
THÈSE EN COTUTELLE

Pour l'obtention du grade de

**DOCTEUR DE NORMANDIE UNIVERSITE
& DE L'UNIVERSITE SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH**

SPECIALITE : Recherche Opérationnelle et Informatique

Présentée par :

Mustapha Oudani

Optimisation de problèmes de transport multimodal

Directeurs de thèse : **Pr. Ahmed El Hilali Alaoui et Pr. Jaouad Boukachour**

Soutenue publiquement le 21 Mai 2016
Devant la Commission d'Examen

JURY

M. xx xxxxx	Professeur à l'université de	Président
M. xx xxxxx	Professeur à l'université	Rapporteur
M. xx xxxxx	Professeur à l'université	Rapporteur
M. xx xxxxx	Professeur à l'université	Examineur
M. xx xxxxx	Professeur à l'université	Examineur
M. xx xxxxx	Chargé Recherche au GPMH	Examineur
M. Ahmed El Hilali Alaoui	Professeur à l'université Fès	Directeur thèse
M. Jaouad Boukachour	Professeur à l'université du Havre	Directeur thèse

Dédicace

I Yiman n unazur Muhend Seidi!

La maturité de l'homme, c'est d'avoir
retrouvé le sérieux qu'on avait au jeu
quand on était enfant

Friedrich Nietzsche/Par-delà le bien et
le mal

Remerciements

Remerciement

C'est le moment pour remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de cette thèse de doctorat.

Je tiens tout d'abord à remercier mes deux directeurs de thèse pour la confiance qu'ils ont faite à mon égard. Je remercie le professeur Ahmed El Hilali Alaoui, pour son encadrement rigoureux, pour sa disponibilité permanente et pour ses qualités humaines. Mes remerciements vont également au professeur Jaouad boukachour pour la qualité de son encadrement, pour ses nombreuses relectures et corrections de ce manuscrit.

Je remercie infiniment monsieur Abdelkader Sbihi, professeur à l'école de management de Normandie pour avoir accepté de rapporter cette thèse. Je le remercie également pour ses remarques pertinentes et pour ses corrections qui ont amélioré ce rapport.

Je tiens à exprimer ma gratitude pour le professeur Mohamed El Khomssi pour avoir accepté de rapporter ce travail et également pour ses corrections et remarques importantes.

Je remercie vivement le professeur Chakir Loqman pour avoir accepté de rapporter ce travail et pour ses remarques pertinentes.

Mes remerciements les plus sincères vont à monsieur Jean-François Emery, chargé de mission innovation et veille technologique au Grand Port Maritime du Havre (GPMH), en premier lieu pour la qualité de son encadrement tout au long de mon travail au sein du GPMH, mais également pour ses nombreuses relectures, propositions et corrections qui ont beaucoup amélioré cette thèse.

J'adresse mes remerciements au professeur Abdelhamid Benaini pour avoir accepté d'examiner ce travail et pour ses différentes remarques et suggestions. Je remercie le professeur Youssef Benadada pour avoir accepté de présider le Jury et d'examiner ce manuscrit.

Je remercie particulièrement David Leriche, chercheur développeur au GPMH et collègue dans

Remerciements

le cadre du projet DCAS pour ses remarques, relectures et suggestions.

Je remercie Michèl Bézien, photographe au GPMH, pour la collection de photos fournie et pour ses nombreuses conseils et remarques.

Un grand merci pour mes collègues au laboratoire Modélisation et Calcul Scientifique de la FST de Fès, au laboratoire du Mathématiques Appliquées du Havre et à la Direction des Transports Terrestres au GPMH.

Je remercie chaleureusement mes parents, mes sœurs et frères pour leur encouragement permanent et pour l'intérêt qu'ils ont toujours porté pour ce que je faisais.

Je remercie bien tendrement ma femme pour ses encouragements et pour son soutien inconditionnel.

Je remercie tous les membres de ma famille, mes amis, collègues et professeurs pour leur soutien inestimable.

Résumé

Cette thèse est une contribution aux travaux de recherche sur l'optimisation des problèmes du transport multimodal. Nous commençons par la présentation du contexte général en définissant les principaux concepts et formes d'intermodalité. Le problème de la localisation des terminaux du transport intermodal est ensuite étudié. Nous proposons un algorithme génétique à codage mixte pour la résolution de ce problème et nous comparons nos résultats avec ceux de la littérature. Un ensemble de problèmes posés dans le cadre de notre travail sur le projet DCAS (Direct Cargo Axe Seine) y sont décrits et modélisés par des outils de programmation mathématique. Ainsi, nous avons étudié le problème du transfert de navettes ferroviaires qui consiste à optimiser le transfert d'un ensemble de conteneurs entre des terminaux maritimes et un terminal multimodal. Ensuite, nous avons modélisé le problème d'ordonnancement des trains de grandes de lignes pour le placement sur les voies de la cour ferroviaire du terminal multimodal. Ces problèmes sont résolus en utilisant une approche combinée optimisation simulation. Une première application est basée sur un algorithme génétique couplée avec la simulation pour l'affectation des voies aux trains. Une deuxième, consiste à optimiser la manutention des conteneurs lors d'un transbordement rail-rail en utilisant un algorithme de colonie de fourmis intégré dans le modèle de simulation.

Mots clés : Optimisation combinatoire, multimodalité, logistique portuaire, transport combiné, métaheuristiques

Abstract

This thesis is a contribution to the research on the optimization of multimodal transport problems. We begin by presenting the general context by defining key concepts and different forms of inter-modality. The intermodal terminals location problem is then studied. We propose a mixed coding genetic algorithm for solving this problem and we compare our results with those of the literature. A set of problems in the context of our work on the DCAS (Direct Cargo Axe Seine) project are then described and modeled by using mathematical programming tools. Thus, we studied the rail shuttles transfert problem which consist to optimize the transfer of a set of containers between maritime terminals and a multimodal terminal. Then, we modeled the lines trains scheduling problem whose objective is the placement of trains on rail yard tracks of multimodal terminal. These problems are solved by using a combined simulation optimization approach. A first application is based on a genetic algorithm coupled with simulation to solve an assignment problem. A second one is to optimize the handling of containers in a rail-rail transfer using a embedded ant colony algorithm in the simulation model.

Table des matières

Table des figures	xv
Liste des tableaux	xix
Introduction générale	1
I Transport multimodal : généralités et état de l'art	5
1 Introduction	5
2 Les modes du transport de base	6
2.1 Mode maritime	6
2.2 Mode ferroviaire	7
2.2.1 Train complet vs le wagon isolé	8
2.2.2 Principaux opérateurs	9
2.3 Mode routier	9
2.4 Mode aérien	11
2.5 Mode fluvial	12
2.6 Pipeline	13
2.7 Une comparaison entre les modes	14
2.7.1 En termes de capacité	14
2.7.2 En termes d'émission	14
2.7.3 Seuils de pertinence	15
2.7.4 Récapitulatif	16
3 Transport multimodal	17

Table des matières

3.1	Les unités de transport intermodal	17
3.2	Choix politiques et écologiques	19
4	Formes d'interface multimodales	19
4.1	Engins de manutention	19
4.1.1	Les grues et portiques de quai	19
4.1.2	Les portiques ferroviaires et fluviaux	20
4.1.3	Reach stacker	21
4.1.4	Chariot cavalier	21
4.1.5	AGV	21
4.2	Les ports maritimes	22
4.3	Terminaux de transport combiné rail-route	23
4.4	Terminaux de combiné fleuve-route	24
4.5	Nouvelles générations de terminaux multimodaux	24
4.5.1	Les ports secs	24
4.5.2	Terminaux de transbordement rapide rail-rail	24
5	Différentes formes d'intermodalité	26
5.1	Transport combiné rail-route	26
5.2	Transport combiné fleuve-route	26
5.3	Ferroutage et autoroute ferroviaire	27
5.4	Merroutage	27
5.4.1	Le feeder maritime	27
5.4.2	Le roulier	28
6	Organisation logistique et commerciale des chaînes de transport multimodal	28
6.1	Principaux acteurs de transport intermodal	28
6.2	Organisation du transport intermodal	29
7	Transport multimodal : état de l'art	30
7.1	Problématique de définition	30
7.2	Problèmes stratégiques	32
7.3	Problèmes tactiques	33
7.4	Problèmes opérationnels	35
7.5	Tendances et perspectives	35
7.5.1	La mutualisation	35
7.5.2	La synchronodalité	36
7.5.3	L'internet physique	36
8	Conclusion	36

II	Localisation des terminaux intermodaux : modélisation et résolution	39
1	Introduction	39
2	Réseaux en étoile	40
2.1	Fonctions administratives	41
2.2	Fonctions d'exploitation	41
3	Position du problème	41
4	Formulation mathématique	41
5	Evaluation du coût intermodal	44
6	Résolution par algorithme génétique	46
6.1	Représentation des solutions	47
6.2	Population initiale	47
6.3	Opérateurs de croisement	47
6.3.1	Croisement de Laplace	48
6.3.2	Croisement arithmétique	49
6.4	Opérateurs de mutation	50
6.4.1	Mutation MPT	50
6.4.2	Mutation puissance	50
6.5	Schéma général	51
7	Réglages des paramètres de l'algorithme	52
8	Résultats numériques	53
9	Conclusion	55
 III	 Modélisation des problèmes de transport multimodal au port du Havre	 57
1	Introduction	57
2	Port du Havre	58
2.1	Système logistique actuel	58
2.2	Système logistique avec TMM	61
2.2.1	Composantes du TMM	61
2.2.2	Intérêts logistiques de TMM	64
3	Système DCAS	65
3.1	Projet DCAS	65
3.2	État de l'art sur le coupon	66
3.3	Réponse technologique et organisationnelle de DCAS	67
3.4	Un autre intérêt pour les entrepôts logistiques	68
3.5	Brouettages intraterminaux maritimes	68

Table des matières

3.6	Transfert terminal maritime centre de réparation	69
4	Modélisation des problèmes d’optimisations rencontrés	69
4.1	Problème de transfert de navettes ferroviaires	69
4.1.1	Description du problème	69
4.1.2	Circulation en noria	70
4.1.3	Formulation mathématique	70
4.2	Problème d’ordonnancement des trains et navettes sur la cour ferroviaire	74
4.2.1	Description du problème	74
4.2.2	Modélisation mathématique	75
4.3	Problème d’affectation des trains/navettes aux voies	77
4.3.1	Description du problème	77
4.3.2	Première formulation	77
4.3.3	Deuxième formulation	78
4.3.4	Troisième formulation	79
5	Conclusion	80
IV Résolution par méthodes de couplage optimisation simulation		81
1	Introduction	81
2	Généralités sur l’optimisation	82
2.1	l’optimisation mathématique	82
2.2	Optimisation combinatoire	82
2.2.1	Heuristiques et métaheuristiques	83
3	Généralités sur la simulation	84
3.1	Essai de définition	84
3.2	Les différents paradigmes	85
3.2.1	Simulation à évènements discrets	85
3.2.2	Simulation des systèmes dynamiques	85
3.2.3	Simulation multi agents	86
4	Comparaison optimisation simulation	86
5	Couplage optimisation simulation	87
5.1	Avantages du couplage optimisation simulation	87
5.1.1	Deux approches complémentaires	88
5.1.2	Test et optimisation de plusieurs scénarios	88
6	Modèle de simulation du port du Havre	88
6.1	Description de système simulé	89

6.2	Environnement de développement	89
6.3	Règles de gestion	90
6.3.1	Ordonnancement des trains de grandes lignes	90
6.3.2	Règles de manutention rail-rail	92
6.4	Optimisation via la simulation	93
6.5	Résultats de la simulation	94
6.5.1	Indicateurs organisationnels	95
6.5.2	Indicateurs financiers	97
6.5.3	Comparaison système actuel/système avec TMM	98
6.5.4	Comparaison système DCAS/TMM	100
7	Algorithme génétique basé sur la simulation pour l'affectation des voies	102
7.1	Problématique	102
7.2	Opérateurs génétiques	103
7.2.1	Croisements	103
7.2.2	Mutations	104
7.3	Évaluation par simulation	105
7.4	Comparaison avec une heuristique myope	106
8	Optimisation des temps de service à la cour ferroviaire	108
8.1	Problématique	108
8.2	Stratégie de collaboration agent	109
8.3	Algorithme de colonie de fourmis intégré dans la simulation	111
8.3.1	Description de l'algorithme	111
8.3.2	Couplage ACO-simulation	112
8.3.3	Réglage des paramètres	112
8.4	Résultats et comparaison	112
9	Conclusion	114
 Conclusion générale et perspectives		 119
 Bibliographie		 121

Table des matières

Table des figures

I.1	Évolution de nombre de conteneurs au niveau mondial	7
I.2	Répartition modale des transports de marchandises en France	10
I.3	Avion mixte pour transport de fret aérien	11
I.4	Convoi de barges	12
I.5	Pipeline Trans-Alaska	13
I.6	Comparaison des modes en capacité	14
I.7	Comparaison des modes par rapport aux émissions	15
I.8	Seuils de pertinence de différents modes	16
I.9	Conteneur 20 pieds	18
I.10	Caisse mobile	18
I.11	Grue de quai	20
I.12	Portique ferroviaire	20
I.13	Reach stacker	21
I.14	Chariot cavalier	22
I.15	AGV	22
I.16	Terminal de transbordement rail-rail	25
I.17	Transport combiné rail-route	26
I.18	Transport combiné rail-route 2	26
I.19	Transport combiné fleuve-route	27
I.20	Transport combiné fleuve-route 2	27
I.21	Autoroute ferroviaire	27
I.22	Feeder maritime	28

Table des figures

I.23	Roulier RORO	28
I.24	Organisation d'une chaîne de rail-route	29
II.1	Réseau intermodal simple	42
II.2	Chaîne typique de transport intermodal	44
II.3	Composition de coût de transport intermodal	45
II.4	Seuil de pertinence ferroviaire en fonction des coûts de pré et post-acheminement 46	
II.5	Diagramme factoriel des paramètres de l'AG	52
II.6	Diagramme factoriel des opérateurs génétiques de GA(a,1)	53
III.1	Vue sur Port2000	59
III.2	Parts de marché du GPMH	59
III.3	Système logistique actuel	60
III.4	Répartition modale de trafic de conteneurs du port du Havre vs les ports de la range nord-européene	61
III.5	Architecture de TMM du Havre	62
III.6	Cour fluviale	63
III.7	Cour ferroviaire	63
III.8	Système logistique avec TMM	64
III.9	Coupon DCAS	65
III.10	Circulation des navettes en noria	70
IV.1	Vue satellite de la zone simulée	89
IV.2	Exemple d'un diagramme d'état	90
IV.3	Conception agent du modèle de simulation	91
IV.4	Manutention selon la règle gauche vers gauche	92
IV.5	Manutention selon la règle du plus proche	93
IV.6	Manutention selon la règle du plus proche dans un sens	93
IV.7	Illustration OptQuest	94
IV.8	Optimisation des paramètres de pondération	95
IV.9	Progression de la recherche de la solution	96
IV.10	Génération de données de sorties	96
IV.11	Nombre de manutention par conteneur au TMM	97
IV.12	Évolution des taux de remplissage des navettes	98
IV.13	Interface graphique des données de sortie de la simulation	99

IV.14 Distribution des prix selon règles de manutention à la cour ferroviaire	99
IV.15 Comparaison coûts système DCAS et classique	100
IV.16 Comparaison système DCAS classique par Monte Carlo	101
IV.17 Représentation d'un individu	102
IV.18 Illustration d'un individu	103
IV.19 Croisement voies et positions	104
IV.20 Croisement voies	104
IV.21 Croisement positions	105
IV.22 Mutation voies et positions	105
IV.23 Mutation voies	105
IV.24 Mutation positions	105
IV.25 Schéma de couplage algorithme génétique simulation	106
IV.26 Cumul de temps d'attente mutuel des portiques	108
IV.27 Partition de la cour ferroviaire	109
IV.28 Schéma couplage ACO-simulation	113
IV.29 Effets absolus des principaux paramètres	114
IV.30 Effets des paramètres sur le temps attente mutuel	114
IV.31 Comparaison en fonction de distance en mètres	115
IV.32 Comparaison en fonction de temps d'exécution en secondes	115
IV.33 Répartition des charges de travail en pourcentage	116
IV.34 Évolution de la charge de travail	116

Table des figures

Liste des tableaux

I.1	Evolution de la capacité des porte-conteneurs du groupe Maersk	7
I.2	Comparaison des modes de transport	17
I.3	Classement des principaux ports mondiaux	23
I.4	Modèles d'organisation de Fret selon les modes	30
I.5	Problèmes tactiques	34
II.1	Comparaison des versions d'AG	54
II.2	Résultats en utilisant la nouvelle approximation du coût de transport inter-modal	55
III.1	Résolution exacte par CPLEX	74
IV.1	Optimisation versus simulation	88
IV.2	Comparaison HTB et AG en temps de service	107

Liste des tableaux

Introduction générale

L'activité du transport est l'une des activités humaines les plus anciennes. Elle remonte aux origines de l'humanité. Et comme la nature est la première source d'inspiration de l'homme, celui-ci a commencé par « le plus naturel » en utilisant ses muscles pour déplacer des biens d'une part et en profitant de la force des courants d'eau d'autre part. Cet activité a connu des révolutions historiques favorisées par des inventions technologiques et des découvertes de nouvelles pratiques. Ainsi, le transport a changé de visages après la domestication de certains animaux, en passant par l'invention de la roue et en arrivant aux derniers progrès concernant les moteurs à vapeur, Diesel et électriques.

Une des révolutions qui ont marqué le siècle passé est l'introduction du conteneur. Cette invention a permis au transport maritime d'être à la tête des modes du transport en termes de capacité et de compétitivité. Mais la plus importante conséquence de l'introduction du conteneur et qui constitue d'ailleurs sa « raison d'être » était le besoin d'assurer la continuité du transport des flux de marchandises maritimes sur le continent. En effet, l'idée vient du fait qu'au lieu de transporter une marchandise tributaire de son vecteur du transport (un camion par exemple), on peut se contenter de transporter la marchandise dans un contenant standardisé pour faciliter leurs opérations de manutention [Levinson,2010]. Ainsi, le conteneur a permis de « relier » des modes du transport différents en facilitant le passage des marchandises d'un mode à l'autre sans empotage ni dépotage. D'autres contenants vont voir le jour comme réponse au besoin d'un « passage souple » d'un mode à l'autre. En effet, ces nouveaux contenants standardisés qu'on appelle Unités de Transport Intermodal (UTI) ont permis l'apparition de nouveaux services et offres logistiques combinant plusieurs modes du transport.

La mondialisation a permis d'une part l'ouverture des marchés mondiaux et l'accroissement de la concurrence économique entre pays et entreprises. Et puisque les firmes multinationales

recherchent un profit maximal, la majorité de celles-ci ont opté pour des stratégies de fragmentation internationale de leurs activités. Elles délocalisent une partie de leurs productions dans des pays dotés d'un moindre coût de production.

Actuellement, le transport est au centre du cycle de la production-consommation. En effet, les entreprises et les individus doivent prendre des décisions sur les trajets à emprunter et les modes du transport à utiliser afin d'acheminer du fret ou des personnes. Le choix du mode du transport pour acheminer des marchandises ou des individus d'une origine à une destination est l'une des questions que se posent les décideurs. Ce choix dépend d'un certain nombre de facteurs tels que la nature des biens, le coût, la rapidité, les infrastructures disponibles, les trajets (origines et destinations).

Dans le contexte actuel de convalescence économique après des années de récession post-crise de 2008, le développement du transport de fret sera un corollaire de la reprise de croissance. Le déséquilibre entre le mode routier et ferroviaire et les pressions de la tendance écologique vont pousser le transport intermodal à jouer un rôle important. Les combinaisons des modes et des moyens du transport disposent d'un fort potentiel inexploité. Néanmoins, plusieurs conditions doivent être réunies pour faire du transport intermodal un vrai concurrent de la route. La maîtrise des coûts et l'amélioration de la qualité de service sont ainsi parmi les conditions indispensables.

Cette thèse s'inscrit dans les travaux de recherche sur l'optimisation des problèmes du transport multimodal. Notre but est l'amélioration de l'organisation, de la planification et de la gestion des opérations en relation avec la multimodalité et la combinaison des modes du transport de marchandises. Elle est scindée en quatre chapitres.

Le premier chapitre expose les problématiques générales du transport multimodal et donne un aperçu sur l'état de l'art. C'est un chapitre introductif contenant des définitions, des concepts et des données chiffrées sur les différents aspects de la multimodalité du transport de marchandises. Ainsi, on peut y trouver des définitions simples des modes du transport de base (mode routier, ferroviaire, fluvial, maritime et transport par conduite), leurs caractéristiques principales, puis une étude comparative de ces modes en termes de capacité, de seuils de pertinence et de leurs externalités négatives sur l'environnement. Un essai de définition du transport multimodal et de l'intermodalité sera présenté en exposant les différents points de vue des chercheurs dans la littérature scientifique. Nous étudions les principaux points d'interconnexion des modes du transport appelés interfaces à savoir : les ports maritimes, les terminaux du transport combiné (rail-route et rail-fluve), les ports secs et les nouvelles générations de terminaux multimodaux. Les différentes formes d'intermodalité sont abordées pour illustrer l'aspect pratique et le succès de la combinaison des modes de transport. Ainsi, nous donnons l'exemple du transport

combiné rail-route et rail-fleuve, le *feeder* maritime et le ferroulage. Ensuite, nous traitons l'organisation logistique et commerciale des chaînes du transport intermodal et les missions des principaux acteurs de cette organisation. Un état de l'art sur les problèmes de transport multimodal est présenté. La présentation des problèmes de littérature scientifique est donnée selon les trois horizons de planification : stratégique, tactique et opérationnel. Nous terminons ce chapitre par l'exposé de certaines tendances du développement des offres logistiques du transport intermodal à savoir : la synchronodalité, la mutualisation et l'internet physique.

Le deuxième chapitre est dédié à la problématique de la localisation des terminaux du transport intermodal rail-route. Cette problématique concerne la localisation d'un ensemble de terminaux choisis parmi un ensemble de sites potentiels, puis la détermination d'un plan d'acheminement (unimodal ou intermodal) des quantités de marchandises pour un ensemble de clients. Une modélisation mathématique sous forme de programme mathématique linéaire mixte est présentée. Nous introduisons une nouvelle évaluation de coût du transport intermodal. La pertinence de cette nouvelle approximation est justifiée par les coûts fixes élevés des pré et post-acheminements routiers lors d'un plan du transport intermodal (coûts de retour à vide, coûts fixes journaliers des chauffeurs, etc.). Nous avons développé et testé plusieurs versions d'un algorithme génétique à base d'un codage mixte (binaire et réel) en faisant varier les opérateurs génétiques de croisement et de mutation. Une meilleure version est, ensuite, comparée aux récents travaux de littérature sur plusieurs instances. Nous utilisons la méthode des plans d'expérience pour le réglage des paramètres de l'algorithme. Les résultats numériques sont présentés.

Nous exposons dans le troisième chapitre, une partie de nos travaux de recherche effectués dans le cadre du projet DCAS (Direct Cargo Axe Seine) porté par le Grand Port Maritime du Havre (GPMH) qui a pour objectif l'amélioration de la qualité de service du mode ferroviaire et l'augmentation des modes massifiés en général entre les ports et les métropoles urbaines, partout en France et en Europe. Nous commençons par la présentation du projet, ses objectifs, sa zone d'application particulière en relation avec le GPMH. Le système logistique actuel et futur du port du Havre est abordé ainsi que les enjeux de sa nouvelle plateforme multimodale. Nous présentons nos formulations mathématiques des problèmes rencontrés, en l'occurrence, le problème de transfert de navettes ferroviaires, le problème d'ordonnancement des trains et navettes sur la cour ferroviaire, le problème de l'affectation des trains aux voies et le problème d'ordonnancement des portiques ferroviaires.

Le dernier chapitre est consacré à des applications de couplage d'optimisation/simulation sur les problèmes étudiés dans le troisième chapitre. Nous commençons par un aperçu sur l'optimisation, la simulation, leurs avantages et inconvénients et les enjeux de leurs couplages. Nous

présentons le modèle de simulation développé pour le système logistique du port du Havre dans le cadre du projet DCAS. La méthodologie de modélisation, les données d'entrée, l'environnement de développement sont détaillés. Nous exposons les règles de gestion proposées pour la simulation et l'approche d'optimisation via la simulation en utilisant le solveur OptQuest intégré dans l'outil de simulation. Les résultats du modèle de simulation sont présentés et classés sous forme d'indicateurs de performance. Une première application de couplage est traitée, il s'agit d'un algorithme génétique pour résoudre un problème d'affectation des trains aux voies d'un faisceau ferroviaire. L'algorithme génétique est alimenté par l'évaluation des individus fournis par le modèle de simulation. Cette approche est comparée, après réglage de ses paramètres par plans d'expérience, à une heuristique myope intégrée dans le modèle de simulation. Une deuxième application de combinaison optimisation simulation basée sur un algorithme de colonie de fourmis est étudiée. Des couples de fourmis sont lancés dans le modèle de simulation pour optimiser le rendement des deux portiques ferroviaires du terminal multimodal du port du Havre. Les objectifs espérés sont la minimisation des charges de travail des portiques, la minimisation des temps d'attentes mutuels et des déposes à terre. Cette approche est comparée à une approche basée sur un système de collaboration multiagents basée sur la manipulation dynamique d'un séparateur virtuel des zones de travail des deux portiques. Les deux approches (ACO, collaboration agent) sont comparées à des règles de gestion de la manutention proposées selon plusieurs critères liés au temps de service, à la distance totale parcourue par les portiques, etc.

Nous terminons cette thèse par une conclusion générale dans laquelle nous reprenons les principaux résultats de notre travail et où nous suggérons des perspectives pour des travaux futurs.

Chapitre I

Transport multimodal : généralités et état de l'art

1 Introduction

L'introduction du conteneur comme unité standard de chargement, au milieu du siècle dernier, a révolutionné le secteur de transport. Il a amplifié le développement du commerce mondial. Grâce à sa manutention facile lors des ruptures de charge entre les modes du transport classiques, le conteneur a favorisé l'apparition des offres du transport combinant plusieurs modes de transport de base (maritime, ferroviaire, routier). Néanmoins, en Europe, le transport est fortement marqué par une séparation technique, sociale, voire politique, entre les modes de transport. Le mode routier reste, le mode le plus compétitif. Il bénéficie d'une bonne croissance actuellement. Sa forte compétitivité vient du fait qu'il bénéficie d'une infrastructure universelle, souvent payée par les contribuables et par les automobilistes. Le développement des UTI (Unités de Transport Intermodal) comme les caisses mobiles et les conteneurs a permis au transport intermodal d'être une alternative crédible au tout route. Cependant, l'intermodalité est loin de concurrencer la route, celle-ci occupe toujours une place prépondérante, tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif : c'est le mode routier qui fixe aujourd'hui les prix du marché et les performances auxquels les autres modes alternatifs se confrontent. Les externalités négatives sur l'environnement du transport routier restent son principal inconvénient. Une future internalisation des coûts externes, dans le cadre de la transition énergétique, pourra diminuer l'attractivité de ce mode le plus polluant. Ce qui rend nécessaire la promotion de l'intermodalité pour une future économie verte et durable.

Ce chapitre est introductif et sera consacré à la présentation de certaines notions et concepts liés au transport multimodal. Nous commençons par les modes du transport de base, leurs caractéristiques, leurs acteurs et quelques données chiffrées. Puis, nous donnons quelques définitions

du transport multimodal. Après, nous présentons les principales formes d'interfaces modales : les ports maritimes, les terminaux du transport combinés, les ports secs, etc. Nous exposons les différentes formes du transport intermodal utilisées actuellement et finalement les tendances et perspectives futures de la multimodalité, en l'occurrence, la mutualisation, la synchronodalité et l'internet physique.

2 Les modes du transport de base

2.1 Mode maritime

Le transport maritime des marchandises est un mode massifié qui assure plus de 80 % des échanges de marchandises au niveau mondial. Ce mode s'appuie sur des navires porte-conteneurs de taille croissante. Ce mode du transport a été favorisé par la délocalisation des unités de production loin des marchés de consommation (externalisation géographique des activités vers la Chine et les pays disposant de très faibles coûts de main-d'œuvre). Ce mode du transport est fondamental pour le commerce international car il permet le transport de grandes quantités de marchandises à un coût raisonnable. Selon [Smith,2009], le faible coût du transport maritime favorise l'ouverture de nouveaux marchés. De surcroît, il représente un levier pour le développement de l'industrie sur les façades maritimes. Ce mode est basé principalement sur trois éléments. Le premier est l'infrastructure des ports et des terminaux à conteneurs. Le deuxième regroupe les navires et les feeders qui relient les ports maritimes. Le troisième se compose des systèmes qui assurent l'exploitation efficace du matériel et des infrastructures. Plusieurs acteurs/métiers se sont développés autour de ce mode du transport tels que : l'armateur, l'affréteur, le courtier maritime, l'opérateur de terminal à conteneur, etc.

L'introduction du conteneur au milieu des années 50 a facilité les opérations de manutention maritimes, ce qui a donné un grand élan au mode maritime. Ainsi, le nombre de conteneurs échangés par ce mode a connu une grande évolution en passant de 50 millions d'EVP (Equivalent Vingt Pieds) en 1985 à 250 millions d'EVP en 2004 [Kim et Gunther,2007]. La figure I.1 montre l'évolution du nombre de conteneurs au niveau mondial pendant la période 2006-2015 [Worldbank,2016] :

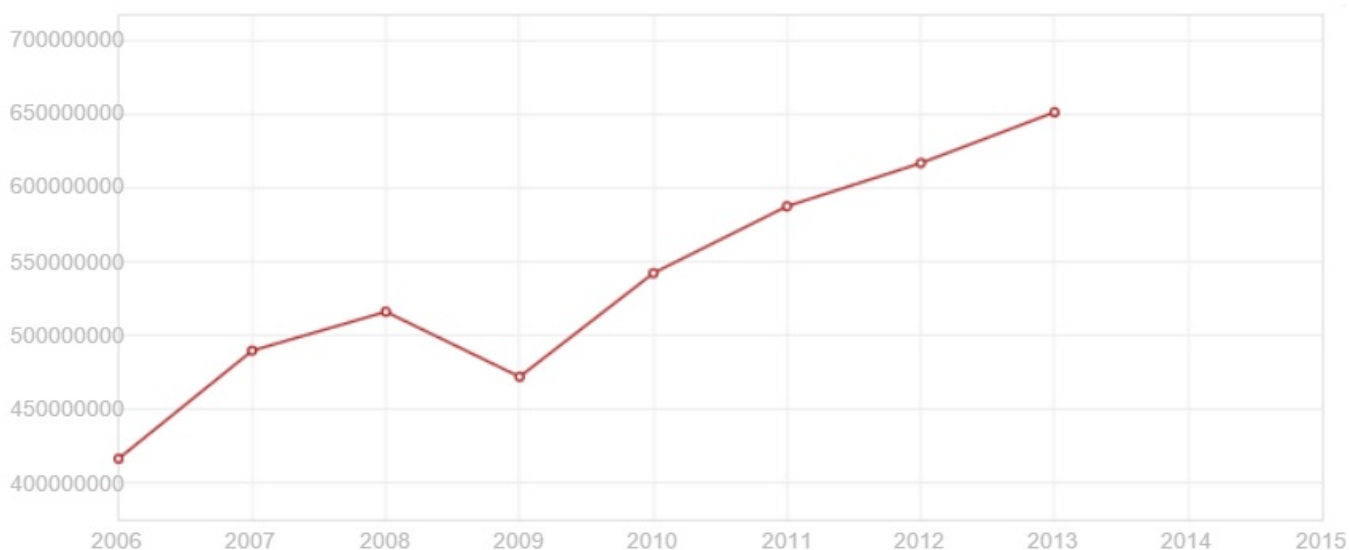


Figure I.1 – Évolution de nombre de conteneurs au niveau mondial

Par ailleurs, la capacité des navires porte-conteneurs est passée de quelques centaines de conteneurs à plusieurs dizaines de milliers de conteneurs pour les navires transocéaniques actuels qui peuvent transporter jusqu'à 18.000 EVP (avec une tendance à la hausse, des porte-conteneurs de 20 000 à 21 000 EVP sont déjà en commande). Comme exemple illustratif, le tableau I.1 montre l'évolution de la capacité de chargement des portes-conteneurs du groupe Maersk :

Porte-conteneurs	Année	Capacité (EVP)	Longueur (m)
Triple E	2013	18.000	400
Emma	2006	15.500	397
Gudrun	2005	9074	367
Laura	2001	4258	266
Alabama	1998	1068	155

Tableau I.1 – Evolution de la capacité des porte-conteneurs du groupe Maersk

2.2 Mode ferroviaire

Le transport de fret peut se faire en train complet ou en lotissement appelé "wagons isolés" rassemblés dans des gares de triage. Les caractéristiques des trains sont différentes entre l'Europe et les États-Unis. En Europe, les trains, en un seul niveau, peuvent atteindre une longueur de 750 m, voire 1000 m, avec une capacité de quelques dizaines d'EVP en utilisant des wagons plats tractés essentiellement par des locomotives électriques. Aux États-Unis, les trains peuvent

être en deux niveaux (double stack), sur une longueur pouvant atteindre 2500 m tractés par des locomotives diesel.

2.2.1 Train complet vs le wagon isolé

Le fret ferroviaire en train complet, appelé également train entier, ou train-bloc est une forme du transport ferroviaire de marchandises qui consiste à former un train de marchandises acheminé directement de son point de chargement à son point de destination sans remaniement intermédiaire. Ce principe assure la rapidité et la fiabilité de l'acheminement et évite les aléas du passage par les gares de triage. Il permet une optimisation des conditions de traction en profitant de la pleine puissance de l'engin de traction (locomotive). Sa mise en place nécessite que la logistique des installations terminales soit adaptée aux opérations de chargement/déchargement du train dans les meilleures conditions compte tenu de la dimension de ces convois. Pour une meilleure rentabilité, ce schéma du transport exige un flux du transport suffisant pour bénéficier des avantages de la massification.

En France, par exemple, les trains entiers ont souvent une longueur limitée à 750 mètres et une charge de 1800 tonnes comme charge brute ou 1200 tonnes comme charge utile. Sur les lignes minières spécialisées, la taille et la longueur des trains-bloc peuvent atteindre des records. Dans ce cas, les contraintes liées à la résistance des attelages obligent dans certains cas à intercaler des locomotives au milieu ou en queue du train.

Le wagon isolé (ou train de lotissement) quant à lui consiste à acheminer des wagons individuels ou des groupes de wagons qui sont assemblés pour former des trains dans les gares de triage. Les wagons sont expédiés depuis un ou plusieurs sites embranchés et passent par le relais de différentes gares de triage dans lesquelles les trains sont reformés. Un wagon isolé est donc intégré à plusieurs trains au cours de son voyage. Les trains du lotissement peuvent ensuite desservir plusieurs clients. En France, la filiale fret de la société nationale SNCF (Fret SNCF) appelle d'ailleurs son offre de wagon isolé multi lots/multi clients. Contrairement au train-bloc, il permet l'envoi et la réception de petits volumes (un seul wagon souvent) et la desserte d'un plus grand nombre de sites (de petites gares peuvent être ouvertes au trafic wagons isolés). Ce type du transport autorise ainsi une desserte plus au moins souple, car moins régulière qu'avec un train-entier. Ce système, relativement coûteux (infrastructure, main-d'œuvre) et moins fiable à cause des retards ou des pertes des wagons dans les gares de triage, et qui est, en outre, en concurrence, par la taille des envois, avec le transport routier, a vu sa part de marché fortement diminuer. Il a même été totalement supprimé dans certains pays, comme le Royaume-Uni, par exemple.

2.2.2 Principaux opérateurs

En Europe, le transport ferroviaire est géré par un ensemble d'acteurs institutionnels et privés, à savoir :

- **Gestionnaire des infrastructures** : c'est une entreprise chargée de la gestion d'un réseau ferroviaire, dont elle est généralement le propriétaire. Elle a comme missions la construction des lignes, des gares, l'entretien et la maintenance de ces installations. En France, par exemple, le propriétaire du réseau principal est Réseau Ferré de France (RFF).
- **Tractionnaire ferroviaire** : c'est une entreprise prestataire de services de traction de wagons sur un réseau ferroviaire. Ces services incluent la locomotive et le conducteur.
- **Les loueurs de wagons** : ce sont des entreprises spécialisées dans la location des wagons, caisses mobiles, conteneurs pour des périodes pouvant aller de quelques jours à plusieurs années.
- **Les opérateurs ferroviaires de proximité** : ce sont souvent des PME ferroviaires locales ou des filiales de grands groupes (Europort filiale d'Eurotunnel). Elles constituent une réponse nouvelle au transport de courte distance dans les territoires ou dans les ports. Ils ont vocation à transporter des lots de wagons ou des trains déjà massifiés jusqu'à ou à partir d'un point d'échange avec un opérateur ferroviaire longue distance.

2.3 Mode routier

En France, le mode routier est aujourd'hui le mode du transport dominant avec plus de 80 % de part de marché des transports terrestres [Merlin,1991]. La position dominante de la route est le résultat de sa capacité à s'adapter à l'économie contemporaine et aux évolutions de la logistique, en raison de ses qualités intrinsèques (souplesse, unités du transport plus petites et plus flexibles) [Merlin,1991]. La figure I.2 ci-dessous montre la répartition modale des transports terrestres de marchandises en France en tonne-kilomètre qui est une unité de mesure de quantité du transport correspondant au transport d'une tonne sur un kilomètre. Cette mesure a l'avantage de quantifier l'intensité du trafic d'un mode du transport sans double compte avec celui réalisé sur les modes suivants. Une des conclusions que nous pouvons tirer de la figure est que les parts de marchés perdues par le ferroviaire sont récupérées par le routier.

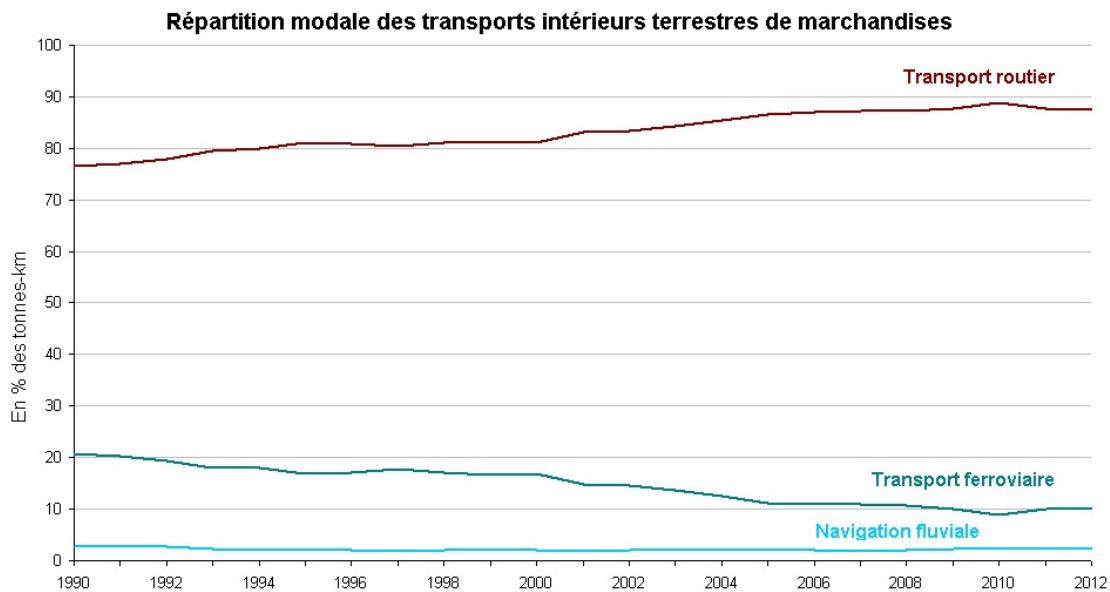


Figure I.2 – Répartition modale des transports de marchandises en France

Parmi les atouts du transport routier de marchandises :

- Le transport par camion est le seul mode qui peut atteindre les zones montagneuses, et d'une façon générale les lieux d'accès difficiles, tels que les milieux urbains denses où il n'y a plus d'espace disponible pour les grandes infrastructures de transport,
- La grande souplesse d'usage du transport routier permise par l'utilisation de la voirie banale,
- Cette souplesse permet, pour les distances courtes ou moyennes un service plus rapide que celui assuré par le chemin de fer,
- L'utilisation de la voirie locale permet d'éviter les transbordements, et permet aussi l'usage du camion comme complément du chemin de fer, de la voie navigable, du transport maritime ou aérien pour les transports finaux,
- Sa capacité (en tonnes ou quelques dizaines de tonnes) réduit les groupages et le rend apte aux transports de marchandises en petites quantités, les plus fréquentes dans l'économie contemporaine,
- L'usage d'une infrastructure construite par les pouvoirs publics et entretenue par eux,
- La possibilité d'une organisation de la profession en petites entreprises qui assurent souvent une bonne rentabilité et une utilisation optimale des investissements et du personnel.

Malgré ses multiples atouts, le mode routier est souvent pointé du doigt d'un point de vue environnemental. En effet, avec l'aérien, il contribue le plus aux émissions de polluants at-

mosphériques (particules fines et gaz à effets de serre) et nuisances sonores. C'est pour cette raison que plusieurs organismes gouvernementaux (autorités communautaires européennes et étatiques) essaient de plus en plus de réduire les parts du transport routier en proposant parfois des mesures drastiques via un ensemble de réglementations contraignantes et taxes sur les véhicules polluants.

2.4 Mode aérien

Durant les quarante dernières années, le transport aérien de marchandises a connu un fort développement grâce à l'augmentation des capacités des soutes des avions et à l'apparition des gros porteurs "Cargo" (figure I.3). Ce mode du transport bénéficie de plusieurs avantages :

- **Rapidité** : ce mode permet de prendre en charge les demandes urgentes.
- **Sécurité** : c'est le mode du transport le plus sûr avec le plus bas nombre d'accidents enregistrés.
- **Régularité** : la disponibilité des lignes régulières permet une bonne planification des flux de transport.
- **Fiabilité** : les nombreuses réglementations de la bonne traçabilité de fret aérien font de l'avion le moyen du transport le plus fiable.



Figure I.3 – Avion mixte pour transport de fret aérien

Malgré ses nombreux avantages, ce mode du transport reste le mode le plus coûteux et le plus polluant également (émissions gazeuses et sonores).

2.5 Mode fluvial

Largement développé dans le Benelux et l'Allemagne, où des interconnexions ont été réalisées entre les grands bassins fluviaux jusqu'à l'Est de l'Europe (liaison Rhin-Main-Danube), le réseau est de faible capacité en France et les voies fluviales principales Seine et Rhône ne sont pas encore connectées à grand gabarit au reste de l'Europe. Le problème des hautes et basses eaux est une contrainte de plus pour les chargeurs. A noter également la limitation de gabarit haut, imposée par les ponts, qui devient très contraignante en période des hautes eaux. Le transport fluvial se fait par des navires fluvio-maritimes, des péniches ou par des convois de barges porte-conteneurs poussés. La figure I.4 montre un convoi de barges.



Figure I.4 – Convoi de barges

Ce mode du transport bénéficie de plusieurs atouts :

- **Compétitivité intrinsèque** : le fluvial possède une forte compétitivité due à son caractère de massification des flux grâce à des économies d'échelle générées. Un convoi de barges par exemple peut remplacer plusieurs centaines de camions ou même plusieurs trains. A cela s'ajoute, sa liaison efficace entre les ports maritimes et les ports secs intérieurs (Rotterdam-Duisbourg, Dunkerque-Dourges, Le Havre-Gennevilliers) d'où partent les dessertes ferroviaires ou routières.
- **Intérêt écologique** : En remplaçant plusieurs camions, ce mode permet de générer des économies sur les quantités de CO₂ émises dans l'atmosphère.

2.6 Pipeline

Appelé également transport par canalisation, il consiste à transporter des matières fluides au moyen de conduites constituant généralement un réseau. Les pipelines portent des noms spécifiques selon le produit transporté.



Figure I.5 – Pipeline Trans-Alaska

Les principaux systèmes du transport pipeline sont :

- **Gazoduc** : Pour le transport du gaz naturel,
- **Oléoduc** : Pour le transport des hydrocarbures liquides, dont surtout le pétrole,
- **Aqueducs** : Pour le transport de l'eau douce, surtout pour l'irrigation,
- **Oxygénoducs** : Pour le transport de l'oxygène.

Le transport par canalisation est le mode le plus compétitif pour le transport du pétrole ou du gaz naturel sur de grandes distances terrestres. Les fluides transportés par pipeline se déplacent dans des tubes en acier, soudés bout à bout, à des vitesses variant de 1 à 6 m/s. La pression et la vitesse sont créées par des pompes pour les liquides ou des compresseurs pour les gaz. Les oléoducs peuvent transporter plusieurs types de liquides, en séquences appelés "trains". Deux trains sont séparés par un mélange de produits. Le bouchon (ou zone) de mélange est éliminé à l'arrivée dans la station de réception.

2.7 Une comparaison entre les modes

2.7.1 En termes de capacité

L'importance de l'étude comparative des modes du transport par rapport à leurs capacités vient de l'économie d'échelle réalisée par les modes du transport de masse. En effet, l'économie d'échelle ne se limite pas à la production des biens, elle est également intéressante dans le secteur du transport ou on peut faire des économies importantes en utilisant les modes fluviomaritimes et ferroviaires. La compétitivité intrinsèque de ces modes du transport massifiés vient de leurs grandes capacités qui amortissent leurs coûts fixes. La figure I.6 montre une comparaison des capacités de trois modes.

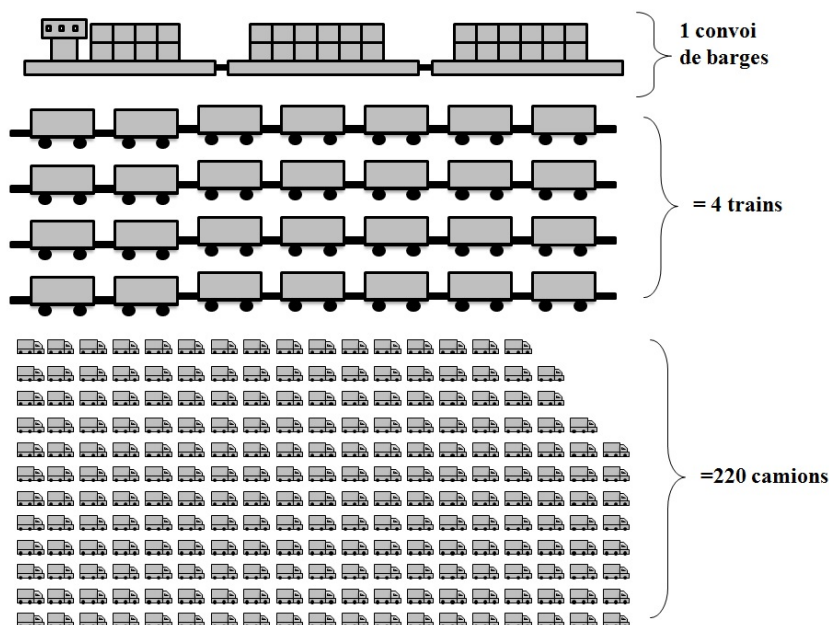


Figure I.6 – Comparaison des modes en capacité

2.7.2 En termes d'émission

Le secteur du transport tous modes confondus est responsable de 14 % du total des émissions de gaz à effet de serre. La mondialisation a permis de morceler les étapes de production et de les répartir géographiquement aux quatre coins de monde. Ainsi, certains pays se sont spécialisés dans la production des matières premières, d'autres dans leur transformation. Cette dispersion des différentes activités de production a créé le besoin du transport par différents modes de transport. Les modes du transport consomment chaque année de grandes quantités d'énergie produites essentiellement à partir de matières fossiles. La figure I.7 qui suit représente

la répartition des émissions par mode du transport.

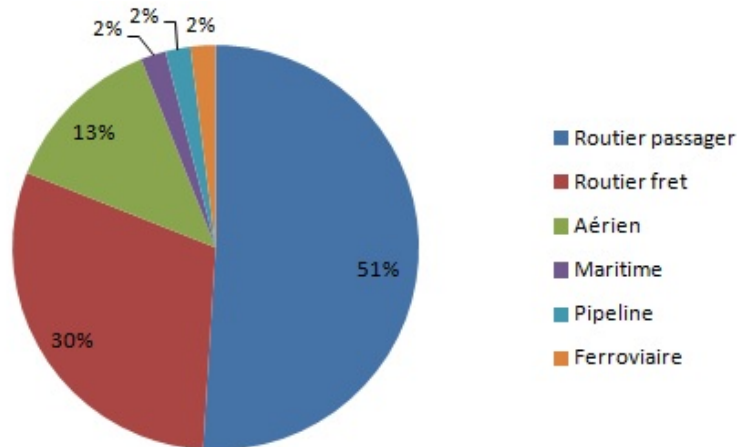


Figure I.7 – Comparaison des modes par rapport aux émissions

2.7.3 Seuils de pertinence

La comparaison des coûts de transports des différents modes est une problématique très compliquée. En effet, les fonctions coûts de chaque mode du transport sont loin d'être de simples fonctions proportionnelles à une seule variable (distance). Toute étude comparative dans ce sens doit prendre en compte plusieurs paramètres qui rentrent en jeu (en partant des coûts et contraintes horaires des chauffeurs pour le mode routier, les coûts fixes de formation des trains pour le ferroviaire, les aléas climatiques pour le fluvio-maritime, etc.), et qui rendent ces fonctions non linéaires. Néanmoins, des seuils de pertinence théoriques et approximatifs peuvent être identifiés, pour chaque mode du transport en fonction de la distance. La figure I.8 montre les différents seuils de pertinence de chaque mode unitaire.

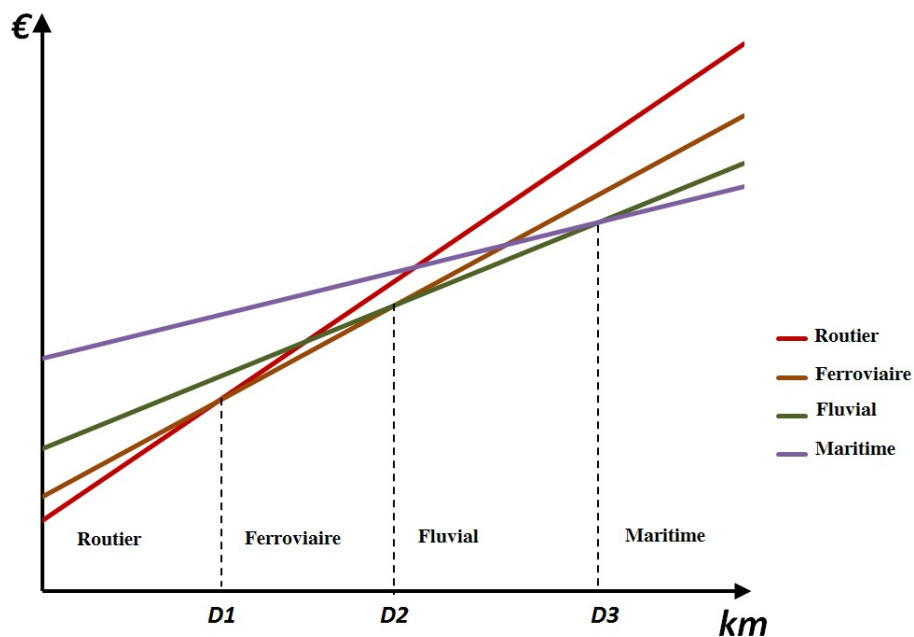


Figure I.8 – Seuils de pertinence de différents modes

2.7.4 Récapitulatif

Le tableau qui suit présente une vue comparative des différents modes du transport et donne les principaux avantages et inconvénients de chaque mode. De cette récapitulation sur les avantages et les inconvénients de chaque mode du transport on peut déduire les éléments suivants :

- Toute politique de promotion de l'intermodalité ne doit pas mettre les modes du transport dans une logique de compétition, au contraire chaque mode a ses propres points forts qui doivent être exploités. Une logique de complémentarité modale devrait être privilégiée.
- La promotion de l'intermodalité devrait passer par l'amélioration de son attractivité intrinsèque (nouveaux investissements sur les réseaux et surtout une meilleure organisation logistique menant à une meilleure qualité de service) et pas nécessairement par la taxation des autres modes de transport.
- Le mode routier, est actuellement, le mode incontournable pour les trafics locaux (moins de 50 Km) et pour les longues distances entre régions de faible émissions/réception de marchandises.

Mode du transport	Avantages	inconvénients
Fluvio-maritime	Transport massifié en volume et en poids, coûts faibles, longues distances sans rupture de charge entre deux ports	Irrégulier, peu rapide, accès limité aux zones fluvio-maritimes, risques du transport
Transport aérien	Rapidité, sécurité, trafic régulier, faibles coûts indirects du transport (assurances)	Faible capacité, non adaptabilité pour certaines marchandises, rupture de charge due à la petite taille des unités de chargement, pollution
Transport routier	Délais et coûts raisonnables, tout type de marchandises, unités de chargement variées	Pollution, risques (accidents, conditions climatiques)
Transport ferroviaire	Rapidité, sécurité, capacité en volume et en poids	Desserte limitée par le réseau ferroviaire, rupture de charge.

Tableau I.2 – Comparaison des modes de transport

3 Transport multimodal

3.1 Les unités de transport intermodal

Les unités de transport intermodal cumulent des fonctions de protection des marchandises et d'aide à la manutention et au transport. Ces unités ont permis l'organisation des chaînes de transport intermodal, ont favorisé la baisse des coûts et ont rendu possible l'échange entre les modes. Il existe différentes formes d'UTI (Unités de Transport Intermodal). Dans le transport maritime, les UTI sont principalement les conteneurs 20 et 40 pieds qu'on appelle alors conteneurs maritimes. Ils existent des UTI qui essaient de combiner les deux qualités, comme le conteneur 45 PW : 45 pieds empilable avec les 20 et 40 pieds et compatible avec les euro-palettes. La simple remorque routière présente un avantage majeur de fait qu'elle existe en millions d'exemplaires en Europe et peut subir une manutention horizontale (ne nécessitant pas donc des investissements en superstructures et engins de manutention lourds). Une des problématiques de la norme ISO des conteneurs est qu'elle ne relève pas du système métrique (vu son origine américaine). Elle n'est donc pas efficacement compatible avec les palettes européennes. En effet, cette incompatibilité engendre un taux de remplissage médiocre et une nécessité de caler les marchandises. La caisse mobile (figure I.10) quant à elle (à usage terrestre

Chapitre I. Transport multimodal : généralités et état de l'art



Figure I.9 – Conteneur 20 pieds

en Europe) est plus large qu'un conteneur ISO et de structure plus légère donc n'est pas empilable sur plusieurs niveaux. Un autre exemple d'UTI est la semi-remorque qui permet une



Figure I.10 – Caisse mobile

bonne flexibilité pour le transport routier.

3.2 Choix politiques et écologiques

L'une des revendications de certains courants politiques (de sensibilité écologique) pour la réduction de l'impact du secteur du transport sur l'environnement est la taxation des modes polluants et la promotion des modes "écologiques". Une formule proposée pour l'application de cette politique passe par "l'internalisation des coûts externes" représentant les coûts des externalités négatives. Ainsi, le mode routier sera taxé par le coût correspondant à l'empreinte carbone générée. Néanmoins, plusieurs études et projets de recherche ont montré que l'internalisation des coûts externes ne réduirait pas suffisamment l'écart entre la route et les autres modes (ou les solutions intermodales) pour remettre ceux-ci dans le marché. La promotion de l'intermodalité passe donc, en grande partie, par l'amélioration de la compétitivité intrinsèque de ce service.

Un des exemples des textes sur les politiques de transport est le livre blanc de la commission européenne en matière de transport, suivie sur ce point par tous les gouvernements européens. En France, les conclusions de "Grenelle de l'environnement" établissent un cadre normatif pour une politique des transports.

4 Formes d'interface multimodales

Les formes d'interfaces multimodales sont l'ensemble de nœuds d'intersection des modes du transport. Elles jouent un rôle important dans la réussite de l'offre du transport multimodale.

4.1 Engins de manutention

Avant d'aborder les différentes formes d'interface modales, nous présentons les différents engins de manutention qui assurent le transbordement des UTI d'un mode à un autre, dans les formes d'interface multimodales.

4.1.1 Les grues et portiques de quai

Ils assurent le chargement et déchargement des navires et unités fluviales (figure I.11). Les dernières générations permettent la manutention des gros porte-conteneurs dans des temps très courts. Certains d'entre eux permettent de manutentionner plusieurs conteneurs à la fois.



Figure I.11 – Grue de quai

4.1.2 Les portiques ferroviaires et fluviaux

Ils permettent d'enjamber soit plusieurs voies ferrées, une ou deux voies routières et/ou des zones de dépose de conteneus (figure I.12). Ces portiques peuvent avoir des capacités de levage supérieures à 40 tonnes. Ils peuvent être équipés d'outils de préhension tournants (pincés ou spreaders) pour positionner les UTI perpendiculairement aux voies ferrées.



Figure I.12 – Portique ferroviaire

Les caractéristiques qui permettent de déterminer l'efficacité d'un portique sont : la vitesse de déplacement horizontale du portique appelée également vitesse de translation, la vitesse de levage, la vitesse horizontale du chariot ou vitesse de direction.

4.1.3 Reach stacker

Il permet de faire le transfert rail-route, le stockage et la réorganisation du parc des conteneurs (figure I.13). Les reach stacker sont équipés de spreaders ou pinces à l'extrémité de leurs bras de levage.



Figure I.13 – Reach stacker

4.1.4 Chariot cavalier

Le cavalier (straddle carrier) est un engin de manutention (70t à vide et 110t en charge) flexible aux performances élevées en vitesse notamment (figure I.14). Sa flexibilité résulte de son aptitude à prendre un conteneur, se déplacer rapidement et à déposer un conteneur par ses propres moyens contrairement à la plupart des autres équipements (remorque, AGV, Multi Trailer System). A l'exception des opérations de bord à quai, un cavalier peut effectuer l'ensemble des opérations de manutention sur un terminal, à savoir :

- Desservir les portiques bord à quai,
- Stocker les conteneurs sur le terre-plein sur 2 ou 3 hauteurs,
- Charger et décharger un véhicule routier, un wagon,
- Prendre un conteneur dans le stock pour l'acheminer vers une zone d'échange route ou rail et réciproquement.

4.1.5 AGV

Un AGV (Automated Guided Vehicle) est surtout un engin de transfert interne des conteneurs dans les terminaux portuaires automatisés (figure I.15). Ils permettent de faire le transfert



Figure I.14 – Chiot cavalier

des conteneurs d'une zone buffer vers les parcs de stockages.



Figure I.15 – AGV

Notons que la liste des engins de manutention est longue : on peut citer également les portiques de parc (automatiques ou pas) qui réalisent le stockage, le tri et l'organisation des conteneurs. Les front loader dont la principale mission est le stockage des conteneurs vides.

4.2 Les ports maritimes

Les ports maritimes de commerce constituent le point d'intersection de deux flux de marchandises bi-directionnels (import/export) et en quantités (navires de grandes capacités vers/

à partir des vecteurs de transport de capacités très inférieures). On trouve plusieurs types de ports maritimes selon leurs principales activités : les ports de commerce, les ports de pêche, les ports de plaisance, et les ports militaires. Les ports maritimes de commerce, qui nous intéressent dans ce document, servent à accueillir les navires de commerce. Ils s'occupent du trafic passager sur les ferries et les paquebots et/ou du transport de marchandises sur les navires cargo. Ils constituent l'un des maillons de la chaîne de transport multimodal.

Les premiers ports en termes de tonnage se trouvent actuellement en Asie surtout en Chine qui en détient sept sur les dix premiers au monde. Le tableau I.4 présente le classement des dix premiers ports de commerce dans le monde.

Rangs en 2014	Ports de commerce	Pays	trafic annuel en millions de tonnes
1	Port de Ningbo	Chine	873,0
2	Port de Shanghai	Chine	755,3
3	Port de Singapour	Singapour	580,8
4	Port de Tientsin	Chine	540,0
5	Port de Tangshan	Chine	500,8
6	Port de Canton	Chine	500,4
7	Port de Tsingtao	Chine	480,0
8	Port de Rotterdam	Pays-Bas	444,7
9	Port de Dalian	Chine	420,0
10	Port de Hedland	Australie	372,4

Tableau I.3 – Classement des principaux ports mondiaux

4.3 Terminaux de transport combiné rail-route

Un Terminal de Transport Combiné Rail-Route (TTCRR) est un terminal équipé d'installations nécessaires pour le transbordement des UTI des trains vers les camions et vice-versa. Les principaux facteurs à prendre en compte pour la conception d'un TTCRR sont :

- **Connectivité ferroviaire** : un bon TTCRR est un site bien raccordé au réseau ferroviaire, la facilité et la rapidité de la connexion ferroviaire du site sont un élément clé améliorant la performance d'un tel site. À souligner que pour les locomotives électriques, l'arrivée directe n'est possible que par rebroussement du fait que l'installation des caténaires interdit la manutention verticale par portique ou par grue mobile.
- **Proximité des clients** : la position géographique proche des zones clientes et infrastructures routières suffisamment dimensionnées.
- **Services associés** : cette conception doit comprendre une aire de stockage de conteneurs,

une zone de réparation des conteneurs et des moyens de transbordement nécessaires.

4.4 Terminaux de combiné fleuve-route

Ces terminaux sont destinés au transbordement des conteneurs des unités fluviales (barges et automoteurs) vers les camions et inversement. On y trouve les mêmes moyens de transfert utilisés dans les TTCRR, à savoir les portiques sur rail et les reachs stacker.

4.5 Nouvelles générations de terminaux multimodaux

Récemment, une nouvelle génération de terminaux multimodaux est apparue. D'autres configurations sont de plus en plus proposées par des sociétés d'ingénierie spécialisée dans le cadre de projet d'études. Généralement un système de transbordement doit présenter un ensemble de caractéristiques parmi lesquelles on peut citer :

- Une longueur suffisante des voies pour le traitement de trains complets du fait que les manœuvres pour fractionner les wagons sont coûteuses,
- Une bonne capacité de stockage temporaire des conteneurs,
- Des services (administratifs, commerciaux) qui améliorent l'attractivité du système de transbordement,
- La possibilité de traiter une large gamme d'UTI,
- Disponibilité des systèmes d'informations temps réels et des systèmes de suivi d'UTI.

4.5.1 Les ports secs

C'est un terminal situé à l'intérieur des terres pour le groupage/dégroupage, distribution/collecte de marchandises, ayant des fonctions similaires à celles d'un port maritime et comprenant des services de dédouanement. Ainsi, un port sec contient les installations pour la manutention des conteneurs et de la marchandise en vrac, les infrastructures de liaison aux autres modes de transport et des bâtiments des sociétés et organismes qui se chargent du transport des marchandises et des services, à savoir : inspection douanière, entreposage, entretien et réparation, paiement des taxes et liaisons bancaires aux moyens des technologies de l'information et de la communication.

4.5.2 Terminaux de transbordement rapide rail-rail

Ce sont des terminaux assurant le transbordement d'un ensemble de trains vers un autre ensemble de trains de correspondance pendant un arrêt très bref. La dernière génération de ce

type de terminaux comporte :

- Un système de manutention automatique des UTI basé sur plusieurs portiques qui se déplacent perpendiculairement aux voies (parfois une par wagon),
- Des buffers pour le stockage temporaire des boîtes parallèlement aux voies,
- Des navettes automatiques qui se déplacent parallèlement aux voies et qui permettent de déplacer les UTI d'une travée à une autre.

La figure I.16 montre un schéma d'un terminal de transbordement rapide de troisième génération.

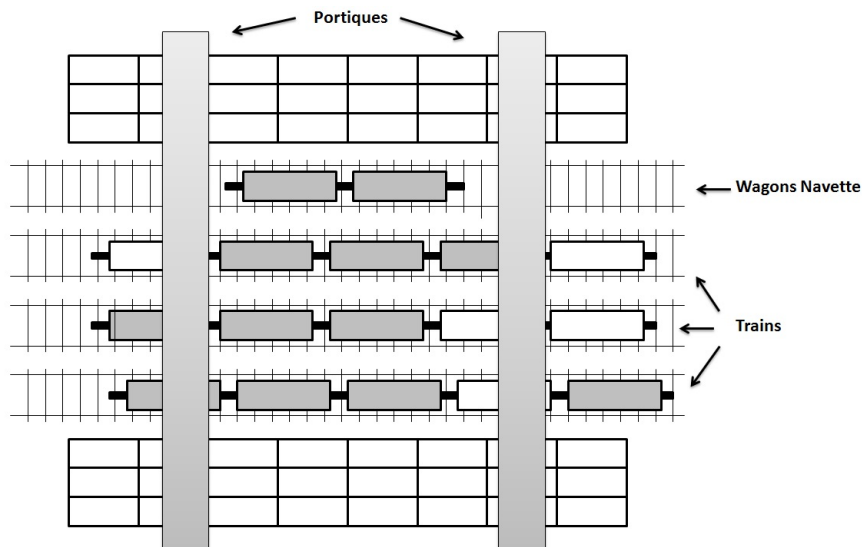


Figure I.16 – Terminal de transbordement rail-rail

Un exemple dans ce sens est le terminal multimodal du port du Havre. C'est un terminal qui sert à recevoir les conteneurs maritimes imports des terminaux à conteneurs via des navettes ferroviaires. Il offre la possibilité de transbordement trimodal rapide vers les trains, barges et camions. Ainsi, les conteneurs reçus des manutentionnaires sont dispatchés vers l'hinterland. Inversement, les conteneurs exports reçus de l'hinterland via les trains, camions et unités fluviales sont transférés via des navettes ferroviaires vers les terminaux à conteneurs. Ce terminal est équipé de deux portiques ferroviaires sur rail pour le transfert rapide rail-rail, de deux portiques pour le transfert fleuve-rail ainsi que des reach-stackers pour le transfert rail-route ou parc-route. Plus de détails sur ce terminal seront donnés plus loin dans cette thèse.

5 Différentes formes d'intermodalité

5.1 Transport combiné rail-route

On trouve ce type de transport combiné appelé également transport combiné non accompagné dans le cas de chargement des marchandises au départ des usines ou des entrepôts dans des conteneurs, caisses mobiles ou semi-remorques par route vers un premier terminal. Ensuite, les UTI sont transférées par train jusqu'au terminal de destination. Un ensemble routier se charge de la livraison du second terminal vers le destinataire (figure I.17). Une autre configuration de



Figure I.17 – Transport combiné rail-route

TCRR consiste en l'acheminement des conteneurs maritimes par le mode ferroviaire entre un port maritime et une plate-forme rail-route. Ici, le transport combiné est un prolongement des lignes maritimes utilisant les navires porte-conteneurs (figure I.18).



Figure I.18 – Transport combiné rail-route 2

5.2 Transport combiné fleuve-route

Dans la plupart des cas, le transport combiné fleuve-route est utilisé pour l'acheminement des conteneurs maritimes entre un port maritime et un port fluvial en utilisant des convois de barges ou des automoteurs puis en utilisant les camions pour faire le pré et post-acheminement (figure I.19). Une autre configuration du transport combiné fleuve route consiste à charger les marchandises au départ des usines ou des entrepôts dans des UTI qui sont acheminées par camion vers un terminal fleuve-route. Ces UTI sont transférées par unités fluviales jusqu'au terminal de destination. Un dernier transfert se fera par un camion entre le terminal de destination vers le client final. Voir la figure I.20



Figure I.19 – Transport combiné fleuve-route



Figure I.20 – Transport combiné fleuve-route 2

5.3 Ferroutage et autoroute ferroviaire

Le ferroutage est un type de transport combiné qui consiste à charger un véhicule sur un train pour la plus grande partie de son trajet. L'autoroute ferroviaire est une forme de ferroutage où des camions complets ou des remorques seules sont acheminés par voie ferrée sur des trains composés de wagons à plancher surbaissé sur toute leur longueur. C'est le principe appliqué à l'Eurotunnel sous la Manche (navettes) ou pour traverser la Suisse ou la France (Betembourg/Perpignan).



Figure I.21 – Autoroute ferroviaire

5.4 Merroulage

5.4.1 Le feeding maritime

Le feeding est le processus de collecte et de distribution par des navires feeders (navires collecteurs/distributeurs) des conteneurs entre des ports de petite taille et des ports plus grands. Les lignes maritimes feeders sont mises en place comme solution au gigantisme des navires portes-conteneurs ne pouvant pas délivrer tous les ports (figure I.22).



Figure I.22 – Feeder maritime

5.4.2 Le roulier

Le roulier est un navire spécialisé pour le transport de véhicules routiers pour la traversée d'une mer ou d'un océan. Le roulier est connu sous son appellation anglaise RO-RO qui vient de "Roll on, Roll of" et qui signifie littéralement "roule dedans, roule dehors" pour exprimer la méthode de chargement horizontale (figure I.23).



Figure I.23 – Roulier RORO

6 Organisation logistique et commerciale des chaînes de transport multimodal

6.1 Principaux acteurs de transport intermodal

- **Les chargeurs** : appelés également donneurs d'ordre ou expéditeurs sont les entreprises clientes qui peuvent confier à d'autres (commissionnaires ou transporteur) les missions d'acheminer leurs marchandises à des destinataires,
- **Les commissionnaires de transport** : Ce sont des sociétés de logistique et de transport qui proposent des prestations d'acheminement des marchandises de porte à porte à ses clients (les chargeurs) en utilisant les services d'un ou plusieurs opérateurs de transport combiné,
- **Exploitant de plateforme** : C'est souvent le propriétaire des équipements d'une plateforme. Il assure généralement les opérations de transfert (manutention, stockage) ou les sous-traite à un opérateur tiers. Dans le cas des ports maritimes, les activités d'exploitation sont cédées à des entreprises privées (les manutentionnaires) qui sont parfois des filiales des grands armateurs et qui sont sous-traitantes de ces derniers.

I.6 Organisation logistique et commerciale des chaînes de transport multimodal

- **Gestionnaires d'infrastructures** : Ce sont les gestionnaires des infrastructures des différents maillons de la chaîne du transport intermodal. Sur le ferroviaire, l'opérateur historique SNCF en France est un gestionnaire de l'exploitation du réseau tandis que RFF (Réseau Ferroviaire de France) est le propriétaire de réseau. Sur les ports maritimes, les Grands Ports Maritimes constituent l'autorité portuaire gérante des infrastructures, ils sous-traitent l'exploitation et la maintenance des infrastructures aux exploitants (manutentionnaires),
- **Opérateurs de transport combiné** : Il peut s'agir d'une entreprise ou d'un artisan propriétaire des barges dans le cas de transport combiné fleuve-route ou d'une entreprise ferroviaire qui achète des prestations de traction ferroviaire à une entreprise spécialisée.

6.2 Organisation du transport intermodal

Une bonne organisation d'une chaîne de transport intermodal doit assurer une continuité technique (gabarit, caténaire dans le cas de la rail-route), organisationnelle et commerciale des multiples maillons constituant la chaîne. Cette continuité multidimensionnelle est appelée "interopérabilité" entre les modes. Elle inclut une flexibilité de transition d'un mode du transport à un autre, une continuité technique, une efficacité commerciale et la facilité de communication entre les différents opérateurs de modes de transport.

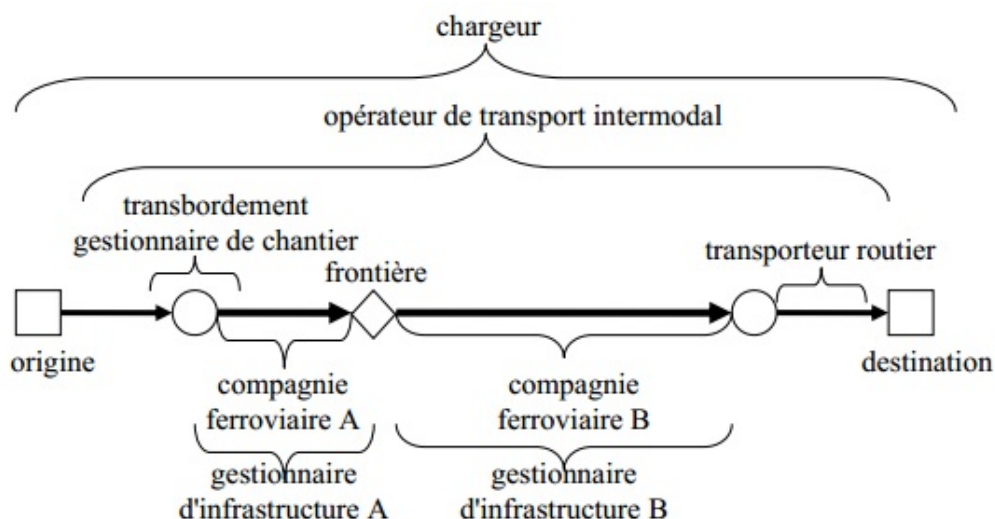


Figure I.24 – Organisation d'une chaîne de rail-route

L'organisation des offres de transport uni et multimodal se présente sous forme de deux

systèmes différents : système transversal et système dédié. Le tableau suivant montre les caractéristiques des deux systèmes pour les différents modes de transport.

	Système transversal	Système dédié
Caractéristiques	planifié, multiclients, économie d'envergure, standard	A la demande, dédié, économie d'échelle, différencié
Route	lot partiel, colis	lot complet
Mer	lignes, conteneurs	tramping vrac
Rail	wagons isolés	trains complets
Intermodal rail-route	opérateurs historiques	nouveaux opérateurs

Tableau I.4 – Modèles d'organisation de Fret selon les modes

7 Transport multimodal : état de l'art

Avant de donner un état de l'art sur la multimodalité. Nous présentons les travaux de synthèse (reviews) sur ce sujet. En effet, dans [Crainic et Kim,2006], nous trouvons une synthèse de travaux jusqu'à 2005. Le papier de [SteadieSeifi et al.,2014] couvre les travaux de 2005 à 2013. [Bontekoning et Macharis,2004] donnent un état de l'art des travaux jusqu'à 2004 d'un point de vue méthodologique en prévoyant l'émergence d'un domaine de recherche propre sur l'intermodalité. [Macharis et Bontekoning,2004] présentent une synthèse de travaux sur le transport intermodal de marchandises en particulier ceux de la recherche opérationnelle. D'autres travaux de synthèse sont donnés par [Ishfaq et Sox,2010] et [Ishfaq et Sox,2011].

7.1 Problématique de définition

La notion de multimodalité dans les réseaux du transport est une thématique qui a attiré l'attention de nombreux chercheurs. Néanmoins, ce concept signifie plusieurs choses pour différentes personnes [Crainic et Kim,2006]. En effet, il n'y a aucune définition consensuelle du transport intermodal en dépit de l'intérêt qu'il suscite pour les industriels et les gouvernements. Les mots multimodal, intermodal ou transport combiné sont souvent utilisés comme synonymes, bien que les mots ne soient pas entièrement interchangeables [Pedersen et Madsen,2005].

Plusieurs organismes, entreprises et gouvernements ont proposé leurs propres définitions. Ainsi, le transport multimodal est défini par la commission européenne [UNECE,2009] comme le transport de marchandises par au moins deux modes de transport différents. Le transport multimodal s'est développé principalement en raison de la nécessité d'assurer la poursuite de

transport terrestre de fret maritime. Un exemple illustratif de la multimodalité est le trafic croissant de conteneurs entre les terminaux maritimes d'un port de commerce avec son hinterland où plusieurs millions de conteneurs sont transférés par route, le rail ou par les voies navigables (fluviales). En 1991, le ministère des transports des États-Unis a montré dans ISTEA (une loi sur l'efficacité de transport intermodal) que : le système de transport intermodal est constitué de toutes les formes de transport de manière unifiée et interconnectée, la promotion de l'intermodalité doit viser la réduction de la consommation d'énergie et de la pollution de l'air tout en favorisant le développement économique et le commerce international de la Nation [Jones et al.,2000]. Transports CNC, une société française spécialisée dans les services de transport et de logistique intermodale présente la définition suivante pour le transport intermodal : c'est le transport de marchandises par une combinaison d'au moins deux modes de transport au sein de la même chaîne de transport, au cours de laquelle il n'y a pas de changement d'unités de chargement utilisées et dont la majeure partie du voyage est par chemin de fer, voie navigable ou par mer, tandis que les parties initiale et finale du voyage sont effectuées par la route et sont les plus courtes possibles [Jones et al.,2000].

Récemment, de nouveaux termes sont apparus comme : le transport co-modal, qui peut être défini comme le transport qui se concentre sur l'utilisation efficace des différents modes de transport isolément ou en combinaison. Cette même co-modalité est définie par la Commission des Communautés européennes [UNECE,2009] comme l'utilisation de deux ou plusieurs modes de transport, mais avec deux différences particulières de la multimodalité : (i) elle est utilisée par un groupe ou un consortium d'expéditeurs de la chaîne, et (ii) les modes de transport sont utilisés d'une façon plus intelligente afin de profiter des avantages de tous les modes et en assurant une performance globale [Verweij,2011]. Le transport synchronodal se positionne comme la prochaine étape après le transport intermodal et co-modal, et implique une combinaison structurée, efficace et synchronisée de deux ou plusieurs modes de transport. Grâce au transport synchronodal, les transporteurs ou les clients ont la possibilité de choisir, à tout moment, le meilleur mode en fonction des circonstances opérationnelles et/ou les exigences du client [Verweij,2011].

Pour récapituler, un transport multimodal est tout transport qui fait appel à plusieurs modes de transport. L'intermodalité en est un cas particulier qui signifie du transport de marchandises, sous forme d'unités de chargement standards, en utilisant au moins deux modes de transport différents. Le combiné quant à lui est une forme d'intermodalité où les marchandises sont acheminées d'un expéditeur à un destinataire et dont le premier et le dernier parcours sont effectués par route et le parcours principal (le plus long) par route, fer, fleuve, mer ou par avion.

7.2 Problèmes stratégiques

Les problèmes stratégiques concernent les problèmes de planification sur le long terme. La majorité de ces problèmes dans notre cas sont des problèmes de localisation de plateformes connus en littérature scientifique par *hub location problems*. On distingue plusieurs variantes dont :

1. **Problème p-hub médian** : il s'agit de localisation de p hubs (plateformes) et l'affectation des nœuds non hubs aux hubs. On trouve deux variantes :

- **Affectation simple** : le nœud (client) ne peut expédier/recevoir qu'à une seule plateforme.

[O'Kelly,1987] est le premier qui a présenté une formulation reconnue du problème. L'objectif est la minimisation du coût total du transport (le temps, distance) pour satisfaire l'ensemble donné des flots. L'expression de la fonction objectif est :

$$\text{Min} \sum_i \sum_j W_{ij} (\sum_k X_{ik} C_{ik} + \sum_m X_{jm} C_{jm} + \alpha \sum_{jm} X_{ik} X_{jm} C_{km})$$

Où W_{ij} est le flot entre les nœuds i et j et C_{ij} est le coût du transport d'une unité de flot entre i et j et X_{ik} est une variable de décision égale à 1 si le nœud i est alloué au hub k , 0 sinon. Les contraintes du problème sont les contraintes classiques de conservation des flots, de localisation d'un nombre déterminé p de hubs et de l'affectation unique de chaque nœud à un hub. Exemples : [Campbell,1994] a présenté un programme linéaire à variables entières avec des seuils de flux minimaux pour permettre de servir une liaison. [Elhedli et Hu,2005] : proposent une modélisation avec une fonction de coût convexe non linéaire, ils ont proposé une linéarisation par relation lagrangienne. [Ernst et Krishnamoorthy,1996] proposent une formulation qui requiert moins de variables et contraintes et qui traite les transferts inter hubs.

- **Affectation multiple** : le nœud peut expédier /recevoir de plusieurs hubs.

[Campbell,1992] est le premier qui a formulé le problème de l'allocation multiple comme un problème linéaire entier. [Skorin-kapov et O'Kelly,1996] ont proposé une autre formulation avec moins de contraintes. [Ernst et Krishnamoorthy,1998] ont proposé une formulation plus efficace que celle de [Skorin-kapov et O'Kelly,1996].

2. **Avec coûts fixes** : prise en compte d'un coût fixe d'ouverture des plateformes.

[Abdinnoun-Helm,1998] ont proposé une méthode taboue comme méthode de résolution. [Yoon et Current,08] quant à eux ont proposé un programme linéaire à variables mixtes qui prend en compte le coût fixe de l'ouverture des plateformes ainsi que la création et

l'utilisation des arcs [Topcuoglu et al.,2005] [Aykin,1994].

3. **Problème de p-hub centre** : il consiste à minimiser la distance maximale entre chaque nœud et la plateforme la plus proche.

[Campbell,1994] définit trois variantes du problème. [Ernst et al.,2009]et [Sim et al.,2009] proposent une version stochastique du problème.

4. **Problème de recouvrement des hubs** : les nœuds de demande sont couverts s'ils sont à une distance spécifique du hub ou l'objectif est la minimisation des coûts d'ouverture d'un hub et la maximisation de la demande couverte.

[Kara et Tansel,2003] plusieurs modèles avec leurs linéarisations.

D'autres problèmes de localisation de hubs sont définis avec d'autres contraintes ou en prenant en compte d'autres situations dont on peut citer la localisation avec composante de transport (hub location-allocation problem) qui consiste à choisir les arcs du réseau pour que les marchandises circulent entre origine-destination au coût le plus bas. Ainsi, [Racunicam et Wynter,2005] ont présenté un modèle pour la localisation optimale des hubs intermodaux de fret. Ils ont utilisé une fonction du coût non linéaire concave pour prendre en compte l'économie d'échelle générée sur les arcs inter hubs.

7.3 Problèmes tactiques

Les problèmes tactiques traitent l'utilisation optimale des infrastructures en choisissant les modes de transport et les services associés, l'affectation des capacités aux demandes et la planification de leurs itinéraires et fréquences. Ces problèmes se déclinent en deux grandes classes : problèmes de planification des flots sur les réseaux connus en anglais par Network Flow Planning (NFP) et les problèmes de conception des réseaux de service ou Service Network Design (SND). Le premier groupe de problèmes concerne les décisions relatives à la planification des mouvements de commandes. Le second comprend le choix des services de transport et les modes (ou leurs combinaisons) pour la satisfaction des demandes. Le tableau I.5 donne un inventaire de certains travaux d'ordre tactique avec leurs principales caractéristiques.

Chapitre I. Transport multimodal : généralités et état de l'art

Référence	Mode	Groupe	Transbordement	Fonction objectif
[Cohn et al.,2008]	Routier, aérien	NFP	Non	Coût selon le mode
[Meng et Wang,2011b]	Maritime	NFP	Oui	Coût de transport vide
[Verma et Verter,2010]	Rail	NFP	Oui	Exposition aux matières dangereuses
[Verma et al.,2012]	Rail	NFP	Oui	Exposition aux matières dangereuses
[Anghinolfi et al.,2011]	Rail	SND	Oui	Coût de transbordement et pénalité de demandes non satisfaites
[Ayar et Yaman,2012]	Routier, maritime	SND	Non	Pénalité d'attente aux terminaux
[Caris et Macharis,2012]	Fluvial	SND	Non	Coût d'utilisation d'arcs et pénalité d'attente aux terminaux
[Crainic et Kim,2007]	Rail-route	SND	Non	Temps de service
[Cho et al.,2012]	Rail,aérien, maritime	SND	Non	Temps de service
[Lin et Chen,2008]	Routier, aérien	SND	Oui	Coût de transbordement
[Pazour et al.,2010]	Rail-route	SND	Non	Bi-niveaux : minimiser le temps et maximiser le profit
[Agarwal et Ergun,2008]	Maritime	SND	Oui	Maximiser le profit
[Andersen et al.,2009]	Rail	SND	Non	temps d'attente
[Puetzman et Stadtler,2010]	Rail	SND	Non	Coût de sous-traitance
[Zhu et al.,2014]	Rail	SND	Oui	Maximiser le profit

Tableau I.5 – Problèmes tactiques

7.4 Problèmes opérationnels

Les problèmes qui se rapportent à la multimodalité au niveau opérationnel concernent les décisions sur le choix des services et des modes de transport ainsi que l'affectation des ressources, mais en temps réel. [Erera et al.,2005] étudient un problème de repositionnement des conteneurs vides dans un cas réel de 100 ports. [Chang et al.,2008] traitent le problème de substitution des conteneurs. Leurs papiers supposent la possibilité d'échange de conteneurs entre clients sans passer par les terminaux. [Di Francesco et al.,2013] étudient le même problème de repositionnement des conteneurs vides, mais en tenant en compte des incertitudes sur la position des conteneurs et sur les routes. [Goel,2010] a étudié la valeur de l'utilisation de la technologie RFID sur la visibilité des expéditions à travers un réseau de transport multimodal rail-route. [Bock,2010] a proposé un algorithme de recherche de voisinage pour la résolution du problème de planification des itinéraires.

7.5 Tendances et perspectives

La multimodalité, malgré son caractère polysémique, constitue l'un des domaines en développement continu en recherche et en industrie. Elle ouvre le chemin vers de nouveaux horizons de recherche et d'innovation en matière de gestion des réseaux de transport. Ainsi, des nouvelles notions comme la mutualisation, la synchronodalité et l'internet physique constituent des thématiques en pleine essor. Elles constituent l'étape suivante du développement de l'intermodalité.

7.5.1 La mutualisation

La mutualisation est une approche collaborative d'organisation du transport entre plusieurs acteurs industriel(s) et/ ou distributeur(s), et, le cas échéant, un prestataire logistique en vue d'optimiser le transport physique et d'améliorer le taux de remplissage du matériel roulant [Pan,2010]. Ceci présuppose de partager le planning de chargement et de livraison. La mutualisation du transport a un caractère multidimensionnel : mutualisation des capacités des véhicules pour optimiser les taux de remplissage, mutualisation des flux de marchandises pour diminuer les trajets à vide, mutualisation des achats des prestations pour bénéficier d'une éventuelle économie d'échelle, etc. Ainsi, une utilisation prospective intense de la mutualisation générera des grands flux de marchandises. Ces grosses quantités de flux futurs générées sont justement la condition sine qua non pour le développement de transport intermodal.

7.5.2 La synchronodalité

Le mot synchronodalité vient de la contraction des deux mots : synchronisation et multimodalité. C'est un nouveau concept d'organisation des flux des UTI où tous les modes de transport seront sollicités simultanément et si possible en temps réel pour acheminer ces flux des UTI. L'idée principale est de pouvoir combler toute rupture de chaîne d'un mode du transport en faisant appel à un autre mode du transport disponible. Pour autant, la synchronodalité nécessite que le contrat entre le commissionnaire de transport et le chargeur laisse la possibilité au commissionnaire de changer de mode de transport à tout moment.

7.5.3 L'internet physique

L'internet physique est un nouveau concept qui a l'ambition de bâtir un système logistique mondiale ouvert similaire à l'internet numérique fondé sur l'interconnectivité physique, numérique et opérationnelle [Montreuil,2011]. Dans le manifeste de l'internet physique, papier fondateur de l'initiative, les objectifs de l'internet physique étaient de : *transformer la façon dont les objets physiques sont manipulés, déplacés, entreposés, réalisés, fournis et utilisés, visant à atteindre une meilleure efficacité logistique et une bonne durabilité globale*. L'internet physique s'est développé en remarquant que l'internet digital ne transmet pas d'informations : il transmet des paquets d'informations. Ces paquets sont conçus pour faciliter l'utilisation de l'internet numérique. Les informations contenues dans un paquet sont encapsulées et ne sont pas traitées par le réseau. L'en-tête du paquet contient toutes les informations nécessaires à son identification et à son acheminement jusqu'à destination. Un paquet est conçu pour une transmission spécifique et il est démonté une fois qu'il a atteint sa destination. L'internet digital est basé sur un protocole de transmission de paquets de données indépendamment de l'équipement. De la même façon, l'internet physique ne manipule pas directement les biens physiques, elle manipule exclusivement des conteneurs (appelés π -conteneurs) qui sont explicitement conçus pour l'internet physique et qui encapsulent des biens physiques.

8 Conclusion

Nous avons présenté des généralités sur le transport multimodal des marchandises. Nous avons commencé par l'introduction des caractéristiques des modes de transport de base. Les principales notions comme les unités de transport intermodales et les engins de leurs maintenances sont abordées. Ensuite nous avons présenté les différentes formes d'interface intermodale qui constituent les points de liaison des modes de base. Puis nous avons détaillé les principales

formes d'intermodalité comme les transport combiné rail-route, fleuve-route, ferroutage et roulier suivies de l'organisation logistique des chaînes du transport intermodal. Un état de l'art sur les problèmes du transport multimodal des marchandises suivant les différents horizons de planification a été présenté.

Chapitre II

Localisation des terminaux intermodaux : modélisation et résolution

1 Introduction

Commencé déjà il y a des années, le processus de mondialisation exige de plus en plus de réseaux et d'interconnexions. Les répercussions dans les domaines de transport et la logistique se manifestent par une concurrence acharnée entre les acteurs de la chaîne logistique pour offrir les meilleurs services à moindre coût. La quête de la compétitivité économique va désormais au-delà de la simple et traditionnelle organisation de l'offre logistique en cherchant une meilleure combinaison/gestion des différents modes de transports et des différents acteurs du secteur. Une bonne organisation d'une chaîne de transport pour un client passe par l'identification du mode et/ou de la combinaison des modes de transport comportant des "points de transfert" appropriés pour permettre une performance globale.

Historiquement, le catalyseur de ces nouvelles offres de transport intermodaux/combinés est l'invention du conteneur qui a beaucoup simplifié les opérations de manutention et de transfert entre les différents modes de transport. L'utilisation des conteneurs a révélé la complémentarité potentielle entre les différents systèmes de transport de marchandises en offrant une meilleure fluidité des mouvements et une standardisation des chargements. On peut même dire que le conteneur a catalysé le développement et la diffusion du transport intermodal et qu'il est à l'origine des différentes mutations qu'a connues le domaine des transports. À travers la réduction des temps de manutention, des charges de travail, des temps d'empotage/rempotage, le conteneur permet une amélioration considérable de l'efficacité dans le secteur de transport. Néanmoins, le transport intermodal est loin d'être une alternative économique au transport routier à cause de la fragilité de ses infrastructures et du degré actuel de la connectivité des différents modes de transport. Pour améliorer son attractivité, la localisation des terminaux intermodaux joue

un rôle décisif dans la conception d'un réseau de transport intermodal compétitif. Ce chapitre sera consacré à l'étude du problème de la localisation des terminaux intermodaux. Nous allons commencer par l'introduction des réseaux en étoile qui sont considérés comme l'ancêtre des réseaux de transport intermodal, puis nous présentons une description du problème et ses formulations mathématiques. Ensuite, nous détaillons notre approche de résolution par algorithme génétique. Après, nous proposons une nouvelle approximation du coût de transport intermodal et nous terminons par les résultats numériques.

2 Réseaux en étoile

Malgré la singularité du problème de localisation des terminaux intermodaux, celui-ci peut être assimilé à celui de la localisation des plateformes dans les réseaux en étoile connus sous l'appellation anglaise "hub and spoke" qu'on peut traduire littéralement par "Moyeu et rayon". Le terme "hub" est un anglicisme qui désigne un point central d'un réseau (transport, informatique). Les termes équivalents en français sont : plate-forme de correspondance, pôle ou plaque tournante . Dans le domaine de transport, les hubs sont des centres équipés d'installations et qui servent à la redirection, le transfert et le tri dans les systèmes de distribution de type "many-to-many" [Crainic et Kim,2006]. Au lieu de servir chaque paire origine-destination de façon directe, les réseaux de type "hub and spoke" massifient les flux de marchandises pour bénéficier des avantages de l'économie d'échelle [Racunicam et Wynter,2005]. C'est un type de configuration qui s'est développé plus particulièrement en aéronautique, il consiste à mettre en place des vols long-courriers effectués par des très gros porteurs (tel que l'A380), entre les grands aéroports. Les passagers changent ensuite d'avion, et sont amenés à leur lieu de destination par un avion plus modeste. Les plus grands hubs aériens se trouvent aux États-Unis où l'avion assure 90 % des transports publics entre les villes. Le premier travail connu dans la littérature scientifique sur la localisation des hubs est réalisé par [O'Kelly,1987] dans lequel il a présenté la première formulation basique du problème. Actuellement, nous avons à disposition une littérature riche et variée comportant des articles relatifs à l'état de l'art et de nombreux articles de recherche. Plus de détails concernant les problèmes de l'unique/multiple, affectation/localisation, p-hub médian sont largement étudiés dans les articles de [Campbell,1994], [Campbell,1996],[Campbell et al.,2002], [O'Kelly,1987],[O'Kelly et Bryan,1998], [Alumur et Kara,2008]. Un terminal de transport intermodal n'est pas un simple point d'intersection entre deux modes de transport. C'est un maillon critique de la chaîne de transport intermodal. Il assure un rôle de concentration/éclatement de flux et remplit plusieurs fonctions qui constituent un facteur déterminant de sa compétitivité.

Parmi ces fonctions on peut citer :

2.1 Fonctions administratives

- Contrôle à l'entrée du site/réception des conducteurs routiers,
- Gestion et attribution des capacités sur le train/réservation,
- Gestion du personnel du site,
- Gestion administrative du dépôt et de stockage des conteneurs,

2.2 Fonctions d'exploitation

- Transbordement rail-route,
- Manœuvres et tri des wagons et des conteneurs,
- Stockage et éventuellement réparation des conteneurs.

3 Position du problème

Le problème à étudier consiste à déterminer le meilleur plan de routage d'un ensemble de demandes dans un réseau à doubles modes (camions et trains). Cette planification comportera d'abord, l'ouverture d'un ensemble de terminaux choisis parmi un ensemble de sites candidats (sites potentiels). La marchandise demandée par un ensemble de clients peut être transportée par route (en camions) ou en utilisant une combinaison camion-train (transport intermodal). Donc la résolution du problème doit déterminer les quantités à transporter unimodalement (par route) et les quantités à transporter via la combinaison intermodale. La figure II.1 montre un réseau de 3 clients et de 3 terminaux intermodaux. Aux trois clients i_1, i_2, i_3 sont associés un ensemble de demandes qu'on peut acheminer directement ou à travers les terminaux T_1, T_2, T_3 .

4 Formulation mathématique

[Arnold et al.,2001] ont proposé la première formulation du problème de la localisation des terminaux intermodaux. [Sørensen et al.,2012] ont proposé une formulation améliorée du problème comme suit :

Paramètres

- I : ensemble de tous les clients,

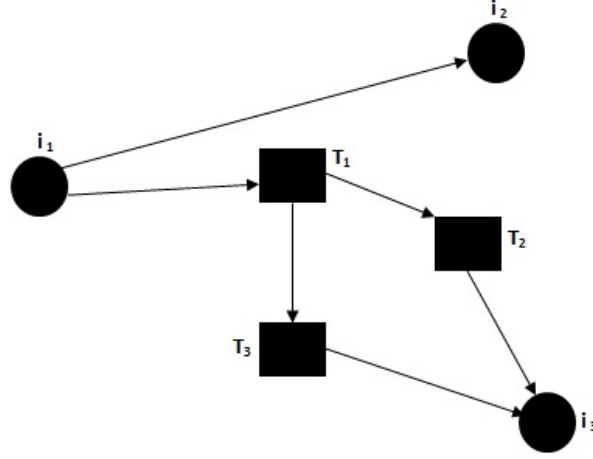


Figure II.1 – Réseau intermodal simple

- K : ensemble de tous les sites potentiels,
- q_{ij} : la quantité totale de la marchandise à transporter de i à j ,
- c_{ij} : le coût unitaire de transport par route de i à j ,
- c_{ij}^{km} : le coût unitaire de transport intermodal de i à j via les deux terminaux k et m ,
- C_k : capacité du terminal k ,
- F_k : coût de l'installation de k .

Variables de décision

- y_k : variable binaire égale 1 si k est un terminal , 0 sinon,
- w_{ij} : fraction de q_{ij} transportée par camion de i à j ,
- x_{ij}^{km} : fraction de q_{ij} acheminée de i à j via les terminaux k et m .

$$\text{Min } \sum_{i,j \in I} \sum_{k,m \in K} c_{ij}^{km} x_{ij}^{km} + \sum_{i,j \in I} c_{ij} w_{ij} + \sum_{k \in K} F_k y_k \quad (\text{II.1})$$

Sous les contraintes :

$$x_{ij}^{km} \leq q_{ij} y_k, \forall k, m \in K, \forall i, j \in I \quad (\text{II.2})$$

$$x_{ij}^{km} \leq q_{ij} y_m, \forall k, m \in K, \forall i, j \in I \quad (\text{II.3})$$

$$\sum_{k,m \in K} x_{ij}^{km} + w_{ij} = q_{ij}, \forall i, j \in I \quad (\text{II.4})$$

$$\sum_{i,j \in I} \sum_{k \in K} x_{ij}^{km} + \sum_{i,j \in I} \sum_{m \in K} x_{ij}^{km} \leq C_k, \forall k, m \in K \quad (\text{II.5})$$

$$x_{ij}^{kk} = 0, \forall i, j \in I, \forall k \in K \quad (\text{II.6})$$

$$w_{ij} \geq 0, x_{ij}^{km} \geq 0, y_k \in \{0, 1\}, \forall i, j \in I, \forall k, m \in K \quad (\text{II.7})$$

La fonction objectif minimise le coût de transport des différentes quantités de marchandises et le coût de l'installation des terminaux. En effet, le premier terme exprime le coût de transport par route du client i vers le terminal de départ k , puis le coût de transport par rail du terminal de départ k vers le terminal de destination m , puis le coût de transport par route du terminal m vers le client j . Le deuxième terme exprime le coût de transport des quantités de marchandises routées directement entre des clients i et j . Le troisième terme exprime le coût d'investissement nécessaire à l'installation des terminaux. Les contraintes (II.2) et (II.3) imposent de ne pas dépasser la quantité maximale à transporter entre les terminaux et excluent les terminaux non ouverts du plan de transport. La contrainte (II.4) stipule que la somme des quantités de marchandises transportées par route et de celles transportées par la combinaison route-rail est égale à la quantité globale à transporter entre deux clients i, j . La contrainte II.5 impose de ne pas dépasser la capacité des terminaux. La contrainte (II.6) interdit l'utilisation d'un seul terminal intermodal. Les contraintes (II.7) sont des contraintes classiques de positivité et d'intégrité des variables de décision. Récemment, Lin et al. (2014) ont prouvé que les trois contraintes (II.2), (II.3), (II.5) sont équivalentes à la seule contrainte suivante :

$$\sum_{i,j \in I} \sum_{k \in K} x_{ij}^{km} + \sum_{i,j \in I} \sum_{m \in K} x_{ij}^{km} \leq C_k y_k, \forall k, m \in K \quad (\text{II.8})$$

Cette dernière contrainte II.8 simplifie considérablement le problème en réduisant le nombre de contraintes. Pour cette raison, nous considérons le modèle avec cette contrainte, mais en utilisant une nouvelle approximation du coût de transport intermodal que nous introduisons dans la section suivante. Le programme mathématique est un programme linéaire avec variables mixtes (Mixed Integer Program). Si $|I| = |J| = |K| = n$ est assez grand, le problème sera de grande taille et fortement contraint. [Sörensen et al.,2012] ont montré, en utilisant une réduction polynomiale de ce problème vers le problème de l'emplacement des installations avec capacités,

qu'il est NP-difficile, il n'existe donc aucun algorithme exact qui peut résoudre ce problème en un temps polynomial (raisonnable). Nous proposons donc une résolution par les métaheuristiques.

5 Evaluation du coût intermodal

Une chaîne du transport intermodal est composée globalement de trois segments : le pré-acheminement (pre-haul en anglais ou le premier kilomètre pour la collecte), l'acheminement (le transfert intermédiaire), et le post-acheminement (end-haul en anglais ou le dernier kilomètre pour la livraison). Dans la majorité des cas, le pré et le post-acheminement sont effectués par la route et l'acheminement est effectué soit : par la route, le rail, l'avion ou les voies d'eau. Un exemple illustratif typique d'une telle chaîne est donné dans la figure II.2 :

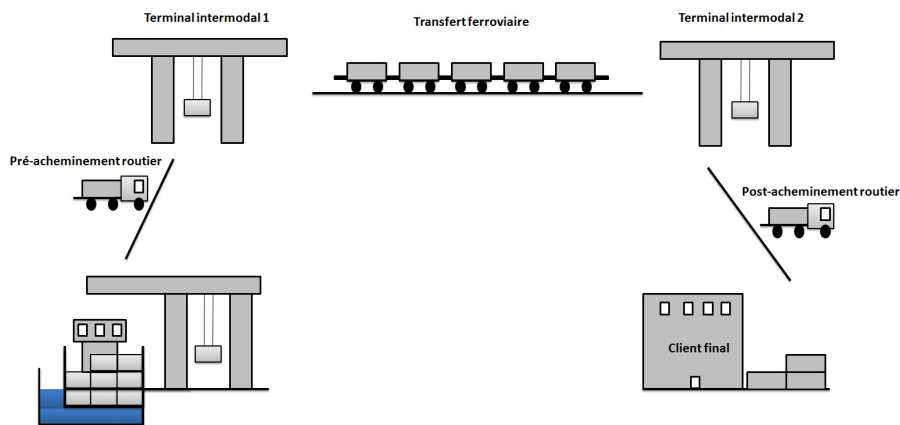


Figure II.2 – Chaîne typique de transport intermodal

La fonction coût de transport intermodal peut être écrite comme $\phi(x, z)$, où x est la variable flux et le z est la variable de localisation. Autrement dit, cette fonction dépend de la quantité des marchandises (x) et du coût de transfert dans les terminaux intermodaux localisés en z (les coûts de manutention). Malgré l'économie d'échelle engendrée par les grandes quantités de marchandises dans le deuxième segment, nous devons prendre en considération les coûts de manutention localisés dans chaque terminal utilisé. Dans la plupart des cas, nous pouvons économiser jusqu'à 75% sur les coûts de transport en ferroviaire par rapport à la route notamment sur les grandes distances (supérieure à 300 Km considérée comme le seuil de pertinence du mode ferroviaire). [Sørensen et al.,2012] (et [Lin et al.,2014] après) ont considéré qu'on peut faire l'approximation suivante pour le coût de transport intermodal entre l'expéditeur i et le

destinataire j en passant par les deux terminaux k et m :

$$C_{ij}^{km} = C_{ik} + \frac{1}{2}C_{km} + C_{mj}$$

C'est vrai que dans un plan de transport intermodal rail-route en Europe, la traction ferroviaire ne représente que 56 % du coût total et les opérations terminales représentent 25 %. La figure II.3 montre la segmentation d'un coût de transport intermodal.

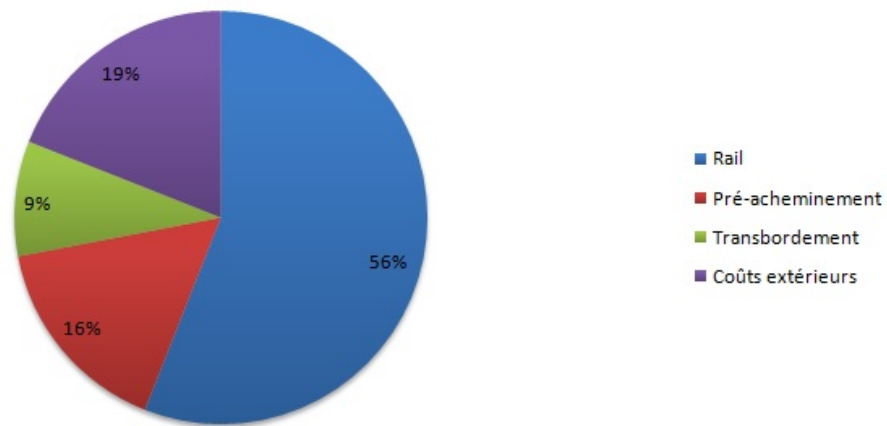


Figure II.3 – Composition de coût de transport intermodal

Néanmoins, dans la réalité, le pré et le post acheminement restent les segments les plus contraignants dans la majorité des cas si on prend en considération les coûts de manutention sur les terminaux, les coûts d'organisation, les retours à vide et d'autres limitations d'ordre juridique surtout dans la logistique urbaine. Pour cette raison, nous proposons une approximation plus réaliste pour le coût du transport intermodal comme suit :

$$C_{ij}^{km} = \alpha_1 C_{ik} + \alpha_2 C_{km} + \alpha_3 C_{mj}$$

avec

$$\alpha_1, \alpha_3 > 1, \alpha_2 < 1$$

Les paramètres α_1, α_3 dépendent de plusieurs facteurs et varient d'un contexte à l'autre. En effet, ces paramètres qui donnent le coût de pré et post-acheminement par rapport à un coût standard dépendent par exemple de l'engin de manutention et du service logistique utilisé. Par exemple, un préacheminement à partir d'un port maritime ayant un personnel docker moins polyvalent, plus chère et moins flexible en carrier haulage (acheminement par le chargeur maritime) est

plus chère qu'un pré routage à partir d'un centre logistique en merchant haulage (acheminement par le chargeur). La figure II.4 montre la variation de la moyenne des distances entre terminaux en fonction des coûts des pré et post-acheminement. On peut remarquer la réduction de seuil de pertinence du ferroviaire en réduisant les coûts de post et pré-acheminement.

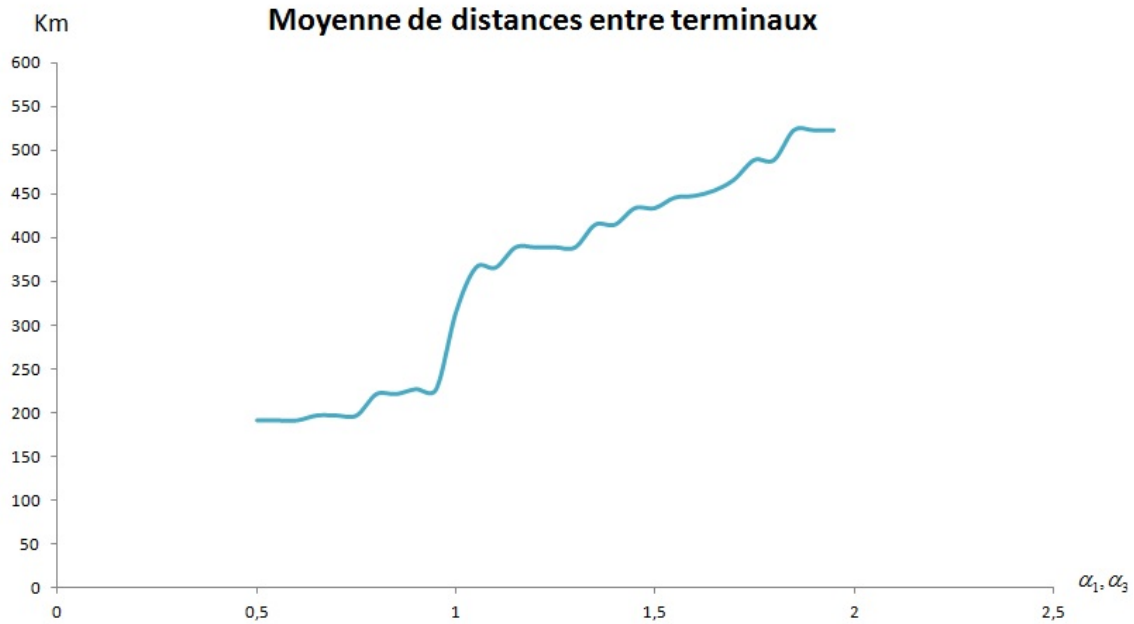


Figure II.4 – Seuil de pertinence ferroviaire en fonction des coûts de pré et post-acheminement

Pour les tests numériques qui suivent, nous prenons $\alpha_1 = \alpha_3 = 1,5, \alpha_2 = 0,75$. Ces valeurs considérées sont une approximation moyenne des coûts actuels du transport combiné appliqués en France.

6 Résolution par algorithme génétique

Inspirée de la génétique des populations, un algorithme génétique (AG) est un algorithme de recherche stochastique de bonnes solutions dans les espaces de recherche les plus larges. Sa forme canonique a été développée par Goldberg (1989) puis il a connu des extensions et des adaptations nouvelles aux différents domaines. Dans l'approche que nous proposons, nous utilisons le codage mixte réel et binaire des solutions puisque ce type de codage est le plus adapté au problème et du fait que plusieurs auteurs ont souligné dans la littérature la performance de ce type de codage qui dépasse celle du codage binaire dans certains cas. Le choix des opérateurs de croisement et de mutation utilisés se justifie par le fait que ces opérateurs ont montré leur

efficacité dans la résolution de la classe des problèmes d'optimisation linéaire mixte dont fait partie notre problème. Nous testons quatre opérateurs génétiques différents : deux opérateurs de croisement et deux opérateurs de mutations. Les quatre versions de l'algorithme génétique construites par la combinaison de ces opérateurs génétiques sont comparées puis la version performante est comparée aux résultats de la littérature.

6.1 Représentation des solutions

Le succès d'un algorithme génétique dépend de la façon avec laquelle sont codées les solutions. Nous utilisons le codage mixte, les variables y_k sont codées en binaire, tandis que les autres variables sont codés en utilisant le codage réel qui est le plus naturel dans ce cas, ces variables sont considérés comme un vecteur de nombre appartenant au domaine continu. Dans notre approche, chaque chromosome (exemple d'une solution) est constitué de deux tableaux : *LocationArray* et *RoutingArray*. La longueur de *LocationArray* est égale au nombre de sites potentiels des terminaux. Il contient des 0 et des 1, où la valeur 1 indique que le site est un terminal et 0 sinon. Tandis que *RoutingArray* contient les fractions de la marchandise à router de i à j , d'une façon unimodale ou de manière intermodale.

6.2 Population initiale

Un nombre prédéfini de solutions est généré aléatoirement dans l'ensemble des solutions durant l'étape de la génération de la population initiale. Nous utilisons l'heuristique 6.2 :

Dans la phase de l'initialisation, nous commençons par l'ouverture aléatoire d'un ensemble de terminaux parmi les sites candidats et nous utilisons la route pour l'acheminement de la totalité des marchandises. Après, nous comparons les coûts de transports unimodal et intermodal : si $c_{ij} > c_{ij}^{km}$ l'alternative intermodale est choisie sinon la route est gardée.

6.3 Opérateurs de croisement

Les opérateurs de croisement assurent une meilleure exploration de l'espace de recherche. Au début de la recherche des solutions, les individus sont plus au moins différents et le croisement a plutôt le rôle d'exploration tandis qu'à la fin de la recherche les individus sont plus proches les uns des autres et le croisement a plutôt le rôle d'intensification. Un croisement en un point standard est appliqué sur les tableaux *LocationArray* et les croisements suivants sont appliqués aux tableaux *RoutingArray*.

initialization :

Générer un nombre aléatoire **nbr_ter** parmi les sites potentiels,

Pour $i, j \in I$ **faire**

$w_{ij} \leftarrow q_{ij}$

Pour $k, m \in K$ **faire**

$x_{ij}^{km} \leftarrow 0$

Fin Pour

Fin Pour

Routing goods :

Tant que $(c_{ij} \geq c_{ij}^{km})$ **faire**

Si $(y_k == 1)$ **Alors**

Pour $i, j \in I$ **faire**

Pour $k, m \in K, k \neq m$ **faire**

$x_{ij}^{km} \leftarrow \frac{q_{ij}}{C_k C_m}$

$w_{ij} \leftarrow q_{ij} (1 - \sum_{k, m \in K} \frac{1}{C_k C_m})$

Fin Pour

Fin Pour

Fin Si

Fait

Algorithme 1 – Heuristique de génération de la population initiale

6.3.1 Croisement de Laplace

L'importance de cet opérateur réside dans l'héritage par les enfants de l'information génétique. En utilisant le Croisement de Laplace (CL) proposé dans [Deep et Thakur,2007], deux

enfants : $\begin{cases} y^{(1)} = (y_1^{(1)}, y_2^{(1)}, \dots, y_n^{(1)}) \\ y^{(2)} = (y_1^{(2)}, y_2^{(2)}, \dots, y_n^{(2)}) \end{cases}$ Sont générés à partir de deux parents :

$\begin{cases} x^{(1)} = (x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_n^{(1)}) \\ x^{(2)} = (x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, \dots, x_n^{(2)}) \end{cases}$

Comme suit :

Début

Générer aléatoirement $u \in [0, 1]$

Générer β selon la fonction de distribution de Laplace comme suit :

Si ($u \leq \frac{1}{2}$) **Alors**

$$| \beta = a - b \log(u)$$

Sinon

$$| \beta = a + b \log(u)$$

Fin Si

Générer les enfants comme suit :

$$\begin{cases} y_i^{(1)} = x_i^{(1)} + \beta |x_i^{(1)} - x_i^{(2)}| (1) \\ y_i^{(2)} = x_i^{(2)} + \beta |x_i^{(1)} - x_i^{(2)}| (2) \end{cases}$$

Fin

Algorithme 2 – Croisement de Laplace (CL)

Le croisement de Laplace laisse les enfants proportionnels à la différence entre les parents. Ainsi, si les parents sont similaires, les enfants le sont également et vice-versa, car on : $y_i^{(1)} - y_i^{(2)} = x_i^{(1)} - x_i^{(2)}, \forall i$

6.3.2 Croisement arithmétique

Dans le croisement arithmétique, deux enfants sont générés comme suit :

Début

Générer un nombre aléatoire $u \in [0, 1]$

Générer α selon la fonction de distribution de Laplace :

Générer les enfants par l'équation :

$$\begin{cases} y_i^{(1)} = \alpha x_i^{(1)} + (1 - \alpha) x_i^{(2)} \\ y_i^{(2)} = \alpha x_i^{(2)} + (1 - \alpha) x_i^{(1)} \end{cases}$$

Fin

Algorithme 3 – Croisement arithmétique

α est un paramètre . Il fait des enfants une pondération de leurs parents.

Ces opérateurs sont appliqués au tableau *RoutingArray* et une phase de correction est appliquée

pour éliminer les individus non réalisables.

6.4 Opérateurs de mutation

Les opérateurs de mutation offrent une diversité aléatoire à la population, ils permettent également d'éviter une convergence prématurée de l'algorithme lorsqu'il rencontre des optima locaux. Nous utilisons l'opérateur de mutation proposé par dans [Deep et al.,2009]. Dans [Deep et Thakur,2007], les auteurs lui donnent le nom de MPTM (Makinen, Periaux and Toivenen Mutation).

6.4.1 Mutation MPT

Nous avons utilisé la mutation MPTM (Makinen and Periaux Toivenen Mutation) proposée par [Deep et al.,2009]. Nous considérons un vecteur $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, le vecteur muté $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$ est obtenu comme suit :

Début

Générer un nombre aléatoire $r_i \in [0, 1]$

Calculer t_i comme suit :

$$t_i = \frac{x_i - x_i^l}{x_i^u - x_i^l}$$

Si ($r_i < t_i$) **Alors**

$$| t'_i = t_i - t_i \left(\frac{t_i - r_i}{t_i} \right)^{b_m};$$

Sinon

$$| t'_i = t_i + (1 - t_i) \left(\frac{r_i - t_i}{1 - t_i} \right)^{b_m}$$

Fin Si

Le vecteur muté est donné par :

$$x'_i = (1 - t'_i)x_i^l + t'_i x_i^u$$

Fin

Algorithme 4 – Mutation MPT

6.4.2 Mutation puissance

Soit f la fonction définie par $f(x) = px^{p-1}, 0 \leq x \leq 1, 0 < p < 1$. f est une densité de probabilité sur $I = [0, 1]$, il existe donc une loi de probabilité dont f est la densité. Cette loi s'appelle : la loi puissance. La mutation puissance est basée sur la distribution de probabilité selon cette loi. En effet, la procédure définissant cette mutation est donnée comme suit :

Début Générer aléatoirement $r \in [0, 1]$
 Générer s suivant la distribution mentionnée précédemment
 Calculer t_i comme suit :

$$t_i = \frac{x_i - x_i^l}{x_i^u - x_i^l}$$
 Le vecteur muté est défini comme suit :
Si ($t_i < r$) **Alors**
 | $x'_i = x_i - s(x_i - x_i^l)$
Sinon
 | $x'_i = x_i + s(x_i^u - x_i)$
Fin Si
Fin

Algorithme 5 – Mutation puissance

Cette mutation permet de produire un enfant x' au voisinage d'un parent. La force de cette mutation est que la diversification est contrôlée par l'indice de la mutation p . En effet, pour des petites valeurs de p , les enfants ressemblent plus aux parents et inversement. La probabilité de produire une solution x' à gauche (à droite) de x est proportionnelle à la distance de x de $l(u)$ et le vecteur muté est toujours réalisable [Deep et Thakur,2007].

6.5 Schéma général

La sélection utilisée est la sélection par Roulette (Wheel Selection) : les parents sont sélectionnés en fonction de leurs performances, un bon chromosome a plus de chances d'être sélectionné et les meilleurs individus peuvent être tirés plusieurs fois et les plus mauvais ont une faible chance d'être sélectionnés. La fonction fitness est comme dans l'algorithme génétique standard représentée par l'inverse de la fonction objectif, on évite surtout les doubles évaluations de cette fonction du fait de son coût élevé par rapport à la complexité temporelle de l'algorithme. Nous proposons de tester quatre versions de l'algorithme génétique avec les différents opérateurs génétiques introduits précédemment. Ainsi, nous notons par a= CL (Croisement de Laplace), b=CA (Croisement Arithmétique) et 1= MPTM et 2= Mutation puissance. Donc GA(a,1) est l'algorithme génétique avec le croisement CL, et la mutation MPTM, GA(b,2) est l'algorithme avec les opérateurs de croisement b et de mutation 2, etc.

7 Réglages des paramètres de l'algorithme

Pour tester l'algorithme, nous avons utilisé les instances générées aléatoirement par [Sörensen et al.,2012], ces instances se trouvent dans le lien suivant : <http://antor.ua.ac.be/intermodal> L'algorithme est implémenté en C++ sur un PC sous Windows 7 CPU 2.20Ghs, Intel(R) Core(TM) i3-2230m (4CPUs) RAM : 4 Ghs.

Pour optimiser la performance de l'approche proposée, nous avons opté par le réglage des paramètres de l'algorithme par les plans d'expérience. Ces paramètres sont :

- Les probabilités de croisement et celle de mutation,
- La taille de population (nombre d'individus),
- Le nombre d'itérations maximal qui est choisi comme critère d'arrêt.

Nous avons utilisé un plan factoriel complet à deux niveaux pour voir les effets de ces paramètres sur la solution (qui est ici l'inverse de l'objectif) et déterminer les valeurs susceptibles de donner des meilleurs résultats. La figure II.5 montre le diagramme factoriel des paramètres définis précédemment. Les valeurs choisies pour les paramètres généraux de l'algorithme sont :

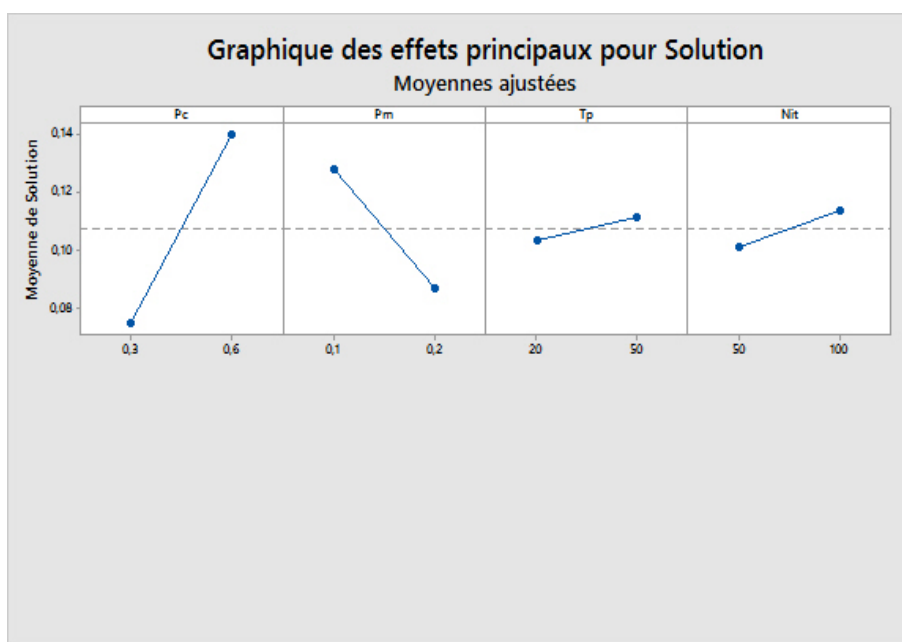


Figure II.5 – Diagramme factoriel des paramètres de l'AG

- Probabilité de croisement $P_c = 0.6$,
- Probabilité de mutation $P_m = 0.1$,
- Taille de la population $T_p = 50$,
- Nombre maximal d'itérations $N_{it} = 100$.

Après détermination des paramètres généraux de l'algorithme. Nous avons étudié également le réglage des paramètres de chaque opérateur génétique. La figure II.6 donne les valeurs choisies pour les deux opérateurs génétiques de la version GA(a,1).

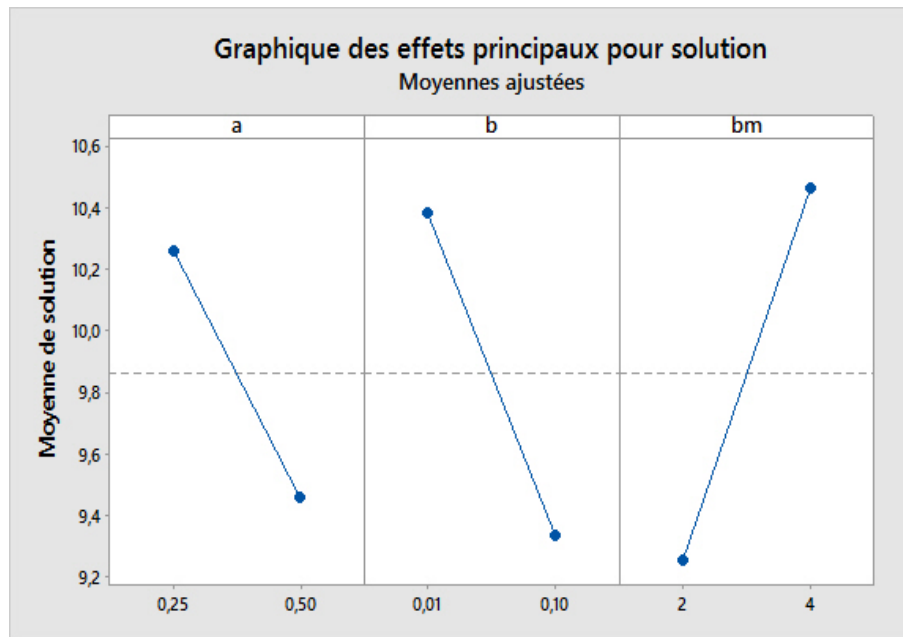


Figure II.6 – Diagramme factoriel des opérateurs génétiques de GA(a,1)

8 Résultats numériques

Le tableau II.1 donne les résultats de nos différentes versions d'algorithmes génétiques comparé aux solutions exactes fournies Sørensen al.(2012) résolues par Gurobi. Nous soulignons que pour une comparaison significative, nous avons adopté la même évaluation de coût de transport intermodal comme décrite dans [Sørensen et al.,2012].

Considérons les différents taux de déviataion, il s'avère que : $GA(a, 1)$ est la version la plus performante.

Le tableau II.2 donne nos résultats en utilisant cette version avec une comparaison aux solutions exactes trouvées en utilisant CPLEX. La première colonne contient le nom de l'instance, la deuxième et la troisième contiennent respectivement le nombre de clients et le nombre de sites potentiels, la quatrième contient la solution exacte trouvée par le solveur Gurobi 3.0.1, la cinquième colonne contient les résultats trouvés par K. Sorensen, la sixième colonne contient nos résultats et les deux dernières colonnes calculent la déviation de notre solution par rapport

Chapitre II. Localisation des terminaux intermodaux : modélisation et résolution

Instance	Solution Exacte	GA(a,1) ($\times 10^7$)	GA(a,2) ($\times 10^7$)	GA(b,1) ($\times 10^7$)	GA(b,2) ($\times 10^7$)	dev_1 (%)	dev_2 (%)	dev_3 (%)	dev_4 (%)
10C10L	9.540	9.883	9.947	10.483	10.557	3,59	4,26	9,88	10,66
10C20L	9.083	9.238	9.198	9.328	9.238	1,70	1,26	2,69	1,70
10C30L	9.167	9.464	9.574	9.841	10.611	3,23	4,43	7,35	15,75
10C40L	8.807	9.125	9.845	9.849	9.882	3,61	11,78	11,83	12,20
10C50L	8.390	8.66	8.841	8.481	8.647	3,21	5,37	1,08	3,06
10C60L	7.475	9.33	9.741	9.777	8.542	24,81	30,31	30,79	14,27
10C70L	7.637	8.480	7.802	8.846	8.148	11,03	2,16	15,83	6,69
10C80L	7.955	9.682	9.142	9.559	9.846	21,70	14,92	20,16	23,77
10C90L	8.678	9.523	9.145	9.956	9.623	9,73	5,38	14,72	10,88
10C100L	8.398	10.180	9.980	11.885	10.380	21,21	18,83	41,52	23,60
20C10L	50.916	51.263	52.183	52.833	51.263	0,68	2,48	3,76	0,68
20C20L	45.968	45.974	51.554	51.584	52.015	0,01	12,15	12,21	13,15
20C30L	46.358	46.461	55.261	47.461	48.481	0,22	19,20	2,37	4,57
20C40L	40.123	40.458	42.154	47.774	45.554	0,83	5,06	19,06	13,53
20C50L	34.403	34.887	41.137	36.807	38.147	1,40	19,57	6,98	10,88
20C60L	41.174	42.577	43.177	42.333	48.487	3,40	4,86	2,81	17,76
20C70L	33.559	35.473	40.363	44.145	41.142	5,70	20,27	31,54	22,59
20C80L	36.024	37.123	38.583	39.789	41.541	3,05	7,10	10,45	15,31
20C90L	32.626	36.740	41.456	44.189	46.864	12,60	27,06	35,44	43,64
20C100L	38.512	44.547	50.184	50.184	54.795	15,67	30,30	30,30	42,28
30C10L	111.66	115.72	117.12	112.72	113.14	3,63	4,88	0,94	1,32
30C20L	104.16	105.19	105.51	112.48	111.49	0,98	1,29	7,98	7,037
30C30L	103.31	104.03	114.84	114.99	114.51	0,69	11,16	11,30	10,84
30C40L	80.470	80.713	91.713	91.495	92.954	0,30	13,97	13,70	15,51
30C50L	89.726	90.88	102.02	101.33	100.54	1,28	13,70	12,93	12,05
30C60L	88.521	89.268	103.15	114.26	104.84	0,84	16,52	29,07	18,43
30C70L	90.509	90.753	111.53	102.01	101.03	0,26	23,22	12,70	11,62
30C80L	75.126	79.557	89.164	81.462	89.051	5,89	18,68	8,43	18,53

Tableau II.1 – Comparaison des versions d'AG

à la solution exacte et par rapport la meilleure solution trouvée par K. Sorensen, les expressions de la déviation sont données par la formule suivante :

$$\begin{cases} dev_1 = \frac{(\text{Notre solution 1} - \text{solution exacte})}{\text{solution exacte}} \\ dev_2 = \frac{(\text{Notre solution 2} - \text{solution Sorensen})}{\text{solution Sorensen}} \end{cases}$$

Instance	Solution exacte CPLEX	Solution de Sörensen et al.	Notre solution 1	Notre solution 2	dev_1	dev_2
10C10L	11,54	10,05	9,883	11,85	2,64	-1,66
10C20L	12,44	9,24	9,23	12,74	2,36	-0,02
10C30L	12,96	9,64	9,46	13,04	0,59	-1,89
10C40L	9,48	9,11	9,12	9,78	3,16	0,12
10C50L	9,51	8,89	8,66	9,63	1,26	-2,66
10C60L	9,54	8,93	9,33	10,16	6,47	4,40
10C70L	9,84	8,44	8,48	9,99	1,52	0,47
10C80L	10,02	9,58	9,682	11,59	15,65	1,04
10C90L	10,84	9,48	9,52	11,01	1,55	0,42
10C100L	15,16	10,12	10,18	15,16	0	0,59
20C10L	51,48	51,56	51,26	51,88	0,77	-0,58
20C20L	48,15	51,75	45,97	49,15	2,07	-11,16
20C30L	47,21	55,66	46,46	48,47	2,67	-16,52
20C40L	45,15	47,76	40,45	45,15	0	-15,29
20C50L	41,28	42,87	34,88	41,36	0,20	-18,63
20C60L	43,18	48,57	42,57	43,21	0,06	-12,33
20C70L	39,84	39,31	35,47	39,91	0,16	-9,76
20C80L	41,16	43,58	37,12	41,48	0,78	-14,82
20C90L	40,87	38,74	36,74	40,88	0,03	-5,16
20C100L	46,14	48,54	44,54	46,45	0,66	-8,23
30C10L	105,19	117,72	115,72	105,48	0,27	-1,69
30C20L	115,95	113,5	105,19	116,15	0,17	-7,32
30C30L	149,61	117,03	104,03	149,74	0,08	-11,10
30C40L	88,16	91,31	80,71	88,41	0,28	-11,60
30C50L	102,15	105,48	90,88	102,49	0,33	-13,84
30C60L	114,16	103,24	89,26	114,46	0,26	-13,54
30C70L	148,12	113,53	90,75	148,84	0,49	-20,06
30C80L	105,33	188,55	79,55	105,55	0,21	-10,17

Tableau II.2 – Résultats en utilisant la nouvelle approximation du coût de transport intermodal

9 Conclusion

L'une des principales caractéristiques de transport combiné rail-route par rapport au transport routier en porte à porte est qu'il engendre des économies sur le parcours central ferroviaire et des pertes lors des ruptures des charges en pré et post acheminement. Une des conséquences directes de ce fait est la délimitation de la zone de la compétitivité de transport intermodal rail-route à des distances supérieures à 500 km. La localisation des terminaux intermodaux constitue de ce fait un enjeu majeur pour le développement de ce type de transport. Pour

Chapitre II. Localisation des terminaux intermodaux : modélisation et résolution

cette raison, nous avons étudié le problème de la localisation des terminaux intermodaux qui est un problème NP-difficile. Dans un premier temps, nous avons présenté une description du problème, sa formulation mathématique et nous avons détaillé par la suite notre approche de résolution basée sur les algorithmes génétiques. Nous envisageons, comme perspectives, d'améliorer les résultats obtenus par adaptation de nouvelles heuristiques au problème d'une part et par le réglage des paramètres de l'algorithme d'autre part en utilisant des méthodes plus spécialisées, car souvent dans une métaheuristique, le choix des bonnes valeurs pour les paramètres influence considérablement la qualité des solutions. Une autre piste est la réduction voire une suppression des ruptures de charge et des pré-, post-acheminements afin de rendre le transport combiné rail-route pertinent sur des distances plus courtes 200 Km.

Chapitre III

Modélisation des problèmes de transport multimodal au port du Havre

1 Introduction

Le transport maritime est le principal vecteur du commerce international avec une part de marché de plus de 80 %. Le développement du secteur de transport a connu une croissance exponentielle depuis l'introduction du conteneur dans les années 1950. La standardisation des unités de chargement du mode maritime et l'arrivée des grands navires portes conteneurs ont révolutionné le commerce mondial. L'augmentation de la taille des navires a accru le besoin d'espace dans les zones de stockage des terminaux maritimes (TM). Cette croissance impose aux différents acteurs de la portuaire plus d'efficacité et de ponctualité. Pour faire face à la concurrence historique des ports de la range nord-européenne (Hambourg, Anvers, Rotterdam...) et pour renforcer son offre de transport terrestre qui est devenu le champ de bataille des ports maritimes, le port du Havre, premier port français du trafic de conteneurs, a développé un nouveau système logistique comprenant un terminal multimodal (TMM) servant de hub pour la massification du trafic avec son hinterland. Ce nouveau système permettra d'augmenter la part de trafic des modes fluviaux et ferroviaires. Le projet DCAS (Direct Cargo Axe Seine) lancé par le GPMH dans le cadre de la promotion des modes massifiés vise l'amélioration de l'attractivité du rail via l'introduction d'un coupon ferroviaire (ensemble de wagons) téléopéré et automoteur pour les opérations terminales.

Nous présentons dans ce chapitre ces nouveaux schémas logistiques du port de Havre. Nous définissons le cadre du projet DCAS, ses objectifs et ses cas d'applications. Puis, nous modélisons certains problèmes rencontrés lors de nos travaux dans le cadre de ce projet.

2 Port du Havre

Fondé en 1517 par le roi de France François 1^{er}, le Port du Havre bénéficie d'un emplacement privilégié dans le nord-ouest de l'Europe. Il est connecté à un arrière-pays riche (Bassin de Paris, marché français et européen) par la route, le fluvial et par le ferroviaire. Cette position stratégique en fait le premier port français pour le commerce extérieur et lui donne une vocation européenne, en particulier en tant que port de transbordement des conteneurs (feeder maritime). C'est le premier port de France en termes de trafic de conteneurs avec plus de 2,6 millions d'EVP (Equivalent Vingt Pieds) en 2015.

Ses conditions nautiques lui permettent de s'affranchir des contraintes de marées et de tirant d'eau. C'est l'un des rares ports qui ont la possibilité de recevoir des portes-conteneurs de plus grandes capacités. Il traite un flux massifié de conteneurs et accompagne leur acheminement vers de multiples destinations. Sa localisation à l'embouchure de la Seine privilégie l'acheminement des conteneurs par voie fluviale vers les ports fluviaux de Rouen et de Paris. Le GPMH (Grand Port Maritime du Havre) est doté également d'une vaste zone industrialo-portuaire et de nombreuses plateformes logistiques (plus de 10 000 ha).

Le port du Havre dispose de plusieurs terminaux maritimes dédiés au traitement des marchandises diverses comme les conteneurs, les voitures et les produits en vrac (terminal minéralier, terminal pétrolier, terminal sucrier, etc.). Le trafic conteneurisé est celui qui présente le plus grand potentiel de croissance et qui apporte le plus de bénéfices pour le territoire. Les principaux terminaux à conteneurs sont :

- Terminaux nord (Quais de l'Atlantique, Amériques, Europe),
- Port 2000 : Terminal de France (TDF), Terminal de la Porte océane (TPO), Terminaux de Normandie associés à Mediterranean Shipping Company (TNMSC) (figure III.1).

Récemment, le port du Havre s'est associé aux ports de Rouen et de Paris pour constituer un GIE (Groupement d'Intérêt Economique) appelé HAROPA (HAvre ROuen PARis). Il ambitionne d'être un guichet unique pour le système de transport et de logistique proposant une offre de service globale de bout en bout. En termes des zones desservies, le GPMH (Grand Port Maritime du Havre) détient des parts de marché importantes sur tout le territoire français : voir figure III.2.

2.1 Système logistique actuel

Un des facteurs qui détermine la compétitivité d'un port maritime de commerce est la disponibilité d'un réseau de liaisons multimodales avec son hinterland. Au port du Havre et



Figure III.1 – Vue sur Port2000

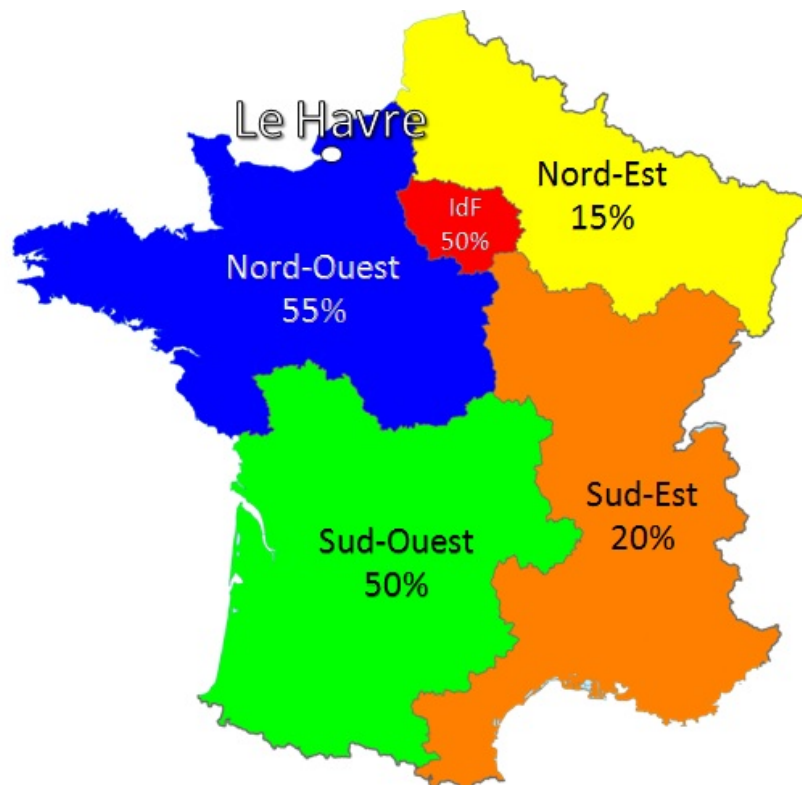


Figure III.2 – Parts de marché du GPMH

concernant le transport routier, le camion vient chercher les conteneurs directement dans les terminaux maritimes, le transfert des conteneurs par ce mode peut donc se faire sans rupture de charge, du terminal maritime à la porte de l'entrepôt de livraison.

Chapitre III. Modélisation des problèmes de transport multimodal au port du Havre

Pour la partie fluviale, une part de ce trafic se fait aussi directement du quai vers des bateaux fluviaux maritimes. Du fait de l'absence d'accès direct fluvial à Port 2000, certaines barges non maritimisées (qui n'ont pas un franc-bord suffisant par exemple) ne peuvent pas y accéder. Pour pallier ce manque d'accès direct, les conteneurs de certaines barges étaient manutentionnés sur le terminal de l'Europe (jouant le rôle du hub pour les barges), avant d'être transférés via navettes ferroviaires jusqu'aux terminaux de Port 2000 en export, et inversement à l'import. Cependant, ce transfert ferroviaire entre Europe et Port 2000 se faisait suivant une procédure dérogatoire, bloquant des voies routières et utilisant beaucoup de ressources humaines. Concernant le ferroviaire, les conteneurs étaient manutentionnés sur des wagons distribués au préalable sur les terminaux maritimes puis les wagons étaient collectés pour être regroupés sur un faisceau ferroviaire (plaine alluviale ou/et faisceau du port 2000) et enfin, les wagons pouvaient être tractés par une locomotive sur le Réseau Ferré National. Ce système de desserte est schématisé par la figure III.3.

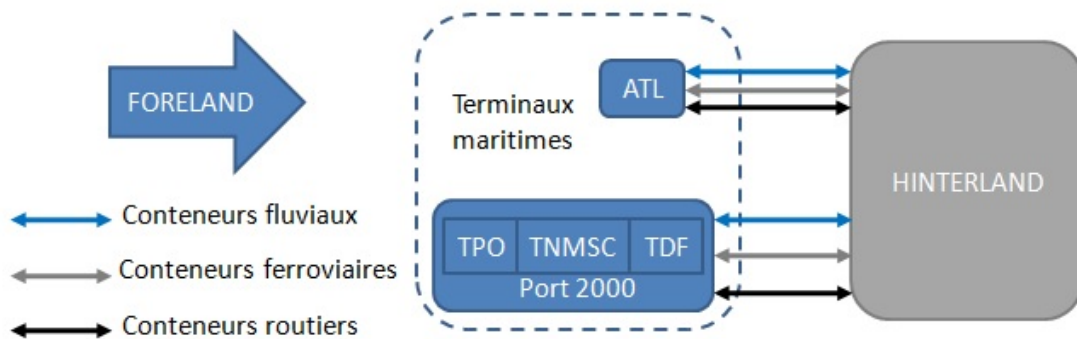


Figure III.3 – Système logistique actuel

Malgré un bon réseau de liaisons multimodales avec son hinterland, la part du GPMH en transports massifiés (fluvial et ferroviaire) reste très faible. Contrairement à ses concurrents du Range Nord, le port du Havre a un déséquilibre de répartition modale en faveur de transport routier (figure III.4). C'est pour cette raison que le port du Havre a construit le Terminal Multimodal pour améliorer sa part des transports massifiés.

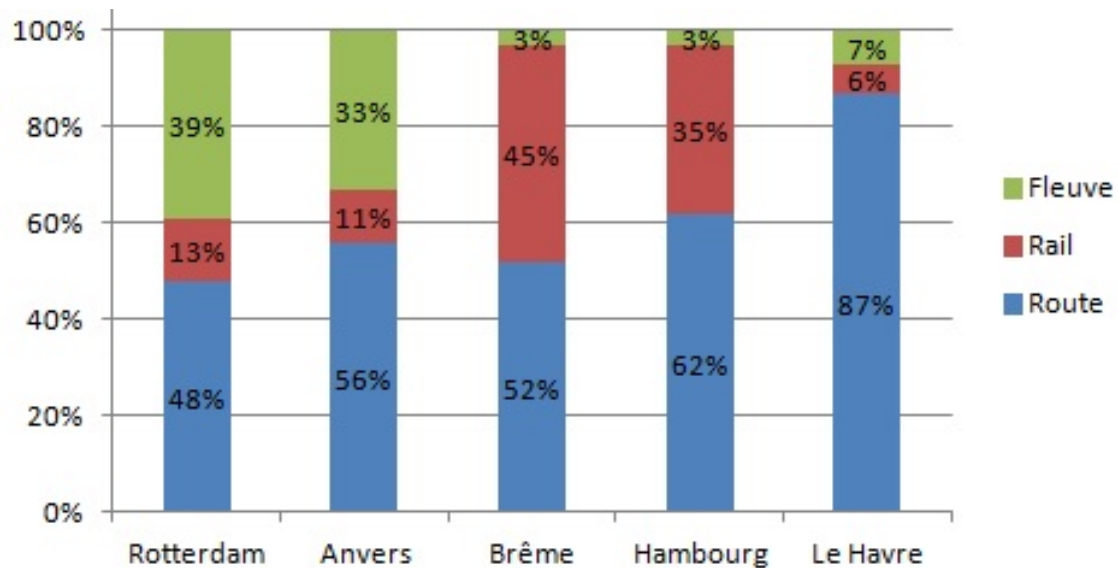


Figure III.4 – Répartition modale de trafic de conteneurs du port du Havre vs les ports de la range nord-européenne

2.2 Système logistique avec TMM

Le terminal multimodal est conçu pour accueillir des conteneurs et caisses mobiles par navettes ferroviaires depuis différents sites d’expédition de fret tels que les terminaux maritimes, les zones industrielles et logistiques. Il comprend des espaces et des moyens de manutention pour effectuer le transfert des conteneurs sur les barges et les trains de ligne et éventuellement un stockage provisoire.

2.2.1 Composantes du TMM

Le terminal trimodal a été dimensionné pour un trafic annuel de 200 000 UTI. Ce chantier multimodal comprend : un faisceau de réception, une cour ferroviaire, une cour fluviale et une cour continentale (figure III.5). Le faisceau de réception sert à recevoir les trains grandes lignes venant de l’hinterland ainsi que les navettes ferroviaires venant et à destination des terminaux maritimes. Il comporte également des voies de garages pour le stationnement des locomotives. La cour ferroviaire, quant à elle, comporte plusieurs voies parallèles pour le transbordement rapide rail-rail entre les navettes ferroviaires venant/à destination des terminaux maritimes et les trains grandes lignes. Les conteneurs fluviaux sont traités dans deux postes à quai dédiés. Les barges peuvent y être chargées/déchargées vers les wagons et/ou vers les espaces de stockage. La cour fluviale (figure III.6) est composée de :



Figure III.5 – Architecture de TMM du Havre

- Un quai fluvial de 400 m de long permettant la réalisation de 2 postes à quai,
- 2 portiques de manutention dotés d'avant-bec de 18 m permettant le traitement de barges,
- 3 voies ferrées en chaussées de 400 m,
- Une zone de mise à terre d'UTI, de 4 rangs sous portique, offrant une capacité de 700 EVP,
- 1 voie ferrée en chaussée, une zone de stockage et reprise de conteneurs sous arrière-bec du portique.

La cour ferroviaire (figure III.7) est composée de :

- 8 voies ferrées sous portiques de plus de 800 m,
- 2 portiques de manutention permettant la mise à terre de 1000 EVP,
- Possibilité de départ direct en ligne,
- Deux buffers Sud et Nord pour les déposes à terre.

Le faisceau de réception est composé de :

- Le faisceau ferroviaire de 6 voies de plus de 800 m et 2 voies de 1000 m pour accueillir les trains longs,
- Une voie de stationnement de wagons pour petites réparations de 150 m,
- Un garage de locomotives.

La nouvelle organisation logistique multimodale permet la livraison des conteneurs sur le chantier multimodal par un système de navettes ferroviaires. Les conteneurs sont repositionnés sur

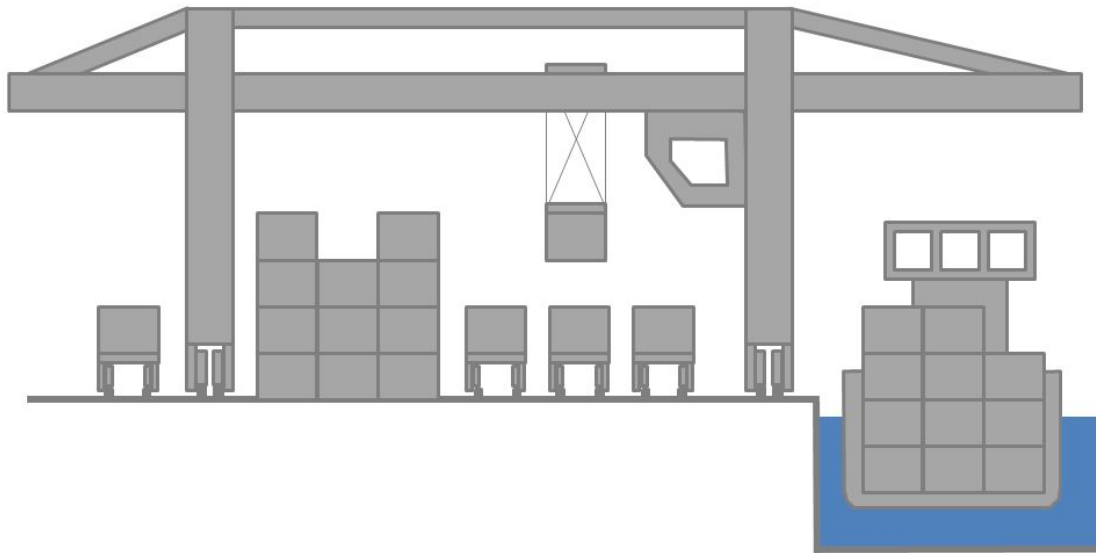


Figure III.6 – Cour fluviale

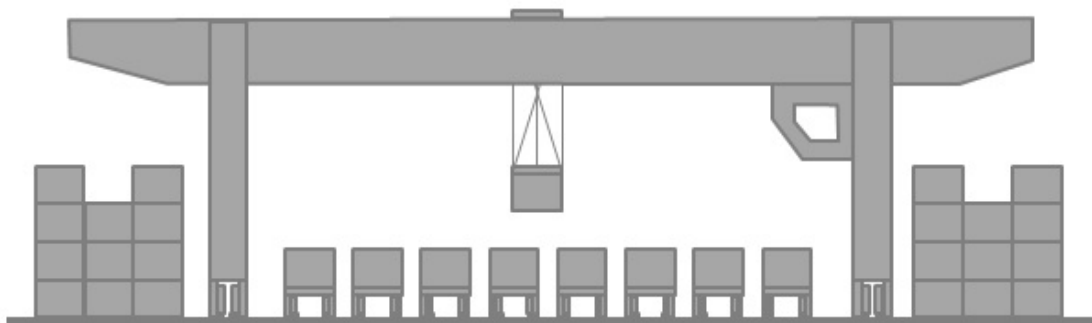


Figure III.7 – Cour ferroviaire

des trains de grandes lignes ou sur des barges à destination de l'hinterland en import (et inversement en export) (figure III.8). Le nouveau schéma logistique ne prévoit pas de changement pour le mode routier. Néanmoins, et à titre exceptionnel certains conteneurs urgents peuvent être transportés par camion du multimodal aux terminaux ou inversement. Dans le sens import, les conteneurs maritimes non urgents peuvent être stockés sur la cour continentale du chantier multimodal en attendant le transporteur routier afin de libérer de l'espace sur les terminaux maritimes.

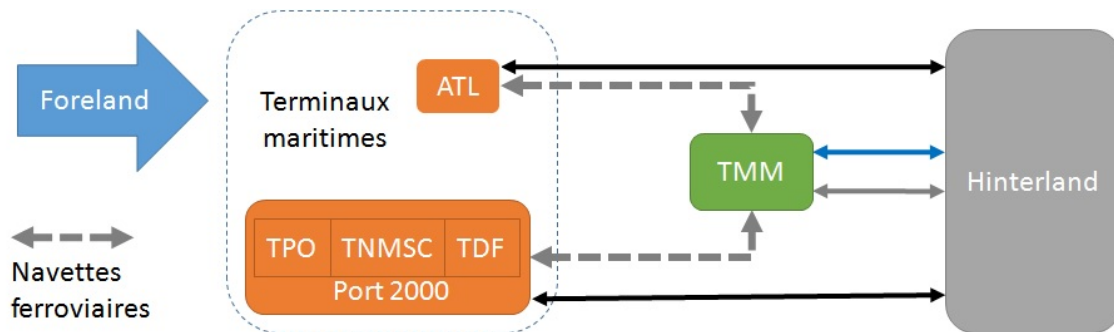


Figure III.8 – Système logistique avec TMM

2.2.2 Intérêts logistiques de TMM

Un chantier multimodal permet de collecter et distribuer les conteneurs des terminaux maritimes, lorsque ces derniers n'ont pas chacun un trafic ferroviaire justifiant l'investissement d'un chantier ferroviaire en arrière quai, ce qui est généralement le cas en France. La collecte des conteneurs fluviaux permet aussi de libérer de la place sur le terminal maritime pour accueillir plus de navires de mer et d'affecter un engin de levage adapté aux barges pour manutentionner les conteneurs. Ce nouveau système logistique permet donc une plus grande flexibilité, une meilleure efficacité et davantage de compétitivité pour les terminaux maritimes si les surcoûts induits par les ruptures de charges supplémentaires ne remettent pas en cause l'économie du transport. L'intérêt de ce nouveau système logistique est d'ordre organisationnel, économique et écologique.

L'amélioration organisationnelle réside surtout dans la possibilité d'ajuster le rythme de la réception/livraison de conteneurs par les manutentionnaires (société qui gère les terminaux maritimes) selon le principe du Push/Pull des conteneurs. Ainsi, le Push des conteneurs permet au terminal maritime de pousser les conteneurs import au terminal multimodal. Cette évacuation des conteneurs des terminaux maritimes vers la plateforme multimodale permet une meilleure gestion des espaces de stockage (limités) par les manutentionnaires. Pull des conteneurs : selon les dates d'arrivée des navires, les terminaux maritimes demandent les conteneurs à recevoir du terminal multimodal. Un autre atout d'ordre organisationnel consiste en la simplification du travail des opérateurs de transport combiné (opérateurs ferroviaires/fluviaux). En effet, ils n'ont plus besoin de faire le tour des terminaux maritimes pour collecter/livrer les conteneurs, les conteneurs sont désormais déchargés/chargés dans le terminal multimodal et les navettes ferroviaires se chargent de faire le pré/postacheminement.

L'intérêt économique réside dans l'accès aux transports massifiés. En effet, le terminal multimodal est une plateforme agissant comme un hub pour les terminaux maritimes. La formation des

trains entiers, des convois ferroviaires et barges avec un taux de remplissage important permet de bénéficier d'économies d'échelle.

La problématique de l'accès aux modes de transport consolidés n'est pas seulement économique, mais aussi environnementale. Le trafic qui passe par le terminal multimodal au Havre va générer une économie de 500 000 tonnes de CO₂/an. À titre d'exemple, une barge de 300 conteneurs peut remplacer 300 camions.

3 Système DCAS

3.1 Projet DCAS

Le projet DCAS (Direct Cargo Axe Seine) a pour but d'améliorer la performance des modes massifiés en flexibilisant et en fiabilisant les manœuvres ferroviaires sur les places portuaires et dans les plateformes logistiques urbaines, ainsi qu'en réduisant les pré et post acheminements routiers aux extrémités du segment de transport massifié, en arrivant au plus près de la distribution finale. Ce concept s'appuie :

- d'une part sur un nouveau vecteur ferroviaire dénommé coupon. Celui-ci consiste en un ensemble indéformable et téléopéré de wagons revampés, d'une longueur de 100 m environ, équipé d'attelages automatiques à chaque extrémité, d'une propulsion et d'un freinage autonome, et d'une télécommande sur les zones de manœuvres.
- d'autre part sur l'exploitation de chantiers compacts utilisant très peu de fonciers, soit à créer, soit utilisant des installations logistiques existantes à rénover.

La figure III.9 illustre un exemple d'un coupon DCAS formé de 5 wagons indéformables de type 1+4 : un wagon moteur et 4 wagons passifs. Il est téléopérable à l'aide d'un PCP (Poste de commande Portable). Le projet proposera aux logisticiens deux alternatives :



Figure III.9 – Coupon DCAS

- Soit de tracter le conteneur maritime du Port vers l'entrepôt d'emportage/dépotage/ distribution, opérations qui seront traitées à destination en zone urbaine.
- Soit de dégroupier et grouper les conteneurs maritimes dans des caisses mobiles dans les

entrepôts logistiques de la place portuaire. Les contenants des caisses mobiles seront alors prêts à être distribués à destination.

3.2 État de l'art sur le coupon

En ce qui concerne, le coupon lui-même, l'équipement le plus proche est le " Cargo Sprinter " de Windorf, mais qui a été conçu pour être conduit manuellement et individuellement (maximum deux coupons en tête bêche), sur le réseau européen, ce qui rend son prix rédhibitoire et son exploitation difficile, lorsqu'il y a peu de sillons disponibles sur un réseau.

Le wagon automatique Cargo Mover de Siemens n'a pas dépassé le stade de prototype. Ses principaux défauts sont que son équipement prévoit une automatisation totale. En plus il n'est prévu que pour un seul wagon et non pas un ensemble de wagons ce qui rend là aussi son prix excessif pour le marché du fret ferroviaire. Les autres recherches européennes concernent principalement l'amélioration des trains longs et la distribution du freinage et ne présentent donc pas de concurrence pour DCAS.

En ce qui concerne l'axe Seine, les trois ports Le Havre, Rouen Paris se sont associés au sein du GIE (Groupement d'Intérêt Economique) HAROPA (HAVre ROUen PARis) pour développer des synergies et faire de la Seine un axe majeur de communication avec le Grand Paris. De nombreuses marchandises passent actuellement par les ports du Benelux. La reconquête de ces trafics est une ambition partagée par les trois ports. Cette volonté a profité ces dernières années au trafic fluvial qui a doublé sa part de marché en 10 ans. Le coupon DCAS est un nouveau vecteur de distribution qui doit, par une nouvelle dynamique, permettre de relancer le trafic ferroviaire entre le port du Havre et la région parisienne.

La première application de ce type est donc l'acheminement des conteneurs entre le terminal multimodal du Havre et un chantier situé en zone dense. A ce stade, deux possibilités sont identifiées :

- Rungis, pour l'acheminement de produits alimentaires et des produits secs dans la zone logistique,
- La Chapelle, pour l'acheminement de produits pour la grande distribution au nord de Paris.

Les apports visés par le coupon DCAS sont les suivants :

- Une limitation et une simplification des manœuvres ferroviaires par :
 1. un allotissement des conteneurs sur des groupes de wagons,
 2. des équipements de motorisation, d'attelage automatique et de téléopération.

- Une réduction des contraintes organisationnelles propres au mode ferroviaire au point de collecte et de distribution en :
 1. Simplifiant le déplacement des coupons et permettant à d'autres personnels d'effectuer cette activité,
 2. Apportant plus de liberté entre le mode ferroviaire et les activités logistiques.

3.3 Réponse technologique et organisationnelle de DCAS

La solution DCAS est pertinente en raison de la faible longueur des voies disponibles dans ces deux zones, ce qui rend les manœuvres en mode classique très coûteuses, consommatrices d'espaces et de temps. Outre cette optimisation de l'exploitation ferroviaire, DCAS permettrait donc de desservir très rapidement les zones d'entrepôts sur ces sites (Rungis notamment), mais aussi de rendre le fer pertinent pour les entrepôts proches de ces sites (au nord de Paris notamment), trop éloignés du chantier de Valenton pour être pertinents pour le fer. Le projet DCAS a pour objectif de mettre en œuvre une solution efficace et rentable pour le transfert des conteneurs par navettes ferroviaires sur un domaine portuaire ainsi que sur des corridors, entre des ports maritimes et de grands centres urbains tels que Le Havre/Paris, Marseille/Lyon, etc.

Ces navettes seront composées de coupons ferroviaires. Ces équipements visent à faciliter le tri ferroviaire et rendre le transport ferroviaire plus flexible dans le cadre de certaines applications, comme indiqué ci-après. Le transport ferroviaire pur entre un point A et un point B, du fait de sa massification, est plus économique qu'un transport routier. Ce qui le pénalise, ce sont les pré- et post-acheminements routiers aux points A et B et les ruptures de charge induites. Au-delà du coût de ces activités annexes, les contraintes organisationnelles propres au mode ferroviaire pour les maillons de la chaîne logistique, avant le point A et après le point B, pénalisent l'offre ferroviaire. Car du fait du processus de réservation de sillons sur le réseau ferré national, les trains ont des horaires fixes de départ et d'arrivée, auxquels doivent s'adapter les autres maillons de la chaîne du transport. En outre, la conduite des locomotives, les procédures d'attelage et dételage nécessitent des compétences et des qualifications ferroviaires spécifiques. Afin d'optimiser l'utilisation de ces ressources chères, les autres maillons doivent encore s'adapter.

Par ailleurs, le mode ferroviaire sera d'autant plus pertinent qu'il y aura une massification suffisante aux points A et B de telle sorte que les pré et postacheminements pourront être évités ou du moins, fortement réduits. C'est déjà le cas dans les ports où les navires débarquent des milliers de conteneurs par escale, et c'est aussi le cas des centres logistiques des zones urbaines

denses.

Des corridors entre des ports et des plateformes logistiques urbaines représentent un marché potentiel, apte à tirer pleinement profit des améliorations décrites ci-dessus.

3.4 Un autre intérêt pour les entrepôts logistiques

Environ 10 % des conteneurs maritimes déchargés dans un port comme Le Havre sont dépotés et rempotés dans des entrepôts logistiques avant d'être envoyés en caisses mobiles ou camions dans l'hinterland. Pour un port comme Anvers, ce pourcentage est beaucoup plus important (plus de la moitié). Les transferts entre les TM et les entrepôts sont généralement réalisés par des camions (activité de brouettage). Lorsque ces entrepôts sont embranchés fer, ce qui est souvent le cas, le coupon DCAS pourra présenter une alternative économique et environnementale à la route. Les fonctionnalités du coupon DCAS permettront de former des trains complets depuis un port ou une plateforme de distribution régionale, et d'atteindre directement une ou plusieurs plateformes de distribution urbaine au plus près des centres de consommation. Au sein de ces plateformes logistiques, un chantier compact permettra la manutention des conteneurs et leur transfert à l'intérieur des entrepôts logistiques. Si des caisses mobiles sont posées sur les coupons et qu'une infrastructure permet la distribution des wagons au droit des entrepôts, alors les coupons pourront être amenés sans locotracteur directement dans les entrepôts et les marchandises déchargées et rechargées, sans manutention du contenant. Sur ce type de desserte, les gains sont générés par la diminution du coût de desserte terminale, l'optimisation de la rotation des matériels roulants et la réduction de l'investissement nécessaire pour les chantiers combinés. Ce type d'application peut être pertinent pour l'ensemble des zones denses ou l'acceptabilité des camions est faible. Le potentiel pour ce type d'application est important en raison des contraintes croissantes sur les flux routiers et dans les zones urbaines denses. Ce type d'application pourrait donc être développé dans l'ensemble des grandes métropoles européennes.

3.5 Brouettages intraterminaux maritimes

Il existe un nombre limité de ports capables d'accueillir les navires-mères (plus de 400 m de long, plus de 18 000 EVP). En outre, toutes les lignes des compagnies maritimes ne desservent pas tous les grands ports européens à chaque rotation. C'est pourquoi certains conteneurs doivent être rechargés sur d'autres navires (activité de transbordement). Il est donc parfois nécessaire de transférer des conteneurs d'un terminal maritime à un autre par voie terrestre. Actuellement, cette activité est généralement assurée par des tracteurs portuaires (activité de

brouettage). La solution DCAS peut remplir ces fonctions de transferts intra-terminaux et remplacer les camions.

3.6 Transfert terminal maritime centre de réparation

Les flux de marchandises ne sont pas systématiquement équilibrés entre l'import et l'export. Il s'en suit souvent des accumulations de conteneurs vides dans les zones urbaines et dans les ports, soit au sein des terminaux maritimes, soit dans des zones de stockage et de réparation spécialisées, les entrepôts ne désirant pas s'encombrer de ces contenants inutiles. Ces conteneurs appartiennent aux compagnies maritimes et doivent leur être rendus, à un moment ou un autre. La gestion des conteneurs vides pose problème sur un territoire portuaire, voire sur une chaîne de transport. Le coupon maritime pourra là encore apporter une solution, notamment, si l'on peut massifier encore plus les transferts en s'autorisant le double-stack, empilement de deux conteneurs l'un sur l'autre. Pour cette dernière option, il faut que la voie ferrée ne soit pas équipée de caténaires.

4 Modélisation des problèmes d'optimisations rencontrés

Dans cette section nous décrivons les principaux problèmes d'optimisations résolus dans la conception d'un nouveau système logistique comprenant un TMM.

4.1 Problème de transfert de navettes ferroviaires

4.1.1 Description du problème

Ce problème concerne le dimensionnement et l'ordonnancement des navettes dans le but de transférer des conteneurs entre les terminaux maritimes et le TMM en minimisant les retards. L'objectif principal de ce problème est de déterminer la stratégie la moins coûteuse pour le transfert d'un ensemble de conteneurs entre deux terminaux à conteneurs. La minimisation du coût concernera, en l'occurrence, la minimisation du nombre de wagons des navettes assurant le transfert d'une part et la minimisation du nombre d'aller-retour pour la locomotive d'autre part.

4.1.2 Circulation en noria

Pour que la manutention des navettes s’effectue sans mobiliser les locomotives, on prépare des navettes manutentionnées sur chaque terminal. Les locomotives font le transfert ininterrompu entre le terminal multimodal et les terminaux maritimes sous forme d’un schéma de circulation en noria c.-à-d. lorsque la locomotive arrive au terminal maritime (resp. au terminal multimodal), elle laisse sa navette et elle prend la navette préalablement manutentionnée, cette navette ayant été transférée sur zone par une précédente locomotive. Les rames s’alternent entre manutention sur TMM, transfert export, manutention sur TM et transfert import. Ce schéma de rotation des rames est illustré dans la figure III.10.

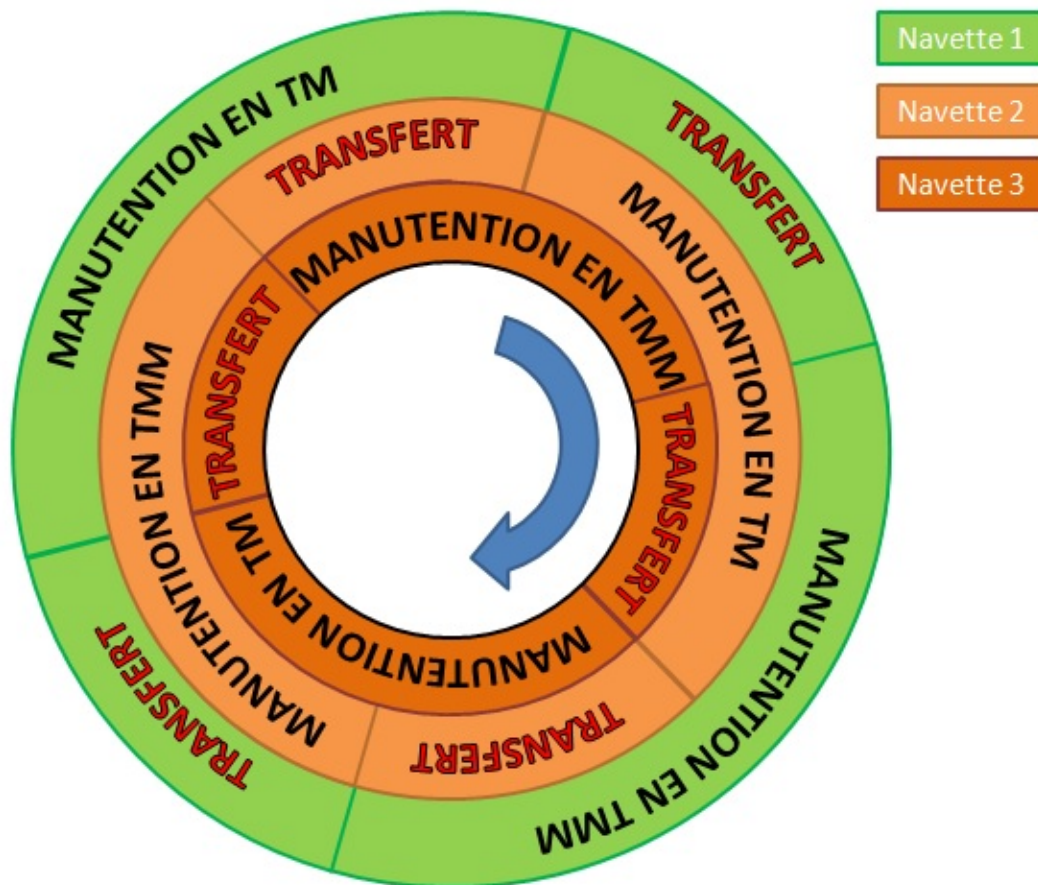


Figure III.10 – Circulation des navettes en noria

4.1.3 Formulation mathématique

Soient les paramètres suivants :

III.4 Modélisation des problèmes d'optimisations rencontrés

- C_l : coût fixe d'une locomotive à l'heure
- C_w : coût de location d'un wagon à l'heure
- R : Ensembles des rames
- NA : nombre maximal d'allers des navettes. Un aller est un trajet du terminal multimodal vers le terminal Atlantique.
- NR : nombre maximal de retours des navettes. Un retour est un trajet du terminal atlantique vers le TMM,
- TR : taille maximale des rames,
- T_0 : taille minimale des rames,
- NCX : nombre de conteneurs en export,
- NCI : nombre de conteneurs en import,
- d_i : variable de décision représentant la dimension de la rame i ,
- a_i : nombre d'allers de la rame i ,
- r_i : nombre de retours de la rame i .

Ce problème de transfert et de dimensionnement de navettes est modélisé en programme mathématique P_1 suivant :

$$\text{Min } \sum_{i \in R} C_w d_i + \sum_{i \in R} C_l (a_i + r_i) \quad (\text{III.1})$$

Sous les contraintes :

$$NCX \leq \sum_{i \in R} a_i d_i \quad (\text{III.2})$$

$$NCI \leq \sum_{i \in R} r_i d_i \quad (\text{III.3})$$

$$T_0 \leq d_i \leq TR, \forall i \in R \quad (\text{III.4})$$

$$1 \leq a_i \leq NA, \forall i \in R \quad (\text{III.5})$$

$$1 \leq r_i \leq NR, \forall i \in R \quad (\text{III.6})$$

$$0 \leq |r_i - r_j| \leq 1, \forall i, j \in R \quad (\text{III.7})$$

$$0 \leq |a_i - a_j| \leq 1, \forall i, j \in R \quad (\text{III.8})$$

$$0 \leq |a_i - r_j| \leq 1, \forall i, j \in R \quad (\text{III.9})$$

$$d_i \in \mathbb{N}^*, r_i \in \mathbb{N}^*, a_i \in \mathbb{N}^*, \forall i \in R \quad (\text{III.10})$$

La fonction objectif minimise le coût d'utilisation des wagons (premier terme) et le coût des trajets effectués par la locomotive (deuxième terme). La contrainte (III.2) assure que le nombre de déplacements effectués par les rames dimensionnées sera suffisant pour le transfert des conteneurs exports. De la même façon, la contrainte (III.3) assure que le nombre de déplacements effectués par les rames dimensionnées sera suffisant pour le transfert des conteneurs imports. La contrainte (III.4) limite la taille des rames. En effet, la limitation des tailles des navettes est due à des contraintes du réseau ferré portuaire, à savoir la longueur limitée des faisceaux de réception à l'entrée de chaque terminal, et aux contraintes liées à l'utilisation de certains engins de manutention (les chariots-cavaliers en particulier). Les contraintes (III.5) et (III.6) limitent le nombre de déplacements pour chaque navette, car une locomotive ne peut faire qu'un nombre limité de trajets par jour pour des contraintes de ressources humaines (2 shifts travaillés par journée). Les contraintes (III.7), (III.8), (III.9) expriment la rotation des navettes, en effet, les navettes se permutent entre aller, retour et manutention sur le terminal maritime et le terminal multimodal. Plus précisément, du fait que les navettes font le transfert suivant un schéma de circulation en noria : une rame fera soit autant de déplacements que les autres ou, plus au moins un déplacement que les autres rames. Les contraintes (III.10) sont les contraintes classiques d'intégrité des variables de décisions.

Le modèle présenté est un programme mathématique en nombres entiers à contraintes quadratiques. Si la matrice associée à la forme quadratique des contraintes (III.2), (III.3) n'est pas semi-définie positive, aucun solveur standard (à notre connaissance) ne peut résoudre ce programme mathématique. Pour cette raison, nous avons transformé le programme mathématique initial P_1 en un programme à variables $\{0, 1\}$, en écrivant chaque variable entière sous forme de somme de puissance de 2. En effet, pour les variables entières de P_1 :

$$\exists(p, q, r) /$$

$$1 \leq d_i \leq 2^p - 1$$

III.4 Modélisation des problèmes d'optimisations rencontrés

$$1 \leq a_i \leq 2^q - 1$$

$$1 \leq r_i \leq 2^r - 1$$

Telles que :

$$d_i = \sum_{k=0}^{p-1} 2^k u_{ik}$$

$$a_i = \sum_{k=0}^{q-1} 2^k v_{ik}$$

$$r_i = \sum_{k=0}^{r-1} 2^k w_{ik}$$

Avec :

$$u_{ik}, v_{ik}, w_{ik} \in \{0, 1\}$$

En remplaçant les variables de décisions entières dans les contraintes (II.3) et (III.3), nous obtenons un programme 0-1 à contraintes quadratiques. Enfin, avec la propriété suivante, nous obtenons un programme linéaire mixte P_2 que nous résolvons avec CPLEX :

$$\text{Pour } (x, y) \in \{0, 1\}, z = x \cdot y \Leftrightarrow \begin{cases} z \leq x \\ z \leq y \\ z \geq x + y - 1 \\ z \geq 0 \end{cases}$$

Les jeux de données, fournis par le GMPH, concernent le trafic actuel et le trafic prévu des conteneurs export et import pour le terminal Atlantique. Le solveur CPLEX a pu résoudre toutes les instances du problème en un temps court. Les valeurs de la fonction objectif et les temps de résolution correspondants sont données dans le tableau III.1.

Chapitre III. Modélisation des problèmes de transport multimodal au port du Havre

Instances	Nombre de conteneurs import/jour	de	Nombre de conteneurs export/jour	de	Valeur de l'objectif	Temps de calcul (secondes)
Instance 1	40		50		263	0.38
Instance 2	70		40		323	0.38
Instance 3	70		70		323	0.38
Instance 4	80		20		341	0.8
Instance 5	100		60		383	0.78
Instance 6	120		80		413	1.21
Instance 7	140		100		521	2.33
Instance 8	180		120		633	2.34
Instance 9	220		140		745	2.44
Instance 10	260		160		865	2.56
Instance 11	320		180		964	2.48
Instance 12	380		200		1023	2.98
Instance 13	460		220		1248	2.96
Instance 14	540		240		1302	3.01
Instance 15	540		260		1574	3.05

Tableau III.1 – Résolution exacte par CPLEX

La colonne 1 et 2 donnent le nombre de conteneurs en export et en import respectivement, la colonne 3 donne la valeur de la fonction objectif calculée à partir des valeurs approximatives des coûts de circulation de la locomotive et de location de wagons pour l'exploitation actuelle et la colonne 4 correspond au temps de résolution. Le trafic (nombre de conteneurs) considéré dans les instances correspond à la part du trafic journalier par mode ferroviaire du terminal Atlantique qui est de l'ordre de 10 % du trafic ferroviaire global du Port du Havre dans un horizon de 20 ans. Les coûts donnés par l'optimisation ne prennent pas en compte l'amortissement des infrastructures ni les coûts des ressources humaines. L'algorithme implémenté est rapide sachant que l'augmentation du nombre du trafic n'entraîne pas nécessairement l'augmentation du temps de résolution, car ce dernier est lié à la structure et à la complexité temporelle du problème pour l'instance considérée.

4.2 Problème d'ordonnancement des trains et navettes sur la cour ferroviaire

4.2.1 Description du problème

Ce problème concerne la détermination d'un ordre sur les TGL et les navettes pour les placer à la cour ferroviaire dans le but d'éviter qu'un train/navette quitte la cour ferroviaire

pour le repositionner par la suite et pour minimiser les déposes à terre. Le nombre de voies de la cour ferroviaire étant limité, un nombre de voies est réservé pour les trains grandes lignes qui sont chargés de conteneurs export et qui seront déchargés sur les trains navettes (trains de correspondance), le reste des voies est réservé pour l'accueil des navettes qui se chargent d'acheminer les conteneurs ferroviaires entre le terminal multimodal et les terminaux maritimes. Un bon plan d'ordonnement sur les trains grandes lignes doit minimiser :

1. **Repositionnement sur la cour :** Si toutes les voies de la cour ferroviaire sont pleines et qu'un train/navette attend des conteneurs d'un train de correspondance qui n'est pas positionné sur les voies, ce train/navette doit quitter la cour ferroviaire pour être repositionné ultérieurement. Ce mouvement de repositionnement est très coûteux. Il nécessite la mobilisation d'un engin de traction (et donc des ressources humaines), l'occupation des voies de faisceau ferroviaire et des voies de circulation, et nécessite un temps non négligeable vu la lourdeur des manœuvres ferroviaires.
2. **Dépose à terre :** Un mouvement de stockage d'un conteneur est un mouvement coûteux pour le rendement des portiques ferroviaires. Si un train a des conteneurs à destination d'une navette non positionnée sur la cour ferroviaire, on peut le décharger vers le buffer. Cependant, le buffer est limité et le recours excessif au stockage risque de diminuer la productivité des portiques.

L'optimisation de l'ordonnement des trains et navettes sur les voies de la cour ferroviaire vise à minimiser d'une part, les temps des manœuvres ferroviaires des repositionnements et les déposes à terre d'autre part.

4.2.2 Modélisation mathématique

Soient les paramètres suivants :

- H ensemble des créneaux horaires,
- T ensemble des trains grandes lignes,
- N ensemble des navettes
- A_{kl} nombre de conteneurs à transférer de train k vers la navette l ,
- P le nombre de voies réservées pour les trains de grandes lignes,
- Q le nombre de voies réservées pour les navettes,
- y_{ij} une variable binaire égale à 1 si le train i et la navette j sont affectés à deux créneaux horaires différents, 0 sinon,
- x_i une variable binaire égale 1 si le train i quitte la cour ferroviaire avant sa manutention complète, 0 sinon,

Chapitre III. Modélisation des problèmes de transport multimodal au port du Havre

- u_{ih} une variable binaire égale à 1 si le train i est affecté au créneau horaire h , 0 sinon,
- v_{jh} une variable binaire égale à 1 si la navette j est affectée au créneau horaire h , 0 sinon.

Le problème d'ordonnement des trains/navettes sur la cour ferroviaire est modélisé comme suit :

$$\text{Min } \sum_{i \in T} x_i + \sum_{i \in T, j \in N} y_{ij} (A_{ij} + A_{ji}) \quad (\text{III.11})$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{h=e_i}^{h=l_i} u_{ih} = 1, \forall i \in T \quad (\text{III.12})$$

$$\sum_{h=e_i}^{h=l_i} v_{jh} = 1, \forall j \in N \quad (\text{III.13})$$

$$\sum_{i \in T} u_{ih} \leq P, \forall h \in H \quad (\text{III.14})$$

$$\sum_{j \in N} v_{jh} \leq Q, \forall h \in H \quad (\text{III.15})$$

$$\sum_{h=1}^H u_{ih} \cdot h + x_i M \geq \sum_{h=1}^H v_{jh} \cdot h, \forall i \in T, \forall j \in N \quad (\text{III.16})$$

$$\left| \sum_{h=1}^H u_{ih} - \sum_{h=1}^H v_{jh} \right| \leq y_{ij} \cdot M, \forall i \in T, \forall j \in N \quad (\text{III.17})$$

La fonction objectif [III.11](#) minimise le nombre de repositionnements des trains sur la cour ferroviaire et le nombre des déposes à terre des conteneurs. Les contraintes [III.12](#) et [III.13](#) assurent l'affectation des trains à un seul créneau horaire compatible avec sa disponibilité temporelle. Les contraintes [III.14](#), et [III.15](#) limitent le nombre de trains/navettes positionné sur la cour ferroviaire. La contrainte [III.16](#) force l'affectation du train i à un créneau horaire ne dépassant pas son horizon de disponibilité temporelle. La contrainte [III.17](#) impose à la variable z_{ij} de prendre la valeur 1 si les deux trains i et j sont affectés à deux créneaux différents.

4.3 Problème d'affectation des trains/navettes aux voies

4.3.1 Description du problème

Si le problème précédent procure un ordre pour le placement des trains sur les voies de la cour ferroviaire, il ne précise pas quelle voie pour quel train et quelle position sur la voie. La détermination de la voie et de la position sur la voie de chaque train influence directement les mouvements des deux portiques ferroviaires et donc va impacter la productivité. Le placement vertical des trains (affectation des voies) détermine directement le comportement vertical des portiques : ces mouvements sont appelés dans le monde industriel les mouvements de direction. Le placement horizontal, quant à lui, influence les mouvements horizontaux, appelés mouvements de translation. Dans la réalité, les mouvements de translation sont plus coûteux que les mouvements de direction. Ce problème répond donc aux deux questions : quel train/navette pour quelle voie puis quelle position sur la voie choisie. Nous avons proposé différentes formulations de ce problème. Chaque formulation dépend d'un ensemble d'hypothèses.

4.3.2 Première formulation

L'idée de la première formulation est de minimiser les mouvements verticaux des portiques en mettant ensemble sur des voies adjacentes les trains/navettes qui vont échanger les conteneurs. Ainsi nous mettons les navettes à côté de leurs trains de correspondance et vice-versa.

Soient les paramètres suivants :

- T : ensemble de trains,
- N : ensemble de navettes,
- E_{tn} : ensemble de conteneurs à transférer du train t vers la navette n ,
- I_{nt} : ensemble de conteneurs à transférer de la navette n au train t ,
- x_{tn} : une variable de décision égale à 1 si le train t est adjacent à la navette n , 0 sinon

Nous présentons le premier modèle comme suit :

$$\text{Max} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} (E_{tn} + I_{nt}) x_{tn} \quad (\text{III.18})$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{t \in T} x_{tn} \leq 2, \forall n \in N \quad (\text{III.19})$$

$$\sum_{n \in N} x_{tn} \leq 2, \forall t \in T \quad (\text{III.20})$$

La fonction objectif maximise le nombre de conteneurs échangés entre les trains et les navettes adjacents, la contrainte III.19 limite à 2 le nombre de trains adjacents à une navette, la deuxième III.20 limite le nombre de navettes adjacentes à un train.

Si cette modélisation permet de mettre ensemble les trains/navettes avec leurs vecteurs de correspondance en favorisant le transfert direct (ce qui est intéressant dans certains cas de figure comme dans le cas où des trains de grandes lignes ont des conteneurs pour un seul terminal ou inversement), elle ne permet pas de minimiser les mouvements horizontaux (appelés mouvements de translation dans le monde industriel) qui restent les mouvements les plus coûteux (mouvement lent du fait de l'inertie des portiques) pour un portique.

4.3.3 Deuxième formulation

Dans cette section, nous présentons une autre modélisation qui affecte les voies aux trains/navettes en ne s'attachant toujours qu'à minimiser les mouvements de direction. Soient les paramètres suivants :

- V : ensemble des voies
- c_{ij} : le coût (distance/temps) de transfert d'un conteneur depuis le train positionné sur la voie i vers le train positionné sur la voie j
- x_{tv} : une variable de décision égale à 1 si le train t est positionné sur la voie v , 0 sinon
- y_{nv} : une variable de décision égale à 1 si la navette n est positionnée sur la voie v , 0 sinon

Nous présentons le deuxième modèle comme suit :

$$\text{Min} \sum_{i,j \in V} \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} c_{ij} (E_{tn} + I_{nt}) (x_{ti} + y_{ni}) \quad (\text{III.21})$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{t \in T} x_{ti} + \sum_{n \in N} y_{ni} = 1, \forall i \in V \quad (\text{III.22})$$

$$\sum_{i \in V} x_{ti} = 1, \forall t \in T \quad (\text{III.23})$$

$$\sum_{i \in V} y_{ni} = 1, \forall n \in N \quad (\text{III.24})$$

$$\sum_{t \in T} x_{ti} = 1, \forall i \in V \quad (\text{III.25})$$

$$\sum_{n \in N} y_{ni} = 1, \forall i \in V \quad (\text{III.26})$$

La fonction objectif III.21 minimise les coûts de transferts des conteneurs imports et exports, ces coûts sont physiquement les charges de travail des portiques qui assurent le transfert des conteneurs. La contrainte III.22 impose le placement d'un train ou une navette sur une seule voie. Les contraintes III.23 et III.24 assurent de ne pas affecter un train (resp. une navette) à plusieurs voies. Les contraintes III.25 et III.26 impose le placement d'un seul train (resp. navette) sur une voie.

Cette modélisation minimise les mouvements de direction es portiques et ne prend pas en charge la minimisation des mouvements de translation.

4.3.4 Troisième formulation

Dans cette section, nous présentons le programme mathématique minimisant à la fois les mouvements verticaux et les mouvements horizontaux des portiques.

Soient les paramètres suivants :

- P ensemble de positions
- c_{ij}^{pq} : le coût (temps de travail de portique) de transfert d'un conteneur de la position p du train placé sur la voie i vers la position q du train positionné sur la voie j
- x_{tp} : une variable de décision égale à 1 si le train t est placé sur la position p

Le problème est modélisé comme suit :

$$\text{Min} \sum_{i,j \in V} \sum_{m,n \in T} \sum_{p,q \in P} c_{ij}^{pq} x_{ip} x_{jq} \quad (\text{III.27})$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{i \in T} x_{ip} = 1, \forall p \in P \quad (\text{III.28})$$

$$\sum_{p \in P} x_{ip} = 1, \forall i \in T \quad (\text{III.29})$$

La fonction objectif III.27 minimise les charges de travail des portiques pour un placement des trains donné. La contrainte III.28 impose le placement d'un seul train sur une position. La contrainte III.29 détermine une seule position pour un train.

Cette modélisation permet de minimiser à la fois les mouvements de direction et de translation de portiques. C'est un programme quadratique à contraintes linéaires. Ce problème est un problème NP-difficile au sens fort. En effet, avec des valeurs de c_{ij}^{pq} égales à 1, une instance de ce problème se réduit facilement à une instance du Problème d'Affectation Quadratique (Quadratic Assignment Problem) qui est prouvé dans [Sahni et al.,1976] être NP-difficile. C'est pour cette raison que nous utilisons dans le quatrième chapitre un algorithme approché (algorithme génétique) pour la résolution de ce problème.

5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le projet DCAS, ses objectifs, la zone d'application qui est la zone portuaire havraise, ainsi que les problèmes d'optimisation rencontrés et leurs formulations par des modèles de programmation mathématique. Le problème de transfert de navettes ferroviaires est ainsi formulé par un programme linéaire en nombres entiers à contraintes quadratiques. Celui-ci est transformé en un programme linéaire puis résolu avec le solveur CPLEX. Le problème d'ordonnancement des trains et navettes sur les voies de la cour ferroviaire est ensuite modélisé. Trois formulations du problème d'affectation des trains/navettes aux voies est ensuite présenté en détaillant le sens de chaque contrainte.

Chapitre IV

Résolution par méthodes de couplage optimisation simulation

1 Introduction

La modélisation mathématique et informatique est devenue un outil indispensable pour les décideurs industriels et pour les scientifiques. La plupart des avancées scientifiques dépendent des modèles. Ces modèles sont des expressions de la théorie et lui fournissent un moyen d'être confrontée à des données réelles et conduisent à des nouvelles connaissances. La liste des succès de la modélisation est longue, et va rapidement devenir plus qu'une spécialité cantonnée au développement des méthodes quantitatives. Ainsi, l'expérimentation de la modélisation mathématique finira par se transformer en un troisième domaine de la science.

Ce chapitre est consacré à la résolution des problèmes de transfert des conteneurs entre les terminaux maritimes et la plateforme multimodale du port du Havre formulés, en partie, au troisième chapitre. Une méthode de couplage optimisation simulation est utilisée pour la résolution de ces problèmes. Nous commençons par des notions sur l'optimisation en recherche opérationnelle (optimisation combinatoire) et les méthodes de résolution approchées (heuristiques et métaheuristiques). Puis, nous présentons les différents paradigmes de la simulation (continue, discrète et multiagents). Les avantages et les inconvénients de l'utilisation de l'optimisation et de la simulation sont ensuite présentés. Nous exposons, par la suite, les avantages de la combinaison optimisation simulation pour la résolution des problèmes de transfert de conteneurs. Le modèle de simulation des systèmes logistiques introduits au chapitre précédent est ensuite présenté en classant les résultats en indicateurs de performance. Une première application de couplage basée sur un algorithme génétique pour la résolution du problème du placement des trains sur les voies de la cour ferroviaire est détaillée. Une seconde application visant la minimisation des temps de service et des temps d'attente mutuels des portiques à

la cour ferroviaire est ensuite étudiée. Nous proposons, dans cette dernière approche, une méthode de collaboration agent et un algorithme de colonie de fourmis. Les résultats montrent que ces algorithmes proposés minimisent les temps d'attente des portiques et la charge totale de manutention.

2 Généralités sur l'optimisation

2.1 l'optimisation mathématique

L'optimisation est une branche des mathématiques qui a pour objectifs, la modélisation, l'analyse et la résolution analytique ou numérique d'un problème dit problème d'optimisation. Un problème d'optimisation consiste à déterminer la ou les solutions qui optimisent une fonction en respectant un ensemble de contraintes. L'optimisation est utilisée dans plusieurs domaines à la frontière entre les mathématiques, l'informatique et l'économie. Ainsi, elle est spécialement utilisée en Recherche Opérationnelle, en analyse numérique, en statistique, en théorie des jeux et en théorie du contrôle et de la commande.

Actuellement, l'optimisation est utilisée par différents chercheurs et industriels pour la résolution de tout système susceptible d'être décrit par un modèle mathématique. La qualité des résultats obtenus dépend de la pertinence du modèle qui reflète le système étudié, de l'efficacité des approches algorithmiques développées pour la résolution et des moyens pour le traitement numérique. Les applications vont de l'optimisation des prix des ventes, du rendement des appareils, des réactions chimiques, de la planification des transports, de la construction d'un avion, etc.

2.2 Optimisation combinatoire

L'optimisation combinatoire (dite également discrète) consiste à déterminer l'optimum (maximum ou minimum) d'une fonction sur un ensemble discret (fini ou dénombrable) sous (ou sans) contraintes. La forme la plus générale d'un problème d'optimisation combinatoire est formellement exprimée par :

$$\underset{S \subseteq N}{\text{Min}} \{f(S) : S \in R\}$$

- Un ensemble discret N ,
- Une fonction $f : 2^N \rightarrow \mathbb{R}$, dite fonction objectif,
- Un ensemble R de sous-ensembles de N , appelé ensemble des solutions réalisables.

La résolution d'un problème d'optimisation combinatoire dans le cas d'un ensemble de solutions réalisables fini est un problème facile en théorie. En effet, il suffit de comparer toutes les solutions et d'en choisir la meilleure. Néanmoins, en pratique cette comparaison est très coûteuse en temps. Ainsi, pour un problème de voyageur de commerce qui cherche à visiter n villes à moindre coût nécessite d'énumérer toutes les solutions qui sont au nombre de $n!$. Pour $n = 80$, le nombre de combinaisons à tester (quelque 7.15×10^{118}) dépasse déjà le nombre d'atomes de l'univers dans sa partie accessible à nos yeux (environ 10^{80})!

Dans la plupart des cas, les problèmes d'optimisation combinatoire sont NP-difficile, c'est-à-dire des problèmes qu'on peut résoudre par des algorithmes polynomiaux par une machine de Turing non déterministe. À moins que la classe P (classe des problèmes qu'on peut résoudre en temps polynomial par une machine de Turing déterministe) soit égale à la classe NP, il n'existe pas d'algorithmes capables de résoudre ce type de problème d'optimisation combinatoire en un temps raisonnable. On fait alors appel aux méthodes de branch and bound, à l'optimisation linéaire en nombres entiers et à la programmation par contraintes pour la résolution des problèmes d'optimisation combinatoire. En pratique, vu l'explosion combinatoire et l'état actuel des ordinateurs, la complexité acceptable n'est que polynomiale. C'est pour cette raison que la plupart des chercheurs et industriels se contentent d'avoir une solution approchée obtenue par une heuristique ou une métaheuristique.

2.2.1 Heuristiques et métaheuristiques

Une heuristique, au sens de l'algorithmique, est un algorithme pour la recherche d'une solution approchée pour un problème d'optimisation difficile. Elle est également utilisée pour accélérer des méthodes de résolution exactes. Un exemple type d'une heuristique est une heuristique gloutonne, c'est-à-dire, qui choisit l'optimum à chaque étape de l'algorithme. Par exemple, le choix de la plus proche ville voisine pour le problème du voyageur de commerce. La qualité d'une heuristique peut s'évaluer par la qualité de la solution, son coût temporel ou en espace ou par son domaine d'application (domaine d'optimalité ou d'admissibilité).

Une métaheuristique, quant à elle, est une méthode algorithmique pour la résolution de problèmes d'optimisation difficiles avec un haut niveau d'abstraction lui permettant d'être adaptée à une large gamme de problèmes différents. Elle peut aller d'une simple heuristique de recherche locale à des algorithmes plus complexes. Les métaheuristiques s'articulent autour de plusieurs notions :

1. **Voisinage** : Le voisinage d'une solution est l'ensemble des solutions qu'on peut atteindre par une série de transformations données. Un exemple type pour une solution du voyageur

de commerce est l'ensemble des solutions obtenues en permutant deux villes choisies au hasard par exemple.

2. **Intensification** : appelée également exploitation, elle vise à exploiter l'information déjà obtenue pour définir et parcourir les zones intéressantes de l'espace de recherche.
3. **Exploration** : appelée autrement diversification, elle consiste à appliquer des transformations qui permettent d'atteindre des zones de l'espace de recherche éventuellement non balayées par les processus d'intensification.

Parmi les classifications des métaheuristiques, on trouve les métaheuristiques à solution unique comme la recherche taboue ou le recuit simulé et les métaheuristiques à base de population comme les algorithmes génétiques et les algorithmes de colonie de fourmis. Des métaheuristiques hybrides et parallèles sont également utilisées.

3 Généralités sur la simulation

3.1 Essai de définition

La simulation est l'imitation du comportement d'un processus du monde réel ou d'un système au fil du temps [Law et Kelton,1991]. Le fait de simuler quelque chose exige d'abord qu'un modèle soit mis au point. Ce modèle représente les principales caractéristiques ou des comportements/fonctions du système physique ou abstrait sélectionné. Le modèle représente le système lui-même, tandis que la simulation représente le fonctionnement du système au cours du temps.

La simulation est utilisée dans de nombreux contextes, tels que la simulation de la technologie pour l'optimisation des performances, des techniques de sécurité, des tests, etc. La simulation est également utilisée avec la modélisation scientifique des systèmes naturels ou des systèmes humains afin de mieux comprendre leur fonctionnement [Pierreval et al.,2007]. La simulation peut être utilisée pour montrer les effets réels éventuels de conditions alternatives et des pistes d'action. La simulation peut être utilisée lorsque le système réel ne saurait être engagé, car il peut ne pas être accessible, ou il peut être dangereux, inacceptable ou coûteux à engager, ou il est conçu, mais pas encore construit.

Les questions clés en matière de simulation comprennent l'acquisition des sources d'information valables pour la sélection pertinente des caractéristiques et des comportements clés, l'utilisation des hypothèses et approximations simples dans la simulation et la fidélité et la validité des résultats de simulation. Selon [Drogoul,1993] : "On nomme simulation la démarche scientifique

qui consiste à réaliser une reproduction artificielle, appelée modèle, d'un phénomène réel que l'on désire étudier, à observer le comportement de cette reproduction lorsqu'on en fait varier certains paramètres, et à en déduire ce qui passerait dans la réalité sous l'influence de variations analogues. La démarche de simulation passe donc par trois étapes distinctes : l'étape de modélisation, qui consiste à construire le modèle du phénomène à étudier, l'étape d'expérimentation, qui consiste à soumettre ce modèle à un certain type de variations, et l'étape de validation, qui consiste à confronter les données expérimentales obtenues avec le modèle à la réalité."

3.2 Les différents paradigmes

3.2.1 Simulation à événements discrets

Dans ce type de simulation, les variables d'état que l'on désire connaître à tout instant sont discrètes et changent aux instants d'occurrences des événements. L'ensemble des valeurs que ces variables peuvent prendre constitue l'espace d'état du système dans lequel chaque changement d'état ou événement se produit à des dates d'événement. La simulation à événements discrets permet de décrire des systèmes dont l'état change à des instants précis. Une de ses limites est due à son principe qui consiste à décrire les changements d'état par des algorithmes et à définir pour chaque événement les contraintes de précédence entre les activités.

3.2.2 Simulation des systèmes dynamiques

Appelée également simulation continue, elle concerne la modélisation d'un système évoluant au cours du temps, représenté par des variables d'état qui évoluent continûment dans le temps. Les modèles de simulation continus reposent généralement sur des équations différentielles qui régissent les relations entre les variations des variables d'état. Dans le cas où ces équations différentielles sont particulièrement simples, elles peuvent être résolues analytiquement. Dans le cas contraire (la grande majorité des cas), sont utilisées des techniques numériques telles que l'intégration de type Runge-kutta [Law et Kelton,1991].

La simulation continue peut traduire facilement le fonctionnement continu d'industries de process (chimie par exemple). [Pierreval,2006] souligne l'intérêt d'une simulation combinée continue-discrète, appelée aussi hybride, pour l'aide au pilotage d'une fonderie lourde. La simulation continue est aussi utilisée selon la dimension spatiale et temporelle du système simulé. [Caux et Pierreval,2006] développe une procédure d'agrégation des flux pour la simulation continue de réseaux de sites industriels, alors que [Pierreval et al.,2007] déclinent une démarche de simulation continue sur une chaîne logistique dans l'industrie de l'automobile.

3.2.3 Simulation multi agents

Le paradigme agent constitue une nouvelle vision de développement des systèmes dans laquelle ces derniers peuvent être décomposés en sous-composants autonomes. Plusieurs définitions sont proposées dans la littérature pour le terme agent :

Selon [Jenning et al.,1998] : "Un agent est un système informatique, situé dans un environnement, et qui agit d'une façon autonome et flexible pour atteindre les objectifs pour lesquels il a été conçu". Selon [Shoham,1993] : " Un agent est une entité qui fonctionne continuellement et de manière autonome dans un environnement où d'autres processus se déroulent et d'autres agents existent". Une autre définition est donnée par [Ferber et Perrot,1995] : "Un agent est une entité autonome, réelle ou abstraite, qui est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, et qui, dans un univers multi-agents, peut communiquer avec d'autres agents, et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de ses connaissances et des interactions avec les autres agents".

Un système multi-agents est un système composé d'agents autonomes ayant pour but de coopérer, interagir et communiquer afin d'atteindre un objectif collectif. Des enjeux sociaux, tels que la coopération, la communication, la coordination, la compétition entre les agents caractérisent les systèmes multi-agents.

4 Comparaison optimisation simulation

Dans la gestion des opérations inhérentes aux domaines du transport et de la logistique, les décideurs sont confrontés à de nombreux problèmes de décision à différents niveaux. Par exemple, les problèmes de localisation, le problème de dimensionnement des ressources nécessitent des décisions efficaces améliorant les performances de la chaîne d'approvisionnement d'une façon globale (Supply chain Management). La complexité des problèmes de la chaîne logistique est due à plusieurs facteurs :

- Le niveau élevé d'incertitude de l'offre et de la demande,
- Les objectifs contradictoires,
- L'imprécision de l'information,
- La multitude des variables de décision et contraintes,
- La multiplicité des décisions individuelles avec différents niveaux d'importance.

L'utilisation des modèles d'optimisation mathématique reste inefficace du fait que ces modèles sont élaborés avec des hypothèses simplificatrices, et sont dans la plupart des cas des modèles déterministes et nécessitent d'avoir une visibilité suffisante pour toutes les données du problème.

Alors que les problèmes réels :

- Sont multi-objectifs et très contraignants,
- Ont des aléas et événements imprévus,
- Ont un manque et/ou une imprécision d'information.

La force de la simulation est sa flexibilité pour accueillir des éléments stochastiques arbitraires, mais ne fournit pas la capacité de trouver l'ensemble des valeurs optimales des décisions des variables. Pour cette raison, l'intégration de la simulation et de l'optimisation dans le cadre de la chaîne logistique fournit aux décideurs une solution boîte à outils complète pour faire des choix judicieux.

5 Couplage optimisation simulation

5.1 Avantages du couplage optimisation simulation

Si la modélisation mathématique permet de construire un schéma représentatif, pertinent, prédictif du système physique ou abstrait, la simulation permet de fournir des estimations plus au moins réalistes et d'évaluer différents scénarios (règles de gestions de ressource, dimensionnement de ressources, etc.). Ayant déjà fait ses preuves dans le monde de l'industrie [[Law et Kelton,1991](#)], elle a pour objectif d'aider le décideur à prendre des décisions importantes en logistique, en conception ou encore en investissement, suite aux résultats obtenus d'après différents scénarios. C'est pourquoi la simulation paraît être un outil parfaitement adapté pour tester et analyser différentes planifications de la logistique portuaire.

Plusieurs motivations nous amènent à faire la combinaison optimisation/simulation :

La première est de tester les solutions trouvées par les algorithmes de résolution du modèle mathématique. Ces algorithmes permettent de trouver une bonne solution à partir de données statiques. Cependant, un certain nombre de paramètres aléatoires interviennent dans le réel et ces aléas peuvent dégrader une solution. Les paramètres aléatoires sont par exemple le nombre de conteneurs à livrer ou à collecter, le temps passé par un conteneur dans un terminal, etc. La simulation vise donc, dans un premier temps à tester la robustesse d'une solution trouvée par les algorithmes d'optimisation dans un environnement aléatoire.

La deuxième motivation est de fournir un outil d'aide à la décision pour le personnel du port chargé de mettre en œuvre, en réalité, les résultats de processus d'optimisation. Grâce à cet outil, ils peuvent eux-mêmes tester des planifications et orienter leurs choix en analysant les sorties du simulateur. Cette sortie est un ensemble d'indicateurs choisis judicieusement ou une visualisation graphique du résultat permettant de voir le déroulement du système dans le temps.

Ainsi, suite à une simulation, il est possible d'apercevoir des défauts d'une composante choisie et d'en déduire des corrections de certains choix stratégiques. Suite à ces corrections, de nouvelles simulations peuvent être lancées jusqu'à obtenir "la bonne configuration". Le système qui sera mis donc en place comportera deux modules en interaction permanente : un module d'optimisation constitué des algorithmes de résolutions capable de fournir une bonne solution de planification logistique, et un module de simulation capable de tester la planification, les résultats obtenus pouvant être analysés et interprétés de manière à apporter des améliorations.

5.1.1 Deux approches complémentaires

L'optimisation permet de trouver une solution qui minimise (ou maximise) une fonction objectif tandis que la simulation est utilisée pour faire des estimations réalistes et évaluer différents scénarios d'un système étudié. Ces deux approches combinées entre elles sont donc complémentaires comme le montre bien le tableau IV.1 :

	Avantages	Inconvénients
Simulation	Description détaillée d'un problème	Ne peut pas optimiser un système
Optimisation	Peut trouver une solution en un temps raisonnable	Modèle simpliste et déterministe

Tableau IV.1 – Optimisation versus simulation

5.1.2 Test et optimisation de plusieurs scénarios

Un autre avantage intéressant de la combinaison optimisation simulation est la possibilité de tester plusieurs jeux de données et plusieurs scénarios. Cette possibilité est souvent indispensable pour évaluer la robustesse des solutions proposées, de voir leurs limites, de tester leurs stabilités face à des perturbations ou de mesurer la sensibilité de certains paramètres du problème. Ainsi, les derniers outils de la simulation permettent d'exécuter des modules d'optimisations sur des itérations ou répliques données. L'exécution parallèle des modèles d'optimisation simulation a également été permises par la démocratisation des prix des machines multi-cœurs.

6 Modèle de simulation du port du Havre

Les principales motivations de la construction de ce modèle étaient le développement de nouveaux schémas de manœuvres des opérations ferroviaires intra-portuaires, la validation de

l'équation économique de nouveau schéma logistique avec le terminal multimodal et du schéma DCAS. Il a également pour objectif de partager, d'une façon pédagogique, avec les futurs acteurs les améliorations organisationnelles générées par le TMM et l'évaluation de dimensionnement des ressources requises pour le transfert des conteneurs.

6.1 Description de système simulé

La zone simulée comporte les terminaux à conteneurs qui seront liés au terminal multimodal : le terminal Atlantique et les terminaux de port 2000 : TDF, TPO, TNMSC. La figure IV.1 montre une vue globale de la zone simulée.



Figure IV.1 – Vue satellite de la zone simulée

La simulation commence avec l'arrivée des trains grandes lignes et barges se poursuit par déchargement des conteneurs sur les terminaux maritimes et se termine par le départ des trains grandes lignes et des barges. Les trains grandes lignes (TGL) arrivent sur le faisceau de réception, la locomotive de TGL quitte le TMM et une locomotive diesel vient pour le placer sur la cour ferroviaire. Les navettes ferroviaires récupèrent les conteneurs des TGL à la cour ferroviaires et des barges dans la cour fluviale. Les navettes ferroviaires font les allers-retours entre le TMM et les terminaux maritimes (TM). Un trajet de TMM vers les TM est un trajet export tandis que le trajet inverse est appelé trajet import. Les navettes déchargent les conteneurs export sur les buffers des terminaux maritimes et rechargent les conteneurs imports à destination du TMM.

6.2 Environnement de développement

Le modèle de simulation élaboré est conçu sous le logiciel Anylogic qui est un outil multi-paradigme basé sur le langage Java avec interface graphique. Il est construit en utilisant la

combinaison des deux paradigmes des systèmes multi-agents et la simulation à événements discrets. Ainsi, les équipements de manutention comme les portiques ferroviaires et fluviaux sont modélisés par des agents et contrôlés par des diagrammes d'états et les arrivées des barges des trains de grandes lignes sont définies par des événements discrets. Le modèle est alimenté en initialisation par des jeux de données à partir de fichiers Excel comportant le nombre de conteneurs sur chaque TGL, les délais de livraison des conteneurs, etc. Les agents qui modélisent

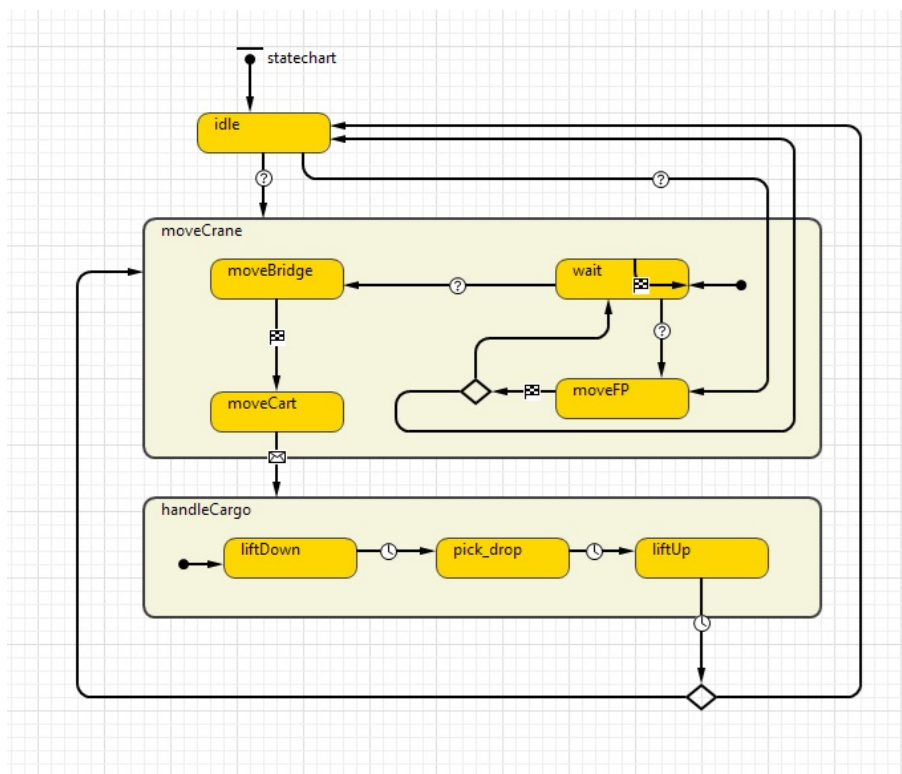


Figure IV.2 – Exemple d'un diagramme d'état

les principales composantes du système simulé peuvent contenir des sous-agents, des fonctions et variables, événements et classes. Cette structure permet une meilleure représentation du système.

6.3 Règles de gestion

6.3.1 Ordonnancement des trains de grandes lignes

Pour déterminer un ordre d'affectation des trains grandes lignes aux voies de la cour ferroviaire. Nous définissons une fonction de priorité pour chaque TGL. Pour chaque train $i \in T$,

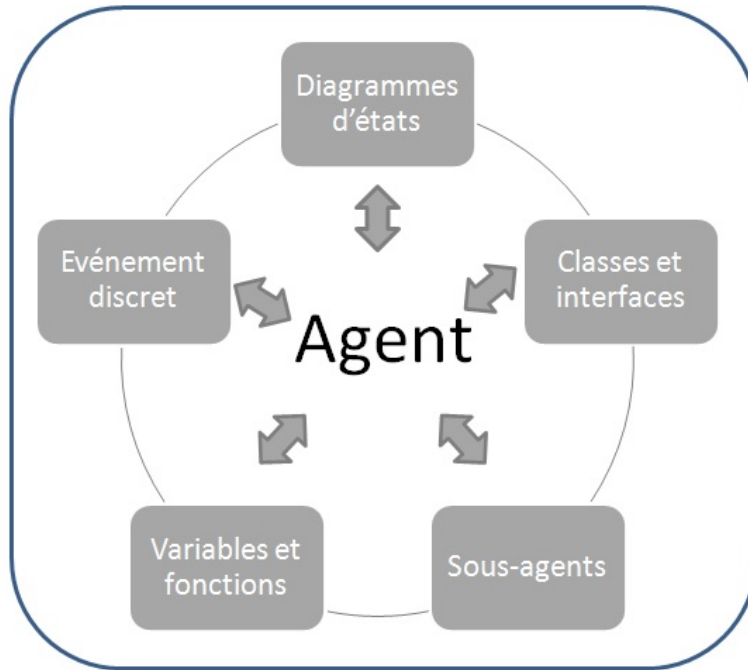


Figure IV.3 – Conception agent du modèle de simulation

(avec T l'ensemble de trains) :

$$P_i = \frac{\alpha_1}{ed_i} + \frac{\alpha_2}{dt_i} + \frac{\alpha_3}{\sum_{i \in T} nc_i} \quad (\text{IV.1})$$

avec

$$\alpha_i \in [0, 1], i \in \{1, 2, 3\}, \sum_{i \in \{1,2,3\}} \alpha_i = 1$$

- ed_i : le délai de livraison export pour le conteneur le plus urgent sur le train i ,
- dt_i : l'heure limite de départ du train i ,
- nc_i : le nombre de conteneurs du train i .

Les coefficients α_i sont des paramètres de pondérations qui déterminent l'importance accordée à chacun des trois termes qui composent la fonction de priorité. Ils laissent le choix au décideur de privilégier soit les flux exports, les flux imports ou la massification des volumes transportés par les trains. Une fois cette fonction définie, les trains sont placés sur la cour ferroviaire suivant l'ordre décroissant de leurs fonctions de priorité.

6.3.2 Règles de manutention rail-rail

Pour le transbordement des conteneurs entre les trains grandes lignes et les trains navettes, nous avons testé trois règles de manutention différentes. Dans la première règle, le portique de gauche (respectivement le portique de droite) commence par la manutention du conteneur le plus à gauche sur un train (respectivement le plus à droite) et le pose sur le wagon vide le plus à gauche (respectivement le plus à droite) d'une navette. La figure IV.4, montre un exemple des opérations de manutention du portique de gauche qu'on appellera, en l'occurrence, règle "de gauche vers gauche".

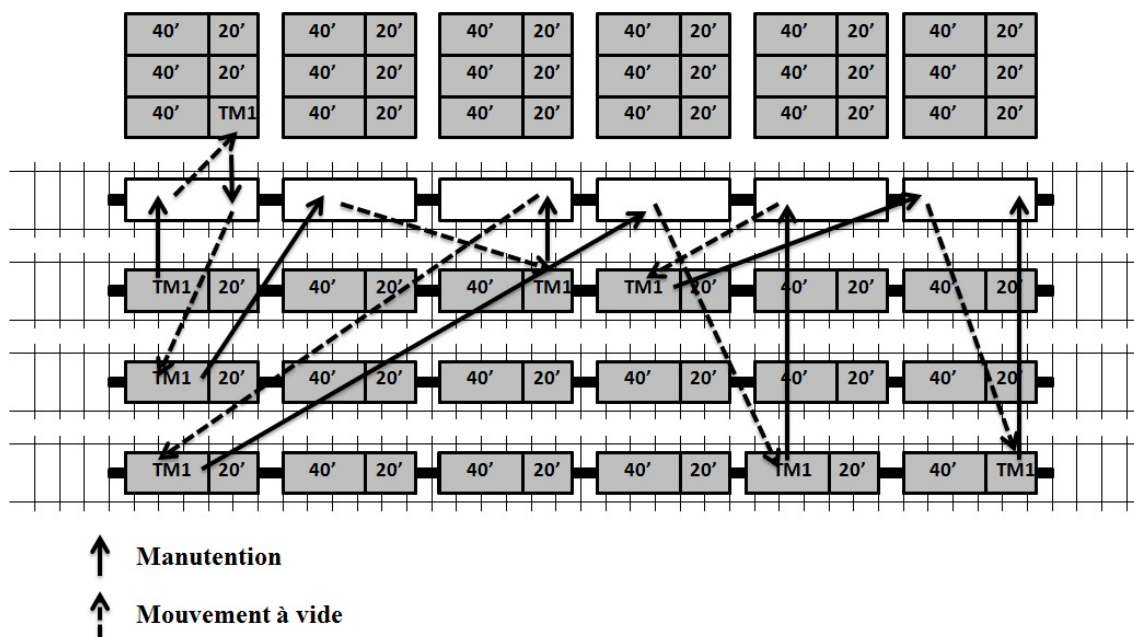


Figure IV.4 – Manutention selon la règle gauche vers gauche

La deuxième règle est une règle gloutonne qui opère en manutentionnant le plus proche conteneur à chaque itération. La figure IV.5 illustre le fonctionnement de cette règle.

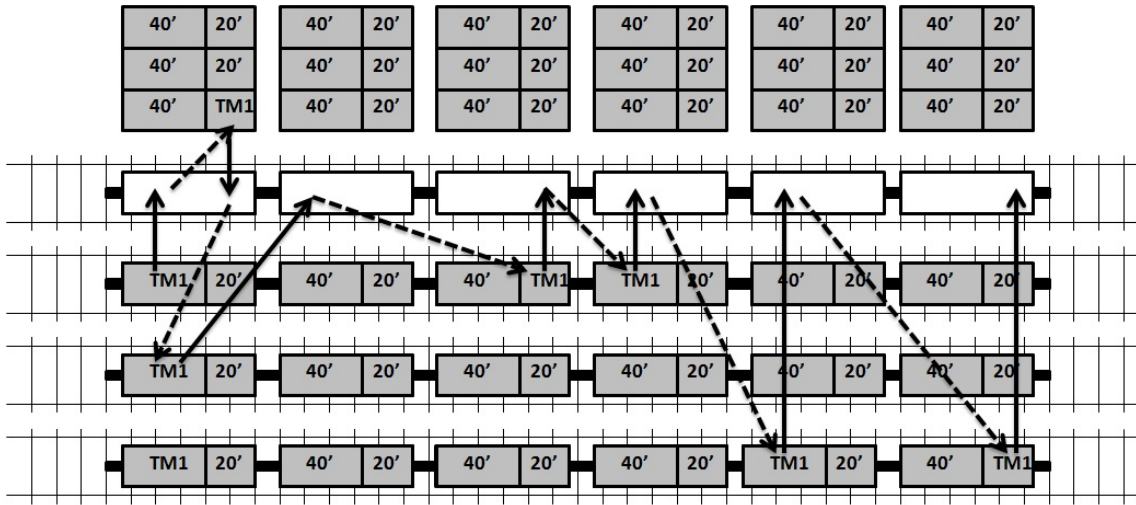


Figure IV.5 – Manutention selon la règle du plus proche

La troisième règle est similaire à la deuxième. Elle a juste la particularité de faire les manutentions des plus proches conteneurs dans un seul sens. Le portique de gauche par exemple va de gauche à droite, une fois au milieu, il fait le sens inverse (figure IV.6).

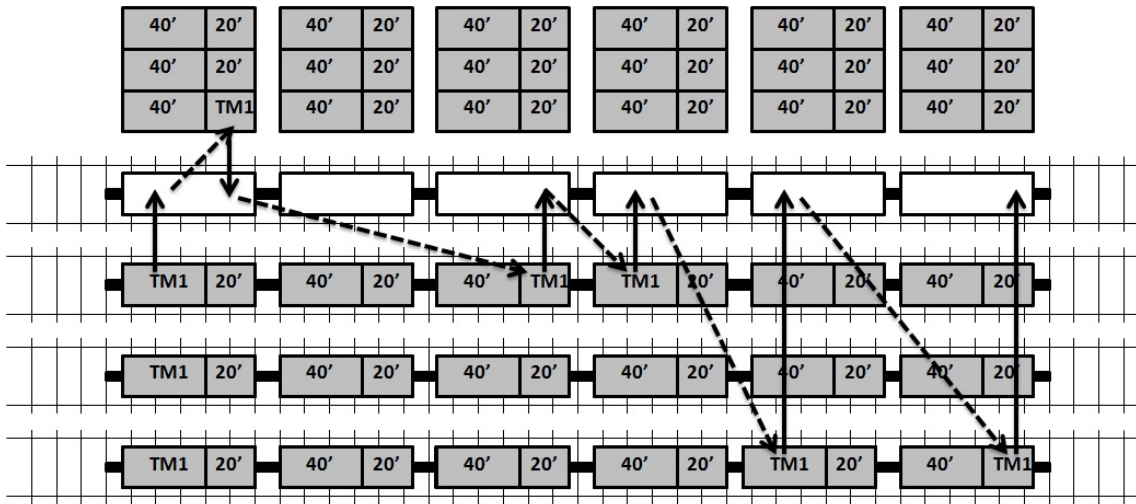


Figure IV.6 – Manutention selon la règle du plus proche dans un sens

6.4 Optimisation via la simulation

Nous avons utilisé l'outil d'optimisation "OptQuest" intégré dans le logiciel de simulation pour déterminer les meilleures valeurs des différents paramètres du modèle. Cet outil d'optimisation développé par la société "Optek" est basé sur la métaheuristique de "Recherche par

dispersion" appelée en anglais "Scatter Search".

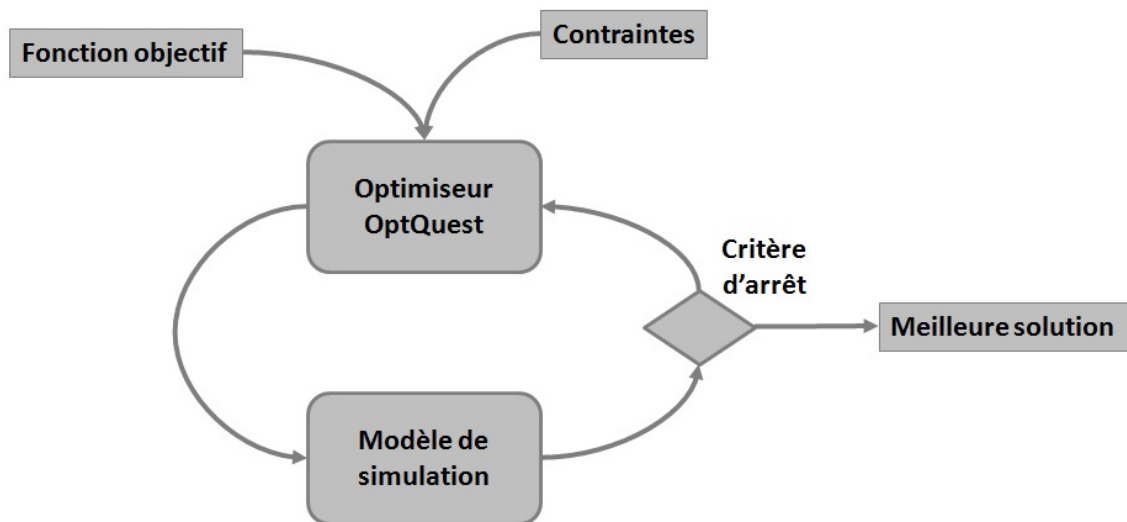


Figure IV.7 – Illustration OptQuest

L'optimisation via OptQuest fonctionne suivant un principe de lancement de modèle de simulation en lot (figure IV.10). En effet, les paramètres à optimiser sont initialisées au début par des valeurs arbitraires, en définissant les intervalles des différents paramètres (continus, discrets), les contraintes à respecter et les objectifs à atteindre, ce module lance plusieurs itérations du modèle de simulation (possibilité de lancement multiple en parallèle) pour trouver les bonnes valeurs des paramètres. Nous reportons ici un exemple typique d'un cas d'utilisation de cette méthode.

Pour l'ordonnancement des trains de grandes lignes sur la cour ferroviaire, nous avons défini précédemment un coefficient de priorité pour chaque train comportant des paramètres de pondérations α_i . Ces paramètres de pondération constituent l'importance accordée soit à la massification, au respect des délais de livraison import, ou au respect de délais de livraison export. Une problématique posée est de trouver les bonnes valeurs de ces paramètres pour un bon taux de massification et pour un respect des délais. Nous avons donc utilisé OptQuest pour optimiser les valeurs de la fonction de priorité citée plus haut. La figure IV.8, montre la progression de la variation des paramètres. La figure IV.9 suivante montre la progression de la fonction à optimiser, en l'occurrence, le nombre total des conteneurs transférés à temps.

6.5 Résultats de la simulation

Pour mesurer le succès du nouveau système logistique simulé, nous présentons les données de sorties de la simulation sous la forme d'informations critiques appelées communément : les

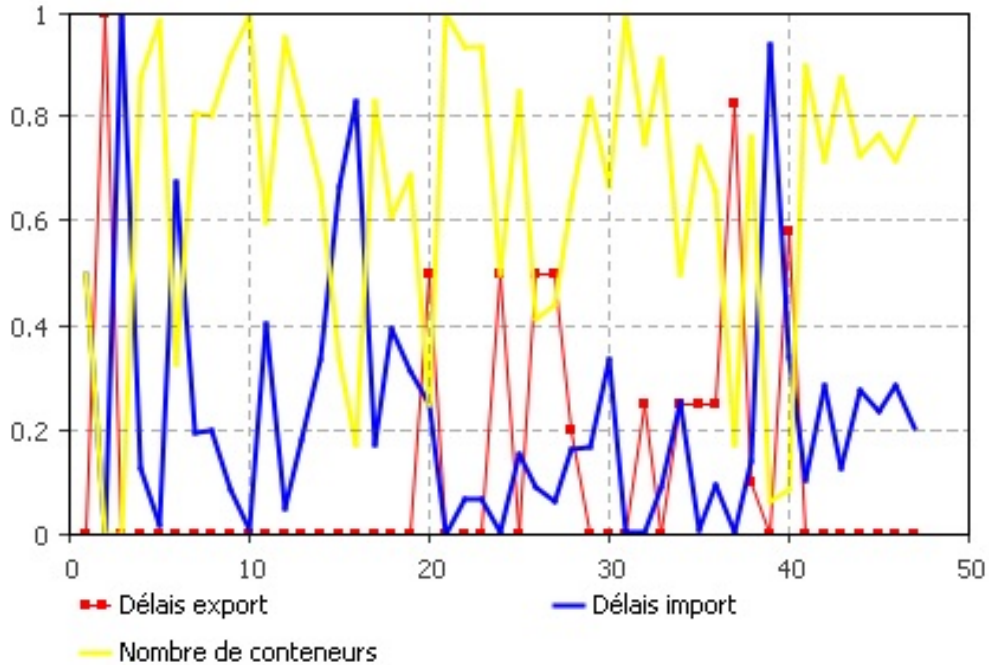


Figure IV.8 – Optimisation des paramètres de pondération

indicateurs de performance. La simulation produit une bonne approximation pour ces indicateurs de performance surtout dans les cas d'études prospectives comme dans notre cas. On peut classer ces indicateurs en : indicateurs organisationnels, financiers, et écologiques.

6.5.1 Indicateurs organisationnels

Ces indicateurs organisationnels donnent une idée sur la réalisabilité du modèle d'une part et la performance du nouveau système logistique d'une part. Ainsi, la figure IV.11 montre la moyenne de nombre de manutentions qu'a subit un conteneur (nombre de coups de pince). Nous savons que pour chaque conteneur transféré en import par exemple, il subit une première manutention sur le terminal maritime, une deuxième lors de transbordement vers un train de grandes lignes ou vers une barge, et éventuellement une troisième si ce conteneur est stocké dans le buffer (temporairement) puis rechargé sur une barge ou sur un train de grande ligne. Cet indicateur nous renseigne sur le degré de bufférisation utilisée (stockage temporaire). On peut remarquer par exemple que dans la cour fluviale en sens import, tous les conteneurs sont déposés à terre. Ceci est dû au fait que les bargistes préfèrent choisir les positions des conteneurs sur leurs barges pour différentes raisons (succession des futurs points de livraison des conteneurs

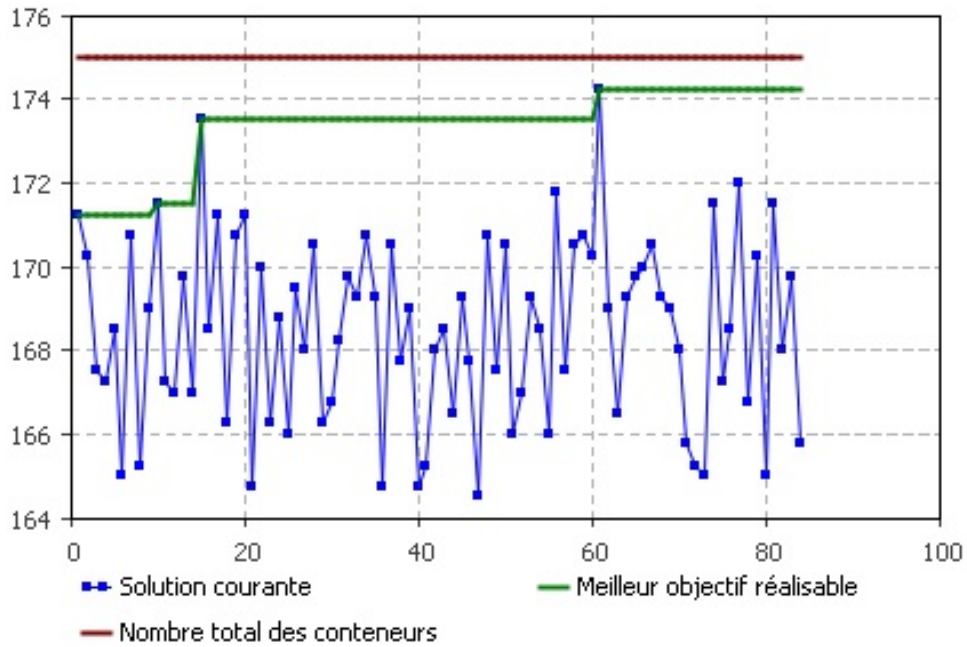


Figure IV.9 – Progression de la recherche de la solution

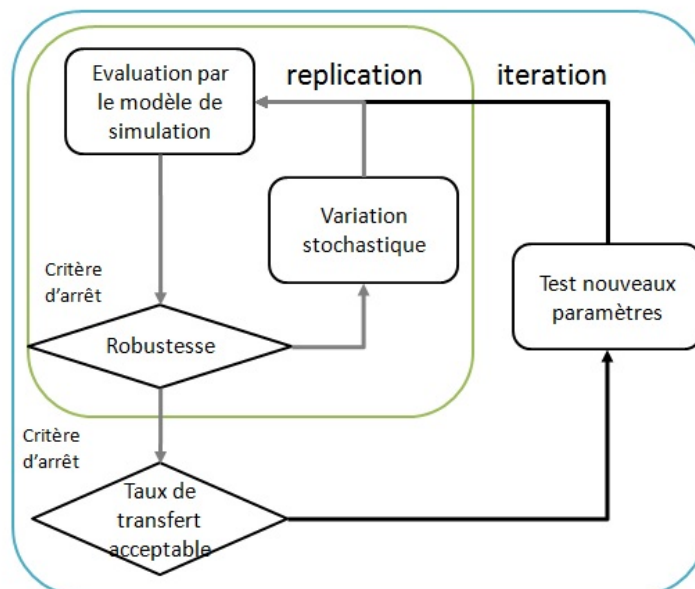


Figure IV.10 – Génération de données de sorties

pour éviter les remaniements et contraintes de la stabilité de la barge en répartissant les poids des conteneurs).

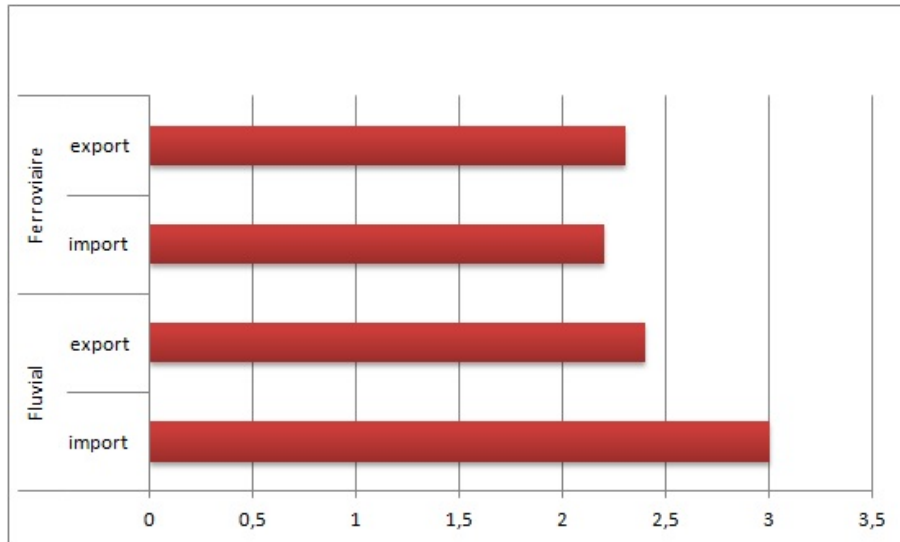


Figure IV.11 – Nombre de manutention par conteneur au TMM

La figure IV.12 donne l'évolution des taux de remplissage des navettes et la répartition fluvial/ferroviaire des conteneurs sur les différentes navettes de la journée. Nous pouvons en faire des conclusions sur les mouvements des navettes et l'arrivée/départ des trains grandes lignes et barges.

6.5.2 Indicateurs financiers

Une interface graphique de la simulation présente les différentes données de sorties financières résultant du modèle de simulation. On y trouve, entre autres, le coût total des opérations au multimodal, le coût des ressources humaines, les coûts des infrastructures, les quantités des émissions de dioxyde de carbone émises, etc. Puisque quelques données d'entrée utilisées contiennent certains éléments incertains (comme la position des conteneurs sur les trains grandes lignes qui sont générés aléatoirement lors du lancement de modèle de simulation et les délais de livraison de chaque conteneur) et pour avoir des résultats robustes, nous avons utilisé la méthode Monte Carlo. Cette méthode exécute la simulation plusieurs fois pour avoir la distribution des données de sortie.

La figure IV.14 montre la distribution des coûts de transfert des conteneurs selon les règles de manutention définies précédemment pour le transfert des conteneurs à la cour ferroviaire, la barre en gras représente la moyenne de cette distribution. Notons que pour des raisons de

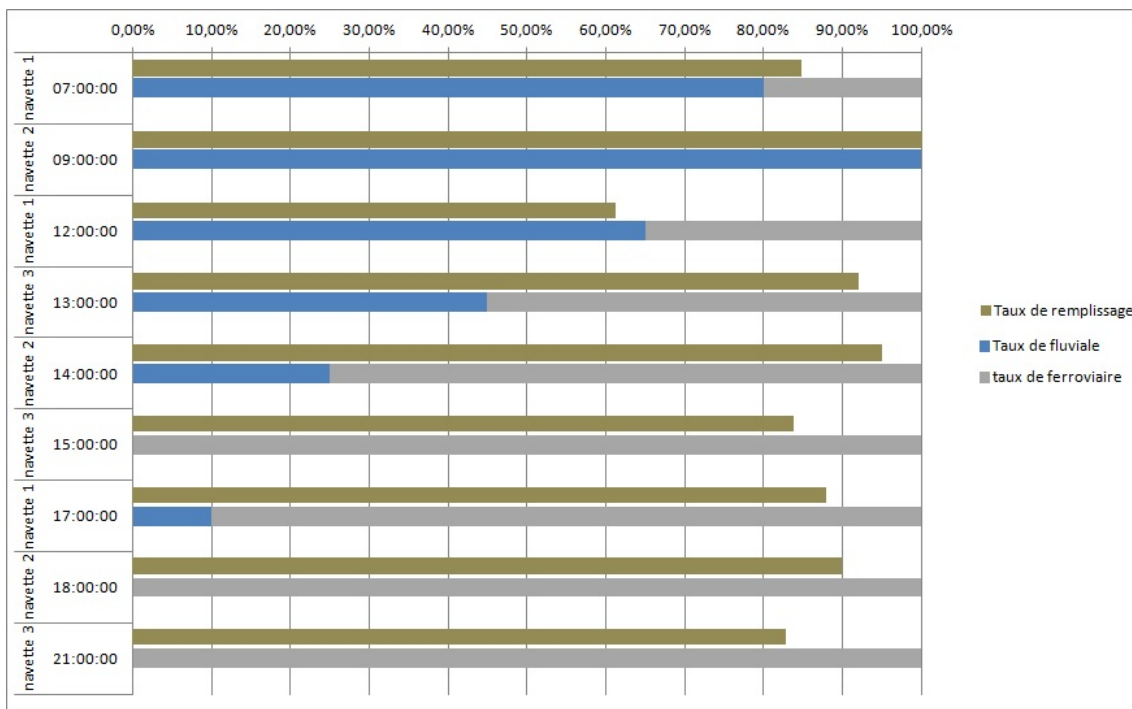


Figure IV.12 – Évolution des taux de remplissage des navettes

confidentialité des données, nous ne donnons pas les valeurs sur l'axe des abscisses et ces résultats sont fournis donc à titre formel. Nous pouvons remarquer de cette figure que les coûts ne sont pas dispersés ce qui montre que le modèle construit est robuste et moins sensible aux perturbations.

6.5.3 Comparaison système actuel/système avec TMM

Une des possibilités que permet le modèle de simulation développé est la comparaison des deux schémas logistiques avec et sans terminal multimodal en termes de coût et de qualité de service. Cette comparaison concerne les coûts unitaires d'une UTI de même caractéristiques (taille, origine/destination) acheminée par les deux schémas. Toutefois, pour des raisons de confidentialité des données, nous n'allons pas donner une comparaison quantitative entre les deux systèmes logistiques. Nous donnerons néanmoins quelques caractéristiques qualitatives de chacun des schémas. D'ores et déjà, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Un seuil de pertinence de terminal multimodal est identifié : en effet, à partir d'un certain volume de trafic, le nouveau terminal devient compétitif. C'est une conséquence directe de la massification des flux : Les avantages apportés par la concentration des marchandises aux transporteurs fluviaux et ferroviaires sont contrebalancés par les surcoûts induits

IV.6 Modèle de simulation du port du Havre

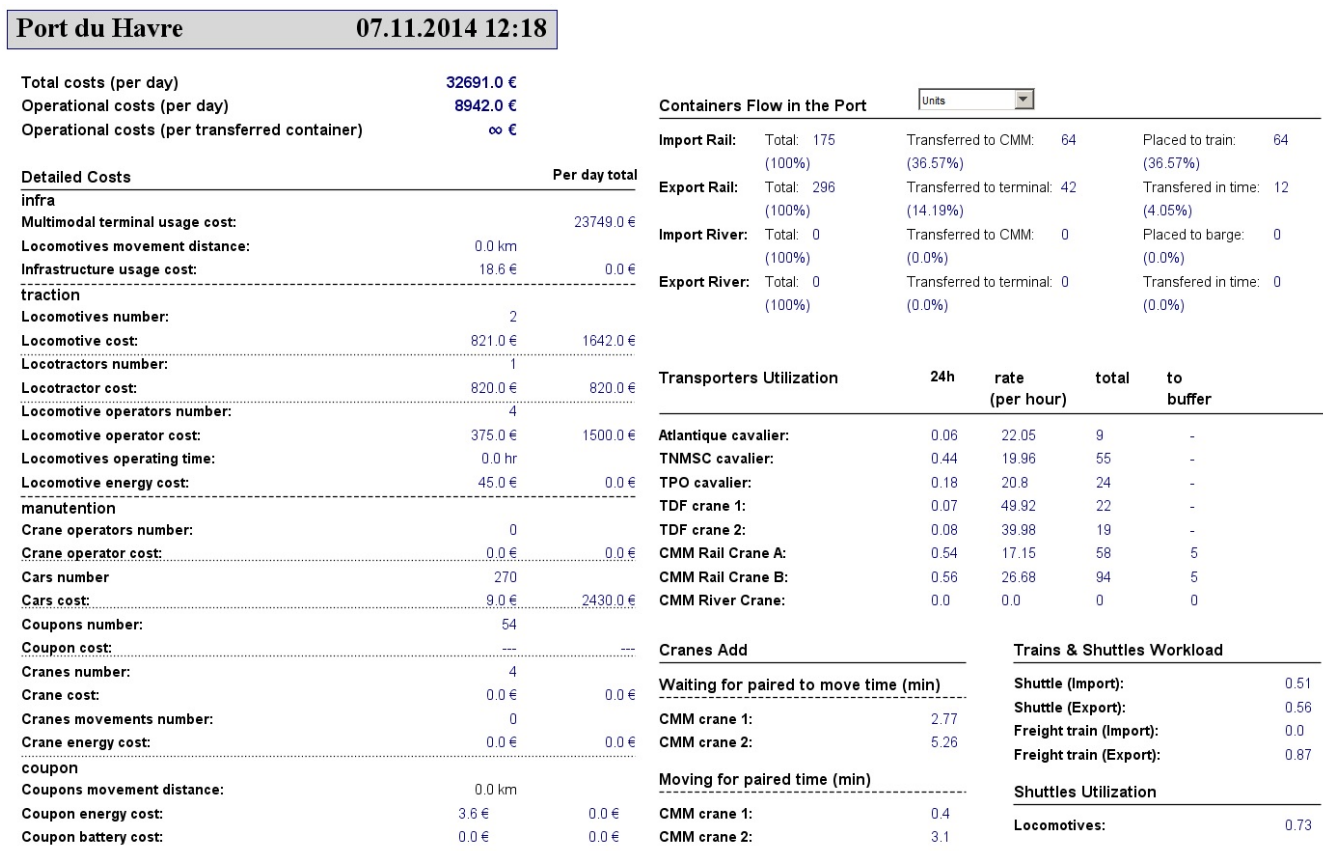


Figure IV.13 – Interface graphique des données de sortie de la simulation

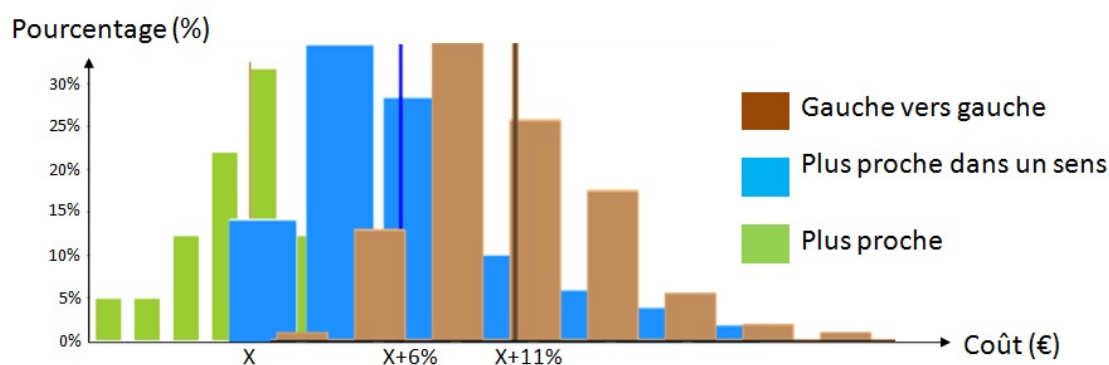


Figure IV.14 – Distribution des prix selon règles de manutention à la cour ferroviaire

par les ruptures de charge supplémentaires. Étant donné que ce surcoût intègre des frais financiers issus d'investissements très importants, plus, le volume de conteneurs sera élevé, plus le surcoût par conteneur sera réduit.

- En outre, la compétitivité du nouveau schéma logistique dépend de l'organisation des opérations au sein du terminal multimodal. En effet, l'optimisation de l'organisation lo-

gistique du TMM permet un gain non négligeable en termes de productivité des navettes ferroviaires, des engins de manutention et donc une baisse des coûts liés aux transferts et aux ruptures de charge.

Une des caractéristiques qui fait baisser la productivité des portiques sur la cour ferroviaire est le temps d'attente des deux portiques. En effet, pour que le portique de droite dépose un conteneur dans la zone de gauche, il doit attendre que le portique de gauche finisse ses tâches à cet endroit. Une autre caractéristique est le recours excessif aux déposes à terre. Cette pratique, due à plusieurs causes comme la non-présence des navettes de correspondance, entraîne des manutentions supplémentaires et coûte en termes de productivité. C'est pour ces raisons que nous proposons, dans les sections suivantes, des méthodes d'optimisation et des stratégies de collaboration des systèmes multi agents pour la résolution des problématiques de gestion des attentes.

6.5.4 Comparaison système DCAS/TMM

Sur le plan théorique, dans le contexte portuaire havrais, les wagons de type DCAS permettent de réduire les coûts de transfert des conteneurs entre les terminaux maritimes et le terminal multimodal. Ainsi, le coupon DCAS évitera d'abord aux locomotives de faire les manœuvres de placement, du tri et de la découpe des wagons sur les voies propres des terminaux maritimes et sur le terminal multimodal. Il permettra aux locomotives de se concentrer sur la traction et le transfert des wagons et donc apportera un gain au niveau de la fréquence de rotation. Ensuite, il permettra au personnel de chaque site d'améliorer son efficacité par une meilleure connaissance de l'exploitation de son installation. Sur le plan expérimental, d'après

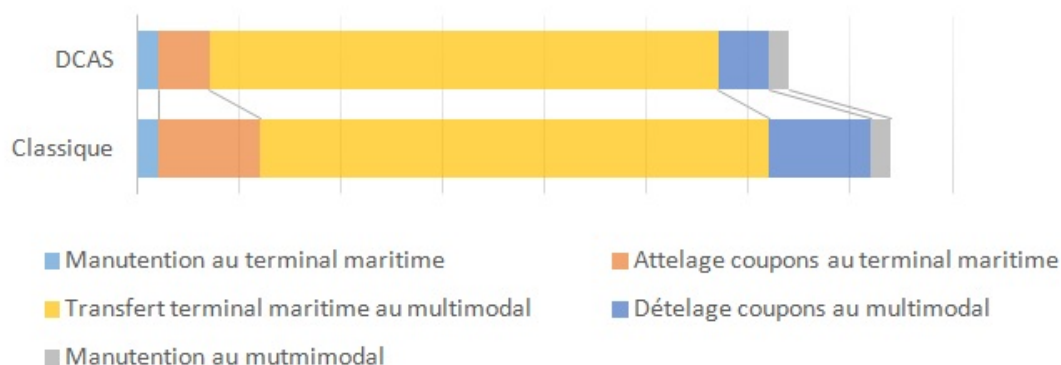


Figure IV.15 – Comparaison coûts système DCAS et classique

IV.6 Modèle de simulation du port du Havre

les résultats de la simulation et d'après la comparaison système classique/système DCAS, ce dernier s'avère le moins coûteux sur tous les jeux de données d'entrée testés. Néanmoins, la pertinence économique de modèle DCAS dépendra du prix de fabrication/acquisition des coupons et l'horizon temporel nécessaire pour l'amortissement du surcoût dû à l'introduction de ce nouvel équipement technologique. La différence entre le système classique et le DCAS sur la zone portuaire havraise devrait permettre de financer les surcoûts de l'achat des coupons télé-opérés. Elle ne permet pas de générer un gain financier mais le système DCAS est susceptible d'améliorer la qualité de service sur la zone portuaire et de générer des économies très importantes à l'autre bout de la chaîne de transport en zone urbaine dense.



Figure IV.16 – Comparaison système DCAS classique par Monte Carlo

7 Algorithme génétique basé sur la simulation pour l'affectation des voies

7.1 Problématique

Le problème d'affectation des voies de la cour ferroviaire modélisé dans le troisième chapitre vise le placement des trains de grandes lignes et les trains navettes sur les huit voies de la cour ferroviaire. Le placement vertical des trains consiste à la détermination de la voie de chaque train, puis le placement horizontal détermine la position de chaque train sur la voie choisie. Plusieurs contraintes doivent être respectées à savoir : un seul TGL/navette sur une même voie, une seule voie pour un TGL/navette. L'objectif de ce problème est la minimisation des mouvements de translation des deux portiques ferroviaires (mouvements horizontaux) et les mouvements de direction (mouvements verticaux).

Un algorithme génétique basé sur une évaluation des individus par simulation est proposé pour la résolution du problème. Les individus représentant les solutions du problème sont sous forme de tableau à deux lignes : la première contient les numéros des voies des trains, la seconde contient les positions sur les voies. Un exemple d'un individu est illustré dans la figure IV.17 : Un ensemble de contraintes doivent être respectées pour qu'un individu soit réalisable. En effet,

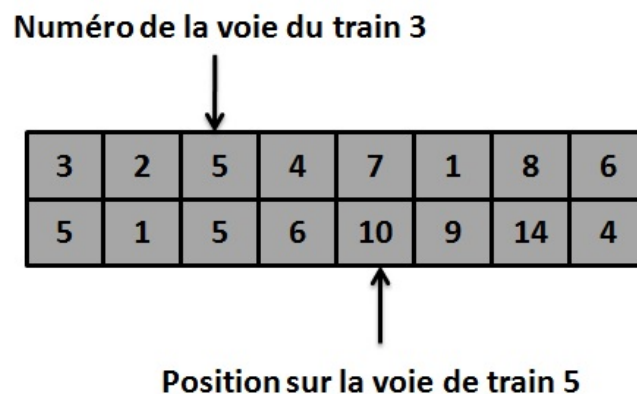


Figure IV.17 – Représentation d'un individu

à part les contraintes sur l'occupation unique des voies et positions, il y a une contrainte sur la compatibilité entre la taille du train et la position. Certains trains sont très longs et ne doivent pas être positionnés sur des positions plus à gauche, chaque train a un ensemble de positions réalisables en fonction de sa taille. La figure IV.18 illustre bien cette contrainte.

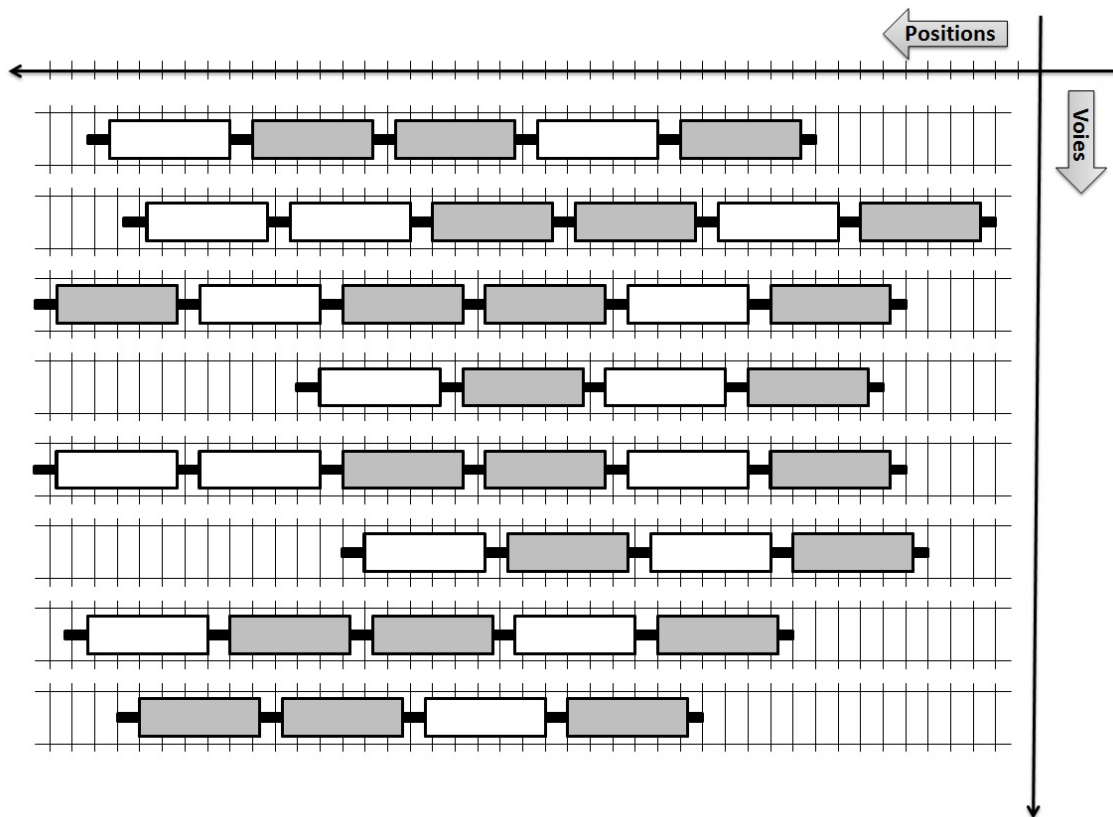


Figure IV.18 – Illustration d'un individu

7.2 Opérateurs génétiques

7.2.1 Croisements

Nous avons proposé et testé différents opérateurs de croisements. Nous donnons ici quelques exemples de ces opérateurs testés essentiellement des versions variées de croisement classique en un point. Le premier exemple classique d'un croisement en un point considéré est le croisement des voies et positions. En effet, deux enfants sont créés en croisant les deux parties (première et seconde ligne) des deux parents. Une phase de correction succède cet opérateur pour ne garder que des individus réalisables. Un deuxième exemple d'un croisement consiste à ne croiser que les parties représentant le placement des trains sur les voies, l'autre partie représentant les positions sur les voies reste inchangée.

L'autre exemple qui vient naturellement en tête est de croiser les seules parties représentant les positions sur les voies des trains/navettes.

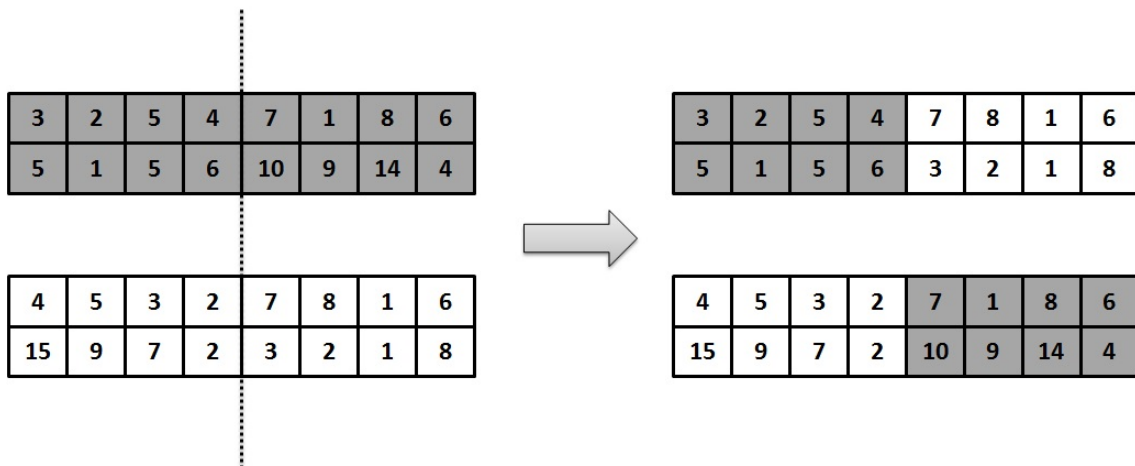


Figure IV.19 – Croisement voies et positions

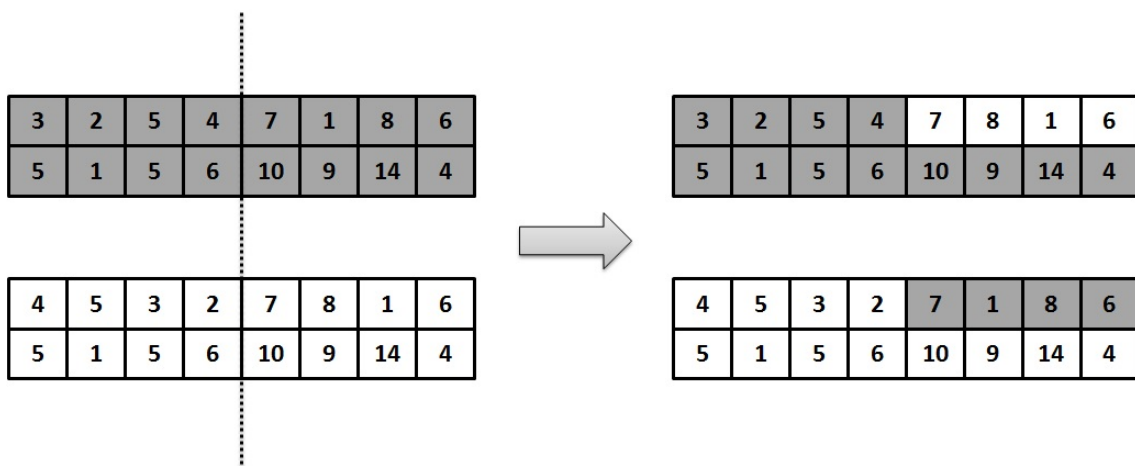


Figure IV.20 – Croisement voies

7.2.2 Mutations

Différentes versions de mutations peuvent être envisagées. Nous avons proposé surtout des mutations par permutation : permutation simple ou double. L'exemple d'une permutation double consiste à interchanger le numéro de la voie et de la position sur la voie de deux trains différents.

Un exemple de permutation simple consiste à permuter les numéros de voies de deux trains. Un autre exemple interchange les positions sur les voies de deux trains différents choisis au hasard.

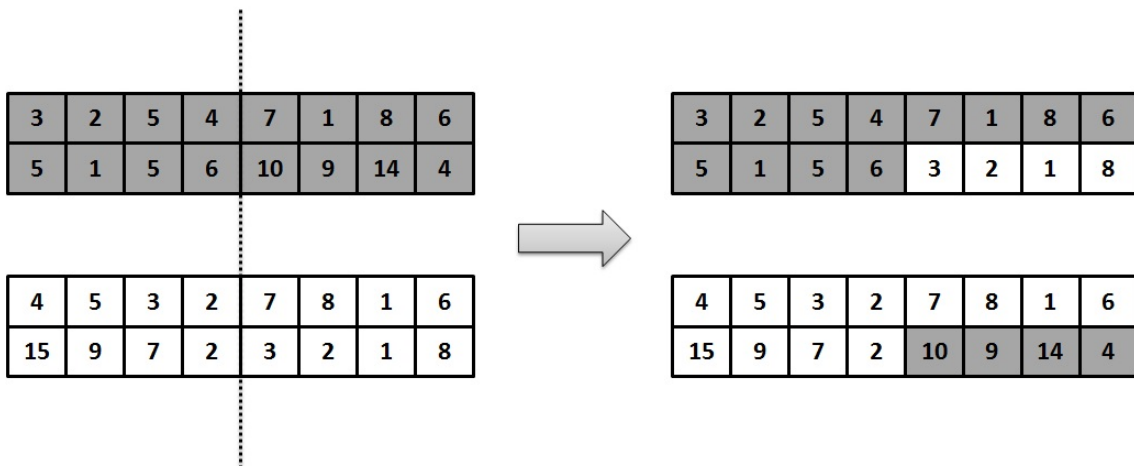


Figure IV.21 – Croisement positions

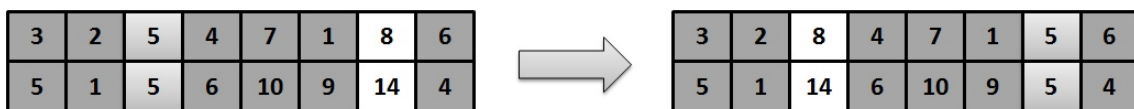


Figure IV.22 – Mutation voies et positions

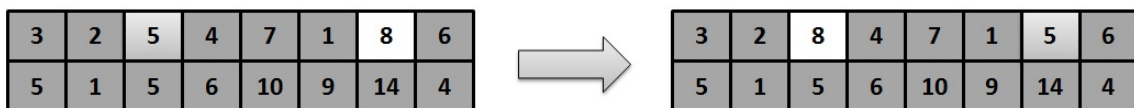


Figure IV.23 – Mutation voies

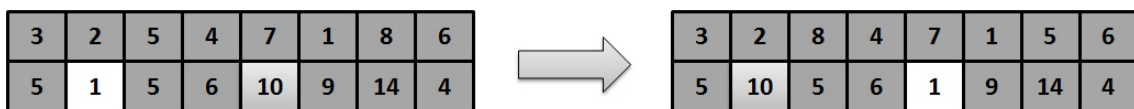


Figure IV.24 – Mutation positions

7.3 Évaluation par simulation

L'algorithme génétique est implémenté dans l'environnement de développement du modèle la simulation (Anylogic). Nous utilisons la simulation pour évaluer les individus de notre algorithme. Un individu définissant un placement des trains et navettes (en x et en y) est utilisé dans le modèle de simulation. Les opérations de manutention et de transfert des navettes commencent. À la fin de l'exécution du modèle de simulation, la charge totale des deux portiques ferroviaires est alors enregistrée. Elle représente la fitness de l'individu évalué. Notons que l'outil de simulation permet l'exécution et le renvoi rapides de l'évaluation des individus selon le schéma de la figure IV.25.

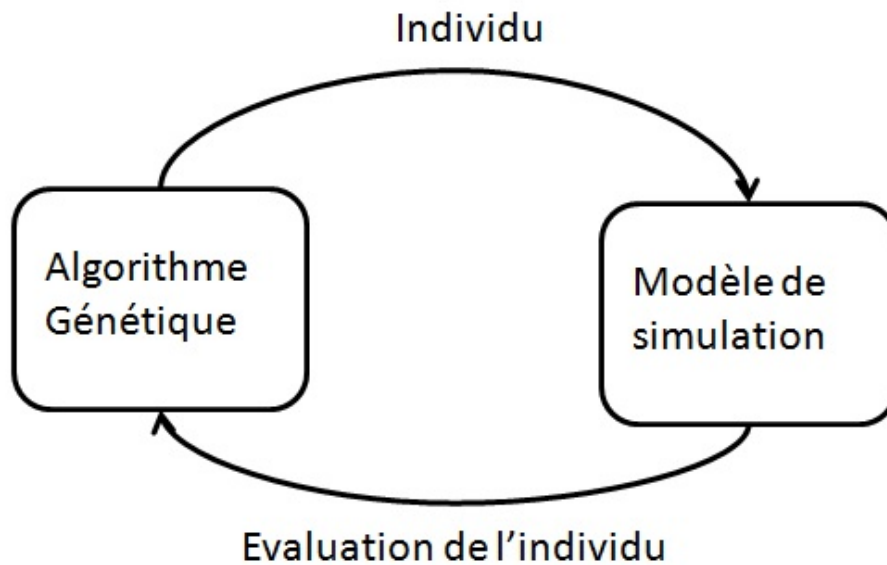


Figure IV.25 – Schéma de couplage algorithme génétique simulation

7.4 Comparaison avec une heuristique myope

Pour bien évaluer la qualité de notre algorithme génétique, nous avons conçu une heuristique constructive de la solution basée sur une affectation myope des trains sur les voies de la cour ferroviaire. En effet, on commence par le tri des TGL et des navettes. Les TGL selon leurs fonctions de priorité définie précédemment et les navettes selon leurs degrés d'urgence. Le premier train est alors positionné sur la voie centrale, puis deux navettes sont positionnées sur les voies adjacentes, puis les deux suivants, ainsi de suite selon le principe de Tie-Break. Le positionnement horizontal des navettes étant effectué selon le principe de barycentre. En effet, une navette devant recevoir beaucoup de conteneurs des wagons gauches est positionnée à gauche et inversement.

IV.7 Algorithme génétique basé sur la simulation pour l'affectation des voies

Début

Ordonner les trains de grandes lignes selon l'ordre décroissant de leurs fonctions de priorité $\langle t_1, t_2, \dots, t_n \rangle$,

Ordonner les navettes selon l'ordre décroissant de leurs urgences $\langle n_1, n_2, \dots, n_m \rangle$,

Positionner t_1 sur la voie centrale,

Positionner n_1 sur la voie nord adjacente t_1 et n_2 sur la voie sud adjacente,

Positionner t_2 et t_3 sur les voies nord et sud adjacentes

Ainsi de suite : 2 navettes puis deux trains

Positionner horizontalement en respectant le principe de "barycentre".

Fin

Algorithme 6 – Heuristique d'affectation en Tie-Break

Les résultats de comparaison des deux algorithmes HTB (pour Heuristique Tie-Break) et AG (pour Algorithme Génétique) sont donnés dans le tableau IV.2. Nous remarquons que pour les 8 instances (issues de données réelles fournies par le GPMH), l'algorithme génétique surclasse l'heuristique myope en fixant comme critère de comparaison la charge totale des deux portiques ferroviaires.

Instances	Taux de remplissage TGL	Taux de remplissage navettes	Obj. ($\times 10^3$) (s)	HTB	Obj. ($\times 10^3$)(s)	AG
Instance 1	15	30	71.4		69.12	
Instance 2	30	60	72.16		70.16	
Instance 3	60	80	72.48		69.15	
Instance 4	80	90	72.78		72.21	
Instance 5	30	15	69.49		67.76	
Instance 6	60	30	70.14		68.84	
Instance 7	80	60	72.64		71.87	
Instance 8	90	80	72.76		72.27	

Tableau IV.2 – Comparaison HTB et AG en temps de service

Cependant, cet algorithme génétique ne permet pas d'optimiser toute l'organisation des opérations à la cour ferroviaire. Il représente même plusieurs défauts :

- Cet algorithme n'optimise que la partie placement des TGL et navettes sur les voies de la cour ferroviaire. Il omet donc l'optimisation des opérations de manutention qui dépend fortement de placement. Il peut même pénaliser celles-ci.
- Il est de nature statique. En effet, il donne le positionnement des trains une fois pour toutes. Alors qu'il est intéressant est fournir un positionnement dynamique en fonction

de l'évolution du modèle de simulation.

- Il ne permet pas de gérer les interactions des deux portiques ferroviaires. En effet, on remarque des temps d'attente réciproques des deux portiques lors de la manutention de certains conteneurs. Ceux-ci pénalisent la productivité des opérations de manutention.

Nous nous sommes particulièrement intéressés au dernier point vu son intérêt pour le GPMH. Nous développons dans la section suivante des algorithmes permettant de réduire les temps de manutention à la cour ferroviaire, surtout les temps d'attente mutuels des portiques.

8 Optimisation des temps de service à la cour ferroviaire

8.1 Problématique

Le temps cumulé moyen qu'un portique passe en attendant l'autre portique pour exécuter une tâche est de l'ordre de 5 % (figure IV.26). La problématique concerne la recherche d'une

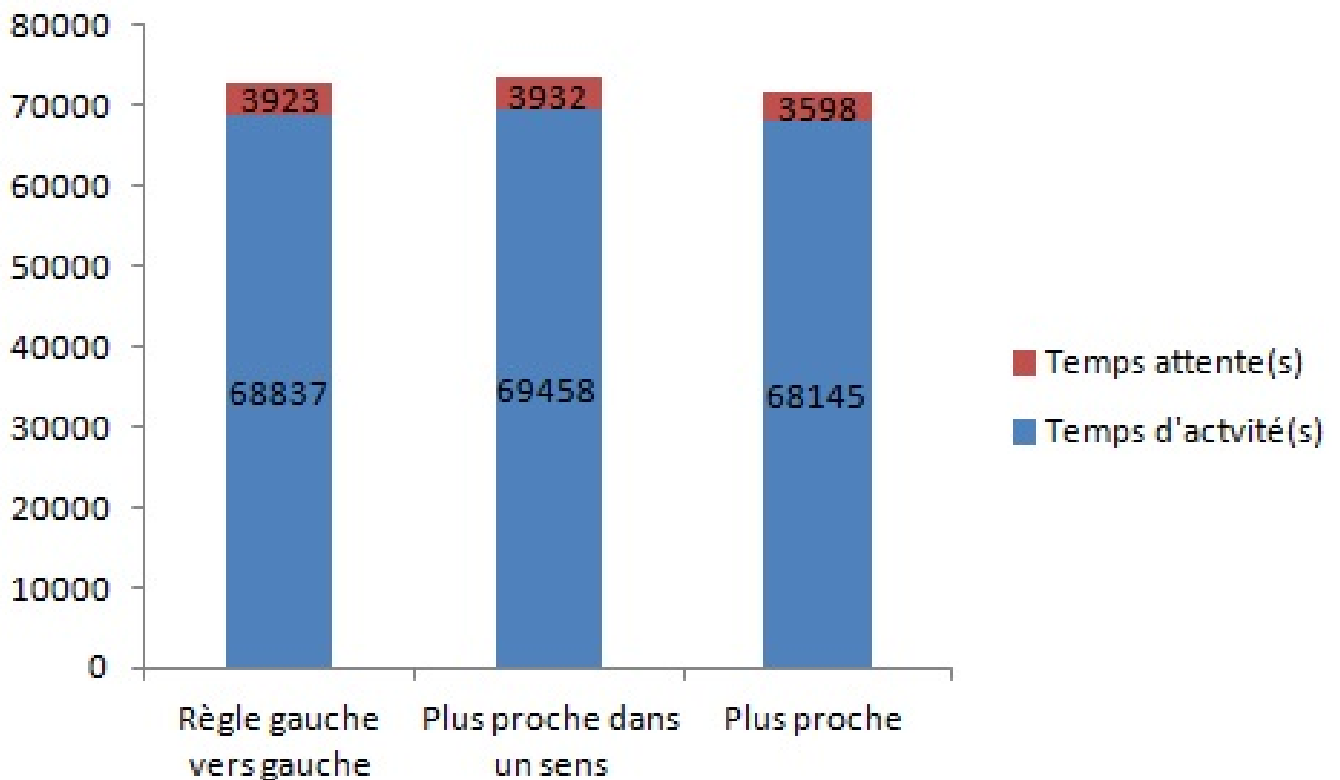


Figure IV.26 – Cumul de temps d'attente mutuel des portiques

meilleure gestion des opérations de manutention des conteneurs à la cour ferroviaire :

IV.8 Optimisation des temps de service à la cour ferroviaire

- Minimisation des temps d'attente réciproques des portiques,
- Minimisation des charges de travail des portiques et l'équilibre de charge entre les deux portiques,
- Minimisation de recours à la bufférisation.

Plusieurs stratégies de collaboration sont proposées pour la résolution de cette problématique.

8.2 Stratégie de collaboration agent

Pour gérer cette problématique, nous avons partitionné la cour ferroviaire en zones dynamiques en utilisant un séparateur dynamique permettant de minimiser les attentes réciproques des portiques et d'éviter d'éventuelles collisions.

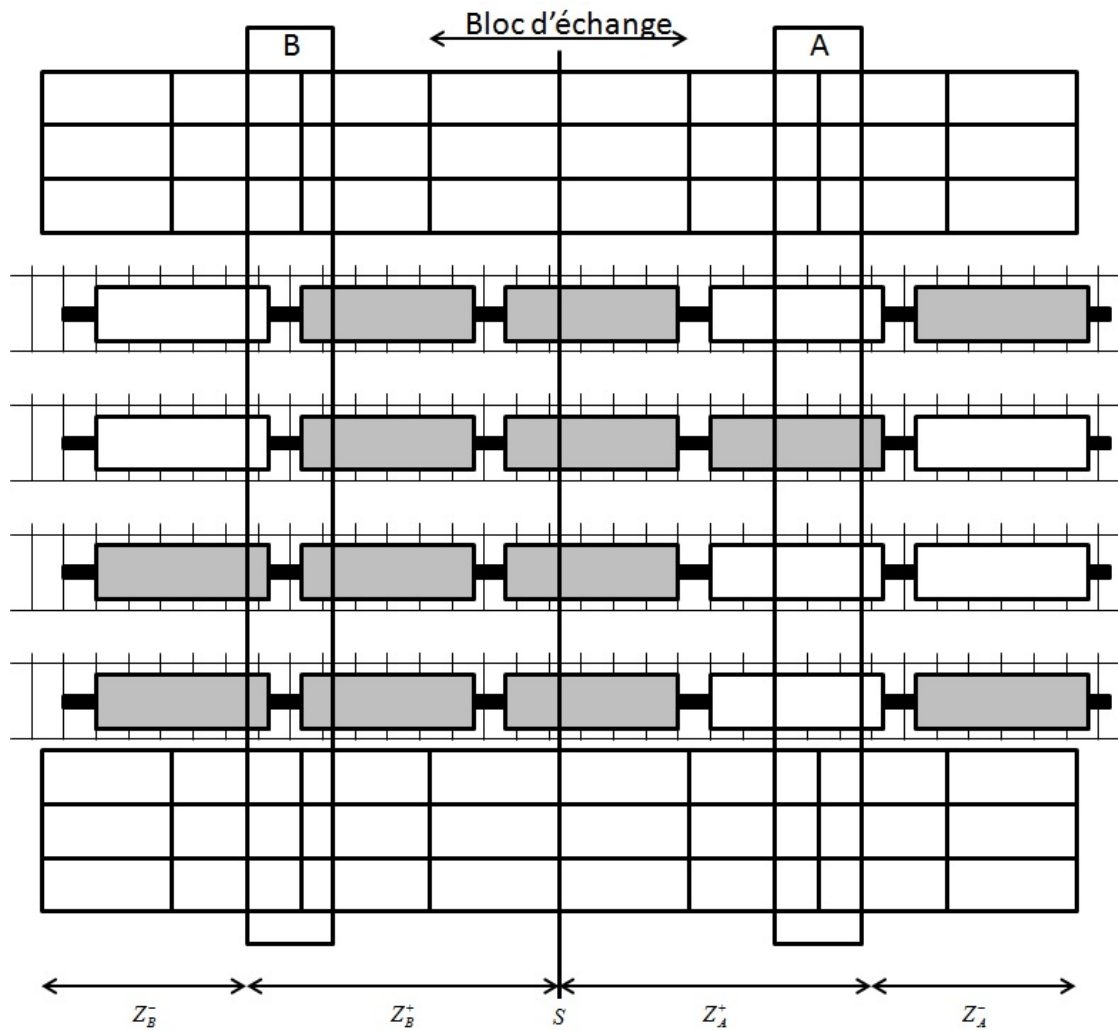


Figure IV.27 – Partition de la cour ferroviaire

Chapitre IV. Résolution par méthodes de couplage optimisation simulation

- S : le séparateur dynamique entre les zones de travail du portique A et portique B,
- Z_B^- : zone privée du portique B et inaccessible pour le portique A,
- Z_B^+ : zone d'opérations du portique B,
- Z_A^- : zone privée du portique A et inaccessible pour le portique B,
- Z_A^+ : zone d'opérations du portique A,

Notre approche de collaboration agent est basée sur la combinaison d'une stratégie de manutention du plus proche conteneur et la manipulation dynamique de séparateur des zones d'opérations des portiques. Désignant par J l'ensemble des tâches (exemple d'une tâche : récupérer un conteneur depuis un TGL ou déposer un conteneur sur une navette) de manutention à exécuter, tel que $J = 1, 2, 3, \dots, n$, avec $n \in \mathbb{N}^*$. De plus, chaque tâche est caractérisée par un ensemble d'éléments que nous définissons comme suit :

- I_j : le portique qui va assurer l'exécution de la tâche j ,
- Z_j^- : la zone privée générée par le portique pour exécuter la tâche j ,
- E_j : le temps d'exécution de la tâche j ,
- S_j : la date de début d'exécution de la tâche j ,
- F_j : la date de fin d'exécution de la tâche j .

L'exécution d'une tâche est tributaire du respect des exigences de minimisation de temps d'attentes réciproques des portiques formulés par l'algorithme suivant :

```
Entrée : liste de tâches à exécuter L  
Pour  $i \in L$  faire  
  | Pour  $j \in L[i]$  faire  
  | | Si  $((I_i \neq I_j) \wedge (Z_i^- \cap Z_j^-) \wedge ([S_i, F_i] \cap [S_j, F_j] \neq \emptyset))$  Alors  
  | | |  $\text{bool} \leftarrow \text{faux}; \text{break};$   
  | | | Sinon  
  | | | |  $\text{bool} \leftarrow \text{vrai};$   
  | | | Fin Si  
  | | Fin Pour  
  | Fin Pour  
Sortie : bool
```

Algorithme 7 – Algorithme de gestion dynamique des portiques

8.3 Algorithme de colonie de fourmis intégré dans la simulation

8.3.1 Description de l'algorithme

Le comportement des deux portiques ferroviaires est modélisé par des couples de fourmis : un couple de fourmis représente le couple de portiques. A chaque étape, la fourmi prépare une liste de tâches à exécuter. Ici une tâche est un conteneur à manutentionner, elle inclut le mouvement vide du dernier conteneur manutentionné vers le conteneur courant puis la manutention de ce dernier. Initialisation :

Les traces des phéromones sont initialisées sur les tâches. A chaque itération des couples de fourmis sont lancés : une fourmi de chaque couple est affectée à une zone aléatoire de la partie gauche de la cour ferroviaire et l'autre à une position aléatoire de la partie droite. Le choix de la prochaine destination se fait à l'aide de la relation suivante :

$$j = \begin{cases} \operatorname{argmax}_{u \in J_i^k} [(\tau_{iu}(t))^\alpha ((\eta_{iu}(t)))^\beta] & \text{if } q \leq q_0 \\ l & \text{if } q > q_0 \end{cases}$$

q_0 est un paramètre fixe dans l'intervalle $[0,1]$, q est un nombre aléatoire choisi entre 0 et 1. La visibilité de chaque fourmi/portique est définie par :

$$\eta_{ij}(t) = \frac{\gamma}{T_{ij}}$$

où γ est un nombre entre 0 et 1.

Pour le portique de gauche, le paramètre est supérieur à 0.5 si le futur conteneur est à gauche et inférieur à 0.5 dans le cas contraire (et inversement pour le portique de droite). Ceci pour favoriser la manutention des conteneurs de la zone gauche par le portique gauche et les conteneurs de la zone droite par le portique de droite. Avec $l \in J_i^c$ est une tâche choisie selon la probabilité suivante :

$$P_{il}^c(t) = \frac{(\tau_{il}(t))^\alpha ((\eta_{il}(t)))^\beta}{\sum_{m \in J_i^k} (\tau_{im}(t))^\alpha ((\eta_{im}(t)))^\beta} \quad (\text{IV.2})$$

Pratiquement dans le cas où $q > q_0$, pour chaque tâche $l \in J_i^k$ on génère un nombre aléatoire entre 0 et 1 et on calcule sa probabilité avec la formule ci-dessus. Si le nombre généré est inférieur ou égal à la probabilité alors la tâche est choisie sinon on passe à la tâche suivante. La quantité de phéromone déposée par chaque fourmi à l'itération t est :

$$\Delta \tau_{ij}^c(t) = \frac{q_1}{L^c} + \frac{q_2}{A^c} + \frac{q_3}{S} + \frac{q_4}{D} \quad (\text{IV.3})$$

Où :

- L^c : est la durée de charge de travail du portique c ,
- A^c : est la somme des temps d'attente du portique c ,
- S : est la somme de la charge de travail des deux portiques,
- D : est la différence de charge de travail entre les deux portiques en valeur absolue.

Les coefficients $q_i, i \in \{1, 2, 3, 4\}$ sont des paramètres entre 0 et 1.

Les traces de phéromones sont mises à jour à la fin de chaque itération en utilisant la formule suivante :

$$\tau_{ij}^c(t+1) = (1 - \rho)\tau_{ij}^c(t) + \Delta\tau_{ij}^c(t) \quad (\text{IV.4})$$

8.3.2 Couplage ACO-simulation

Le schéma de couplage ACO-simulation est schéma cyclique (en boucle). En effet, après initialisation des paramètres de l'algorithme des fourmis le modèle de simulation est exécuté. Un couple de fourmis représentant les deux portiques de la cour ferroviaire simule les opérations de manutention de conteneurs en construisant une solution (un plan de manutention). Ce processus est suivi d'une mise à jour des traces de phéromones. On répète ces exécutions tant que le critère d'arrêt (un nombre maximum d'itérations) n'est pas atteint comme illustré dans la figure IV.28.

8.3.3 Réglage des paramètres

Nous avons utilisé la méthode de plans d'expérience (plan factoriel fractionnaire) pour le réglage des paramètres de l'algorithme de colonie de fourmis. Nous avons commencé par la détermination des effets absolus des différents paramètres sur la solution (figure IV.29). Les meilleures valeurs des paramètres sont ensuite déterminées. Les résultats sont présentés par le diagramme factoriel de la figure IV.30.

8.4 Résultats et comparaison

Nous donnons dans cette section les différents résultats de comparaison de trois stratégies de gestion de la manutention rail-rail à la cour ferroviaire sur une même instance typique donnée. Ces trois stratégies sont :

1. Stratégie de manutention du plus proche conteneur appelée dans ce cas : règles de gestion,
2. L'algorithme de colonie de fourmis,
3. La stratégie de collaboration agent.

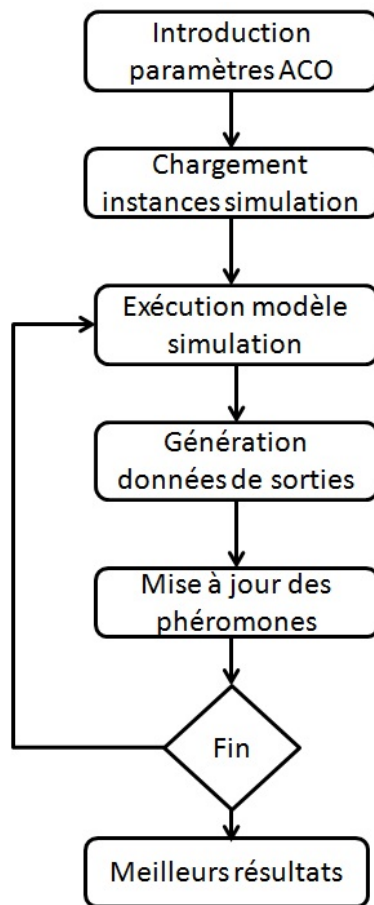


Figure IV.28 – Schéma couplage ACO-simulation

La figure IV.31 donne les résultats des trois stratégies concernant la distance totale parcourue par les deux portiques pour la manutention de la totalité des conteneurs d’une journée. On peut clairement remarquer la performance de l’algorithme de colonie de fourmis et de l’approche agent sur ce critère. Une des explications possibles de ces résultats est que le chevauchement des deux portiques pénalise la règle de gestion. La figure IV.32 va dans le même sens que la précédente. On peut remarquer plus particulièrement un temps d’attente élevé de la règle de gestion qui ne contient aucun de traitement de la problématique des temps d’attente des portiques.

La figure IV.33 donne une autre vision de comportement des deux portiques ferroviaire. Elle met le focus surtout sur l’équilibre de charge de travail entre les deux engins de manutention. L’algorithme de colonie de fourmis surclasse les deux autres en termes différence de charge de travail entre les deux portiques. La figure IV.34 donne le profil de l’évolution de la manutention pour les trois stratégies considérées.

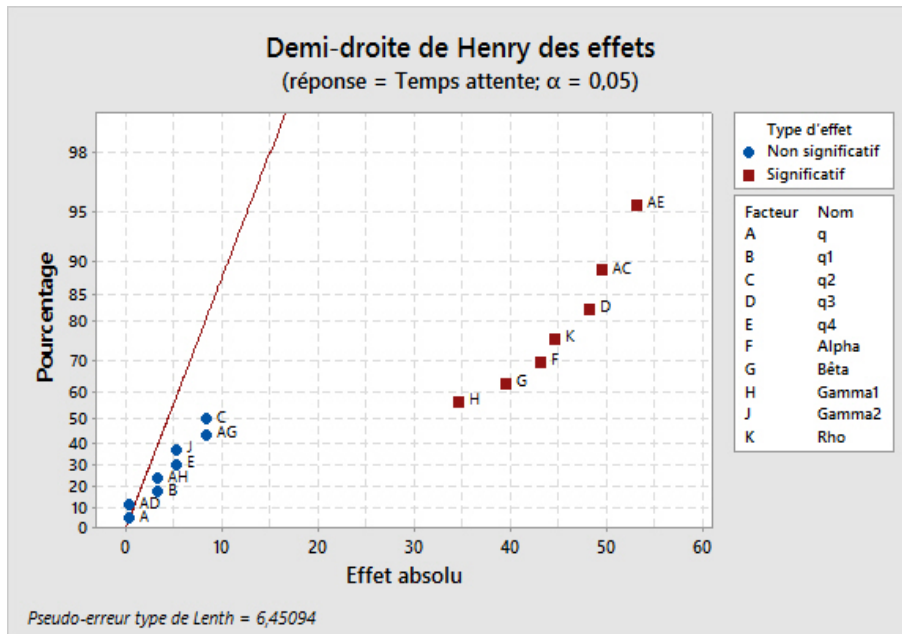


Figure IV.29 – Effets absolus des principaux paramètres

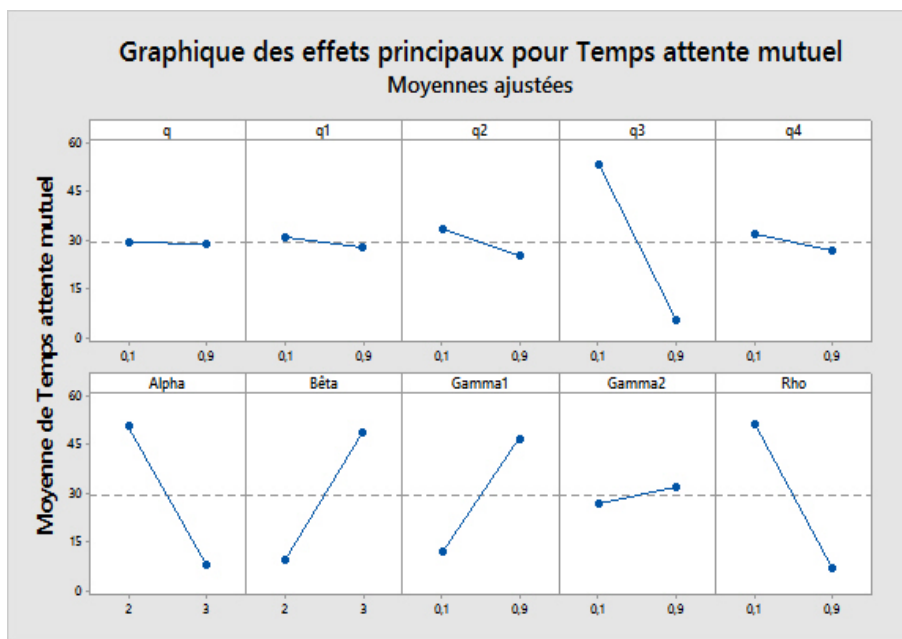


Figure IV.30 – Effets des paramètres sur le temps attente mutuel

9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait la résolution des problèmes liés à la massification des flux entre les terminaux maritimes du port du Havre et le terminal multimodal modélisé dans le

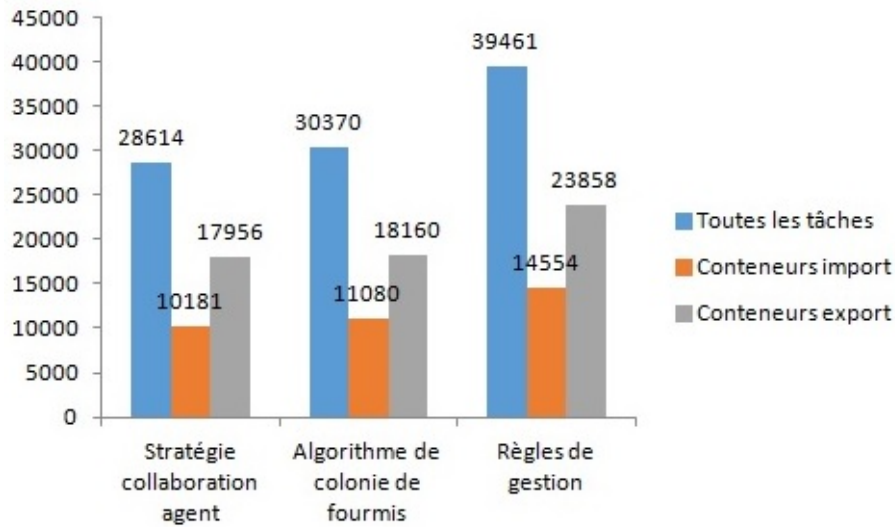


Figure IV.31 – Comparaison en fonction de distance en mètres

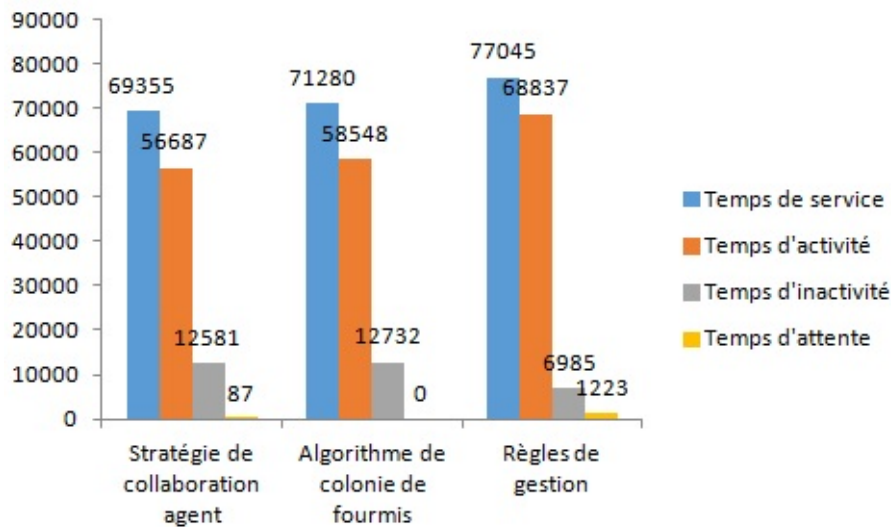


Figure IV.32 – Comparaison en fonction de temps d'exécution en secondes

troisième chapitre. La méthodologie suivie est la résolution par une approche de couplage optimisation simulation. Un modèle de simulation multi paradigme est alors élaboré pour simuler les différentes organisations logistiques du nouveau schéma de massification des flux de conteneurs via la plateforme multimodale. Un algorithme génétique intégré dans la simulation est utilisé pour résoudre le problème d'affectation des trains aux voies de la cour ferroviaire pour réduire les mouvements de translation et de direction des portiques ferroviaires. L'intérêt de cet algorithme est que l'évaluation des individus se fait par simulation des opérations de maintenance et de transfert des navettes selon les règles de gestion fixées par les opérateurs portuaires.

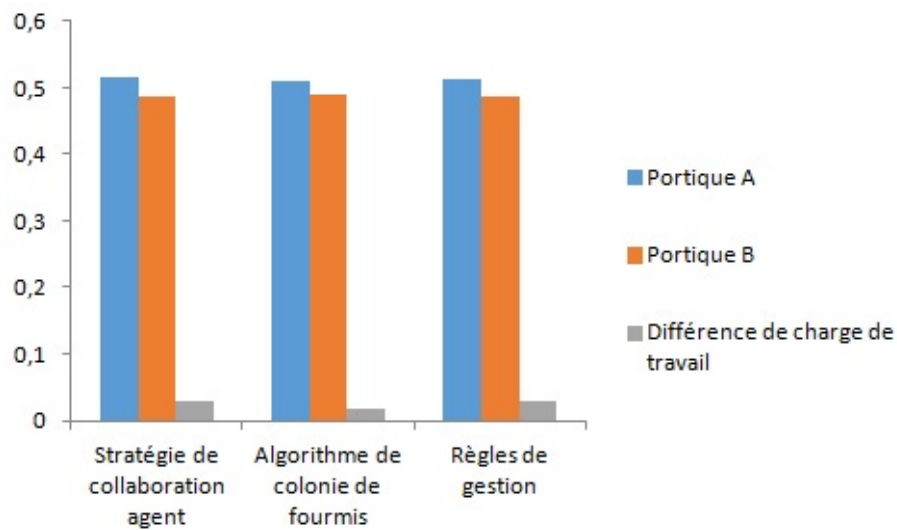


Figure IV.33 – Répartition des charges de travail en pourcentage

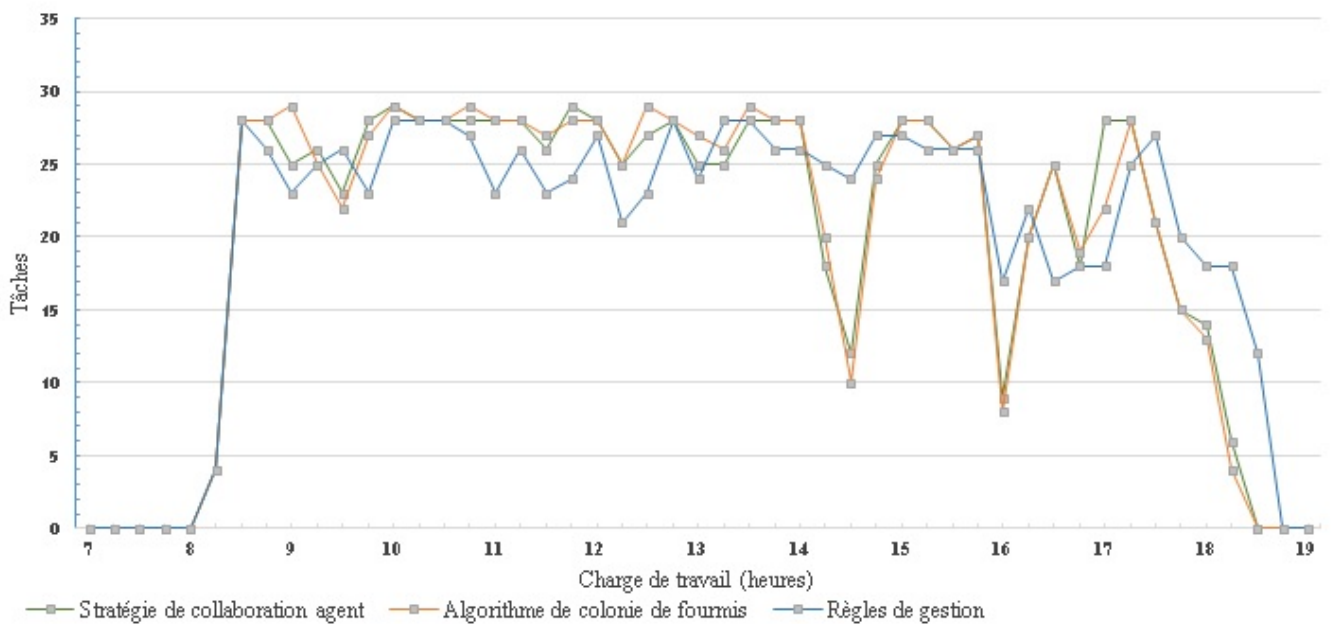


Figure IV.34 – Évolution de la charge de travail

Le problème des temps d'attentes réciproques des portiques est ensuite résolu en utilisant d'une part une approche de collaboration des agents basée sur la gestion mutuelle d'un séparateur dynamique des zones de travail des portiques et par un algorithme de colonie de fourmis d'autre part. Les résultats numériques comparent les différentes stratégies de manutention proposées.

Conclusion générale et perspectives

Notre travail a été consacré à l'optimisation de certains problèmes de transport multimodal. Nous avons commencé cette thèse par un chapitre sur des généralités autour de la multimodalité, des caractéristiques des modes de transport classiques, et les principaux enjeux des offres de combinaison intégrée des modes de transport. Ces éléments introductifs ont permis d'identifier les enjeux du transport intermodal et les thèmes de recherche traités dans les chapitres suivants.

Nous avons étudié le problème de la localisation des terminaux intermodaux dans le deuxième chapitre. Ce problème posé dans la littérature concerne l'ouverture d'un ensemble de terminaux de transport combiné rail-route choisi parmi un ensemble de sites candidats puis l'acheminement optimal, en utilisant le/les mode(s) de transport adéquat (s), des quantités de marchandises destinées pour un ensemble de clients. À cause de son NP-complétude, nous avons proposé de tester des versions d'un algorithme génétique basé sur un codage mixte. Une meilleure version a ensuite été comparée, sur des instances connues en littérature, avec les résultats des travaux récents en littérature. Une nouvelle évaluation du coût de transport intermodal, plus réaliste, a été également proposée. Elle prenait en compte les coûts élevés actuels des pré et post-acheminements routiers pour l'estimation d'un plan de transport combiné rail-route.

Le troisième chapitre a été dédié à l'étude de certains problèmes issus de la logistique portuaire dans le cadre du projet DCAS porté par le Port du Havre. Des données chiffrées et des éléments d'ordre général concernant le système logistique du port du Havre sont reportés en début de ce chapitre. Le projet DCAS, a ensuite été étudié. Les problèmes d'optimisations rencontrés y sont également présentés et formulés mathématiquement afin de réduire les coûts de pré et post-acheminement du transport combiné.

Le quatrième chapitre a eu pour objet la combinaison de l'optimisation et de la simulation pour

la résolution de certains problèmes présentés dans le troisième chapitre. Nous avons commencé ce chapitre par les avantages et les inconvénients de l'utilisation séparée de chaque approche. Puis, nous avons justifié les avantages et les enjeux de couplage des deux approches. Le modèle de simulation de nouveau schéma logistique de port du Havre a été ensuite présenté. Nous avons appliqué deux méthodes de couplage optimisation simulation pour la résolution de deux problématiques différentes. L'une d'elle concernait l'affectation des trains aux voies de la cour ferroviaire en utilisant un algorithme génétique intégré dans le modèle de simulation. La seconde concernait l'optimisation des opérations de manutention des deux portiques de la cour ferroviaire. Un algorithme de colonie de fourmis a été utilisé pour la recherche de meilleures solutions en utilisant le modèle de simulation.

Nos travaux de recherche ont fait l'objet de présentation et de publication devant des conférences et revues internationales à comité de lecture. Nous citons particulièrement :

1. Leriche, D., Oudani, M., Cabani, A., Hoblos, G., Mouzna, J., Boukachour, J., & Alaoui, A. E. H. (2015). Simulating new logistics system of Le Havre Port. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 418-423.
2. Oudani, M., Leriche, D., Boukachour, J., Cabani, A., Hoblos, G., & Alaoui, A. E. H. Optimisation et simulation d'un problème d'affectation des trains aux voies dans le Terminal Multimodal du Havre. *ROADEF'2015*. Marseille, Février 2015.
3. Oudani, M., El Hilali Alaoui, A., & Boukachour, J. (2014). An efficient genetic algorithm to solve the intermodal terminal location problem. *International Journal of Supply and Operations Management*, 1(3), 279-296.
4. Benghalia, A., Oudani, M., Boukachour, J., Boudebous, D., & Alaoui, A. E. H. Proposition d'une approche de couplage optimisation-simulation pour le transfert de conteneurs maritimes. *MOSIM'14*, Nancy 5-7 Novembre 2014.
5. Benghalia, A., Oudani, M., Boukachour, J., Boudebous, D., & Alaoui, A. E. H. (2014). Optimization-Simulation for Maritime Containers Transfer. *International Journal of Applied Logistics (IJAL)*, 5(2), 50-61.
6. Oudani, M., Alaoui, A. E. H., & Boukachour, J. An optimization approach for the intermodal transportation of cut flowers. Deuxième édition de la Conférence IEEE Internationale Gestion Opérationnelle de la Logistique (*GOL'2014*), Rabat 5-7 Juin 2014.
7. Oudani, M., Alaoui, A. E. H., & Boukachour, J. Localisation des terminaux en Transport Intermodal : Modélisation et résolution. Première édition de la Conférence IEEE Internationale Gestion Opérationnelle de la Logistique (*GOL'2012*), Le Havre 17-19 Octobre 2012.

Les travaux que nous avons accomplis sont encourageants et nous incitent à penser à de nouvelles voies de recherche, pour améliorer les modélisations et les méthodes de résolutions. Nous nous intéressons, d'une part, à l'étude d'autres problèmes de logistique portuaire comme la gestion des rotations des conteneurs vides ou la localisation des plateformes et centres de distribution (dit chantiers compacts) dans l'hinterland du port du Havre. Nous envisageons, d'autre part, l'amélioration des travaux actuels :

1. Problème de localisation des terminaux intermodaux

Pour la suite de nos travaux sur le problème de la localisation des terminaux intermodaux, nous proposons :

- De formuler le problème en considérant plusieurs types de terminaux avec différentes capacités, différents coûts, etc.
- De prendre en compte de nouvelles fonctions objectifs et contraintes comme la minimisation du nombre de terminaux à localiser, le cas de non-disponibilité d'un terminal, etc.
- D'adapter de nouvelles heuristiques (hybrides, parallèles).

2. Problèmes de transfert de conteneurs maritimes

Pour la continuité de nos travaux sur les problèmes de transfert des conteneurs au port du Havre, nous proposons :

- Améliorer les modélisations proposées en combinant plusieurs problèmes à la fois,
- Formuler d'autres problèmes comme la détermination de la répartition optimale des voies de la cour ferroviaire entre les trains de grandes lignes et les navettes,
- Utiliser de nouvelles méthodes de résolution.
- Améliorer la gestion des buffers sur le terminal multimodal et sur les terminaux maritimes,
- Intégrer dans un seul modèle toutes les méthodes d'optimisation dans le cadre d'un système d'aide de décision.

Bibliographie

- [Abdinnoun-Helm,1998] Abdinnour-Helm, S. (1998). A hybrid heuristic for the uncapacitated hub location problem. *European Journal of Operational Research*, 106(2), 489-499. [32](#)
- [Andersen et al.,2009] Andersen, J., Crainic, T. G., & Christiansen, M. (2009). Service network design with management and coordination of multiple fleets. *European Journal of Operational Research*, 193(2), 377-389. [34](#)
- [Anghinolfi et al.,2011] Anghinolfi, D., Paolucci, M., Sacone, S., & Siri, S. (2011). Freight transportation in railway networks with automated terminals : A mathematical model and mip heuristic approaches. *European Journal of Operational Research*, 214, 588-594. [34](#)
- [Agarwal et Ergun,2008] Agarwal, R., & Ergun, Ö. (2008). Ship scheduling and network design for cargo routing in liner shipping. *Transportation Science*, 42(2), 175-196. [34](#)
- [Alumur et Kara,2008] Alumur, S., Kara, B.Y (2008). Network hub location problems : The state of the art. *European journal of operations research*, 190(1), 1-21. [40](#)
- [Arnold et al.,2001] Arnold, P., Peeters, D., Thomas, I., Marchand, H (2001). Pour une localisation optimale des centres de transbordement intermodaux entre réseaux de transport : formulation et extensions. *The Canadian Geographer/Le géographe canadien*, 45(3), 427-436. [41](#)
- [Ayar et Yaman,2012] Ayar, B., & Yaman, H. (2012). An intermodal multicommodity routing problem with scheduled services. *Computational Optimization and Applications*, 53(1), 131-153. [34](#)

- [Aykin,1994] Aykin, T. (1994). Lagrangian relaxation based approaches to capacitated hub-and-spoke network design problem. *European Journal of Operational Research*, 79(3), 501-523. [33](#)
- [Bock,2010] Bock, S. (2010). Real-time control of freight forwarder transportation networks by integrating multimodal transport chains. *European Journal of Operational Research*, 200(3), 733-746. [35](#)
- [Bontekoning et Macharis,2004] Bontekoning, Y. M., Macharis, C., Trip, J. J. (2004). Is a new applied transportation research field emerging? A review of intermodal rail-truck freight transport literature. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 38(1), 1-34. [30](#)
- [Cohn et al.,2008] Cohn, A., Davey, M., Schkade, L., Siegel, A., & Wong, C. (2008). Network design and flow problems with cross-arc costs. *European Journal of Operational Research*, 189, 890-901. [34](#)
- [Campbell et O'Kelly,2012] Campbell, J. F., O'Kelly, M. E. (2012). Twenty-five years of hub location research. *Transportation Science*, 46(2), 153-169.
- [Campbell,1992] Campbell, J. F. (1992). Location and allocation for distribution systems with transshipments and transportation economies of scale. *Annals of operations research*, 40(1), 77-99. [32](#)
- [Campbell,1994] Campbell, J. F. (1994). Integer programming formulations of discrete hub location problems. *European Journal of Operational Research*, 72(2), 387-405. [32](#), [33](#), [40](#)
- [Campbell et al.,2002] Campbell, J. F., Ernst, A. T., Krishnamoorthy, M. (2002). Hub location problems. *Facility location : applications and theory*, 1, 373-407. [40](#)
- [Campbell,1996] Campbell, J. F. (1996). Hub location and the p-hub median problem. *Operations Research*, 44(6),923-935. [40](#)
- [Campbell,1994] Campbell, J. F. (1994). A survey of network hub location. *Studies in Locational Analysis*, 6, 31-49.
- [Caux et Pierreval,2006] Caux, C., David, F., & Pierreval, H. (2006). Implementation of delayed differentiation in batch process industries : a standardization problem. *International journal of production research*, 44(16), 3243-3255. [85](#)

-
- [Crainic et Kim,2006] Crainic, T. G., & Kim, K. H. (2006). Intermodal transportation. *Transportation*, 14, 467-537. [30](#), [40](#)
- [Crainic et Kim,2007] Crainic, T., & Kim, K. (2007). Intermodal transportation. In C. Barnhart, & G. Laporte (Eds.), *Transportation. Handbooks in operations research and management science* 14, 467-537. [34](#)
- [Caris et Macharis,2012] Caris, A., Macharis, C., & Janssens, G. K. (2012). Corridor network design in hinterland transportation systems. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 24(3), 294-319. [34](#)
- [Chen,2012] Chen, L., & Miller-Hooks, E. (2012). Resilience : an indicator of recovery capability in intermodal freight transport. *Transportation Science*, 46(1), 109-123.
- [Cho et al.,2012] Cho, J. H., Kim, H. S., & Choi, H. R. (2012). An intermodal transport network planning algorithm using dynamic programming :a case study : from Busan to Rotterdam in intermodal freight routing. *Applied Intelligence*, 36(3), 529-541. [34](#)
- [Chang et al.,2008] Chang, H., Jula, H., Chassiakos, A., & Ioannou, P. (2008). A heuristic solution for the empty container substitution problem. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 44(2), 203-216. [35](#)
- [Di Francesco et al.,2013] Di Francesco, M., Lai, M., & Zuddas, P. (2013). Maritime repositioning of empty containers under uncertain port disruptions. *Computers & Industrial Engineering*, 64(3), 827-837. [35](#)
- [Deep et al.,2009] Deep, K., Singh, K. P., Kansal, M. L., Mohan, C. (2009). A real coded genetic algorithm for solving integer and mixed integer optimization problems. *Applied Mathematics and Computation*, 212(2), 505-518. [50](#)
- [Deep et Thakur,2007] Deep, K., Thakur, M. (2007). A new mutation operator for real coded genetic algorithms. *Applied mathematics and Computation*, 193(1), 211-230. [48](#), [50](#), [51](#)
- [Drogoul,1993] Drogoul, A. (1993). De la simulation multi-agent à la résolution collective de problèmes (*Doctoral dissertation, Université Paris VI*). [84](#)
- [Elhedli et Hu,2005] Elhedhli, S., & Hu, F. X. (2005). Hub-and-spoke network design with congestion. *Computers & Operations Research*, 32(6), 1615-1632. [32](#)

- [Ernst et Krishnamoorthy,1996] Ernst, A. T., & Krishnamoorthy, M. (1996). Efficient algorithms for the uncapacitated single allocation p-hub median problem. *Location science*, 4(3), 139-154. [32](#)
- [Ernst et Krishnamoorthy,1998] Ernst, A. T., & Krishnamoorthy, M. (1998). Exact and heuristic algorithms for the uncapacitated multiple allocation p-hub median problem. *European Journal of Operational Research*, 104(1), 100-112. [32](#)
- [Ernst et al.,2009] Ernst, A. T., Hamacher, H., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., & Woeginger, G. (2009). Uncapacitated single and multiple allocation p-hub center problems. *Computers & Operations Research*, 36(7), 2230-2241. [33](#)
- [Erera et al.,2005] Erera, A. L., Morales, J. C., & Savelsbergh, M. (2005). Global intermodal tank container management for the chemical industry. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 41(6), 551-566. [35](#)
- [Ishfaq et Sox,2010] Ishfaq, R., & Sox, C. R. (2010). Intermodal logistics : the interplay of financial, operational and service issues. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 46(6),926-949. [30](#)
- [Ishfaq et Sox,2011] Ishfaq, R., & Sox, C. R. (2011). Hub location-allocation in intermodal logistic networks. *European Journal of Operational Research*, 210(2), 213-230. [30](#)
- [Ferber et Perrot,1995] Ferber, J., & Perrot, J. F. (1995). *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*. InterEditions. [86](#)
- [Jenning et al.,1998] Jennings, N. R., Sycara, K., & Wooldridge, M. (1998). A roadmap of agent research and development. *Autonomous agents and multi-agent systems*, 1(1), 7-38. [86](#)
- [Jones et al.,2000] Jones, W. B., Cassady, C. R., Bowden Jr, R. O. (2000). Developing a standard definition of intermodal transportation. *Transp. LJ*, 27, 345. [31](#)
- [Goel,2010] Goel, A. (2010). The value of in-transit visibility for supply chains with multiple modes of transport. *International Journal of Logistics : Research and Applications*, 13(6), 475-492. [35](#)
- [Kara et Tansel,2003] Kara, B. Y., & Tansel, B. C. (2003). The single-assignment hub covering problem : Models and linearizations. *Journal of the Operational Research Society*, 54(1), 59-64. [33](#)

-
- [Law et Kelton,1991] Law, A. M., & Kelton, W. D. (1991). *Simulation modeling and analysis*. Boston : McGraw Hill. [84](#), [85](#), [87](#)
- [Levinson,2010] Levinson, M. (2010). *The box : how the shipping container made the world smaller and the world economy bigger*. Princeton University Press. [1](#)
- [Lin et Chen,2008] Lin, C. C., & Chen, S. H. (2008). An integral constrained generalized hub-and-spoke network design problem. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, *44*(6), 986-1003. [34](#)
- [Lin et al.,2014] Lin, C. C., Chiang, Y. I., & Lin, S. W. (2014). Efficient model and heuristic for the intermodal terminal location problem. *Computers and Operations Research*,*51*, 41-51. [44](#)
- [Macharis et Bontekoning,2004] Macharis, C., & Bontekoning, Y. M. (2004). Opportunities for OR in intermodal freight transport research : A review. *European Journal of operational research*, *153*(2), 400-416. [30](#)
- [Meng et Wang,2011b] Meng, Q., & Wang, S. (2011). Liner shipping service network design with empty container repositioning. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, *47*(5), 695-708. [34](#)
- [Merlin,1991] Merlin,P. (1991). Géographie, économie et planification des transports *Presses Universitaires de France, Paris* [9](#)
- [Montreuil,2011] Montreuil, B. (2011). Toward a Physical Internet : meeting the global logistics sustainability grand challenge. *Logistics Research*, *3*(2-3), 71-87. [36](#)
- [O'kelly,1987] O'kelly, M. E. (1987). A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities. *European Journal of Operational Research*, *32*(3), 393-404. [32](#), [40](#)
- [O'kelly et Bryan,1998] O'Kelly, M. E., & Bryan, D. L. (1998). Hub location with flow economies of scale. *Transportation Research Part B : Methodological*, *32*(8), 605-616. [40](#)
- [Racunicam et Wynter,2005] Racunica, I., & Wynter, L. (2005). Optimal location of intermodal freight hubs. *Transportation Research Part B : Methodological*, *39*(5), 453-477. [33](#), [40](#)
- [Shoham,1993] Shoham, Y. (1993). Agent-oriented programming. *Artificial intelligence*, *60*(1), 51-92. [86](#)

- [Smith,2009] Smith A (2009). *The wealth of nations*. Penguin, London. 6
- [Skorin-kapov et O'kelly,1996] Skorin-Kapov, D., Skorin-Kapov, J., & O'Kelly, M. (1996). Tight linear programming relaxations of uncapacitated p-hub median problems. *European Journal of Operational Research*, 94(3), 582-593. 32
- [Pedersen et Madsen,2005] Pedersen, M. B., Madsen, O. B., & Nielsen, O. A. (2005). Optimization models and solution methods for intermodal transportation (*Doctoral dissertation, Technical University of Denmark Danmarks Tekniske Universitet, Department of Transport Institut for Transport, Traffic Modelling Trafik modeller*). 30
- [Topcuoglu et al.,2005] Topcuoglu, H., Corut, F., Ermis, M., & Yilmaz, G. (2005). Solving the uncapacitated hub location problem using genetic algorithms. *Computers & Operations Research*, 32(4), 967-984. 33
- [Sahni et al.,1976] Sahni, S., & Gonzalez, T. (1976). P-complete approximation problems. *Journal of the ACM (JACM)*, 23(3), 555-565. 80
- [Sim et al.,2009] Sim, T., Lowe, T. J., & Thomas, B. W. (2009). The stochastic p-hub center problem with service-level constraints. *Computers & Operations Research*, 36(12), 3166-3177. 33
- [StadieSeifi et al.,2014] StadieSeifi, M., Dellaert, N. P., Nuijten, W., Van Woensel, T., & Raoufi, R. (2014). Multimodal freight transportation planning : A literature review. *European Journal of Operational Research*, 233(1), 1-15. 30
- [Sörensen et al.,2012] Sörensen, K., Vanovermeire, C., & Busschaert, S. (2012). Efficient meta-heuristics to solve the intermodal terminal location problem. *Computers & Operations Research*, 39(9), 2079-2090. 41, 43, 44, 52, 53
- [UNECE,2009] UNECE (2009). Illustrated glossary for transport statistics. United Nations Economic Commission for Europe. 30, 31
- [Pan,2010] Pan, S. (2010). *Contribution à la définition et à l'évaluation de la mutualisation de chaînes logistiques pour réduire les émissions de CO2 du transport : application au cas de la grande distribution* (Doctoral dissertation, École Nationale Supérieure des Mines de Paris). 35

-
- [Pazour et al.,2010] Pazour, J. A., Meller, R. D., & Pohl, L. M. (2010). A model to design a national high-speed rail network for freight distribution. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 44(3), 119-135. [34](#)
- [Pierreval,2006] Pierreval, H. (2006). Simulation combinée discret/continu : étude du cas d'une fonderie, 6 ème Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation-MOSIM'06. *Rabat, Maroc*. [85](#)
- [Pierreval et al.,2007] Pierreval, H., Bruniaux, R., & Caux, C. (2007). A continuous simulation approach for supply chains in the automotive industry. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15(2), 185-198. [84](#), [85](#)
- [Puettman et Stadtler,2010] Puettmann, C., & Stadtler, H. (2010). A collaborative planning approach for intermodal freight transportation. *OR spectrum*, 32(3), 809-830. [34](#)
- [Verma et al.,2012] Verma, M., Verter, V., & Zufferey, N. (2012). A bi-objective model for planning and managing rail-truck intermodal transportation of hazardous materials. *Transportation research part E :logistics and transportation review*, 48(1), 132-149. [34](#)
- [Verma et Verter,2010] Verma, M., & Verter, V. (2010). A lead-time based approach for planning rail-truck intermodal transportation of dangerous goods. *European Journal of Operational Research*, 202(3), 696-706. [34](#)
- [Verweij,2011] Verweij, K. (2011). Synchronic modalities-Critical success factors. *Logistics year-book edition*, 75-88. [31](#)
- [Yoon et Current,08] Yoon, M. G., & Current, J. (2008). The hub location and network design problem with fixed and variable arc costs : formulation and dual-based solution heuristic. *Journal of the Operational Research Society*, 59(1), 80-89. [32](#)
- [Zhu et al.,2014] Zhu, E., Crainic, T. G., & Gendreau, M. (2014). Scheduled service network design for freight rail transportation. *Operations Research*, 62(2), 383-400. [34](#)