HAL
open science

PROPOSITION D'UNE APPROCHE DE COUPLAGE OPTIMISATION-SIMULATION POUR LE TRANSFERT DE CONTENEURS MARITIMES

Abderaouf Benghalia, Mustapha Oudani, Jaouad Boukachour, Dalila Boudebous, Ahmed El Hilali Alaoui

To cite this version:

Abderaouf Benghalia, Mustapha Oudani, Jaouad Boukachour, Dalila Boudebous, Ahmed El Hilali Alaoui. PROPOSITION D'UNE APPROCHE DE COUPLAGE OPTIMISATION-SIMULATION POUR LE TRANSFERT DE CONTENEURS MARITIMES . MOSIM 2014, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation, Nov 2014, Nancy, France. hal-01166685

HAL Id: hal-01166685

https://hal.science/hal-01166685

Submitted on 23 Jun 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

PROPOSITION D'UNE APPROCHE DE COUPLAGE OPTIMISATION-SIMULATION POUR LE TRANSFERT DE CONTENEURS MARITIMES

Abderaouf Benghalia, Mustapha Oudani, Jaouad Boukachour, Dalila Boudebous

Université du Havre, France
{abderaouf.benghalia, mustapha.oudani, jaouad.boukachour, dalila.boudebous}@univ-lehavre.fr

Ahmed El Hilali Alaoui

Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Maroc
elhilali_fstf2002@yahoo.fr

RESUME : *L'objectif de ce travail est de proposer un mode d'exploitation optimisé, basé sur une approche d'optimisation et de simulation, pour le transfert ferroviaire massifié de conteneurs entre le terminal maritime Atlantique et le futur terminal multimodal du port du Havre. L'outil de simulation à événements discrets a été réalisé en utilisant le logiciel Flexsim CT. Les variables de décision de la simulation sont déterminées par l'optimisation grâce au logiciel Cplex. Le but est de déterminer la stratégie la moins coûteuse pour le transfert d'un ensemble de conteneurs entre deux terminaux à conteneurs. Des résultats numériques sont présentés et analysés pour montrer l'efficacité de notre approche.*

MOTS-CLES : *Logistique portuaire, Aide à la décision, Optimisation mathématique, Simulation à événements discrets, Performance.*

1 INTRODUCTION

Dans un monde économique exigeant et avec la croissance de flux de conteneurs dans les terminaux à conteneurs, les ports sont tenus à améliorer continuellement leur performance (Henesey., 2006). L'activité de livraison de conteneurs est coordonnée avec les processus de manutention et de transfert interne. Dans ce contexte, l'autorité portuaire du Havre a entrepris la construction d'une nouvelle plateforme multimodale (Agence Paris Centre Normandie. 2011), objet de notre étude. Cette nouvelle configuration du port du Havre nécessite d'organiser des tournées de navettes ferroviaires afin de transférer les conteneurs entre les terminaux maritimes et le futur terminal multimodal (transfert interne de conteneurs). Cette organisation de terminaux à conteneurs et de réseaux de transfert constitue la chaîne logistique portuaire avec des problèmes (gestion des ressources, gestion des risques sécuritaires, etc.) au niveau des processus de réception, de manutention et de livraison. Pour ce type de problèmes, beaucoup de travaux de recherche basés sur les méthodes d'optimisation ou de simulation ont été présentés (Sammarra et al., 2007), (Lim et al., 2005), (benghalia et al., 2014), (Henesey., 2006), (Bielli et al., 2006).

Notre travail consiste à évaluer la performance du transfert massifié des conteneurs par navettes ferroviaires entre le futur terminal multimodal et le terminal maritime Atlantique du port du Havre via l'optimisation et la simulation. L'objectif est, d'une part, de dimensionner les navettes (minimiser le nombre de wagons nécessaires à la composition des navettes), et d'autre part, de minimiser le nombre de tournées des navettes et le nombre de locomotives.

Contrairement à l'optimisation, la simulation seule ne peut pas optimiser un processus (Almeder et al., 2009), elle peut seulement répondre à la question : qu'est ce qui se passe si on décrit ce scénario ? Cependant, les simplifications introduites dans la formulation mathématique ne permettent pas de trouver une solution exploitable directement (Belmokhtar et al., 2010). C'est à ce niveau qu'intervient la simulation qui est supposée fournir une évaluation réaliste du système tout en testant la robustesse des solutions générées par l'optimisation.

Figure 1 : Vue globale du port du Havre

Dans la section 2, nous présentons une description des terminaux concernés par le transfert des conteneurs avec les différentes politiques de gestion. La section 3 présente une synthèse de l'état de l'art. La description de notre problème est présentée dans la section 4, ainsi que

la programmation mathématique. Les résultats obtenus sont présentés dans la section 5.

2 CONTEXTE DE L'ETUDE ET MOTIVATIONS

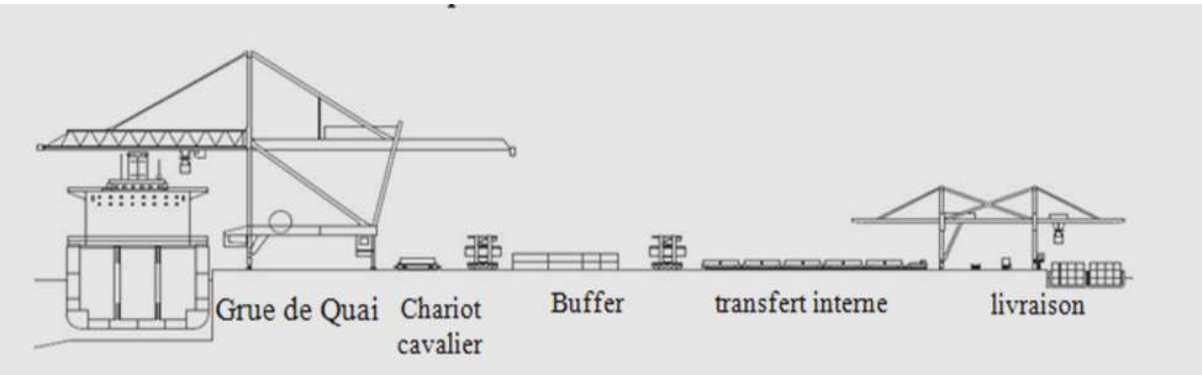

Figure 2 : Processus de manutention des conteneurs

Un terminal à conteneurs (Figure 2) est un espace équipé permettant la manutention, le stockage et la livraison des conteneurs suivant deux modes en import et/ou en export. C'est un ensemble de quais permettant le départ et l'arrivée des navires, de zones de stockages et de ressources pour le transport et les différentes opérations de manutention des conteneurs (Kefi., 2011). Un terminal à conteneurs peut être divisé en deux zones (Vis et al., 2003): la zone de quai et la cour. La zone de quai comporte la partie d'arrimage des navires et les portiques ou les grues de quai qui assurent le chargement et le déchargement de conteneurs. La cour sert aux opérations temporaires de chargement, de déchargement et de transbordement des conteneurs. Le processus de chargement et de déchargement peut être divisé en plusieurs sous-processus, décrits ci-après. Lorsqu'un navire arrive au port, la manutention de conteneurs par les grues de quai commence. Ils sont ensuite transférés par les véhicules qui circulent entre le navire et la pile de stockage. Cet empilement se compose d'un certain nombre de voies de circulation, où les conteneurs peuvent être stockés pendant une certaine période. Les voies sont desservies par des engins, tels que des grues ou des chariots-cavaliers qui peuvent à la fois transporter et stocker des conteneurs dans la pile. Il est également possible d'utiliser des véhicules à guidage automatique (AVG).

Après une certaine période, les conteneurs quittent leur zone de stockage pour être livrés aux clients finaux via différents modes de transport, les barges, les navires, les camions ou les trains. La plupart des terminaux font usage de matériel manipulé par des dockers, comme les chariots cavaliers, grues et autres. Cependant, quelques terminaux, comme des terminaux de Rotterdam, sont automatisés.

Le terminal multimodal du port du Havre (Agence Paris Centre Normandie., 2011) est une plateforme intermédiaire qui permet d'assurer le transport de conteneurs (collecte-livraison) en utilisant une nouvelle gestion des transferts de conteneurs par : trains, barges fluviales et route.

L'objectif est de massifier le transport de conteneurs en utilisant des navettes ferroviaires pour le transfert entre le terminal multimodal et les différents terminaux maritimes d'une part (Figure 1). D'autre part, la livraison des conteneurs aux clients sera effectuée spécialement par des trains de grandes lignes et des barges via l'axe Seine.

Le transfert global de conteneurs entre le port du Havre et son hinterland (principalement la région parisienne) se fait actuellement en grande partie en utilisant le transport routier et le reste par les modes de transport ferroviaire et fluvial. Ce transfert se fait directement entre les terminaux maritimes et les zones de livraison selon le schéma de la figure 3. Ce schéma de fonctionnement provoque une congestion pour les manutentionnaires et une saturation des zones de stockages des terminaux maritimes.

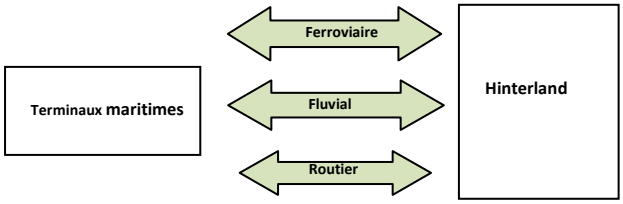

Figure 3 : Transfert actuel des conteneurs

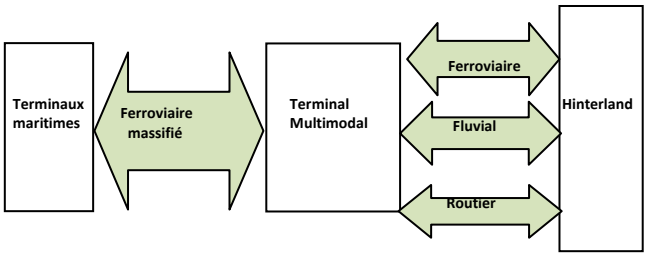

Figure 4 : Transfert futur des conteneurs

Avec la construction du terminal multimodal, les conteneurs seront évacués vers ce terminal (Méga-hub) pour être livrés par la suite à leur destination finale (Figure 4) par camions, barges (via la seine) ou trains.

3 ETAT DE L'ART

Lorsqu'un navire arrive au port, il doit s'amarrer au quai. Le nombre de quais qui devraient être disponibles est l'une des décisions qui doit être faite au niveau stratégique. L'arrimage d'un porte-conteneurs est un problème fortement contraint dans lequel les gestionnaires de terminaux n'ont pas le pouvoir de décision totale :par exemple, les plans de chargement/déchargement sont établis par le capitaine du navire. (Imai et al., 1997) présentent une méthode multicritère d'optimisation pour le problème d'arrimage du navire qui prend en compte deux objectifs opposés : la stabilité du navire et le nombre de conteneurs en mouvements de chargement/déchargement. Les auteurs proposent un modèle de programmation multi-objectif en nombre entier et mettent en œuvre une méthode de pondération pour arriver à un programme à objectif unique. L'approche a été appliquée à des instances contenant jusqu'à 504 conteneurs. Selon (Wilson et Roach., 2000), le problème de chargement de conteneurs est un problème, dont la taille dépend de la capacité du navire et de l'offre et de la demande des conteneurs au niveau de chaque port. Le problème d'ordonnancement des grues de quai réfère à l'allocation d'un nombre fixe des grues de quai aux tâches ainsi qu'à l'ordonnancement des mouvements de chargement et de déchargement. (Lim et al., 2005) traitent le problème d'affectation des grues aux tâches sous les contraintes de non croisement, de voisinage et de séparation. Les auteurs proposent un algorithme de programmation dynamique et un algorithme de recherche tabou probabiliste. Ils ont testé ces algorithmes sur des instances générées (de taille dépassant 30 grues et 40 tâches) reflétant la situation actuelle du Port de Singapore. (Sammarra et al., 2007) ont décomposé le problème en un problème de routage et un problème d'ordonnancement et ils ont proposé un algorithme de recherche tabou pour le problème de routage qui est intégré dans une procédure de recherche locale pour le problème d'ordonnancement. Ils ont comparé leurs résultats avec ceux de (Moccia et al., 2006). L'algorithme proposé surclasse l'algorithme GRASP et il s'est avéré capable de trouver l'optimum pour plusieurs instances dans un laps de temps raisonnable. Le management des opérations de la cour comporte plusieurs problèmes de décision, comme le design des politiques de stockage dans les blocs de conteneurs et au niveau des baies suivant les caractéristiques spécifiques d'un conteneur (taille, poids, destination, import/export etc.), l'allocation, le routage et l'ordonnancement des grues de quai. (Lee et al., 2006) présentent le problème de gestion de la cour de stockage dans un hub de transbordement. L'objectif est la réduction de la congestion du trafic. Les auteurs visent l'affectation des conteneurs aux blocs de la zone de stockage ainsi que l'affectation des grues de manutention aux blocs et proposent un modèle de programmation linéaire mixte qui minimise le nombre des grues nécessaires pour la réalisation des travaux de chargement. Deux heuristiques sont proposées et testées sur des instances générées aléatoirement : une méthode séquentielle et un algorithme de génération de colonnes. (Vis et al., 2003) proposent d'utiliser des zones tampons dans le transfert Quai-Cour, de sorte que le processus peut être dissocié en deux sous-processus: le déchargement et le transport. Un modèle de programmation en nombres entiers détermine la taille minimale de la flotte de telle sorte que chaque conteneur est transporté à l'intérieur de sa fenêtre de temps. Les résultats d'analyse sont validés par simulation, les expériences numériques montrent que le modèle fournit une bonne estimation du nombre de véhicules nécessaires.

Si l'optimisation utilise une modélisation simplifiée d'un système pour trouver une solution qui minimise (ou maximise) une fonction objectif, la simulation permet de fournir des estimations réalistes et d'évaluer différents scénarios (règles de gestions de ressource, dimensionnement de ressources, etc.) (Belmokhtar et al., 2010). Ayant déjà fait ses preuves dans le monde de l'industrie (Law et al., 1991), la simulation a pour objectif d'aider le décideur à prendre des décisions importantes de logistique, de conception ou encore d'investissement, suite aux résultats d'une simulation de différents scénarios. C'est pourquoi la simulation paraît être un outil parfaitement adapté pour tester et analyser différentes planification de la logistique portuaire. Par ailleurs, la simulation peut être utilisée pour dimensionner un système, améliorer le taux d'utilisation des équipements et aussi démontrer le potentiel de l'installation d'un nouvel équipement (Na et al., 2009). Les approches basées sur la simulation permettent la modélisation dynamique des comportements de l'entreprise, avec des degrés variés de contraintes et des politiques différentes (Belmokhtar et al., 2010). Elles peuvent traiter les diverses possibilités occasionnées par les incertitudes de l'approvisionnement et de la demande (Persson et al., 2009). D'un autre côté, l'utilisation de l'optimisation est souvent inefficace pour les problèmes réels qui sont généralement multi-objectifs et fortement contraints. Par ailleurs, en optimisation, les aléas sont rarement pris en compte et de plus il peut y avoir un manque et/ou une imprécision d'information (Almeder et al., 2009).

Dans (Na et al., 2009) le logiciel ARENA a été utilisé pour réaliser un modèle de simulation du fonctionnement d'un terminal à conteneurs. L'objectif des auteurs est d'estimer les effets des séismes sur la performance du terminal. Ce modèle de simulation permet d'indiquer le pourcentage de la perte économique et par conséquent la diminution du trafic de conteneurs lorsqu'un séisme se produit dans un terminal à conteneurs. Hartmann (Hartmann., 2005) a développé un modèle de simulation basé sur la configuration des engins de stockage (manutention automatisée) et des véhicules automatisés de transport AGV-ACT (Automated Guided Vehicle - Automated Container Terminal). Il a comparé la performance de la nouvelle configuration avec l'ancienne sans les AGV. Les résultats obtenus ont montré que l'automatisation est réalisable avec un impact considérable sur la performance des opérations. La simulation a été également

utilisée par (Zeng et al., 2009) pour l'ordonnancement des opérations de manutention dans les terminaux à conteneurs.

Dans (Benghalia et al., 2013), pour déterminer les indicateurs de performance, nous avons proposé la démarche ECOGRAISIM. L'intérêt de cette démarche est d'avoir les variables d'action liées aux indicateurs de performance et aux objectifs à la fois. L'objectif est d'évaluer les indicateurs de performance déterminés par ECOGRAI de la chaîne logistique portuaire et de tester plusieurs modes de transfert interne des conteneurs. Nous avons ensuite mené une étude (Benghalia et al., 2014) dont l'objectif est de comparer via la simulation entre deux modes d'exploitation : mode planifié et mode massifié. Le but principal de cette simulation est de gérer le flux de conteneurs transférés entre le terminal multimodal et le terminal maritime Atlantique en respectant les dates de livraison et en minimisant les coûts des ressources utilisées. La simulation des deux modes massifié et planifié a montré que le mode planifié permet d'avoir un meilleur taux de service. Le mode planifié est également meilleur par rapport à l'indicateur pourcentage de CO_2. Le mode massifié est meilleur économiquement car il permet de transférer les conteneurs en utilisant moins de ressources (locomotives, wagons) qui sont très coûteuses.

La force de la simulation est sa capacité de décrire un système dans sa globalité en intégrant l'aspect stochastique (Bielli et al., 2006). Néanmoins, les valeurs optimales de ses variables de décision sont difficiles à déterminer. (Better et al., 2008) ont couplé l'optimisation et la simulation afin de gérer les risques et les incertitudes. Dans (Almeder et al., 2009), le couplage de l'optimisation et la simulation vise à déterminer les variables de décision de la simulation en utilisant l'optimisation. Les résultats de la simulation alimentent l'optimisation qui en retour détermine les variables de décision de la simulation et ainsi de suite. Notre travail concerne spécialement la détermination des valeurs optimales des variables de décision de la simulation via l'optimisation.

Plusieurs motivations nous amènent à faire la combinaison optimisation/simulation. La première est de tester la robustesse des solutions trouvées par l'optimisation qui génère une bonne solution à partir de données statiques. Cependant, un certain nombre de paramètres aléatoires intervient 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, les temps de séjour des conteneurs dans le 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 les résultats du processus d'optimisation. Grâce à cet outil, ils peuvent eux-mêmes tester des planifications et orienter leurs choix en analysant les résultats. Ainsi, suite à une simulation, il est possible d'apercevoir des défauts d'une configuration et d'en déduire des corrections sur certains choix stratégiques. Suite à ces corrections, de nouvelles simulations peuvent être lancées jusqu'à l'obtention de la bonne configuration. Nous proposons donc un système (Figure 5) composé de deux modules en interaction permanente : un module d'optimisation capable de fournir une bonne solution de planification des transferts des conteneurs et un module de simulation capable de tester cette planification. Les résultats obtenus peuvent être analysés et interprétés de manière à apporter des améliorations.

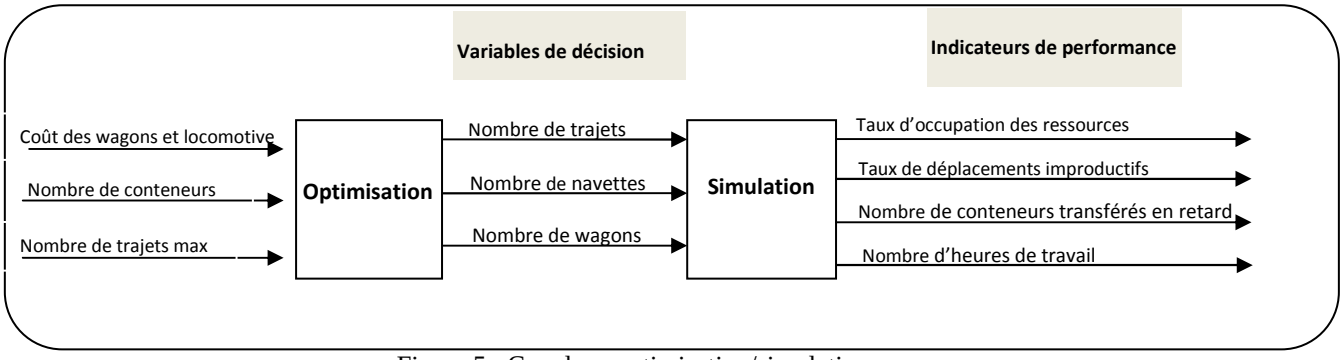

Figure 5 : Couplage optimisation/simulation

4 DESCRIPTION DU PROBLEME

Le problème étudié dans ce papier concerne le transfert et la manutention des conteneurs en import et en export entre le terminal multimodal et le terminal Atlantique.

En import : dans ce cas, les conteneurs sont reçus au niveau du terminal maritime Atlantique. Notre objectif est de les récupérer depuis la zone de stockage, positionner la navette et manutentionner les conteneurs, atteler une locomotive et ensuite lancer le transfert de la navette pour arriver au terminal multimodal et décharger les conteneurs en utilisant un portique. En fin du trajet, la locomotive doit être libérée pour exécuter d'autres tâches.

En export : les mêmes tâches citées en import se répètent mais les conteneurs seront reçus au niveau du terminal multimodal et doivent être transférés au terminal maritime afin de les livrer à leur destination finale.

Notre objectif est d'étendre nos travaux précédents (Benghalia et al., 2014) afin de proposer un nouveau mode de transfert optimisé de conteneurs. Il s'agit de simuler le transfert ferroviaire de conteneurs afin de valider les résultats de l'optimisation et les différents choix fonctionnels (nombre de locomotives, nombre de wagons, ordonnancement de trajets). Cette simulation permet de calculer les indicateurs de performance (taux d'occupation des ressources, taux de déplacements improductifs, nombre de conteneurs transférés en retard, nombre de conteneurs livrés) qui ont été déterminés dans (Benghalia et al., 2013). Après avoir défini les indicateurs de performance, les processus de manutention et de transfert de conteneurs ont été modélisés en utilisant le langage UML. Le but principal de notre étude 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. Un premier modèle de simulation Flexsim (Benghalia et al., 2014) a été réalisé, afin de comparer deux modes d'exploitation : mode planifié (Respect des dates de livraison des conteneurs) et mode massifié (Respect des taux de remplissage fixés). L'objectif est de gérer le flux de conteneurs entre le terminal multimodal et le terminal maritime Atlantique en respectant les dates de livraison et en minimisant les coûts des ressources utilisées.

Ces deux modes simulés (massifié/ planifié) nécessitent l'utilisation de plusieurs ressources, entre autre, trois locomotives qui sont très coûteuses. Pour pallier à cet inconvénient, nous avons adopté une stratégie d'exploitation optimisée. Plus précisément, pour que la manutention des navettes s'effectue sans mobiliser les locomotives, nous préparons 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 (Figure 6) i.e. lorsque la locomotive arrive au terminal maritime (resp. au terminal multimodal), elle laisse sa navette et elle prend la navette déjà manutentionnée.

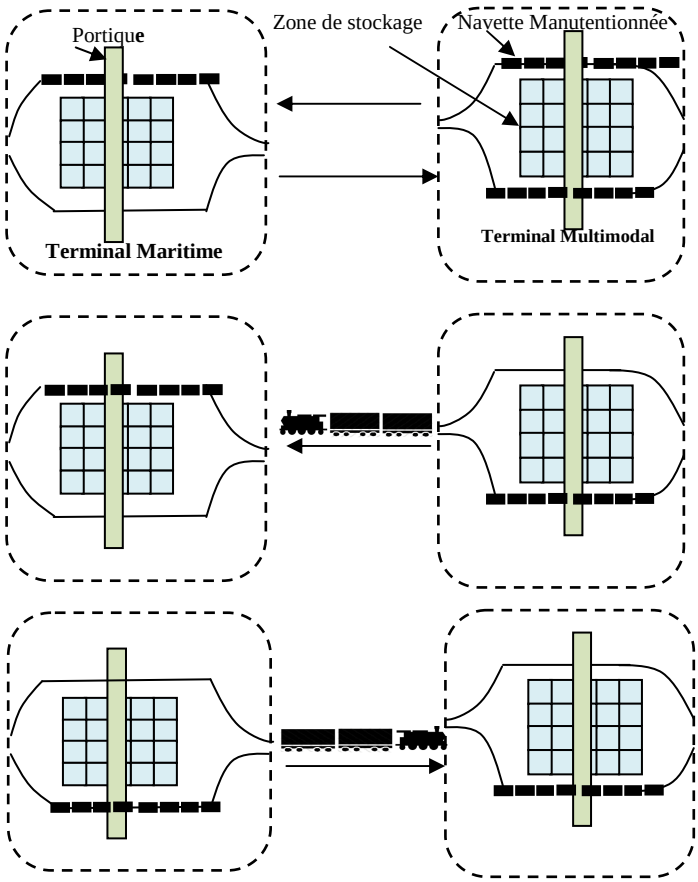

Figure 6 : Stratégie de rotation des navettes en noria

4.1 Simulation

Les processus de manutention et de transfert massifié de conteneurs par navettes ferroviaires entre le terminal multimodal et le terminal maritime Atlantique ont été modélisés dans (Benghalia et al., 2013) grâce au langage UML et en suivant la démarche UP7 (Gabay,J. and Gabay, D., 2008). Pour réaliser notre modèle de simulation à événements discrets, nous avons utilisé le logiciel orienté objet FLEXSIM CT conçu pour modéliser et simuler l'évolution du flux physique à l'intérieur d'un terminal à conteneurs grâce à sa bibliothèque CT (Container Terminal). Il offre également de grandes possibilités de réutilisation et de développement ainsi que le mode 3D. Notre modèle est composé principalement des ressources suivantes (Figure 7) :

- Les zones de stockage (Yard)
- Les portiques de stockages des conteneurs (Gantry Crane)
- Un conteneur : en utilisant l'objet « Basic TE ».
- Des wagons et des rails: en utilisant la librairie API Rail.

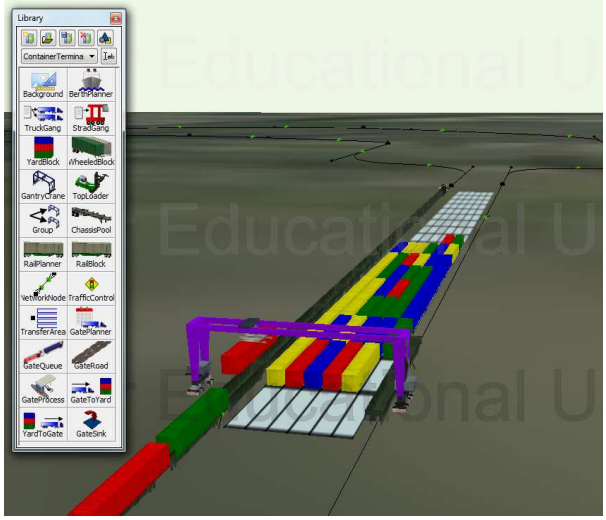

Figure 7 : Capture d'écran de notre simulation

FLEXSIM CT dans sa version actuelle ne permet ni la modélisation des voies ferrées ni de simuler le déplacement d'une navette ferroviaire. Nous avons donc utilisé une bibliothèque développée spécialement pour le transport ferroviaire. Cette bibliothèque, appelée «Rail API»,(http://nordgrenhome.com/community/forum/downloads.php?do=file&id=127) offre la possibilité de créer des trains et des réseaux ferrés et de simuler les déplacements des trains.

La simulation est alimentée avec des données issues d'un fichier Excel (Tableau 1) qui contient pour chaque conteneur : l'heure de disponibilité, l'identifiant, son type, son terminal de départ et son terminal d'arrivée.

HEURE DISPONIBLE	Conteneur	Type	Quantite	Terminal Depart	Terminal Arrivee
0.42	FERR0000704	20.00	1.00	MULTIMODAL	ATLANTIQUE
0.42	FERR0000705	20.00	1.00	MULTIMODAL	ATLANTIQUE
0.42	FERR0000706	20.00	1.00	MULTIMODAL	ATLANTIQUE
0.42	FERR0000707	20.00	1.00	MULTIMODAL	ATLANTIQUE
0.42	FERR0000708	40.00	1.00	MULTIMODAL	ATLANTIQUE
0.42	FERR0000709	20.00	1.00	MULTIMODAL	ATLANTIQUE
0.42	FERR0000001	20.00	1.00	ATLANTIQUE	MULTIMODAL
0.42	FERR0000002	20.00	1.00	ATLANTIQUE	MULTIMODAL
0.42	FERR0000003	40.00	1.00	ATLANTIQUE	MULTIMODAL
0.42	FERR0000004	40.00	1.00	ATLANTIQUE	MULTIMODAL
0.42	FERR0000012	20.00	1.00	ATLANTIQUE	MULTIMODAL
0.42	FERR0000025	20.00	1.00	ATLANTIQUE	MULTIMODAL
0.42	FERR0000026	20.00	1.00	ATLANTIQUE	MULTIMODAL
0.42	FERR0000027	20.00	1.00	ATLANTIQUE	MULTIMODAL
0.42	FERR0000028	20.00	1.00	ATLANTIQUE	MULTIMODAL
0.42	FERR0000029	20.00	1.00	ATLANTIQUE	MULTIMODAL
0.42	FERR0000030	20.00	1.00	ATLANTIQUE	MULTIMODAL
0.42	FERR0000031	20.00	1.00	ATLANTIQUE	MULTIMODAL
0.42	FERR0000032	20.00	1.00	ATLANTIQUE	MULTIMODAL

Tableau 1 : Données de simulation

Le but de notre premier modèle de simulation était de transférer les conteneurs depuis le terminal Multimodal vers le terminal Atlantique (export) et vice-versa (import) en testant plusieurs scénarios (mode massifié et mode planifié). Les variables de décision, le nombre de locomotives, le nombre de wagons et le nombre de trajets, ont été grossièrement fixées par estimation. Pour pallier à cet inconvénient, nous avons opté pour l'optimisation afin de fixer d'une manière optimale ces variables.

4.2 Optimisation

Pour déterminer le nombre de conteneurs import/export, le nombre de wagons de chaque navette et le nombre de trajets d'une locomotive, nous présentons ci-dessous notre formulation mathématique P_1 :

Données :

c_l : Coût de la locomotive par heure

c_w : Coût de location d'un wagon

R : Ensemble des navettes

NR : Nombre maximal de retours des navettes

NA : Nombre maximal d'allers des navettes

TR : Taille maximale des navettes

T_0 : Taille minimale d'une navette

NCX : Nombre de conteneurs en export

NCI : Nombre de conteneurs en import

Variables de décisions :

d_i : Dimension de la navette i

a_i : Nombre d'allers de la navette i, du terminal Multimodal au terminal Atlantique

r_i : Nombre de retours de la navette i, du terminal Atlantique au terminal Multimodal

La fonction objectif :

$$\text{Min} \quad \sum_{i \in R} c_w d_i + \sum_{i \in R} c_l (a_i + r_i)$$

Nous cherchons à minimiser le coût d'utilisation des wagons (premier terme) et le coût des trajets effectués par la locomotive (deuxième terme).

Contraintes :

$$\sum_{i \in R} a_i d_i \geq NCX \qquad (1)$$

$$\sum_{i \in R} r_i d_i \geq NCI \qquad (2)$$

Ces contraintes assurent que le nombre de déplacements effectués par les navettes dimensionnées sera suffisant pour le transfert des conteneurs (en import et en export)

$$T_0 \leq d_i \leq TR, \forall i \in R \qquad (3)$$

La contrainte (3) limite la taille des navettes. En effet, la limitation des tailles des navettes est due à des considérations 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).

$$1 \le a_i \le NA, \forall i \in R \qquad (4)$$
$$1 \le r_i \le NR, \forall i \in R \qquad (5)$$

Les contraintes (4) et (5) limitent le nombre de déplacements pour chaque navette. En effet, une locomotive ne peut faire qu'un nombre limité de trajets par jour pour des considérations de ressources humaines (2 shifts travaillés par journée).

$$0 \le |r_i - r_j| \le 1, \forall i, j \in R \qquad (6)$$
$$0 \le |a_i - a_j| \le 1, \forall i, j \in R \qquad (7)$$
$$0 \le |a_i - r_j| \le 1, \forall i, j \in R \qquad (8)$$

Ces contraintes 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 en noria ; une rame fera soit autant de déplacement que les autres ou plus ou moins un déplacement que les autres rames.

$$d_i \in N^*, a_i \in N^*, r_i \in N^*, \forall i \in R \qquad (9)$$

La contrainte (9) est une contrainte d'intégrité sur les variables.

Le modèle présenté est un programme mathématique en nombre entier à contraintes quadratiques. Si la matrice associée à la forme quadratique des contraintes (1), (2) n'est pas semi définie positive, aucun solveur standard 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:

$$\exists (p, q, r) / \begin{cases} 1 \le d_i \le 2^p - 1 \\ 1 \le a_i \le 2^q - 1 \\ 1 \le r_i \le 2^r - 1 \end{cases}$$

$$\text{Telles que} \begin{cases} d_i = \sum_{k=0}^{p-1} 2^k u_{ik} \\ a_i = \sum_{k=0}^{q-1} 2^k w_{ik} \\ r_i = \sum_{k=0}^{r-1} 2^k v_{ik} \end{cases}$$

$$\text{Avec } (u_{ik}, v_{ik}, w_{ik}) \in \{0,1\}$$

En remplaçant les variables de décision entières dans les contraintes (1) et (2), 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 :

$$\text{Pour } (x, y) \in \{0,1\}, z = x \cdot y \iff \begin{cases} z \le x \\ z \le y \\ z \ge x + y - 1 \\ z \ge 0 \end{cases}$$

Les instances du programme mathématique P_2 ainsi que les données du problème au format *LP* (format standard des programmes linéaires) sont téléchargeables grâce au lien suivant :
https://www.dropbox.com/s/dr90hjtxm0bhk6v/instances_Mosim.rar

5 RESULTATS NUMERIQUES

Le solveur CPLEX a pu résoudre toutes les instances du problème, les valeurs de la fonction objectif pour les instances sont données dans le tableau ci-dessous :

	Nombre de conteneurs export/jour	Nombre de conteneurs import/jour	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
Instance15	540	260	1574	3.05

Tableau 2 : Résultats de la méthode d'optimisation

La colonne 1 et 2 donne 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 donne les 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'entraine 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.

La simulation du mode optimisé concerne une journée type ainsi que l'utilisation d'une seule locomotive. Le trajet entre les deux terminaux dure 60 minutes et le temps de manutention est de 3 minutes par conteneur.

Les valeurs des variables de décision pour l'instance 1 simulé correspondent à 6 déplacement de la locomotive (un déplacement est un aller ou un retour) et 20 wagons au total pour le transfert de 90 conteneurs (somme des conteneurs export et import de l'instance 1).

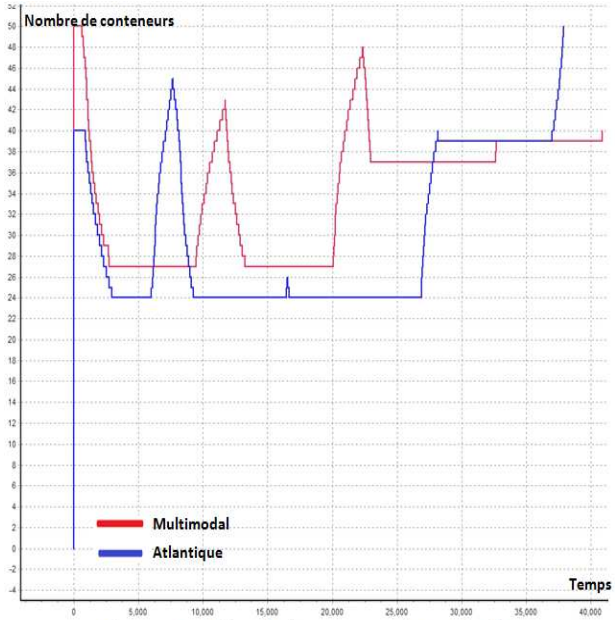

Figure 8 : Circulation en mode optimisé

La figure 8 illustre l'évolution des zones de stockage (le nombre de conteneurs est compris entre 24 et 50) des terminaux (ContentA en bleu : zone de stockage du terminal Atlantique) et (ContentM en rouge : zone de stockage du terminal Multimodal). Nous constatons à partir de la figure précédente que la stratégie de rotation en noria des navettes a été respectée. En effet, chaque variation (augmentation ou diminution) du nombre de conteneurs (ContentA, ContentM) est due à une activité de chargement ou de déchargement de conteneurs. En plus, en fin de simulation, nous constatons que les valeurs de ContentA et ContentM ont été inversées, ce qui signifie que tous les conteneurs ont été transférés à temps. Par ailleurs, les valeurs finales de ContentA et ContentM permettent de calculer le critère de performance «taux de service» (le taux de service est calculé en fonction du nombre de conteneurs transférés à temps et du nombre total de conteneurs transférés).

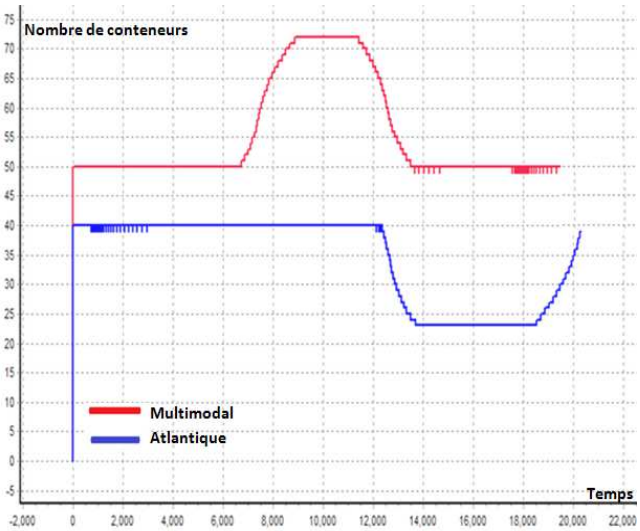

Figure 9 : Circulation en mode massifié

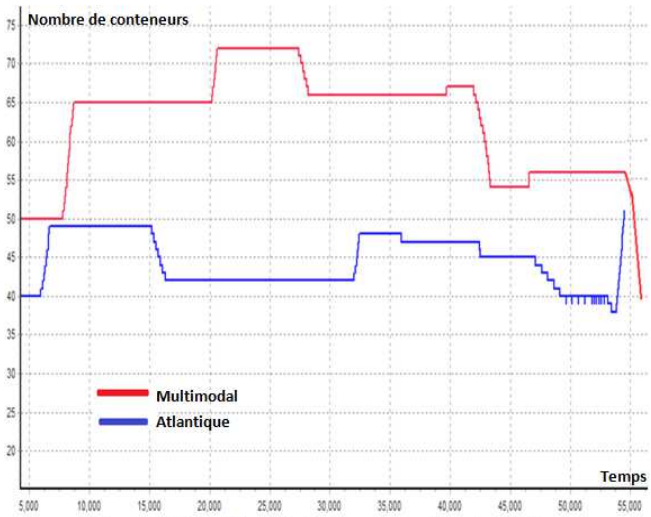

Figure 10 : Circulation en mode planifié

En comparant les figures des trois modes simulés (Figure 8, Figure 9 et Figure 10), nous observons qu'il y a moins de variation au niveau des zones de stockage (dans les figures 9 et 10, le nombre de conteneurs est compris entre 23 et 73) des terminaux. Cette variation est expliquée par l'application du mode massifié (Figure 9). Néanmoins, ce mode génère des retards sur les délais de livraison des conteneurs. Alors que les deux autres modes ne génèrent pas de retard.

Les résultats de la simulation des trois modes (Tableau 3) montrent que les deux modes optimisé et planifié permettent d'avoir un meilleur taux de service car aucun conteneur n'est transféré en retard. Un des avantages du mode massifié est la réduction de l'émission de CO_2 lors des déplacements de locomotives. D'un autre coté, le mode optimisé est meilleur économiquement car il permet de transférer les conteneurs en utilisant moins de ressources (locomotives, wagons) qui sont très coûteuses.

	Mode massifié	Mode planifié	Mode optimisé
Nombre de wagons	47	48	39
Conteneurs transférés en retard	40%	0%	0%
Nombre de locomotives	2	3	1
Nombre de ressources humaines	3	8	6
Nombre d'heures de travail des locomotives (émission de CO_2)	3	8	12

Tableau 3 : Récapitulatif des résultats de simulation (instance 1)

6 CONCLUSION

L'étude menée dans ce travail concerne les processus de manutention et de transfert ferroviaire de conteneurs au niveau du port du Havre. Notre problème consiste à élaborer des tournées de navettes ferroviaires, afin de transférer les conteneurs destinés à l'export ou ceux de l'import. Il s'agit de dimensionner le nombre de ressources (locomotives, wagons) et de déterminer une planification d'exploitation. Trois modes de transfert de conteneurs ont été comparés. Pour le mode optimisé, nous avons proposé une démarche de couplage de l'optimisation et de la simulation. Le principe de cette démarche est, d'une part, d'identifier les variables de décision de la simulation par l'optimisation, et d'autre part, de tester la robustesse et la réalisabilité des solutions de l'optimisation par simulation.

REFERENCES

Agence Paris Centre Normandie. 2011. http://www.haropaports.com/sites/haropa/files/u30/multimodal55pages.pdf

Almeder, C., Preusser, M., and Hartl, R. F., 2009. Simulation and optimization of supply chains: alternative or complementary approaches? *OR spectrum*, 31(1), p. 95-119.

Belmokhtar, S., Klein. T, and Oulamara, A., 2010. Une approche hybride par simulation et optimisation pour un problème de production. *8ème Conférence Internationale de MOdélisation et SIMulation – (MOSIM'10*), Hammamet, Tunisie.

Benghalia, A., Boukachour, J., and Boudebous, D., 2012. Simulation of the passage of containers through le Havre seaport, *The 14th International Conference on Harbor Maritime & Multimodal Logistics Modelling and Simulation*, Vienna, Austria.

Benghalia, A., Boukachour, J., and Boudebous, D., 2013. Évaluation de la performance du trafic des conteneurs maritimes, *9th International Conference on Integrated Design and Production*, (*CPI'13*), Tlemcen, Algeria.

Benghalia, A., Boukachour, J., and Boudebous, D., 2014. Modélisation et simulation du transfert massifié de conteneurs. *The 2nd International IEEE conference on Logistics Operations Management (GOL'14)*, Rabat, Morocco.

Better, M., and Glover, F., 2008. Simulation Optimization: Applications in risk management, *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 7 (04), p. 571-587.

Bielli,M., Boulmakoul,A, and Rida,M, 2006. Object oriented model for container terminal distributed simulation. *European Journal of Operational Research*. 175(3), p. 1731–1751.

Persson, F., and Araldi, M., 2009. The development of a dynamic supply chain analysis tool—Integration of SCOR and discrete event simulation. *International Journal of Production Economics*, 121(2), p. 574-583.

Gabay, J., and Gabay, D., 2008. *UML 2 Analyse et conception-Mise en oeuvre guidée avec études de cas: Mise en oeuvre guidée avec études de cas*. Dunod.

Hartmann, S., 2005. *A general framework for scheduling equipment and manpower at container terminals.* pp. 207-230. Springer Berlin Heidelberg.

Henesey, L., 2006. *Multi-agent systems container terminal management.* Phd Thesis. Blekinge Institute of Technology.

Imai, A., Nagaiwa, K, and Tat, C-W., 1997. Efficient planning of berth allocation for container terminals in Asia. *Journal of Advanced Transportation*. 31(1), p. 75–94.

Kefi, G-M., 2008. *Optimisation Heuristique Distribuée du Problème de Stockage de Conteneurs dans un port*. Thèse de doctorat. Ecole centrale de Lille, France.

Law, A. M., and Kelton, W. D., 1991. *Simulation modeling and analysis*. New York: McGrae-Hill Inc.

Lee, L-H., Chew, E.-P., Tan, K-C., and Han, Y., 2006. An optimization model for storage yard management

in transshipment hubs, *OR Spectrum* 28(4). p. 539–561.

Lim, J-K., Kim, K-H., Yoshimoto, K., Lee, J-H, and Takahashi, T. 2005. A dispatching method for automated guided vehicles by using a bidding concept. In Container Terminals and Automated Transport Systems. Springer Berlin Heidelberg. p. 325-344.

Moccia, L., Cordeau, J-F., Gaudioso, M., and Laporte, G., 2006. A branch and cut algorithm for the quay crane scheduling problem in a container terminal. *Naval Research Logistics*, 53(1), p. 45-59.

Sammarra, M., Cordeau, J. F., Laporte, G., and Monaco, M. F., 2007. A tabu search heuristic for the quay crane scheduling problem. *Journal of Scheduling*, 10(4-5), p. 327-336.

Na, U. J., and Shinozuka, M., 2009. Simulation-based seismic loss estimation of seaport transportation system. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(3), p. 722-731.

Vis, I. F., and De Koster, R., 2003. Transshipment of containers at a container terminal: An overview. *European journal of operational research*, 147(1), p. 1-16.

Wilson, I-D., and Roach, P-A., 2000. Container stowage planning: a methodology for generating computerised solutions. *Journal of the Operational Research Society*, 51(11), p. 1248-1255.

Zeng, Q., and Yang, Z., 2009. Integrating simulation and optimization to schedule loading operations in container terminals. *Computers & Operations Research*, 36(6), p. 1935-1944.