2	28	31,83	31,84	28,21	24,42	24,81
11	1	89,3	119,16	119,32	24	17,98	17,96
12	1	72,34	72,83	72,82	25,32	25,16	25,16
13	2	31	26,1	26,14	22,26	26,43	26,40
14	1	103,08	100,79	101,11	24,59	25,15	25,07
15	2	25,5	26,98	26,92	28,31	26,76	26,83
16	1	86,34	88,4	88,40	25,91	25,28	25,28
17	2	30,1	32,89	32,86	25,58	23,41	23,43
18	1	94,5	92,73	92,56	23,93	24,38	24,43
19	2	32,34	28,38	28,53	23,44	26,71	26,57
20	1	91,25	91,79	91,93	24,35	24,21	24,17
21	2	21,8	22,89	22,83	27,98	26,64	26,72
22	1	96,4	109,36	109,47	23,53	20,74	20,72
23	2	33,2	33,99	33,62	24,91	24,4	24,67
24	1	92,5	80,05	80,07	21,32	24,63	24,63
25	2	24,9	25,35	25,50	23,49	23,07	22,94
26	1	80,75	80,52	80,45	24,93	25	25,02
27	2	27,5	29,11	29,13	25,27	23,88	23,86
Productivité moyenne :					23,99	24,57	23,86

Tableau 8.1 Comparaison entre les données réelles, les données obtenues de la simulation des opérations du terminal et les données obtenues de la simulation des opérations du terminal avec des retards de navires qui causent des arrivées simultanées.

8.2.2 Zone d'opérations terrestres

En ce qui concerne la zone d'opérations, à première vue, l'arrivée de navires simultanément ne devrait pas avoir d'impact sur ces opérations.

Cette intuition se confirme pour ce qui est des arrivées de camions, en effet, le nombre moyen de camions par jours aux cours des dix rondes de simulation s'est élevé à 143,01. Une variance de 41,05 et un écart-type de 6,41 sont associées à cette moyenne. Ces résultats sont très similaires aux résultats obtenus de la simulation de référence pour laquelle la moyenne de camions par jour s'élevait à 143,84.

Tel que démontré auparavant, il s'avère risqué d'utiliser le calcul du temps moyen à l'intérieur du terminal à l'aide des modes des distributions triangulaires pour lesquels aucune moyenne n'est disponible. Par contre, une moyenne est disponible pour la file d'attente des serveurs du terminal qui sont affectés aux opérations sur les camions. Puisque ce temps d'attente représente une part importante du temps total à l'intérieur du terminal, la comparaison de ces temps peut quand même donner une bonne idée de l'évolution du temps moyen à l'intérieur du terminal. En effet, pour la simulation d'une année complète d'opération, le temps d'attente pour les serveurs représentait 96,35% (0,786/0,8158) du temps total à l'intérieur du terminal. Dans le cas présent, le temps d'attente pour un serveur s'élève à 0,3930 heure, comparativement à 0,3980 heure pour la simulation de référence. Cette variation représente une proportion de 1,26% ou 0,3 minute. À partir de ces données, il peut être affirmé que l'arrivée simultanée de plusieurs navires n'a pas d'impact sur le temps des camions à l'intérieur du terminal. En effet, une variation aussi faible peut être due à la nature aléatoire de la simulation.

À l'instar des arrivées de camions, les arrivées de train n'ont été aucunement affectées par l'arrivée simultanée de plusieurs navires. En effet, un total de 960 trains s'est présenté au terminal au cours des dix rondes de simulation, ce qui représente une moyenne de 96 trains par rondes, soit un train par jour, tel que stipulé par l'horaire du transporteur ferroviaire. La

moyenne, la variance et l'écart-type des opérations sur les trains et du plan de chargement de ceux-ci sont présentés au tableau 8.2.

	Temps de traitement	Nb. conteneurs à décharger	Nb. conteneurs à charger
Moyenne	9,150577658	115,8529718	111,7768509
Variance	6,752069391	140,2278382	148,6161233
Écart-type	2,598474435	11,84178357	12,19082127

Tableau 8.2 Temps de traitement et plan de chargement moyens des trains pour dix rondes simulation avec arrivées simultanées de navires.

À la vue des résultats présentés au tableau 8.2, il peut être constaté que le temps de traitement moyen des trains a augmenté légèrement, passant de 8,488, pour la simulation de référence, à 9,150 pour la simulation actuelle. Par contre, cette augmentation du temps moyen de traitement s'accompagne d'une hausse de la variance et de l'écart-type pour ces valeurs. En effet, dans le premier cas, la variance est passée de 0,589 à 6,752, tandis que, dans le second cas, la valeur de l'écart-type est passée de 0,767 à 2,598.

8.2.3 Zone de stockage du terminal

Au niveau de la zone de stockage, l'arrivée simultanée de navires a eu pour effet d'augmenter l'inventaire moyen du terminal. En effet, comme il peut être observé au tableau 8.3, l'inventaire moyen dans la zone de stockage a augmenté de 169,04 conteneurs pour atteindre une moyenne quotidienne de 4657,60 conteneurs. Cette moyenne représente un taux moyen d'occupation de 64,69% par rapport à une estimation de 70% des dirigeants du terminal.

Inventaire moyen du terminal	
Moyenne	4657,60
Variance	106773,23
Écart-type	326,76

Tableau 8.3 Inventaire moyen de la zone de stockage du terminal.

La figure 8.1 présente sous forme graphique l'évolution du stock moyen pour l'ensemble de la période de 96 jours qui est simulée. Ce stock moyen représente la moyenne des dix rondes de simulation effectuées.

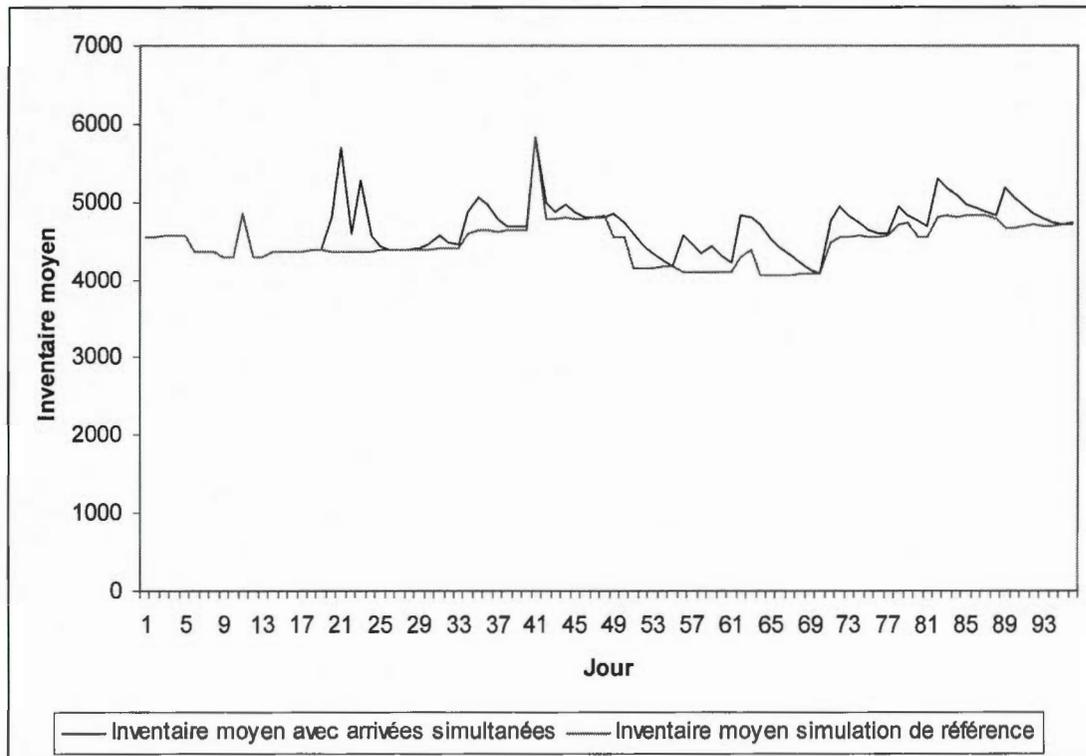


Figure 8.1 Évolution de l'inventaire moyen de la zone de stockage du terminal.

Deux hausses principales peuvent être répertoriées à l'observation du graphique. La première se produit entre les jours 20 et 25. Cette période correspond à l'arrivée des quatre navires à l'intérieur d'une fenêtre de 16 heures. Cette hausse temporaire s'explique par la variation de l'état des navires. En effet, la hausse est composée de deux pointes du stock moyen, la première pointe correspond à la fin des opérations de déchargement des deux premiers navires arrivés, tandis que le creux qui suit correspond à la fin des opérations de chargement de ces navires, la combinaison des deux nécessitant un nombre important de conteneurs pour compléter leurs chargements. Suite à la fin de ces opérations, le début du cycle d'opération des deux autres navires permet de relever temporairement l'inventaire jusqu'à ce qu'ils débutent leurs opérations de chargement. La deuxième hausse temporaire de l'inventaire moyen se produit autour de la 40^{ème} journée de la simulation. Par contre, cette hausse se

produit aussi dans la simulation de référence. C'est pourquoi, on ne peut conclure à une variation induite par les changements apportés aux conditions de la simulation. Le terme simulation de référence renvoie ici à la simulation des opérations du terminal effectuée à partir des données réelles.

Équipements	Taux d'utilisation simulation avec retards	Taux d'utilisation simulation de référence
Grue 1	0,2668	0,2403
Grue 2	0,2081	0,2129
Grue 3	0,2117	0,1818
Guérite	0,2098	0,2100
Serveur 1	0,1972	0,1908
Serveur 2	0,1962	0,1904
Serveur 3	0,1971	0,1902
Serveur 4	0,1959	0,1901
Serveur 5	0,1960	0,1906
Serveur 6	0,1960	0,1893
Serveur 7	0,1963	0,1898
Serveur 8	0,1954	0,1901
Serveur 9	0,1956	0,1899
Serveur 10	0,1961	0,1895
Serveur 11	0,1965	0,1902
Serveur 12	0,1962	0,1911
Serveur 13	0,1961	0,1907
Serveur 14	0,1969	0,1899
Serveur 15	0,1966	0,1904

Tableau 8.4 Taux d'utilisation des équipements du terminal.

Le tableau 8.4 présente les taux d'utilisation moyens des équipements du terminal pour la simulation de référence et pour les rondes de simulation incluant des retards de navires. Tel

qu'il peut être observé, les taux d'utilisation des serveurs ont légèrement augmenté. Cette augmentation s'explique par le nombre plus important de navires qui se sont présentés au terminal. En effet, ces navires ont entraîné un plus grand nombre de conteneurs à traiter dans la zone de stockage du terminal, donc, par le fait même, une utilisation plus importante des serveurs. Par contre, le changement le plus important qui peut être observé se situe au niveau de l'utilisation des grues de quai. En effet, les grues 1 et 3 ont vu leur taux d'utilisation augmenter, tandis que le taux d'utilisation de la grue 2 a légèrement diminué. L'augmentation des taux d'utilisation des grues de quai peut s'expliquer par le plus grand nombre de navire qui se sont présentés au terminal au cours des rondes de simulation. De plus, l'augmentation plus importante du taux d'utilisation de la grue 3 provient des arrivées simultanées de navires qui nécessitent de répartir les grues sur les deux navires se présentant en simultanément.

8.3 Deuxième test : Panne majeure d'une grue de quai

L'objectif de ce second test est de mesurer l'impact sur la performance du terminal d'une panne majeure d'une grue de quai. Par panne majeure, on entend ici une panne d'une durée d'une semaine durant laquelle le terminal doit fonctionner avec une grue en moins. Afin de simuler ce scénario, des ajustements ont dû être apportés au modèle initial du simulateur. La figure 8.2 présente le sous-modèle d'opérations des navires modifié dans le but de simuler le bris d'une grue de quai.

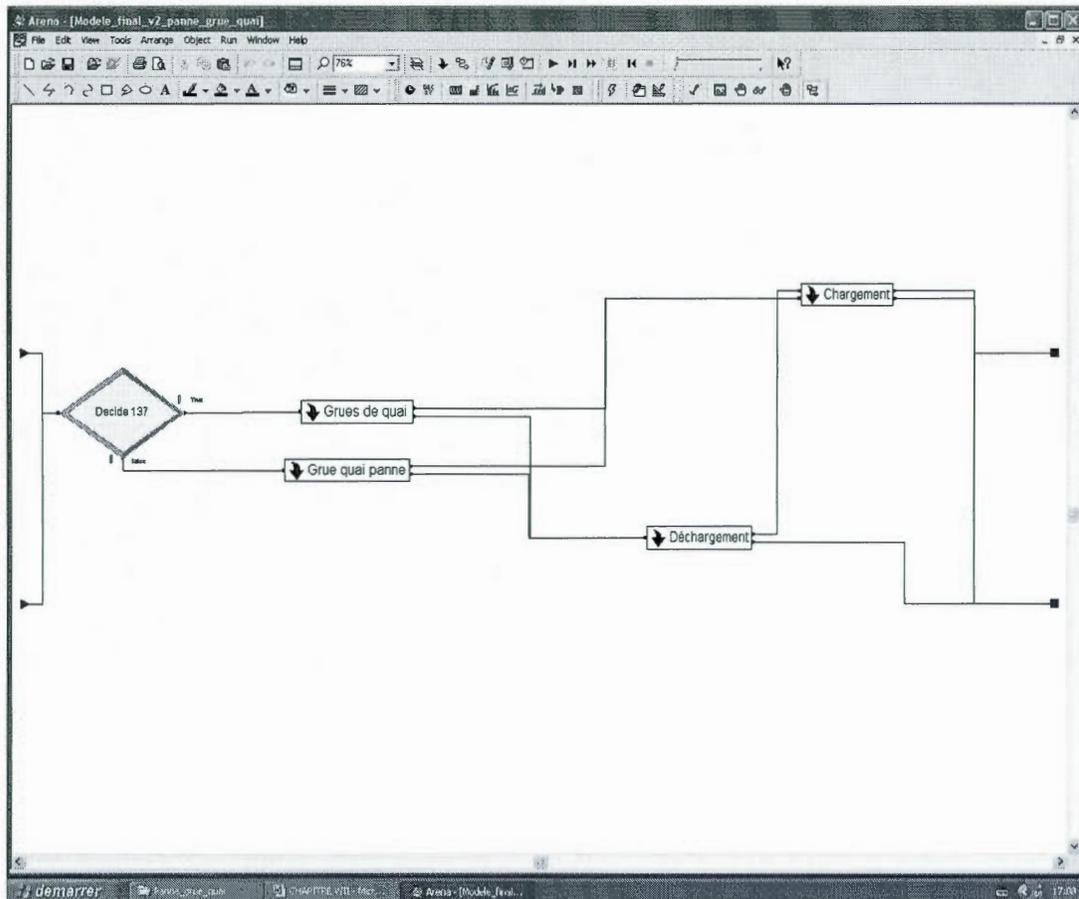


Figure 8.2 Ajustement au sous-modèle d'opérations des navires.

La modification apportée à ce sous-modèle consiste à l'ajout d'un module de décision qui vérifie l'état de la variable nommée «panne grue de quai». Lorsque la valeur de cette est égale à 0, les conteneurs sont dirigés vers le sous-modèle des grues de quai; tandis que lorsque cette variable est égale à 1, les conteneurs sont dirigés vers le sous-modèle identifié de l'étiquette «Grue quai panne», qui représente le comportement de la zone d'opérations portuaires lors d'une panne d'une grue de quai. Ce sous-modèle est illustré sur la figure 8.3.

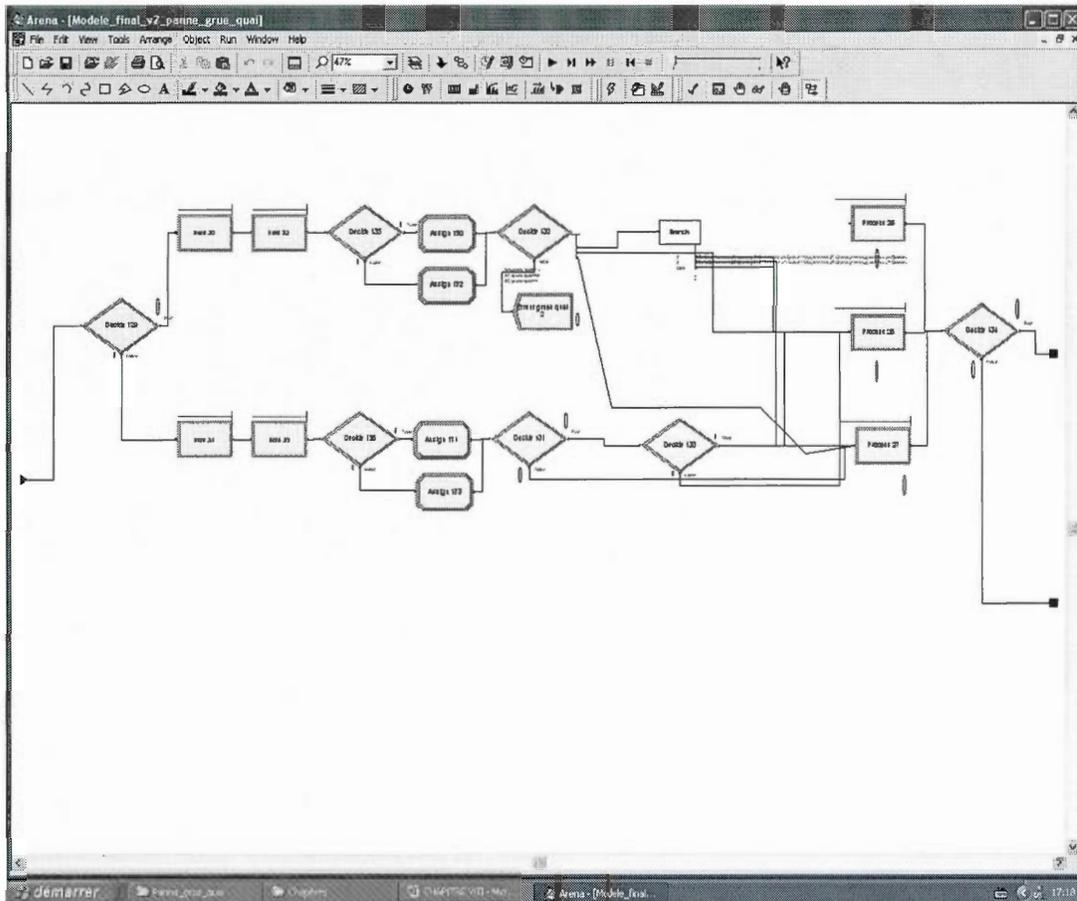


Figure 8.3 Sous-modèle d'opération des grues de quai lorsqu'une grue est en panne.

La principale différence de ce sous-modèle avec le sous-modèle présenté à la figure 6.12 est que les conteneurs ne peuvent être dirigés vers la grue 1, puisque cette dernière est considérée comme inutilisable. La charge de travail est donc répartie sur les deux autres grues.

Afin de simuler une panne d'une grue de quai, la panne doit être générée à un moment de la simulation. C'est pourquoi un sous-modèle supplémentaire a dû être ajouté à l'implantation initiale. Ce sous-modèle, qui est présenté à la figure 8.4, est composé de peu de modules. En effet, le module de création génère une entité de contrôle qui utilise ensuite le module d'assignation pour attribuer la valeur un à la variable «Panne grue de quai». Le module de délai qui suit retient ensuite l'entité pour la durée de la panne et la relâche lorsque cette durée est écoulée. Une fois relâchée, l'entité remet à zéro la valeur de la variable «Panne grue de

quai» à l'aide du module d'assignation et elle est détruite par le module de disposition des qui suit.

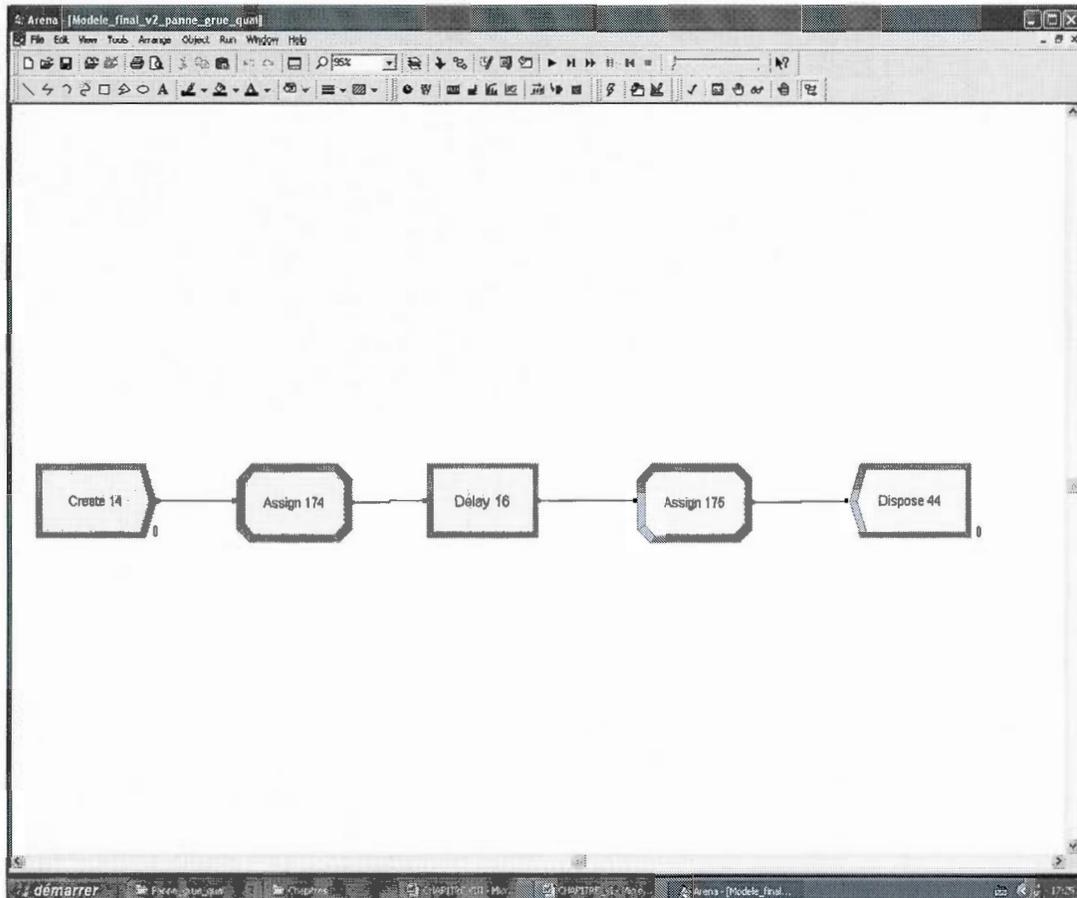


Figure 8.4 Sous-modèle de génération des pannes de grues de quai.

Une fois que ces ajustements ont été effectués sur le simulateur, dix rondes de simulation ont été effectuées pour la période de trois mois couverte par la simulation de référence. Chacune des rondes avait donc une durée de 2304 heures.

8.3.1 Zone d'opérations portuaires

Pour la simulation d'une panne majeure d'une grue de quai, l'horaire original d'arrivée des navires a été utilisé. Ainsi, un total de 25 navires s'est présenté au terminal au cours de chacune des dix rondes de simulation. De ce total, 13 provenaient de la première ligne, tandis

que les 12 navires restants provenaient du second service. Le tableau 8.5 de la page suivante présente les résultats obtenus pour la simulation d'une panne majeure d'une grue de quai. L'observation des résultats permet de constater que les navires 6 et 7 affichent une productivité moyenne plus élevée que lors des rondes de simulation de référence. La période d'arrivée de ces navires correspond à la période de panne de la grue de quai. En effet, le navire 6 s'est présenté au terminal 464 heures après le début de la simulation et navire 7 à la 479^{ème} heure, tandis que la panne de la grue de quai s'est produite 450 heures après le début de la simulation et s'est terminée 168 heures plus tard.

Cette augmentation de la productivité des opérations de transbordement sur les navires s'explique par le fait que la panne se produit sur la plus ancienne des grues, qui s'avère être la moins productive des grues de quai. Donc, les opérations de déchargement et de chargement des conteneurs sur ces navires ont été effectuées avec des grues plus récentes qui permettent d'obtenir des taux de production, en mouvement de conteneurs par heure, plus élevés. En conséquence, la productivité des opérations ne permet pas de mesurer l'impact sur la performance livrée aux clients d'une panne prolongée d'une grue de quai. En effet, la productivité plus élevée des opérations ne permet pas de conclure que le terminal offre un meilleur service à sa clientèle, puisque les données de productivité concernent la productivité moyenne par grue, donc rien n'indique que les navires ont quitté le terminal plus rapidement.

No. navire	Ligne	Temps travail grues quai réel	Temps travail grues quai simulé	Temps travail grues quai avec panne	Productivité réelle	Productivité simulée	Productivité simulée avec panne
1	1	108,2	98,89	99,51	22,48	24,59	24,44
2	2	19,25	17,46	17,47	24,16	26,63	26,63
3	1	87,75	82,63	82,56	23,7	25,17	25,20
4	1	74,3	64,85	64,90	21,9	25,09	25,07
5	2	36,75	31,51	31,73	20,95	24,44	24,27
6	2	31,3	27,81	29,53	23,8	26,79	28,08
7	1	102,95	103,75	86,88	23,05	22,87	27,31
8	2	28	31,83	31,86	28,21	24,42	24,80
9	1	89,3	119,16	119,18	24	17,98	17,98
10	1	72,34	72,83	72,76	25,32	25,16	25,18
11	2	31	26,1	26,14	22,26	26,43	26,40
12	1	103,08	100,79	100,90	24,59	25,15	25,12
13	2	25,5	26,98	26,94	28,31	26,76	26,80
14	1	86,34	88,4	88,32	25,91	25,28	25,31
15	2	30,1	32,89	33,01	25,58	23,41	23,33
16	1	94,5	92,73	92,59	23,93	24,38	24,42
17	2	32,34	28,38	28,35	23,44	26,71	26,74
18	1	91,25	91,79	92,05	24,35	24,21	24,14
19	2	21,8	22,89	22,78	27,98	26,64	26,78
20	1	96,4	109,36	109,41	23,53	20,74	20,73
21	2	33,2	33,99	34,11	24,91	24,4	24,33
22	1	92,5	80,05	80,02	21,32	24,63	24,64
23	2	24,9	25,35	25,51	23,49	23,07	22,93
24	1	80,75	80,52	80,48	24,93	25	25,01
25	2	27,5	29,11	29,23	25,27	23,88	23,78
Productivité moyenne :					23,99	24,57	24,78

Tableau 8.5 Comparaison entre les données réelles, les données obtenues de la simulation des opérations du terminal et les données obtenues de la simulation des opérations du terminal avec une panne majeure d'une grue de quai.

Tel que mentionné au premier chapitre, dû aux coûts élevés d'opération des navires, les terminaux portuaires de conteneurs doivent offrir des séjours à quai de courte durée afin de demeurer compétitif. C'est pourquoi le temps à quai des navires s'avère une mesure plus appropriée pour vérifier l'impact d'une panne sur le service offert aux clients. La figure 8.5 présente les temps à quai moyen des navires de la première ligne pour les rondes qui incluent une panne et les rondes de référence. La figure 8.6 présente les mêmes données pour les navires de la seconde ligne.

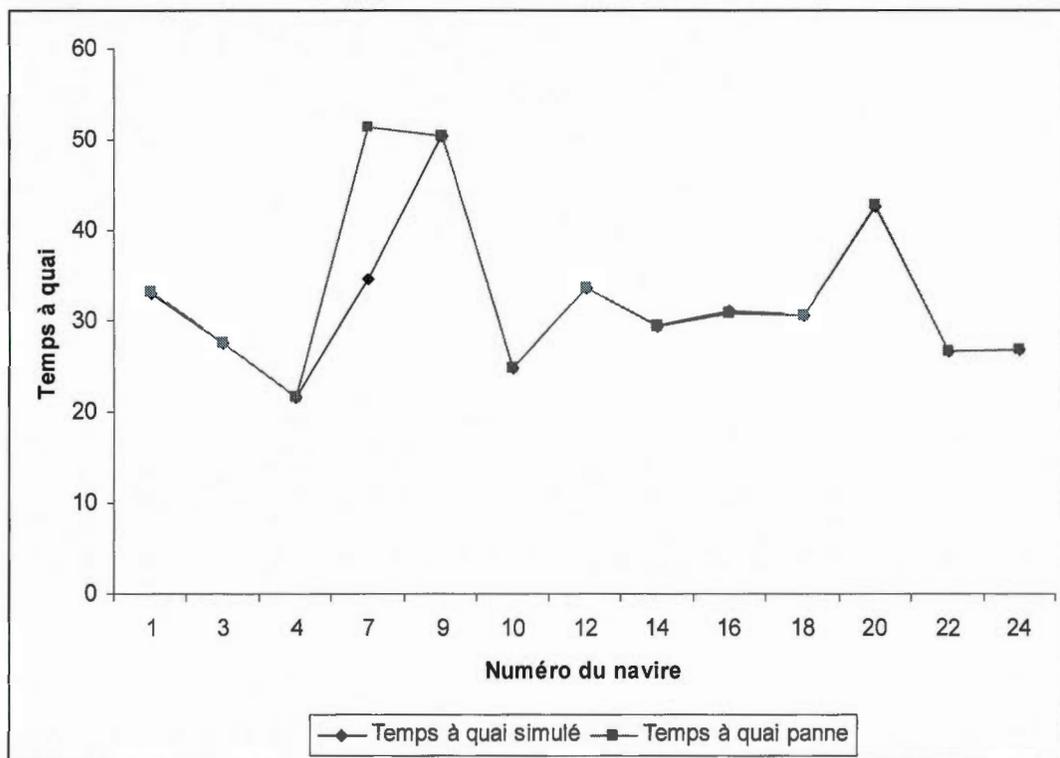


Figure 8.5 Temps à quai des navires de la ligne 1.

Tel qu'il peut être constaté, les résultats obtenus sont sensiblement les mêmes, à l'exception des navires 6 et 7 qui étaient à quai pendant la panne de la grue. Dans le cas du navire 6, ce temps a doublé, passant de 13,90 heures à 26,53 heures, tandis que dans le cas du navire 7, ce temps est passé de 34,59 heures à 51,44 heures. Ainsi, en observant les données on constate que le séjour à quai des navires au cours de la panne a été plus important que dans les rondes de simulation sans panne. Donc, on ne peut pas conclure que la grue 1 devrait être fermée,

puisque, bien qu'elle soit moins productive que les autres grues, elle permet de diminuer le temps à quai des navires.

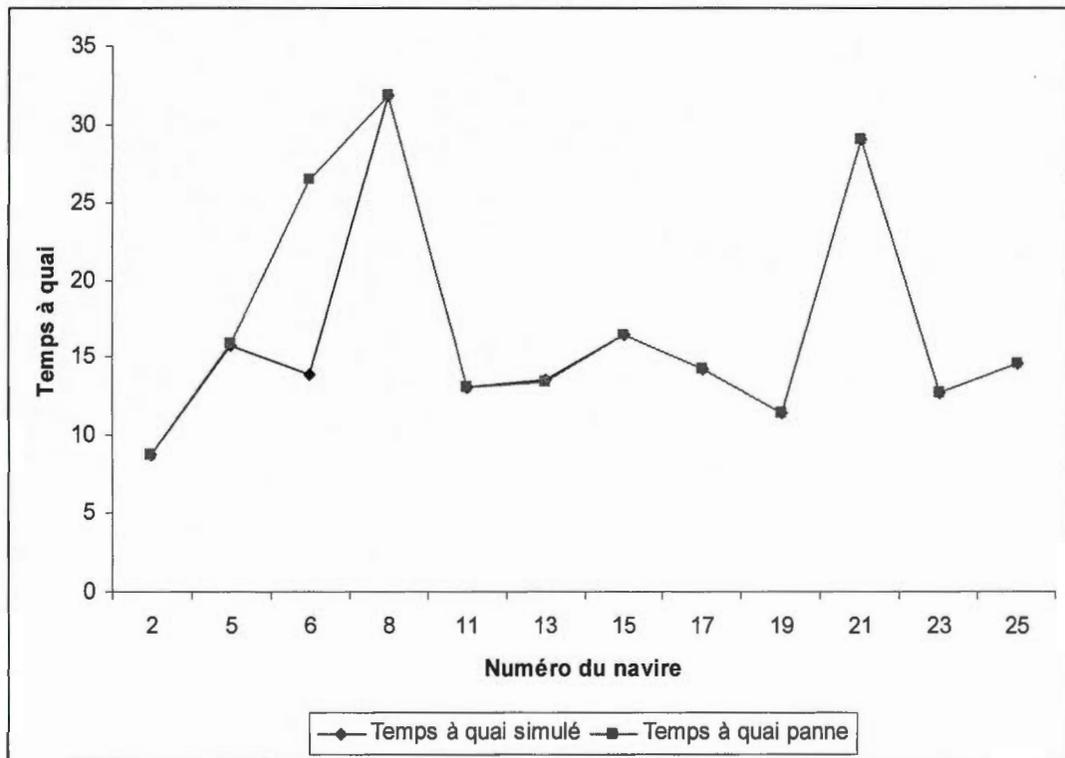


Figure 8.6 Temps à quai des navires de la ligne 2.

8.3.2 Zone d'opérations terrestres

Les grues de quai n'intervenant pas dans les opérations de déchargement et de chargement des trains, une panne prolongée d'une grue de quai ne devrait pas influencer la performance opérationnelle de ces opérations. Évidemment, la performance ne sera affectée, tant qu'il y aura suffisamment de conteneurs dans la cour pour charger les trains. Cette intuition se confirme à l'observation des résultats du temps de traitement moyen des trains. En effet, ceux-ci démontrent une moyenne, une variance et un écart-type similaires aux résultats obtenus pour les rondes de la simulation de référence, tel qu'il peut être observé au tableau 8.6.

	Temps de traitement	Nb. conteneurs à décharger	Nb. conteneurs à charger
Moyenne	8,482898639	113,5739583	109,5489583
Variance	0,604085349	120,4867038	110,9590187
Écart-type	0,777229277	10,97664356	10,53370869

Tableau 8.6 Temps de traitement et plan de chargement moyens des trains pour dix rondes simulation avec panne d'une grue de quai.

8.3.3 Zone de stockage du terminal

Pour la simulation d'une panne majeure d'une grue de quai, l'inventaire moyen de la zone de stockage du terminal a été de 4496 conteneurs, ce qui représente un taux d'occupation moyen de 62,44%. Ce taux est comparable à celui obtenu pour la simulation de référence qui s'élevait à 62,34%. L'inventaire moyen, ainsi que la variance et l'écart-type de cette moyenne se retrouvent au tableau 8.7.

Inventaire moyen du terminal	
Moyenne	4496.006944
Variance	88205.58744
Écart-type	296.9942549

Tableau 8.7 Inventaire moyen de la zone de stockage du terminal.

L'évolution du stock moyen de la zone de stockage du terminal peut, quant à elle, être observée à la figure 8.7, ci-dessous. Lorsque comparée à la simulation de référence, la simulation d'une panne majeure d'une grue de quai entraîne une différence importante dans l'évolution du stock moyen aux alentours de la 20^{ème} journée. Cette augmentation coïncide avec le début de la panne qui s'est produit durant la 18^{ème} journée de la simulation. Cette augmentation peut s'expliquer par une diminution du rythme de chargement des conteneurs sur les navires due à la panne. Ainsi, le rythme d'arrivée des trains et des camions est le même, tandis que le rythme de chargement des navires diminue, ce qui cause une augmentation du stock de conteneurs qui se résorbe par la suite.

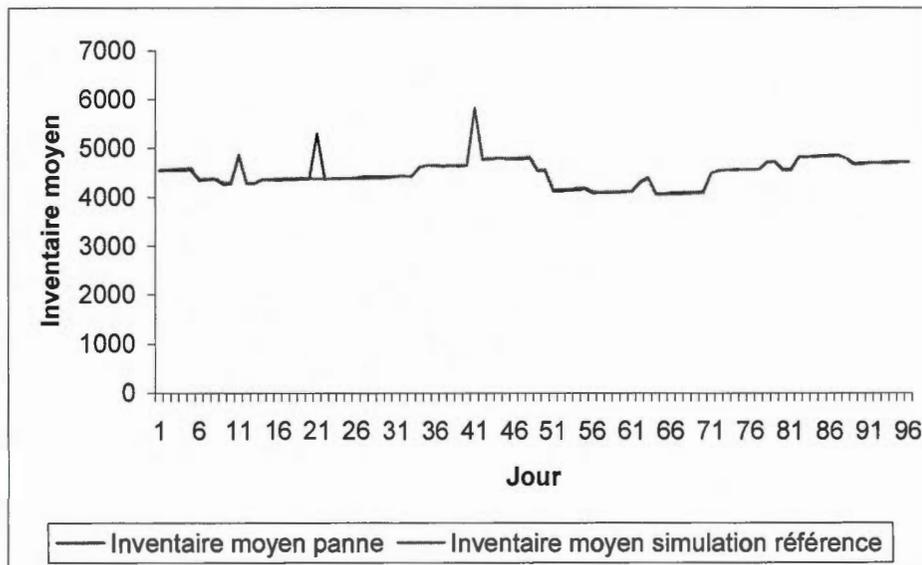


Figure 8.7 Évolution de l'inventaire moyen de la zone de stockage du terminal.

Équipements	Taux d'utilisation simulation avec panne	Taux d'utilisation simulation de référence
Grue 1	0,2214	0,2403
Grue 2	0,2220	0,2129
Grue 3	0,1890	0,1818
Guérite	0,2095	0,2100
Serveur 1	0,1903	0,1908
Serveur 2	0,1899	0,1904
Serveur 3	0,1891	0,1902
Serveur 4	0,1900	0,1901
Serveur 5	0,1889	0,1906
Serveur 6	0,1886	0,1893
Serveur 7	0,1894	0,1898
Serveur 8	0,1895	0,1901
Serveur 9	0,1900	0,1899
Serveur 10	0,1889	0,1895
Serveur 11	0,1896	0,1902
Serveur 12	0,1900	0,1911
Serveur 13	0,1891	0,1907
Serveur 14	0,1904	0,1899
Serveur 15	0,1890	0,1904

Tableau 8.8 Taux d'utilisation des équipements du terminal.

Le tableau 8.8 présente les taux d'utilisation des équipements du terminal pour la simulation de référence et pour le scénario simulant une panne prolongée d'une grue de quai. Le principal constat ressortant de l'observation de ces résultats est que la panne qui a affectée la grue numéro un s'est répercutée sur les deux autres grues de quai, qui ont vu leurs taux d'utilisation augmenter légèrement. De plus, le taux d'utilisation des serveurs a diminué légèrement. Cette situation s'explique par le fait que le taux d'utilisation des serveurs est dépendant du taux d'utilisation des grues de quai. En effet, tel qu'il a été vu au chapitre V,

qui portait sur le design du simulateur, le nombre de serveurs alloué à un navire est déterminé en fonction du nombre de grue de quai qui lui ont été allouées.

8.4 Troisième test : Ajout d'une grue de quai

Les scénarios précédents démontraient la capacité actuelle du terminal à répondre à des événements aléatoires venant modifier les conditions normales du terminal. Par contre, ce troisième test vise à simuler une modification volontaire de ces conditions. Plus précisément, l'objectif de ce scénario est de mesurer l'impact de l'ajout d'une quatrième grue de quai sur les opérations de déchargement et de chargement des navires. Par contre, la simulation de cet ajout a nécessité des modifications à l'implantation générale de la simulation.

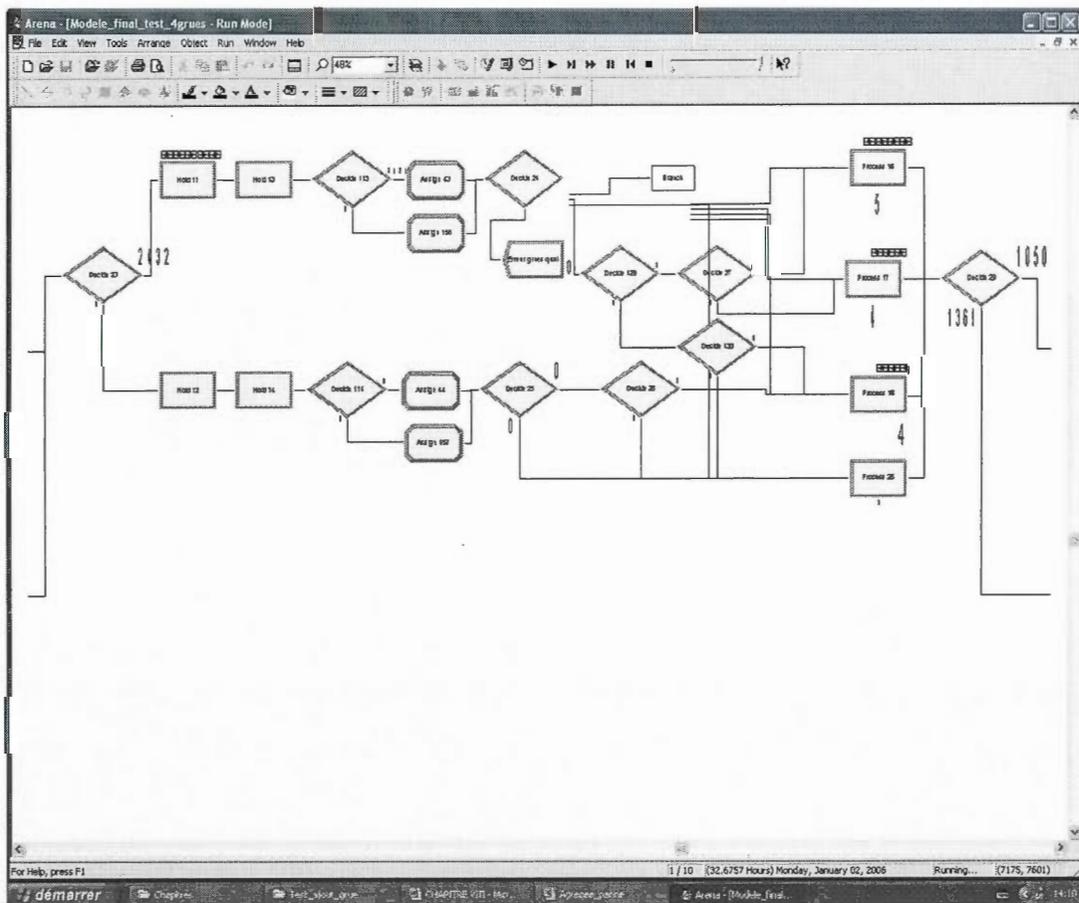


Figure 8.8 Sous-modèle d'opération des grues de quai.

Tout d'abord, la grue supplémentaire a dû être ajoutée au sous-modèle d'opération des grues de quai, tel qu'illustré sur la figure 8.8. De plus, le fichier d'énumération des états possibles du terminal a dû être modifié. En effet, ce fichier, qui est utilisé pour l'allocation des serveurs, a dû être modifié pour tenir compte des nouvelles possibilités d'allocation des serveurs en fonction du nombre de grues de quai allouées aux navires. Ainsi, le fichier est passé de 384 lignes de possibilités d'allocation à 624.

8.4.1 Zone d'opérations portuaires

Au cours de la simulation des opérations du terminal suite à l'ajout d'une grue supplémentaire, un total de 25 navires s'est présenté au terminal. La répartition des navires a été la suivante : 13 navires de la première ligne et 12 navires de la seconde ligne. Les résultats des opérations de déchargement et de chargement de ces navires sont présentés au tableau 8.9. À l'observation du tableau, il peut être constaté que l'ajout d'une grue supplémentaire a fait augmenter la productivité moyenne des opérations. En effet, le nombre moyen de conteneurs manutentionnés pour une grue par heure est passé de 24,57 à 24,83. Cette augmentation peut être attribuable au fait que la nouvelle grue a une capacité de production plus élevée que les grues plus anciennes. En effet, la distribution aléatoire utilisée pour déterminer le temps de traitement des conteneurs par cette nouvelle grue est la même que celle utilisée pour la grue numéro 2. Cette distribution a été choisie puisque cette grue est la dernière qui a été acquise par le terminal (elle est en opération depuis 2 ans). Puisque cette grue est récente, il a été postulé qu'une nouvelle grue aurait une capacité similaire à cette grue.

En ce qui concerne le nombre d'heures travaillées par les grues de quai, les résultats démontrent des variations similaires. En effet, les heures travaillées ont diminuées légèrement suite à l'ajout d'une grue de quai supplémentaire. La cause de cette diminution est la même que dans le cas de la productivité des grues de quai, soit le fait que la nouvelle grue a une capacité d'opération supérieure aux grues plus anciennes.

No. navire	Ligne	Temps travail grues quai réel	Temps travail grues quai simulé	Temps travail grues quai avec grue supplémentaire	Productivité réelle	Productivité simulée	Productivité simulée avec grue supplémentaire
1	1	108,2	98,89	98,89	22,48	24,59	24,59
2	2	19,25	17,46	17,32	24,16	26,63	26,85
3	1	87,75	82,63	82,51	23,70	25,17	25,21
4	1	74,30	64,85	64,80	21,90	25,09	25,11
5	2	36,75	31,51	31,25	20,95	24,44	24,64
6	2	31,30	27,81	27,56	23,80	26,79	27,03
7	1	102,95	103,75	103,76	23,05	22,87	22,87
8	2	28,00	31,83	30,04	28,21	24,42	18,42
9	1	89,30	119,16	116,32	24,00	17,98	26,03
10	1	72,34	72,83	72,97	25,32	25,16	25,11
11	2	31,00	26,10	25,63	22,26	26,43	26,92
12	1	103,08	100,79	100,91	24,59	25,15	25,12
13	2	25,50	26,98	26,74	28,31	26,76	27,00
14	1	86,34	88,4	88,32	25,91	25,28	25,31
15	2	30,10	32,89	32,69	25,58	23,41	23,55
16	1	94,50	92,73	92,62	23,93	24,38	24,41
17	2	32,34	28,38	28,05	23,44	26,71	27,02
18	1	91,25	91,79	92,02	24,35	24,21	24,15
19	2	21,80	22,89	22,52	27,98	26,64	27,09
20	1	96,40	109,36	117,00	23,53	20,74	19,38
21	2	33,20	33,99	29,68	24,91	24,40	27,87
22	1	92,50	80,05	80,00	21,32	24,63	24,65
23	2	24,90	25,35	25,33	23,49	23,07	23,10
24	1	80,75	80,52	80,42	24,93	25,00	25,03
25	2	27,50	29,11	28,90	25,27	23,88	24,05
Productivité moyenne :					23,99	24,57	24,83

Tableau 8.9 Comparaison entre les données réelles, les données obtenues de la simulation des opérations du terminal et les données obtenues de la simulation des opérations du terminal avec l'ajout d'une grue de quai supplémentaire.

À l'instar du test précédent, qui simulait une panne majeure d'une grue de quai, l'impact le plus important de l'ajout d'une grue de quai supplémentaire devrait se faire ressentir sur le temps à quai des navires. En effet, l'ajout de cette grue supplémentaire permet d'assurer un minimum de deux grues de quai par navires lorsque deux navires sont présents au terminal au même moment. Les résultats des temps à quai des navires sont présentés sous forme graphique aux figures 8.9 et 8.10.

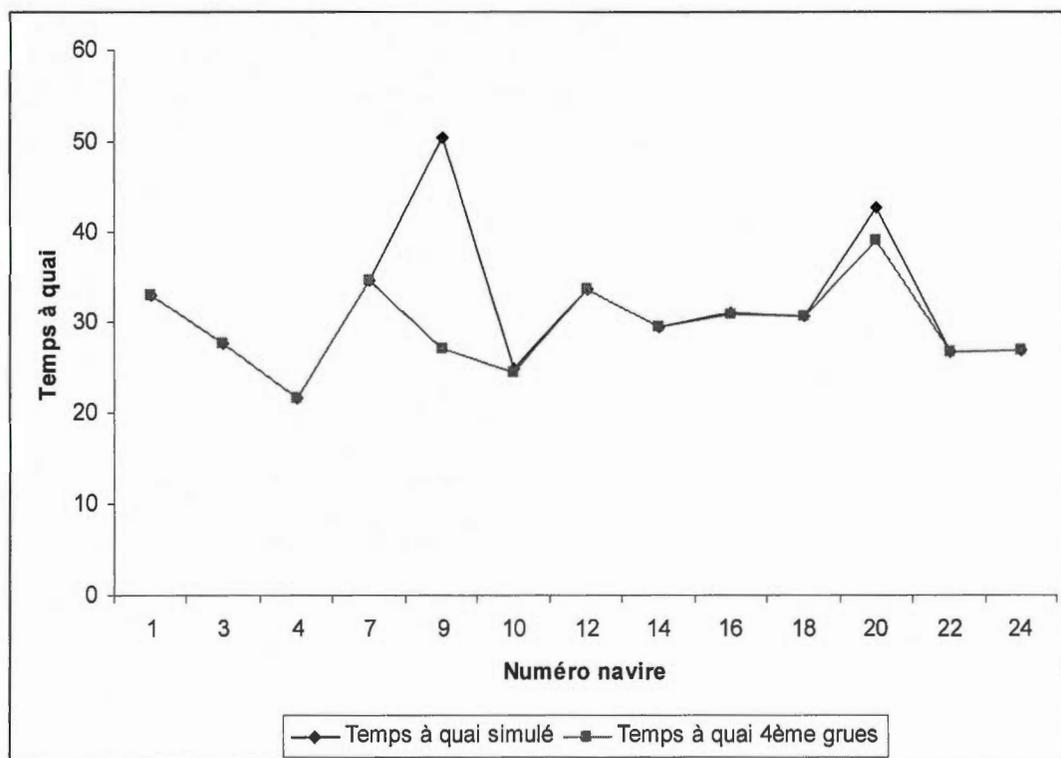


Figure 8.9 Temps à quai des navires de la ligne 1.

La principale différence avec les résultats de la simulation de référence est que les temps à quai lorsque deux navires sont au terminal simultanément diminuent. En effet, les navires 8 et 9, qui arrivent respectivement 704 et 720 heures après le début de la simulation, ainsi que les navires 20 et 21, qui arrivent 1680 et 1704 heures après le début de la simulation, présentent des temps à quai plus faible. Dans le premier cas, le navire 8 a diminué son séjour de 4,81 heures, passant de 31,83 heures à 27,02 heures, tandis que le navire 9 a diminué son séjour de

11,62 heures, passant de 50,39 heures à 38,77 heures. Dans le second cas, le navire 20 a vu son séjour être écourté à 39,00 heures, par rapport à une période de 42,68 heures pour la simulation de référence et le navire 21 a diminué son temps à quai de 6,15 heures, celui-ci étant passé de 28,99 heures à 22,84 heures. Le temps à quai des autres navires a varié peu, puisque le nombre de grue de quai à avoir travaillé sur ceux-ci est demeuré stable. En effet, malgré l'ajout de la grue supplémentaire, le nombre maximal de grues pouvant travailler sur les navires de la première ligne est toujours de trois, tandis que ce nombre est de deux pour les navires de la seconde ligne.

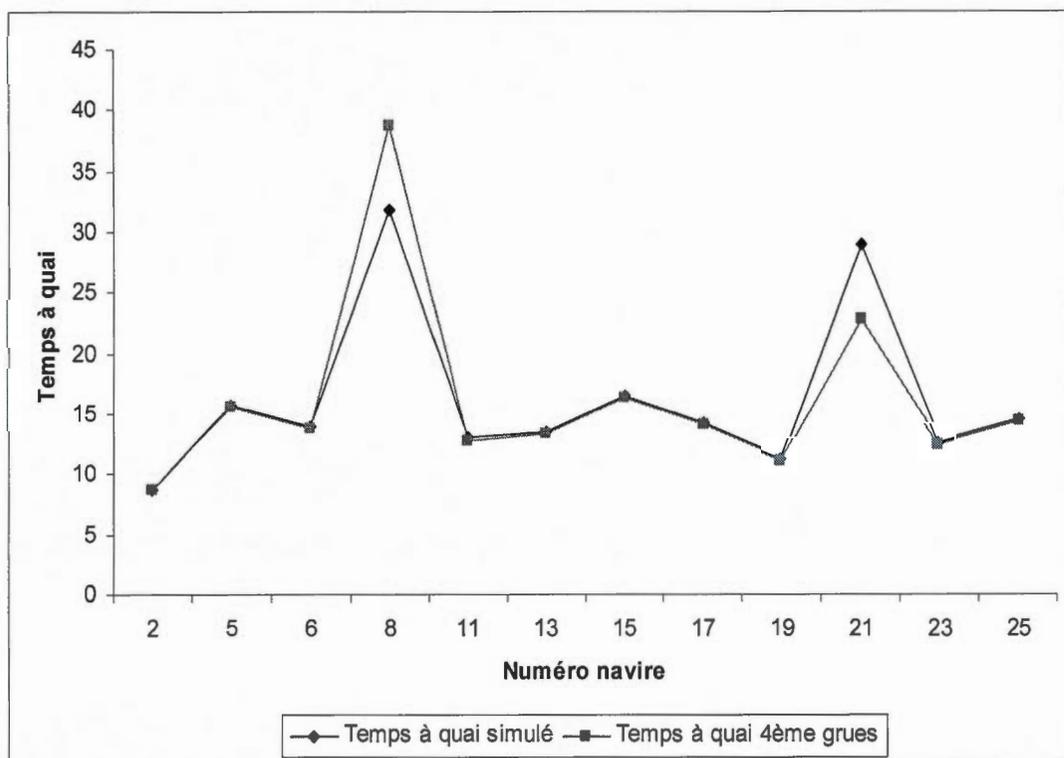


Figure 8.10 Temps à quai des navires de la ligne 2.

8.4.2 Zone d'opérations terrestres

L'ajout d'une grue de quai supplémentaire n'a aucun impact sur les arrivées de camions au terminal. En effet, la moyenne des rondes de simulation en ce qui concerne le nombre moyen de camions se présentant au terminal à chaque jour est de 143,58. Cette moyenne affiche une variance de 39,07 et un écart-type de 6,25. Ces données pour la simulation de référence

étaient respectivement de 143,84 pour la moyenne, 9,14 pour la variance et 3,02 pour l'écart-type.

Le temps d'attente moyen des camions pour un serveur a par contre augmenté. En effet, ce temps est passé de 0,3980 heures, ce qui représente 23,88 minutes, à 0,4003 heures, ce qui représente 24,018 heures. Bien que cette variation ne soit pas très importante, elle peut être expliquée par le nombre plus importants de serveurs qui sont affectés aux opérations sur les navires. En effet, si les quatre grues de quai travaillent simultanément, un nombre plus important de serveurs sera nécessaire pour traiter les conteneurs provenant ou à destination des grues de quai.

Pour ce qui est des trains, le tableau 8.10 présente les résultats moyens obtenus des dix rondes de simulation des opérations du terminal avec l'ajout d'une grue de quai supplémentaire. L'observation du tableau permet de constater que l'ajout d'une grue de quai supplémentaire n'a pas d'impact sur les opérations de déchargement et de chargement des trains. En effet, les résultats obtenus pour ces rondes de simulation sont pratiquement les mêmes que les résultats obtenus pour la simulation de référence qui sont présentés au tableau 7.15 du chapitre précédent.

	Temps de traitement	Nb. conteneurs à décharger	Nb. conteneurs à charger
Moyenne	8,470384994	113,7922756	109,6899791
Variance	0,594377647	110,8773906	106,5317908
Écart-type	0,770958914	10,52983336	10,32142387

Tableau 8.10 Temps de traitement et plan de chargement moyens des trains pour dix rondes simulation avec une grue de quai supplémentaire.

L'implantation de la politique d'allocation des serveurs présentée à la section 6.4.5 explique le fait que le temps d'attente des camions pour un serveur ait varié mais que le temps de traitement des trains n'ait pas varié. En effet, selon cette politique, l'allocation des serveurs aux trains est prioritaire à l'allocation des serveurs aux camions. Dans l'éventualité où le nombre de serveurs nécessaire est plus important que le nombre de serveurs disponible, les

camions sont traités en derniers, lorsque les opérations sur autres modes de transport sont complétées.

8.4.3 Zone de stockage du terminal

La zone de stockage du terminal a démontré un taux d'occupation moyen de 62,70% pour les dix rondes de simulation de ce scénario. Cette moyenne est inférieure au taux d'utilisation estimé par les dirigeants du terminal (70%), mais elle est similaire au résultat obtenu pour la simulation de référence, qui affichait un taux d'utilisation de la zone de stockage du terminal de 62,34%. En conséquence, les données présentées au tableau 8.10 sont similaires aux résultats présentés au tableau 7.16 du chapitre précédent. Ces tableaux présentent l'inventaire moyen du terminal ainsi que la variance et l'écart-type associés à celui-ci.

Inventaire moyen du terminal	
Moyenne	4514,310417
Variance	84078,44577
Écart-type	289,9628352

Tableau 8.11 Inventaire moyen de la zone de stockage du terminal.

La figure 8.11, ci-dessous, présente sous forme graphique l'évolution, au cours de la simulation, de l'inventaire moyen de la zone de stockage du terminal pour la simulation de référence et la simulation incluant la grue de quai supplémentaire. Tel qu'il peut être constaté, ces données confirment la similarité des résultats obtenus pour les deux tests effectués sur le simulateur.

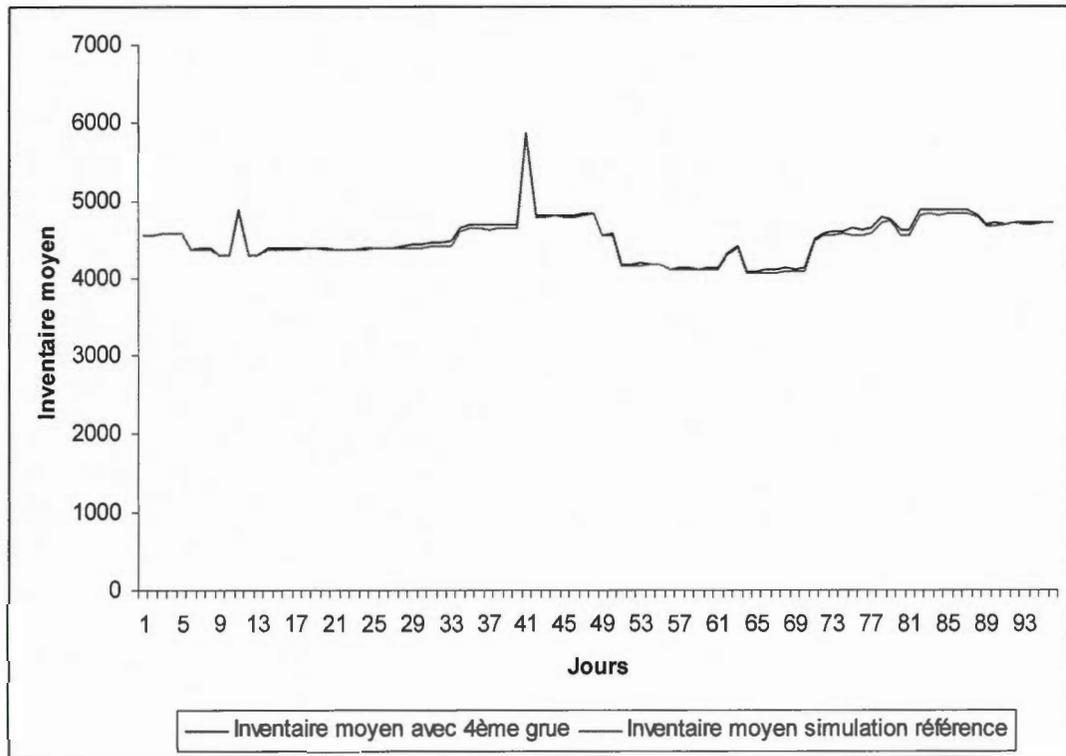


Figure 8.11 Évolution de l'inventaire moyen de la zone de stockage du terminal.

Équipements	Taux d'utilisation simulation avec grue supplémentaire	Taux d'utilisation simulation de référence
Grue 1	0,0862	0,2403
Grue 2	0,1473	0,2129
Grue 3	0,2074	0,1818
Grue 4	0,1672	
Guérite	0,2099	0,2100
Serveur 1	0,1906	0,1908
Serveur 2	0,1897	0,1904
Serveur 3	0,1895	0,1902
Serveur 4	0,1899	0,1901
Serveur 5	0,1898	0,1906
Serveur 6	0,1898	0,1893
Serveur 7	0,1896	0,1898
Serveur 8	0,1904	0,1901
Serveur 9	0,1900	0,1899
Serveur 10	0,1899	0,1895
Serveur 11	0,1895	0,1902
Serveur 12	0,1893	0,1911
Serveur 13	0,1887	0,1907
Serveur 14	0,1897	0,1899
Serveur 15	0,1898	0,1904

Tableau 8.12 Taux d'utilisation des équipements du terminal.

Au niveau de l'utilisation des équipements du terminal, le principal constat qui ressort de la comparaison des résultats pour la simulation de référence et du test actuel est que l'ajout d'une grue de quai supplémentaire permet de diminuer le taux d'utilisation des autres grues. En effet, les grues numéro 1 et 2 ont diminué leur taux d'utilisation de 64,13% dans le

premier cas et de 30,81% dans le second cas. Par contre, la grue numéro 2 a vu son taux d'utilisation passer de 0,1818 à 0,2074 pour une augmentation de 14,08%. La nouvelle grue, quant à elle, a affiché un taux d'utilisation de 0,1672, ce qui a permis de réduire la charge de travail des grues numéro 1 et 2. Pour ce qui est des serveurs, ceux-ci ont démontré des taux d'utilisation similaires aux taux obtenus pour la simulation de référence.

8.5 Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif de démontrer des exemples d'analyses qui peuvent être effectuées à l'aide du simulateur développé dans les chapitres précédents. Pour ce faire, trois tests ont été effectués sur le simulateur. Un premier test simulait l'arrivée simultanée de plusieurs navires au terminal, un autre simulait une panne majeure d'une grue de quai, tandis que le dernier simulait l'ajout d'une grue de quai supplémentaire au terminal.

Tel qu'il a été vu au cours du chapitre, le simulateur permet de mesurer l'impact de ces variations des conditions d'opération du terminal sur la performance de celui-ci. Ainsi, il peut être conclu que la simulation peut être appliquée aux terminaux de la côte Est canadienne. Par contre, afin de pleinement réaliser l'objectif de développer un outil d'analyse pour mesurer l'impact qu'aurait l'introduction de systèmes de transport intelligent dans les terminaux de la côte Est canadienne, des améliorations doivent être apportées au simulateur. En effet, tel qu'il a été vu dans ce chapitre et dans les chapitres précédents, le simulateur est limité par certaines hypothèses qui ont dû être posées afin de surmonter un manque de données réelles. Les principales améliorations à apporter au simulateur se situent au niveau de la simulation des opérations de la zone d'opérations terrestre du terminal.

C'est pourquoi les résultats des tests présentés dans ce chapitre doivent être interprétés avec précaution. En effet, les résultats concernant la productivité des opérations de déchargement et de chargement des navires, ainsi que le temps à quai des navires, peuvent être interprétés avec confiance, puisque ces résultats sont moins affectés que les autres par les postulats posés pour simuler les opérations de la zone d'opérations terrestre du terminal.

La conclusion qui suit ce chapitre présentera avec un détail plus important les améliorations qui pourraient être effectuées sur le simulateur afin de l'améliorer et de permettre de tester avec confiance l'impact que pourrait avoir, sur un terminal portuaire de conteneurs de la côte Est canadienne, l'introduction de systèmes de transport intelligents.

[Cette page a été laissée intentionnellement blanche]

CONCLUSION

Les objectifs de ce mémoire sont multiples, mais convergent vers tous vers un objectif global commun, soit de dresser un portrait de la logistique des terminaux portuaires de conteneurs au Canada, mais plus particulièrement le portrait de son état d'avancement quant à l'utilisation de systèmes de transport intelligents.

Dans un premier temps, les terminaux portuaires de conteneurs ainsi que leur rôle au sein des réseaux de transport maritime ont été situés dans la perspective plus large du transport intermodale. Au cours de ce processus, les opérations de ces terminaux aussi bien que les divers intervenants et parties prenantes concernés par ces opérations ont été présentés. Ensuite, la revue de la littérature, concernant les problèmes de planification et de gestion des terminaux portuaires de conteneurs, a permis de relever la quantité importante de problématique avec lesquelles les administrateurs de terminaux doivent composer. De plus, divers outils pour traiter ces problèmes ont été présentés dans le cadre de cette revue.

Dans le but d'approfondir la compréhension du fonctionnement de ces terminaux, une étude des processus opérationnels et des flux d'information en amont et en aval de ceux-ci a été réalisée à partir d'observations et de discussions avec les dirigeants des principaux ports qui manutentionnent des conteneurs sur la côte Est du Canada. Ces observations et discussions ont servis de base à la suite des travaux effectués, qui procèdent à une analyse comparative de l'utilisation des systèmes de transport intelligent entre ces ports et les ports du reste du monde.

La constatation de la complexité inhérente à la gestion des terminaux portuaires de conteneurs a été le moteur de cette analyse. En effet, ce mémoire se voulait constructif dans son approche en allant au-delà de l'identification des problématiques et en proposant des pistes de solution à celles-ci. C'est dans cette approche que les systèmes de transport intelligents ont été identifiés comme une piste de solution pour le traitement des problématiques de planification et de gestion des terminaux portuaires de conteneurs.

De l'analyse comparative, il a pu être conclu que les ports de la côte Est canadienne, à l'image des ports du reste de l'Amérique du Nord, ont un faible niveau d'intégration des systèmes de transport intelligents dans le cadre de leurs opérations de manutention de conteneurs. Par contre, une combinaison de facteurs géographique et conjoncturels (une saturation des ports de la côte Ouest) place les ports de la côte Est canadienne dans une situation favorable pour saisir des opportunités importantes de développement de marché. Afin de saisir ces opportunités de marché, les ports de la côte Est canadienne doivent être en mesure d'offrir des temps de cycle portuaires (déchargement et chargement du navire) rapide. C'est à ce niveau, et en facilitant la coordination des activités de la chaîne d'approvisionnement, que les systèmes de transport intelligent peuvent jouer un rôle primordial.

Par contre, afin d'évaluer la pertinence et de choisir parmi les nombreuses possibilités d'implantation de système de transport intelligents, les terminaux portuaires de conteneurs ont besoin d'un outil d'analyse. La deuxième partie du mémoire s'est penchée sur le développement d'un tel outil, par le développement d'une première version d'une simulation des opérations d'un terminal maritime de conteneurs.

Tout d'abord, un design du simulateur a été développé à partir des diagrammes des différents processus d'un terminal portuaire de conteneurs. Ces diagrammes constituaient une représentation logique des opérations de ces terminaux. À partir de ces diagrammes, le simulateur a été développé à l'aide de la version 8.1 du logiciel de simulation *ARENA*.

À partir de cette implantation de la simulation, des tests ont été effectués afin de calibrer et de valider la simulation. Cette phase de validation a permis de relever certaines limites du simulateur qui proviennent d'hypothèses qui ont été posées afin de surmonter un manque de données réelles sur les opérations du terminal.

Finalement, des tests ont été effectués sur le simulateur afin de démontrer le type d'analyses qui peuvent être effectuées à partir d'un outil de la sorte. Par contre, l'analyse des résultats de

ces tests s'est faite en tenant compte des limites du simulateur identifiées lors de la phase de calibration et de validation.

Tel que mentionné auparavant, certaines limites ont été rencontrés au cours du développement du simulateur. En effet, le manque de données réelles sur les opérations de la zone d'opération terrestre du terminal limite la portée des analyses qui peuvent être effectuées sur ces opérations. Par contre, des façons de surmonter ces limites ont été présentées au moment où celles-ci ont été identifiées.

L'implantation de ces solutions constitue une piste de développement futur d'une simulation des opérations d'un terminal portuaire de la côte Est canadienne. Par contre, ces solutions nécessitent d'obtenir des données réelles supplémentaires. De plus, l'utilisation d'un échantillon de données couvrant une plus grande période d'opération permettrait de raffiner la simulation. Dans sa version actuelle, le simulateur développé utilise des données provenant d'une période d'opération de trois mois. Des données pour une période d'un an ou plus permettraient de faire apparaître les effets de saisonnalité qui peuvent se produire. En effet, les données utilisées couvrent les mois de juin, juillet et août. Ces trois mois sont des mois où la météo ne constitue pas un facteur influençant le contexte opérationnel des terminaux. Par contre, il est légitime de se demander si l'hiver peut constituer un facteur d'influence sur la productivité des opérations et sur l'horaire des navires.

Une autre avenue de recherche concernant la simulation consisterait à préciser la perspective du simulateur. En effet, dans sa version actuelle le simulateur simule les opérations d'un terminal à un niveau macro. Une simulation à un niveau plus précis nécessiterait de simuler les véhicules de transport interne, ainsi que la capacité et la localisation des différentes piles de conteneurs de la zone de stockage du terminal, afin de mesurer la congestion entraînée par les différentes stratégies opérationnelles utilisées.

En ce qui a trait à l'utilisation des systèmes de transport intelligents par les terminaux portuaires de conteneurs, l'analyse effectuée dans ce mémoire constituait une première analyse afin de situer généralement les terminaux canadiens par rapport aux terminaux du

reste du monde. Une avenue de recherche, dans ce cas, consisterait à élargir l'étendue de cette recherche, en visitant un nombre plus importants de terminaux et en effectuant un recensement plus complet des différents systèmes de transport intelligents existants et en phase de développement, qui sont ou qui pourraient être appliqués aux terminaux portuaires de conteneurs. De plus, une étude des différents facteurs favorisant l'adoption de ces technologies par les terminaux permettrait d'offrir aux terminaux portuaires de conteneurs du Canada des conditions idéales pour une implantation à plus grande échelle des systèmes de transport intelligents et la saisie des opportunités offertes par ceux-ci.

BIBLIOGRAPHIE

Alessandri A, Sacone S, Siri S (2004) *Receding-horizon optimal control for container transfer in intermodal terminals*. Proceedings of the 5th Triennial Symposium on Transportation Analysis, Guadeloupe, 2004.

Arjen Van Klink H, Van Den Berg GC (1998) *Gateways and Intermodalism*. Journal of Transport Geography, vol. 6, no.1, p. 1 – 9.

Bebenek (2006) *EDIPORT Vehicles Access Management System: Managing Truck Queues and Service Times at the Port of Halifax*, Conférence et Réunion Générale Annuelles de la Société des Systèmes de Transport Intelligents du Canada, Whistler, Canada, 4-6 juin 2006.

Benamar MF (1995) *Transport terrestre multimodal de conteneurs maritimes : modèle de tournées simultanées des conteneurs et des véhicules*. Thèse de doctorat, Paris, École Centrale de Paris, 134 pages.

Bickel D (2006) *Using ITS in Canada's Flagship Port*. Conférence et Réunion Générale Annuelles de la Société des Systèmes de Transport Intelligents du Canada, Whistler, Canada, 4-6 juin 2006.

Bish E, Leong T-Y, Li C-L, Ng J, Simchi-Levi D (2001) *Analysis of a New Vehicle Scheduling and Location Problem*. Naval Research Logistics, vol. 48, p. 363 – 385.

Böse J, Reiners T, Steenekn D, Voss S (2000) *Vehicle Dispatching at Seaport Container Terminal Using Evolutionary Algorithms*. Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, 2000.

Bozzo R, Derito A, Nurchi R, Ackroyd N (2001) *MOCONT: a new system for container terminal monitoring and control*. Proceedings of the Intelligent Transportation System Conference, Oakland, USA, August 2001.

Chen T, (1999) *Yard operations in the container terminal – a study in the unproductive moves*. Maritime Policy Management, vol. 26, no.1, p. 27-38.

Crainic TG (2000) *Network Design in Freight Transportation*. European Journal of Operational Research, vol. 122, no. 2, p. 272 – 288.

Crainic TG (2006) *Planning Models for Transportation in the Electronic Age*. Congrès conjoint de la Société Canadienne de Recherche Opérationnelle (SCRO) et des Journées de l'Optimisation, Montréal, Canada, 8-10 mai 2006.

- Crainic TG, Gendreau M (2004) *Intelligent Freight Transportation Systems : Assessment and the Contribution of Operational Research*. Publication: Centre de recherche sur les transport, à venir: Transportation Research part C: Emerging Technologies
- Crainic TG, Kim KH (2005) *Intermodal transportation*. In *Transportation, Handbooks in Operations Research and Management Science*. Sous la direction de Barnhart C et Laporte G, North-Holland, Amsterdam, à paraître.
- Daganzo CF (1989) *Crane Productivity and Ship Delay in Ports*. Transportation Research Board 1251, p. 1 – 9.
- Duinkerken M, Evers J, Ottjes J (2001) *A simulation model for integrating quay transport and stacking policies on automated container terminal*. Proceedings of the 15th European Simulation Multiconference.
- Duinkerken M, Evers J, Ottjes J (2002) *Improving quay transport on automated container terminals*. Technical report, Proceedings of the IASTED International Conference of Applied Simulation and Modelling.
- Dürr E, Giannopoulos GA (2003) *SITS: a system for uniform intermodal freight transport information exchange*. International Journal of Transport Management, vol. 1, p. 175 – 186.
- Evers J, Koppers S (1996) *Automated guided vehicle traffic control at a container terminal*. Transportation Research A, vol. 30, no.1, p. 21 – 34.
- Fratat TJ, Goodman AS, Brant Jr. AE (1960) *Prediction of Maximum Practical Berth Occupancy*. Journal of the Waterways and Harbors Division, vol. 86, p. 69 – 78.
- Gambardella LM, Rizzoli AE, Zaffalon M (1998) *Simulation and planning of an intermodal container terminal*. Simulation, vol. 71, no. 2, p. 107 – 116.
- Garstone S (1995) *Electronic data interchange (EDI) in port operations*. Logistics Information Management, vol. 8, no. 2, p. 30 – 33.
- Giannopoulos GA (2004) *The application of information and communication technologies in transport*. European Journal of Operational Research, vol. 152, p.302 – 320.
- Günther HO, Kim KH (2005) *Container Terminals and Automated Transport Systems*. Springer-Verlag, Berlin, 374 p.
- Grunow M, Günther HO, Lehmann M (2004) *Dispatching multi-load AGVs in highly automated seaport container terminal*. OR Spectrum, vol. 26, p. 211 – 235
- Guan Y, Cheung RK (2005) *The berth allocation problem: models and solution method*. In *Container Terminals and Automated Transport Systems*. Sous la direction de Günther HO et Kim KH, p. 141 – 158, Springer-Verlag, Berlin.

Haefner LE, Bieschke M (1998) *ITS Opportunity in Port Operations*. Proceedings of the 1998 Transportation Conference.

Halifax Port Authority (2006) *Port of Halifax sets new TEU record*. Communiqué disponible à l'adresse : <http://www.portofhalifax.ca> Dernière vérification de l'adresse : 13 avril 2006.

Heneseý L, Törnquist J (2004) *Enemy et the gates: Introduction of Multi-Agents in a Terminal Information Community*. Proceedings of Ports and Marinas, Rhodos, Greece.

Ioannou PA, Kosmatopoulos EB, Jula H, Collinge A, Liu CI, Asef-Vasiri A, Dougherty E (2000) *Cargo Handling Technology*. Technical Report, Center for Commercial Deployment of Transportation Technology.

Kelton, W.D., Sadowski, R.P., and Sturrock, D., (2004) *Simulation with ARENA*, 3ème édition, McGraw-Hill, 668 p.

Kia M, Shayan E, Ghotb F (2000) *The importance of information technology in port terminal operation*. International Journal of Physical Distribution and Logistics Management, vol. 30, no. 3/4, p. 331 – 344.

Kia M, Shayan E, Ghotb F (2002) *Investigation of port capacity under a new approach by computer simulation*. Computers & Industrial Engineering, vol. 42, p. 533 – 540.

Kim KH (1997) *Evaluation of the number of rehandles in container yards*. Computers and industrial engineering 32, no. 4, p. 701 – 711.

Kim KH, Bae JW (1998) *Re-marshalling export containers in port container terminals*. Computers and Industrial Engineering, vol. 35, no. 3-4, p. 655 – 658.

Kim KH, Kang JS, Ryu R (2004) *A beam search algorithm for the load sequencing of outbound containers in port container terminals*. OR Spectrum, vol. 26, no. 1, p. 93 – 116.

Kim KH, Kim HB (1998) *The optimal determination of the space requirement and the number of transfer cranes for import containers*. Computers and Industrial Engineering, vol. 35, no. 3/4, p. 427 – 430.

Kim KH, Kim KY (1999) *An Optimal Routing Algorithm for a Transfer Crane in Port Container Terminals*. Transportation Science, vol. 33, no. 1, p. 17 – 33.

Kim KY, Kim KH (2003) *Heuristic Algorithms for Routing Yard-Side Equipment for Minimizing Loading Times in Container Terminals*. Naval Research Logistics, vol. 50, no. 5, p. 498 – 514.

Kim KH, Park YM (2004) *A crane scheduling method for port container terminals*. European Journal of Operational Research, vol. 156, p. 752 – 768.

Leach P (2005) *PONL's White urges better terminal productivity*. The Journal of Commerce Online. May 2 2005. Disponible sur: <http://www.joc.com/cgi-bin/Printable.asp> Dernière vérification de l'adresse : 13 avril 2006.

Lee-Partridge J, Teo T, Lim V (2000) *Information technology management : the case of the Port of Singapore Authority*. Journal of Strategic Information System, vol. 9, p. 85 – 99.

Lim JK, Kim KH, Yoshimoto K, Lee JH, Takahashi T (2003) *A dispatching method for automated guided vehicles by using a bidding concept*. OR Spectrum, vol. 25, issue 1, p. 25 – 44.

Linn R, Liu J-Y, Wan Y-W, Zhang C, Murty KG (2003) *Rubber tired gantry crane deployment for container yard operation*. Computers and industrial engineering, vol. 45, p. 429 – 442.

Liu CI, Jula H, Ioannou PA (2002) *Design, Simulation, and Evaluation of Automated Container Terminals*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 3, no. 1, p. 12 – 26.

Liu CI, Jula H, Vukadinovic K, Ioannou PA (2000) *Comparing Different Technologies for Container Movement in Marine Container Terminals*. Proceedings of the 2000 Intelligent Transportation Systems Conference.

Meersmans P, Dekker M (2001) *Operations Research supports container handling*. Rapport Technique EI 2001-22, Erasmus University Rotterdam, Econometric Institute. Disponible sur: <http://www2.eur.nl/WebDOC/doc/econometrie/feweco20011102151222.pdf> dernière vérification de l'adresse: 13 avril 2006.

Miller AJ (1971) *Queuing at Single-Berth Terminal*. Journal of Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, vol. 97, p. 43 – 56.

Ministère des transports du Canada (2005) *Government of Canada Announces Pacific Gateway Strategy*. Communiqué disponible à l'adresse: <http://www.tc.gc.ca/mediaroom/releases/nat/2005/05-gc013e.htm#bg> Dernière vérification de l'adresse : 25 juillet 2006.

Murty KG, Liu J, Wan YT, Linn R (2005) *A decision support system for operations in a container terminal*. Decision Support System, vol. 39, no. 3, p. 309 – 332.

Nishimura E, Imai A, Papadimitriou S (2001) *Berth allocation planning in the public berth system by genetic algorithms*. European Journal of Operational Research, vol. 131, p. 282 – 292.

Ottjes J, Duinkerken M, Evers J, Dekker R (1996) *Robotised Inter Terminal Transport of containers: a simulation study at the Rotterdam Port Area*. Proceedings of the 8th European Simulation Symposium, Genua, October 1996.

Park YM, Kim KH (2003) *A scheduling method for Berth and Quay Cranes*. OR Spectrum, vol. 25, issue 1, p. 1 – 23.

Port de Montréal (2006) *Le port de Montréal affiche une excellente performance en 2005*. Communiqué disponible à l'adresse : http://www.port-montreal.com/news/fr_45_1.pdf
Dernière vérification de l'adresse: 13 avril 2006.

Preston P, Kozan E (2001) *An approach to determine storage locations of containers at seaport terminal*. Computers and operations Research, vol. 28, p. 983 – 995.

Ramani KV (1996) *An Interactive Simulation Model for the Logistics Planning of Container Operations in Seaports*. Simulation, vol. 66, no. 5, p. 291 – 300.

Sgouridis SP, Angelides DC (2002) *Simulation-based analysis of handling inbound containers in a terminal*. Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference.

Slack B (2001) *Intermodal Transportation*. In *Handbooks of Logistics and Supply-Chain Management*, sous la direction de Ann M. Brewer, Kenneth J. Button et David A. Hensher, p. 99 – 126. Oxford: Éditions Pergamon.

Statistique Canada (2006) www.statcan.ca Dernière vérification de l'adresse 23 mai 2006.

Steenken D, Voss S, Stahlbock R (2004) *Container terminal operation and operations research: a classification and literature review*. OR Spectrum, vol. 26, p. 3 – 49.

Vancouver Port Authority (2006) *2006 Mid-Year Stats Release*. Communiqué disponible à l'adresse : <http://www.portvancouver.com>

Vis IFA (2005) *Container Logistics*. Disponible sur : <http://www.ikj.nl/container/> Dernière vérification de l'adresse : 13 avril 2006.

Vis I.F.A., De Koster R., Roodbergen K.J., Peeters L.W.P. (2001) *Determination of the number of automated guided vehicles required at a semi-automated container terminal*. Journal of the Operational Research Society, vol. 52, p. 409 - 417.

Vis I, Harika I (2004) *Comparison of the vehicles types at an automated container terminal*. OR Spectrum, vol. 26, p. 117 – 143.

Wan TB, Wah ECL, Meng LC (1992) *The Use of Information Technology by the Port of Singapore Authority*. World Development, vol. 20, no.12, p. 1785 – 1795.

Wilson ID, Roach PA (1999) *Principles of Combinatorial Optimization Applied to Container-Ship Stowage Planning*. *Journal of Heuristics*, vol. 5, p. 403 – 418.

RÉFÉRENCES WEBS

<http://www.cosmosworldwide.com/> Dernière vérification de l'adresse : 13 avril 2006.

<http://www.cpships.com> Dernière vérification de l'adresse : 13 avril 2006.

<http://www.navis.com/> Dernière vérification de l'adresse : 13 avril 2006.

www.itsa.org

www.itscanada.ca

www.portseattle.org

www.portofoakland.com

www.portoflosangeles.org

www.panynj.com

www.mtls.com

www.tideworks.com

www.acp.gob.pa (Panama canal authority)

www.ect.nl