

CIGI QUALITA MOSIM 2023

Analyse économique d'un réseau de transport de conteneurs

MARIE-SABINE SAGET¹, MARYAM DARVISH², JACQUES RENAUD³

¹ CIRRELT, Faculté des sciences de l'administration, Université Laval
2325 rue de la Terrasse, Québec (QC), G1V 0A6, Canada
marie-sabine.saget.1@ulaval.ca

² CIRRELT, Faculté des sciences de l'administration, Université Laval
2325 rue de la Terrasse, Québec (QC), G1V 0A6, Canada
maryam.darvish@fsa.ulaval.ca

³ CIRRELT, Faculté des sciences de l'administration, Université Laval
2325 rue de la Terrasse, Québec (QC), G1V 0A6, Canada
jacques.renaud@fsa.ulaval.ca

Résumé

Cet article traite des stratégies de transport de cargaisons conteneurisées, d'affectation de navires et de calibration de leur taux d'occupation dans le réseau d'approvisionnement Europe-Canada. Nous proposons un modèle de programmation linéaire en nombres entiers afin de minimiser les coûts globaux de transport et satisfaire la demande de clients principalement situés le long du couloir économique Ontario-Québec. En outre, nous procédons à une simulation de Monte-Carlo pour évaluer l'impact des fluctuations de la demande totale.

Les résultats nous permettent de conclure que les transporteurs ne privilégient pas nécessairement les économies d'échelle en mer. La raison principale est que les coûts de transport routier représentent une grande part des dépenses totales de transport. Ainsi, il convient aux transporteurs de considérer la position géographique des ports de réception relativement aux clients et aux organismes gouvernementaux d'en prendre acte dans l'élaboration de leurs politiques d'investissement.

Mots clés - Logistique portuaire, transport conteneurisé, taille de navires, taux d'occupation, simulation de Monte-Carlo.

Abstract

This article evaluates the strategies behind containerized freight transport patterns, vessel allocation, and vessel occupancy rates within the Europe-Canada distribution network. We propose an integer linear programming model that minimizes the total transportation costs and fulfills orders for customers primarily situated along the Ontario-Quebec trade corridor. Furthermore, we conduct a Monte Carlo simulation to evaluate the effects of demand fluctuations on transportation schemes.

The findings suggest that economies of scale at sea are not the foremost concern of carriers, as road haulage accounts for a significant portion of total transportation expenses. Therefore, carriers should consider the proximity of receiving ports to their customers when formulating their transport strategies, and government agencies should consider this factor when designing their investment policies.

Keywords - Port logistics, containerized transport, ship size, occupancy rates, Monte Carlo simulation.

1 INTRODUCTION

Dans un contexte de croissance du volume de marchandises transportées par voie maritime, les transporteurs de fret doivent, de nos jours, faire face à une pléthore de défis. Ces derniers sont de nature stratégique, tactique et opérationnelle [Pasha et al., 2020], mais se retrouvent tous sous l'égide d'une problématique récurrente parmi les transporteurs maritimes. Il s'agit de la conception/organisation des réseaux de services et d'approvisionnement. En d'autres termes, il est question de déterminer les itinéraires permettant aux transporteurs de traiter les volumes de demandes via les ports avec lesquels ils communiquent [Christiansen, 2020 ; Agarwal et Ergun, 2008]. Cependant, vu la structure concurrentielle du secteur maritime, toute possibilité de réduire les coûts est déterminante pour gagner une plus grande part de marché et sensiblement élargir la marge de bénéfices [Reinhardt et David Pisinger, 2012].

Dans cette visée, la flotte de porte-conteneurs et leur taille ont largement crû. Selon les données récentes [Placek, 2022], le

nombre de porte-conteneurs dans la flotte mondiale a augmenté de 4 966 navires en 2011 à 5 589 navires en 2022. De plus, la capacité portante de la flotte marchande mondiale a atteint environ deux milliards de tonnes de port en lourd (tpl) en 2020. L'avantage de cette tendance est qu'elle permet aux transporteurs de réaliser des économies d'échelle, mais la rentabilité des stratégies maritimes dépend également des conditions de marché. Ces dernières influencent notamment le taux d'occupation des navires, un indicateur obtenu en rapportant la taille de cargaisons transportées au tonnage de port en lourd des porte-conteneurs.

Sachant que les conditions de marché, dont la structure de la demande, sont très variables, la problématique est de mieux comprendre la dynamique de ces éléments à travers le choix des routes maritimes. L'objectif de cet article s'y rapporte dans le contexte des liens commerciaux entre les ports européens et leurs homologues du Nord-Est de l'Amérique. Ainsi, cet article propose un programme linéaire visant à minimiser les coûts

totaux de transport pour desservir une clientèle principalement située le long du corridor économique Ontario-Québec. Pour évaluer la robustesse du modèle face aux conditions de marché, une simulation de Monte-Carlo est réalisée en prenant en compte l'incertitude de la demande des clients.

Ainsi, la section 2 est consacrée à la revue de littérature. La section 3 présente le problème et la section 4, le modèle mathématique. La section 5 se concentre sur l'étude de cas, suivie de la conclusion.

2 REVUE DE LITTÉRATURE

La littérature sur le processus décisionnel des transporteurs comprend des contributions algorithmiques et managériales. Pour ce qui est de la contribution algorithmique, certains auteurs [Reinhardt et Pisinger, 2012] se sont concentrés sur la conception d'un réseau de transport de conteneurs et l'affectation de navires. En utilisant un modèle de programmation linéaire à nombres entiers mixtes, les auteurs ont cherché à minimiser le coût de transport global. D'autres auteurs ont privilégié l'approche managériale [Kim et al., 2019] qui met en évidence l'impact du taux de fret maritime sur le choix des routes de navigation. Ils ont également souligné que les tendances actuelles à déployer des méganavires peuvent être contre-productives et ont estimé qu'il faut des recherches plus approfondies pour déterminer la taille optimale des navires. Pour mieux comprendre la réserve des auteurs sur cette question, on peut se référer aux travaux de [Gilman, 1975] ou de [Jansson et Shneerson, 1987]. Ils admettent, en effet, que le déploiement des grands navires permet de réaliser des avantages d'échelle en mer. Néanmoins, cette stratégie génère des déséconomies d'échelle dans les ports puisque ces navires nécessitent un temps de manutention/rotation sensiblement proportionnel à leur capacité.

Tel que mentionné précédemment, un taux d'occupation élevé des navires est déterminant pour bénéficier des avantages d'échelle. Ainsi, certains auteurs ont abordé l'analyse de cet indicateur au regard des conditions de marché. [Adland et al., 2018] se sont basés sur la théorie économique maritime pour poser l'hypothèse que le taux d'occupation est positivement corrélé avec les taux de fret. Il est question par-là d'amortir au maximum les coûts sur le volume de cargaison transportée. Cependant, leurs résultats montrent que les caractéristiques des navires ont plus d'impacts sur leur taux d'occupation que les facteurs économiques. Il ne s'agit nullement d'une contestation de l'intérêt de prendre en compte les tendances économiques dans l'élaboration des modèles mathématiques sur le transport du fret. C'est une inférence pouvant être tirée des travaux de [Agarwal et Ergun, 2008] qui se sont penchés sur le couplage simultané du problème d'assignation des navires et l'acheminement du fret. Dans leur analyse, les auteurs ont posé l'hypothèse d'un seul type de navire pour maintenir une fréquence hebdomadaire sur une route de service. Ils ont toutefois reconnu que la structure de la demande n'est pas nécessairement la même à chaque période. Ainsi, ils ont suggéré l'incorporation de plusieurs types de navires sur les routes de service afin d'intégrer ces changements tout en élargissant l'horizon de planification. En adoptant cette approche, il devient possible d'évaluer la manière dont l'efficacité des chaînes d'approvisionnement et les coûts sont affectés par la variabilité de la demande.

Cela dit, la gestion des risques liés aux fluctuations de la demande ne peut être ignorée, notamment dans la planification des services de transport maritime réguliers. Ces derniers

doivent, contrairement aux transporteurs affrétés qui répondent à des demandes en temps réel, tenir compte la demande prévue de conteneurs dans leur processus décisionnel [Christiansen et al., 2004]. Cette observation a servi de référence à [Wang et al., 2012] qui ont développé un modèle d'optimisation de profit robuste à des différents scénarios de demande de conteneurs en tenant compte de sa variance. En parallèle, [Liang et Huang, 2006] ont développé un système multi-agents pour simuler une chaîne d'approvisionnement dans le but d'améliorer l'efficacité de la chaîne d'approvisionnement et de réduire le coût total.

D'autres auteurs privilégient une combinaison d'optimisation et de simulation. Dans cette optique [Fagerholt et al., 2010] ont développé un cadre de simulation de Monte Carlo pour optimiser les systèmes de navigation industrielle (où le propriétaire de la cargaison contrôle la flotte de navires) ainsi que les transports affrétés (où le propriétaire de la cargaison doit recourir aux services d'un affréteur pour l'organisation du transport). Ils ont reconnu que leur approche est fastidieuse au regard du temps d'exécution, car il faut un échantillon assez grand pour obtenir des résultats fiables. De plus, il faut des données en grande quantité et qualité pour générer des distributions de probabilités pour la demande et d'autres paramètres incertains. Hormis ces inconvénients, l'intégration des aspects stochastiques dans leur approche en fait un important outil d'aide à la décision pour la planification stratégique de transport du fret. [Unnikrishnan et Waller, 2009] ont formulé un problème stochastique en deux étapes avec recours pour optimiser les flux de marchandises dans un réseau d'approvisionnement sous contrainte d'une demande incertaine. Ils ont également appliqué la méthode de simulation de Monte-Carlo afin de faire varier les capacités des centres de distribution. [Frazila et Zuhruf, 2017] ont adopté la même approche en proposant un modèle d'optimisation stochastique discret pour la conception du réseau multimodal de transport de marchandises. Ils ont, en outre, fait une simulation de Monte-Carlo dans le but d'analyser les variations des temps de transport sur les coûts totaux.

En conclusion, les études précédemment mentionnées abordent exhaustivement l'organisation des réseaux de transport. Toute analyse visant à pourvoir des recommandations managériales devrait ainsi prendre en compte des études de cas. Cet article tient compte du fait qu'il n'existe pas encore ce type d'analyse spécifique à la structure commerciale du fret conteneurisé entre les ports de l'Europe occidentale et l'est du Canada. C'est ce qui justifie l'utilisation des méthodes d'optimisation et de simulation pour mieux appréhender la logique économique dans la détermination des routes optimales, des stratégies d'affectation des navires et de leurs taux d'occupation. Il s'agit, en outre, de se concentrer sur une zone économique importante pour les transporteurs opérant sur la route Atlantique ainsi que les preneurs de décision gouvernementaux.

3 DESCRIPTION DU PROBLEME

Dans le problème abordé dans cet article, nous considérons un réseau d'approvisionnement où un transporteur dispose d'une flotte hétérogène de porte-conteneurs. Il doit déterminer des stratégies de transport sur 2 d'échelons (Cf. Figure 1). Le premier échelon fait référence aux interactions entre des ports d'expédition et leurs homologues de réception.

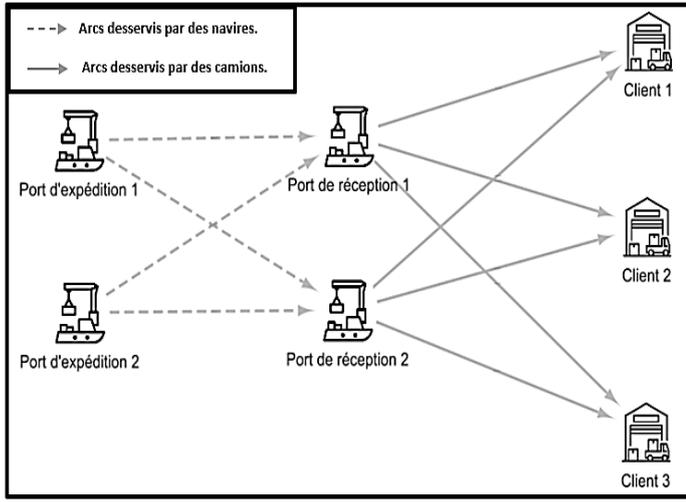


Figure 1 – Illustration schématique du problème abordé.

Le second échelon renvoie au transport par camion des cargaisons reçues par ces derniers vers des clients dont la position géographique est déterminante pour minimiser les coûts totaux de transport.

Les stratégies du transporteur doivent mettre en évidence la concurrence interportuaire sous deux angles :

- Du point de vue des ports d'origine, il s'agit d'identifier les ports qui sont les plus importants pour l'expédition des marchandises.
- Pour ce qui est des ports de réception, il convient d'évaluer leur position concurrentielle, c'est-à-dire leur capacité à capter le trafic conteneurisé. Cette analyse de leur attractivité doit évidemment tenir compte de leur proximité avec les clients.

Le processus décisionnel à partir duquel sont élaborées ces stratégies de transport fait l'arbitrage entre le type et le nombre de navires à affecter au transport des cargaisons. En effet, les avantages d'échelle que procure l'utilisation de grands porte-conteneurs sont conditionnés par leur taux d'occupation. Ainsi, le problème ne se limite pas à la détermination des connexions optimales, mais traite également du nombre de navires et des taux d'occupation optimaux. Ces derniers résultent d'un compromis optimal entre les coûts encourus en mer et ceux liés au transport routier. La section suivante présente la formulation mathématique associée à ce problème.

4 FORMULATION MATHÉMATIQUE DU PROBLÈME

Le réseau d'approvisionnement étudié est modélisé par un graphe $G = (N, A)$ où N est l'ensemble des nœuds et A , l'ensemble des arcs. Sachant que S représente l'ensemble des ports d'expédition, P , l'ensemble des ports de réception et C , l'ensemble des clients, il convient d'établir que $N = S \cup P \cup C$. En outre, l'ensemble V comprend les différents types de navires composant la flotte du transporteur.

Suivant les paramètres présentés dans le Tableau 1, les variables de décisions sont relatives aux flux de conteneurs transportés par tout navire de type $v \in V$ entre tout couple de ports (o, n) , y_{onv} . Le nombre de navires de type $v \in V$ devant desservir ces routes maritimes est représenté par les variables x_{onv} et les variables z_{nc} représentent le flux de conteneurs devant être transportés via camion entre tout port de réception $n \in P$ et client $c \in C$.

Tableau 1 – Présentation des notations utilisées dans le modèle.

Ensembles	
N	Nœuds
A	Arcs
S	Ports d'expédition
P	Ports de réception
C	Clients
V	Types de navires
Paramètres	
q_c	Nombre de conteneurs demandés par client c
Q_v	La capacité du navire v (EVP)
W_n	La plus grande taille de navire que le port n peut accueillir (EVP)
β	Le coefficient de coût du transport d'un conteneur par km dans le réseau routier (\$/EVP-km)
f_v	Le coût fixe de transport du navire v de port o au port n (\$/jour)
α_v	Le coût de transport pour chaque conteneur transporté par navire v (\$/EVP)
Δ_{onv}	La durée du voyage du port o au port n avec le navire v (jours)
d_{nc}	La distance entre tout port n et client c
Variables de décision	
z_{nc}	Le nombre de conteneurs entre les nœuds n et c
y_{onv}	Le nombre de conteneurs transportés entre les nœuds o et n via les navires de type v
x_{onv}	Le nombre de navires de type v reliant les ports o et n si $Q_v \leq W_n$

Le modèle mathématique proposé vise à minimiser une fonction de coûts de transport. Ces derniers comprennent les coûts encourus en mer (variables et fixes) ainsi que les coûts de transport via camion.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \sum_{o \in S} \sum_{n \in P} \sum_{v \in V} (\alpha_v y_{onv} + f_v \Delta_{onv} x_{onv}) \\ & + \beta \sum_{n \in P} \sum_{c \in C} d_{nc} z_{nc} \end{aligned}$$

1. $\sum_{o \in S} \sum_{v \in V} y_{onv} = \sum_{c \in C} z_{nc} \quad \forall n \in P$
2. $\sum_{n \in P} z_{nc} = q_c \quad \forall c \in C$
3. $\sum_{n \in P} \sum_{v \in V} x_{onv} \geq 1 \quad \forall o \in S$
4. $y_{onv} \leq Q_v x_{onv} \quad \forall o \in S \quad \forall n \in P \quad \forall v \in V$
5. $y_{onv} \in \mathbb{Z}^+, z_{nc} \in \mathbb{Z}^+, x_{onv} \in \mathbb{Z}^+$

Sous l'hypothèse que les ports de réception sont en mesure de pourvoir des services de manutention à tout navire accostant à leurs quais ($Q_v \leq W_n$), les contraintes fonctionnelles servent à :

1. Respecter le principe de conservation de flux entrants et sortants au niveau des ports de réception (contraintes 1).
2. Assurer la conformité exacte des livraisons en volume aux clients par rapport à leurs demandes respectives via les contraintes 2.
3. Diversifier les sources d'approvisionnement en imposant que tout port d'expédition soit au moins choisi une fois (contraintes 3). Cette contrainte permet de mettre en lumière l'importance des ports d'origine à travers les tendances de répartition du trafic conteneurisé, d'où l'absence de restriction(s) sur les quantités à expédier ainsi que les types de navires à assigner.
4. Définir les bornes supérieures des quantités transportées par chaque navire via les contraintes 4.

Les contraintes subséquentes sont des contraintes d'intégrité astreignant les variables x_{onv} , y_{onv} , z_{nc} à prendre des valeurs entières.

5 ÉTUDE DE CAS

La section traitant de l'étude de cas comprend deux parties. La première partie situe le problème dans son contexte réel tout en présentant les données d'entrée. Elle est suivie d'une présentation et d'une analyse des résultats.

5.1 Description des données

Le processus de détermination d'une solution optimale de transport tel que présenté dans la section précédente s'opère dans le réseau d'une chaîne d'approvisionnement assurant la jonction entre des ports d'expédition localisés en Europe occidentale et des ports de réception le long de la côte Nord-Est de l'Amérique du Nord. La Figure 1(a) illustre la position géographique des ports d'expédition de Rotterdam, Hambourg (*Hamburg*), Anvers (*Antwerp*), Felixstowe, Le Havre, Valence (*Valencia*), et Gioia Tauro. En outre, la Figure 1(b) présente leurs homologues à Montréal, Halifax et New York pour répondre aux demandes des clients basés au Canada. Puisque nous considérons un cadre d'étude monoproduit, nous avons choisi de nous concentrer sur les clients du secteur de la machinerie dans l'est du Canada (*Canadian Importers Database*, 2022). Ils sont principalement répartis le long du corridor commercial reliant l'Ontario et le Québec.

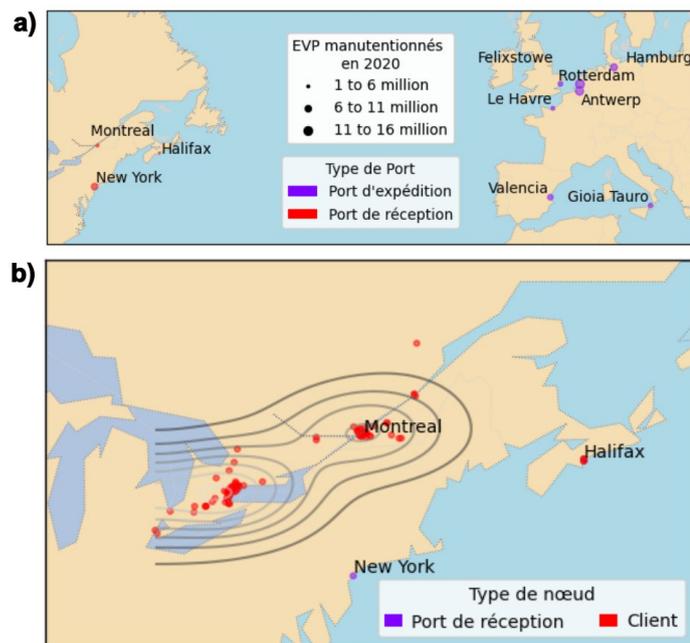


Figure 2 – Présentation de la zone géographique des a) port d'expéditions par rapport aux ports de réception tout en tenant compte de leur importance et en termes de cargaisons manutentionnées et b) clients au regard de leur position par rapport aux ports de réception en insistant sur le corridor économique Ontario-Québec (aire comprise dans les contours en gris).

Il est pertinent de mettre l'accent sur cette zone géographique, car les ports de réception servent d'ouverture sur un pôle de commerce d'importance pour l'économie canadienne. En effet, le rapport de [Lévesque, 2010] souligne le fait que le Québec et l'Ontario bénéficient d'un emplacement stratégique à proximité des principaux marchés du Canada et des États-Unis (le Midwest et la côte orientale). En outre, l'Ontario et le Québec hébergent les plus importants centres de consommation, de production et de redistribution du Canada et sont notamment vus comme le cœur économique du pays. À cet égard, il convient de

souligner qu'ils abritent près de 60% de sa population, contribuent à plus de 60% de son produit intérieur brut (PIB) et représentent plus de 75% de la production manufacturière nationale.

Parallèlement, cette étude vise à mettre en exergue la structure hiérarchique entre les trois ports de réception pour le captage des flux issus du trafic maritime. En référence aux observations de [Ford et Rodrigue, 2018], il existe une compétition entre les ports de Montréal et Halifax. S'il s'avère que le port de Montréal (le second port en termes d'importance au Canada après Vancouver) est traditionnellement une destination de choix pour les transporteurs de marchandises, il fait face à des problèmes de capacité de manutention. En effet, le port de Montréal est seulement capable de manutentionner des porte-conteneurs allant jusqu'à 6 730 EVP. C'est un nombre qui fait pâle figure par rapport au port d'Halifax, pouvant gérer les navires jusqu'à 10 800 EVP. Néanmoins, ledit port ne bénéficie pas de la proximité du couloir commercial Ontario-Québec et de son intégration au réseau ferroviaire du Canadien National (CN) est limitée comparativement à son compétiteur dans le sud. Ceci explique pourquoi le port de New York est souvent considéré comme une meilleure option qu'Halifax et un concurrent plus viable du port de Montréal. Il s'agit d'un port qui, en plus d'être intégré au réseau ferroviaire canadien avec des tarifs suffisamment bas, bénéficie d'une proximité pratique avec la partie sud de l'arrière-pays considéré et est en mesure de desservir des navires de 14 414 EVP au maximum.

Pour faire suite à la brève mise en contexte de la problématique étudiée, le Tableau 2 affiche les paramètres relatifs aux porte-conteneurs. Les travaux de [Veldman, 2011 et Meng et al., 2011] sur les données spécifiques aux différents types de navires servent de référence pour estimer les valeurs de ces derniers. À cet égard, nous pouvons formuler deux remarques clé. Il y a d'abord l'avantage que procure l'usage des porte-conteneurs de grande capacité en termes de coûts variables et vitesse moyenne. Il est néanmoins contrebalancé par le poids des coûts fixes qui sont logiquement moindres quand il s'agit de petits porte-conteneurs.

Tableau 2 - Données sur les frais de navigation, la vitesse et la capacité à plein propres aux différents types de porte-conteneurs (Adapté de [Veldman, 2011 et Meng et al., 2011]).

Capacité (EVP)	Coûts Variables (α_v) \$/EVP	Coûts Fixes (f_v) \$/jour/navire	Vitesse (km/h)	Capacité d'un navire v opérant à plein (Q_v) - EVP
1500	165	7919	36	1350
2000	163	8570	36	1800
3500	158	10525	38	3150
5000	152	12479	41	4500
8000	141	16371	47	7200
10000	130	19209	47	9000
12500	125	22252	54	11250
14000	116	24470	56	12600

Ensuite, la valeur du paramètre Q_v est telle que le taux d'occupation maximal d'un porte-conteneur représente 90% de son tonnage de port en lourd.

Les données extraites du Cadre d'Analyse du Fret Canadien ou CFAF [Statistics Canada, 2021] permettent d'approximer le coût de camionnage (β) en fonction de la provenance et de la destination des marchandises. Sur la base des recettes de fret par tonne-mille, ce coût est estimé à \$4,76/EVP-km. Finalement, les demandes de clients (q_c) sont comprises dans l'intervalle [250-750 EVP] et totalisent 60 000 EVP.

5.2 Résultats et analyses

Cette sous-section présente les résultats de l'analyse computationnelle conduite avec le solveur CPLEX sur l'interface de programmation Python (version 3.10) avec la logithèque Pulp. Elle est scindée en deux parties. La première partie se focalise sur la solution initiale tout en tenant compte des principales tendances de la distribution des flux maritimes. L'instance générée pour ce scénario comporte tous les paramètres présentés antérieurement ainsi qu'une demande déterministe. Une simulation de Monte-Carlo conclut la section analytique et sert à évaluer la robustesse du modèle proposé face à la variabilité de la demande des clients. Le recours à une telle approche sert à éluder l'hypothèse d'une demande constante et à observer la dynamique des stratégies de transport tout en tenant compte des différents types/nombre de navires utilisés ainsi que les taux d'occupation relatifs.

À titre de définition, la méthode de Monte-Carlo est une technique de calcul ayant recours à un échantillonnage aléatoire afin de simuler un système [Graham et Talay, 2015], et dans ce cas, un processus décisionnel. Une fois que le modèle est défini et les paramètres calibrés, les étapes d'implémentation de cette approche sont les suivantes :

- Définir les paramètres de la simulation tels que le nombre d'itérations correspondant à la taille de l'échantillon et le numéro du générateur de séquence de demandes aléatoires.
- Initialiser les variables servant à récupérer les indicateurs de performance du modèle à chaque itération.
- Procéder comme suit à chaque itération :
 - o Générer les demandes aléatoires pour chaque client.
 - o Faire appel au modèle pour obtenir les valeurs de sorties.
 - o Sauvegarder les valeurs de sortie.
 - o Répéter le processus jusqu'à ce que le nombre maximal d'itérations soit atteint.

La demande initiale a une moyenne de 638 et un écart-type de 209. Un échantillon de 10 000 instances a été généré tout en conservant les valeurs des paramètres du scénario initial. Dans chacun des cas, la demande des clients est répartie suivant un coefficient de variation de 0,5. Ce coefficient, qui est une mesure de variabilité relative des demandes générées, est obtenu en rapportant l'écart-type des observations à la demande initiale moyenne (σ/μ).

La génération des nouveaux scénarios exige qu'il y ait un écart type (σ) qui est 2 fois moins grand que la moyenne (μ) afin qu'il n'y ait ni une trop forte ou faible variabilité relative à cette dernière. En général, un coefficient de variation est considéré comme élevé s'il est supérieur à 1 (IBF, sd), ce qui explique le choix de la valeur de cet indicateur de dispersion dans cette étude.

5.2.1 Présentation de la solution de base

Le Tableau 3 présente les indicateurs clés de performance dans la solution initiale. Les coûts variables en mer représentent un peu plus de 8,37% des coûts totaux alors que ce pourcentage est de 1,04% pour ce qui est des coûts fixes en mer. Ces chiffres font état du poids des coûts de camionnage dans la définition des stratégies de transport dans les systèmes d'approvisionnement intégrés, car ils sont évalués à 90,59 % de la valeur de la fonction économique. Ces observations

permettent de déduire que l'importance de la distance interportuaire dans la détermination des connexions maritimes marche de pair avec la proximité des ports de réception aux clients.

Tableau 3 – Présentation des indicateurs clés de performance dans la solution initiale

Type de Coûts	En Valeur (\$)	En pourcentage (%)
Coûts Variables en Mer	8,846,403,27	8,37%
Coûts Fixes en Mer	1,102,588,90	1,04%
Coûts de Camionnage	95,795,775,25	90,59%
Total	105,744,767,42	100,00%

Les connexions interportuaires illustrées dans la Figure 3 permettent d'étayer l'argument précédemment établi. En effet, le fait que le port de Montréal soit en mesure de desservir des navires de capacité maximale de 6 730 EVP le place comme destination principale pour recevoir la majorité des porte-conteneurs. Il faut également tenir compte du fait que 7 navires de 5 000 EVP partent de Felixstowe à destination dudit port. C'est une indication de l'exploitation de la position géographique de ce port d'expédition associée aux avantages d'échelle.

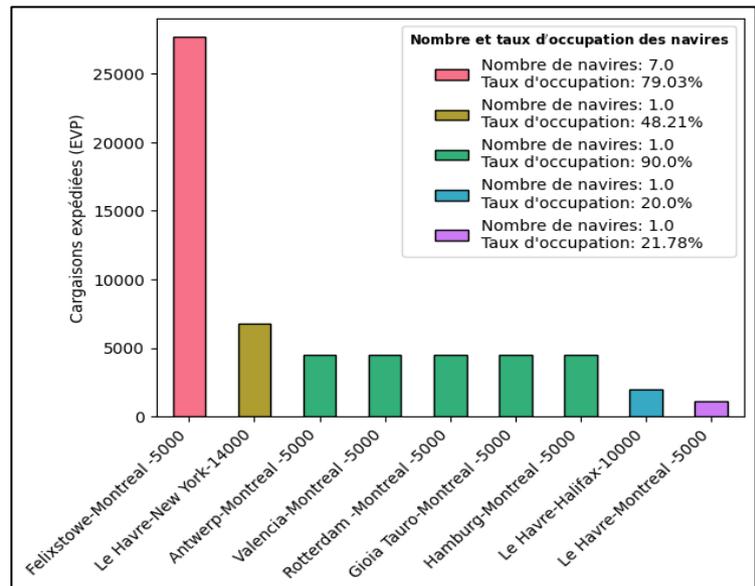


Figure 3 – Stratégies optimales de transport dans la solution initiale.

L'imposition de la contrainte de diversité des sources d'approvisionnement est en phase avec la position géographique des ports d'expédition. Ainsi, la majorité des ports nord-européens tels que ceux d'Anvers, Rotterdam et Hambourg font la connexion avec celui de Montréal. Si les ports de Valence et Gioia Tauro établissent des liens maritimes avec ce dernier, il convient de déduire que sa contiguïté géographique avec les clients l'emporte sur le fait que les ports sud-européens soient plus proches du port de New York.

Parallèlement, l'avantage que procure l'usage de grands navires est beaucoup plus évident pour ce qui est des connexions interportuaires où les ports de New York et d'Halifax sont les ports de réception. En effet, ces derniers desservent de grands navires avec un taux d'occupation de moins de 50%.

En résumé, le principe sous-jacent des stratégies de transport et d'assignation de navires repose sur la distribution des coûts de transport au niveau du réseau global. Ainsi, il est question de

profiter de la distance interportuaire sachant que les coûts de transport routier sont très élevés. C'est ce qui explique le choix du port de Montréal pour recevoir 85,42% des flux entrants de conteneurs (Cf. Tableau 4) et celui de Felixstowe pour l'expédition d'environ 46% des marchandises (Cf. Tableau 5).

Tableau 4 - Répartition du trafic maritime à travers les ports de réception.

Port de réception	Volume total de trafic manutentionné (EVP)	Part des flux entrants (%)
Montreal	51250	85,42%
Halifax	2000	3,33%
New York	6750	11,25%
Total	60000	100%

Tableau 5 - Répartition du trafic maritime à travers les ports d'expédition

Port d'expédition	Type de navire (v)	Volume total de trafic expédié (EVP)	Part des flux sortants (%)
Antwerp	5000	4500	7,50%
Felixstowe	5000	27661	46,10%
Valencia	5000	4500	7,50%
Le Havre	5000, 10000, 14000	9839	16,40%
Rotterdam	5000	4500	7,50%
Gioia Tauro	5000	4500	7,50%
Hamburg	5000	4500	7,50%
Total	-	60000	100%

5.2.2 Analyse de variabilité de la demande des clients

Concernant l'application de la méthode de Monte-Carlo, la Figure 5 résume les données recueillies sur les demandes totales ainsi que les coûts totaux au niveau de l'échantillon de taille $N = 10,000$ observations. La demande totale varie entre 47 250 EVP et 72 510 EVP. D'un autre côté, les coûts totaux sont compris entre 79 559 869 \$ et 131 432 449 \$. À cet égard, il convient de noter la forte variabilité des coûts totaux suivant les fluctuations aléatoires des demandes des clients, vu que son écart-type est 6 609 723 \$.

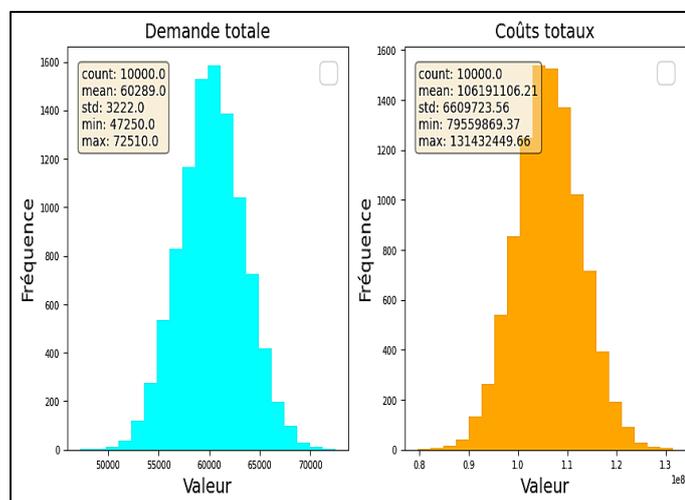


Figure 4 – Statistiques descriptives et histogrammes de la demande totale et des coûts totaux

Cette présentation des résultats prend en compte trois aspects. Le premier aspect à considérer est l'identification de connexions interportuaires uniques. Le deuxième et le dernier examinent respectivement les liens entre les ports en fonction du nombre de navires utilisés et de leurs taux d'occupation.

Dans le premier cas, la procédure consiste à éliminer les solutions qui reposent sur les mêmes stratégies. Tel qu'illustré dans le Tableau 6, l'échantillon filtré est composé de 2 scénarios (1 scénario découlant de la simulation de Monte-Carlo + le scénario de la solution initiale). Ainsi, les stratégies maritimes restent très stables dans les différents scénarios générés.

Pour ce qui est des différences entre les deux cas de figure, il y a d'abord le fait que le lien Felixstowe-New York n'existe pas dans le scénario de départ alors qu'il l'est dans le cas alternatif. En outre, le lien Le Havre-Montréal n'existe pas dans ce dernier alors qu'il l'est dans le scénario initial.

Tableau 6 - Connexions interportuaires (o, n, v) uniques

De	Vers	Type de navires (v)	Scénario initial	Scénario alternatif
Antwerp	Montreal	5000	✓	✓
Felixstowe	Montreal	5000	✓	✓
Felixstowe	New York	14000	✗	✓
Valencia	Montreal	5000	✓	✓
Le Havre	Montreal	5000	✓	✗
Le Havre	Halifax	10000	✓	✓
Le Havre	New York	14000	✓	✓
Rotterdam	Montreal	5000	✓	✓
Gioia Tauro	Montreal	5000	✓	✓
Hamburg	Montreal	5000	✓	✓

Ensuite, le Tableau 7 présente les données statistiques sur la répartition des navires dans toutes les stratégies maritimes (10 000 simulations effectuées en plus de la situation initiale). Comme il a été précédemment établi, le port de Montréal est le seul à recevoir plus d'un navire en provenance de Felixstowe. Néanmoins, ce nombre varie entre 4 et 9 en fonction des fluctuations de la demande avec une moyenne d'environ 7 navires. De plus, les constats faits sur les stratégies maritimes uniques sont en accord avec le fait que les modifications de plans d'affectation d'un seul navire ne concernent que les connexions entre Felixstowe et New York, ainsi que celles entre Le Havre et Montréal.

Tableau 7 – Connexions interportuaires (o, n, v) en fonction de l'affectation des navires.

o, n, v	Nombre d'observations	Moyenne	Écart type	Min	Valeur Médiane	Max
Antwerp-Montreal -5000	10001	1	0	1	1	1
Felixstowe-Montreal -5000	10001	6,70	0,74	4	7	9
Felixstowe-New York-14000	10001	0,01	0,10	0	0	1
Valencia-Montreal -5000	10001	1	0	1	1	1
Le Havre-Montreal -5000	10001	0,99	0,1	0	1	1
Le Havre-Halifax-10000	10001	1	0	1	1	1
Le Havre-New York-14000	10001	1	0	1	1	1
Rotterdam -Montreal -5000	10001	1	0	1	1	1
Gioia Tauro-Montreal -5000	10001	1	0	1	1	1
Hamburg-Montreal -5000	10001	1	0	1	1	1

Il est possible d'analyser la dynamique des taux d'occupation des navires en fonction des ports d'expédition. Ainsi, le Tableau 8 montre des variations pour les connexions entre Felixstowe et

Montréal/New York. Les résultats présentés démontrent également des variations des taux d'occupation du port du Havre vers l'ensemble des ports de réception. Sans surprise, le lien Felixstowe-Montréal est le seul à admettre des navires dont le taux d'occupation est de plus de 80%. Toutefois, le porte-conteneur en provenance de ce port d'expédition vers New York n'est qu'à 14% de sa capacité lorsque cette connexion est établie.

Tableau 8 – Dynamique de la variation du taux d'occupation des navires à travers les connexions interportuaires (o, n, v).

o, n, v	Nombre d'observations	Moyenne	Écart type	Min	Valeur Médiane	Max
Antwerp-Montreal -5000	10001	90	0	90	90	90
Felixstowe-Montreal -5000	10001	83,40	3,74	72,20	83,29	90
Felixstowe-New York-14000	10001	0,03	0,40	0	0	14,3
Valencia-Montreal -5000	10001	90	0	90	90	90
Le Havre-Montreal -5000	10001	21,47	8,97	0	21,5	62,5
Le Havre-Halifax-10000	10001	20,16	5,51	2,35	20,13	43,4
Le Havre-New York-14000	10001	48,37	7,08	16,91	48,32	73,7
Rotterdam -Montreal -5000	10001	90	0	90	90	90
Gioia Tauro-Montreal -5000	10001	90	0	90	90	90
Hamburg-Montreal -5000	10001	90	0	90	90	90

Dans les autres cas (c'est-à-dire lorsque Le Havre est utilisé comme port d'expédition), le taux d'occupation moyen reste en dessous des 50%. Cependant, il y a des scénarios où les navires à destination de Montréal sont remplis à plus de 60%. De plus, dans certains cas, le seul navire à destination de New York peut également être rempli à plus de 70%. Pour relativiser ces observations, il convient de noter que la capacité utilisée pour les chargements de conteneurs importés aux États-Unis en 2018 était seulement de 65%, ce qui a soulevé des questions sur la nécessité d'augmenter le taux d'occupation des porte-conteneurs et d'améliorer la rentabilité des opérations de transport maritime [O'Byrne, 2021]. Par conséquent, il est pertinent de mettre en question le fait d'affecter un navire rempli à un peu plus de 20% à destination des clients situés près du port d'Halifax, plutôt que de faire de Montréal le port de réception pour ces clients et de recourir aux services de camionnage pour la livraison.

Nous nous référons aux résultats du scénario initial (Cf. Figure 3) où le porte-conteneur liant Le Havre à Halifax est à 20% de sa capacité totale de 10 000 EVP. Parallèlement, le porte-conteneur (de type 5 000 EVP) desservant le lien Le Havre-Montréal est rempli à 21,78%. Il est donc plausible de suggérer deux scénarios alternatifs :

- Un cas où le port d'Halifax est totalement exclu dans les décisions d'établir des liens interportuaires. Ceci implique que le taux d'utilisation du porte-conteneur pour la connexion Le Havre-Montréal atteint 61,78% pour desservir les clients dans le voisinage immédiat du port d'Halifax.
- Un cas où le tonnage de port en lourd du porte-conteneur à destination d'Halifax à partir du Havre est de 3 500 EVP. En d'autres termes, pour une cargaison totale de 2 000 EVP vers le port de réception en question, le taux d'utilisation devient 57,14%.

Le tableau 9 présente les résultats de l'analyse comparative de coûts entre le scénario initial et celui excluant le port d'Halifax pour augmenter la capacité du porte-conteneur desservant la liaison Le Havre-Montréal. Il s'agit sans nul doute d'une stratégie permettant de réduire les coûts fixes, mais au détriment des coûts de camionnage et, dans une moindre proportion, des coûts variables en mer.

Tableau 9 – Comparaison des coûts entre le scénario initial et le scénario alternatif (excluant le port d'Halifax)

Type de Coûts	Scénario initial	Scénario alternatif	Taux de variation (Valeur finale - Valeur initiale) / Valeur initiale
Coûts Variables en Mer	\$ 8,846,403,27	\$ 8,891,058,04	▲ 0,502%
Coûts Fixes en Mer	\$ 1,102,588,90	\$ 1,022,800,60	▼ -7,80%
Coûts de Camionnage	\$ 95,795,775,25	\$ 103,248,481,86	▲ 7,22%
Total	\$ 105,744,767,42	\$ 113,162,340,49	▲ 6,55%

Le tableau 10 affiche les résultats de l'analyse comparative de coûts entre le scénario initial et celui qui privilégie l'usage d'un porte-conteneur de 3 500 EVP pour la liaison Le Havre-Halifax. Cette stratégie a pour avantage de garder inchangés les coûts de camionnage. Ainsi, il s'agit de comparer l'avantage que procure une réduction d'environ 2,3% des coûts fixes en mer contre une augmentation de 0,63% des coûts variables. Comme nous l'avons précédemment constaté, ces derniers ont un impact plus important dans les décisions de transport, relativement aux coûts fixes. Ceci explique l'augmentation de 0,028% des coûts totaux.

Tableau 10 - Comparaison des coûts entre le scénario initial et le scénario alternatif (privilégiant l'expédition d'un porte-conteneur de 3,500 EVP pour relier Le Havre au port d'Halifax)

Type de Coûts	Scénario initial	Scénario alternatif	Taux de variation (Valeur finale - Valeur initiale) / Valeur initiale
Coûts Variables en Mer	\$ 8,846,403,27	\$ 8,901,915,18	▲ 0,628%
Coûts Fixes en Mer	\$ 1,102,588,90	\$ 1,077,179,55	▼ -2,305%
Coûts de Camionnage	\$ 95,795,775,25	\$ 95,795,775,25	▬ 0%
Total	\$ 105,744,767,42	\$ 105,774,869,98	▲ 0,028%

En dernier lieu, il est important de noter que parmi les 168 combinaisons possibles d'arcs o, n, v, seules 10 d'entre elles se sont avérées optimales dans le cadre de la simulation de Monte-Carlo (9 pour chaque scénario unique ou 5,35% de toutes les stratégies possibles). Nous insistons sur le fait que ces résultats peuvent varier en fonction de différents facteurs tels que les données recueillies (dont le(s) secteur(s) d'activités considéré(s)), la taille de l'échantillon des scénarios et la calibration du générateur de séquence de demandes aléatoires. Néanmoins, ils révèlent la nature compétitive des relations interportuaires et permettent de mieux comprendre l'adoption du réseau en étoile (*hub and spokes*) comme stratégie de choix dans les réseaux d'approvisionnement global puisque ce type de réseau tend à favoriser un nombre limité de routes maritimes.

6 CONCLUSION

Cet article a eu pour but d'appliquer les outils de modélisation et de simulation et de mettre en lumière le raisonnement derrière les stratégies de transport, d'affectation de navires et leurs taux d'occupation dans le couloir Atlantique reliant l'Europe occidentale à l'est du Canada. Les résultats indiquent que le port de Montréal est un hub de réception important, compte tenu de sa position relative au corridor économique Ontario-Québec où se trouve la majorité des clients. Cette situation explique aussi

la dynamique des connexions interportuaires où le port de Felixstowe joue un rôle central comme port d'expédition.

Les résultats de la simulation de Monte-Carlo pour contrôler l'incertitude liée à la demande des clients sont en cohérence avec le scénario initial. Il y a une persistance des stratégies optimales à travers les fluctuations de la demande, mais elles peuvent être différentes si d'autres paramètres sont pris en compte. En ce sens, il convient de souligner les limites de cette étude. Il y a d'abord le fait qu'elle ne tienne pas compte des possibles déséconomies d'échelle liées au temps de manutention et des risques de congestion dans les ports de réception. En outre, il y a lieu de mettre en question le côté pratique d'utiliser de grands porte-conteneurs avec de très faibles taux d'utilisation, notamment pour desservir les clients qui se trouvent dans le voisinage du port d'Halifax. Il y a certainement un raisonnement mathématique pour justifier ces choix, mais les résultats obtenus démontrent l'importance de considérer le transport ferroviaire. En effet, le port d'Halifax bénéficie d'une proximité relative aux grands ports européens. Ainsi, l'analyse de ce réseau dans un contexte de multimodalité (voies maritime/terrestre/ferroviaire) aurait mieux exploité cet avantage en plus des économies d'échelle que procure l'utilisation du train. In fine, il y a lieu d'incorporer les contraintes de capacité des ports d'expédition et considérer les opérations de retour de navires dans les travaux ultérieurs.

7 REMERCIEMENTS

Cette recherche a été rendue possible grâce au support financier du Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada [2018-03712, 2020-00401]. Ce support est grandement apprécié.

8 REFERENCES

- Adland, R., Jia, H., & Strandenes, S. P. (2018). The determinants of Vessel Capacity Utilization: The case of Brazilian iron ore exports. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 110, 191–201.
- Agarwal, R., & Ergun, Ö. (2008). Ship scheduling and network design for cargo routing in Liner Shipping. *Transportation Science*, 42(2), 175–196.
- Christiansen, M., Fagerholt, K., Ronen, D. (2004). Ship routing and scheduling: Status and Perspectives. *Transportation Science*, 38(1), 1–18.
- Christiansen, M., Hellsten, E., Pisinger, D., Sacramento, D., & Vilhelmsen, C. (2020). Liner Shipping Network Design. *Network Design with Applications to Transportation and Logistics*, 469–505.
- Fagerholt, K., Christiansen, M., Magnus Hvattum, L., Johnsen, T. A. V., & Vabø, T. J. (2010). A decision support methodology for Strategic Planning in Maritime Transportation. *Omega*, 38(6), 465–474.
- Ford, P., Rodrigue, J-P. (2018). Analysis: Eastern Canada Ports Battle for mega-ship calls. *The Journal of Commerce Online*.
- Frazila, R.B., & Zuckhruf, F. (2017). A Stochastic Discrete Optimization Model for Multimodal Freight Transportation Network Design. *International Journal of Operations Research* Vol. 14, No. 3, 107–120.
- Gilman, S. (1975). The choice of ship size on deep-sea general cargo routes. *Maritime Studies and Management*, 3(2), 95–102.
- Graham, C., & Talay, D. (2015). *Stochastic simulation and Monte Carlo Methods Mathematical Foundations of Stochastic Simulation*. Springer Berlin Heidelberg.
- Institute of Business Forecasting and Planning. (s.d.). Coefficient of variation (COV). IBF. Retrieved January 29, 2023, from <https://ibf.org/knowledge/glossary/cov-52#:~:text=It%20is%20commonly%20used%20as,be%20aplied%20without%20further%20review.>
- Jansson, J. O., & Shneerson, D. (1987). *Liner Shipping Economics*. Chapman and Hall.
- Kim, H.-J., Son, D.-H., Yang, W., & Kim, J.-G. (2019). Liner ship routing with speed and fleet size optimization. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(3), 1341–1350.
- Levesque, E. (2010). Ontario-Québec Continental Gateway and Trade Corridor. *Ministère des Transports du Québec*, 12 p.
- Liang, W.-Y., & Huang, C.-C. (2006). Agent-based demand forecast in multi-echelon supply chain. *Decision Support Systems*, 42(1), 390–407.
- Meng, Q., Wang, T., & Gelareh, S. (2011). A linearized approach for liner ship fleet planning with demand uncertainty. *Advances in Maritime Logistics and Supply Chain Systems*, 229–256.
- O'Byrne, R. (2021). Shipping container utilisation: The challenge and why it matters. *Supply Chain Secrets*. Retrieved April 14, 2023, from <https://www.supplychainsecrets.com/the-challenge-of-freight-container-utilisation-and-why-it-matters/>
- Pasha, J., Dulebenets, M. A., Kavooosi, M., Abioye, O. F., Theophilus, O., Wang, H., Kampmann, R., & Guo, W. (2020). Holistic tactical-level planning in liner shipping: An exact optimization approach. *Journal of Shipping and Trade*, 5(1).
- Placek, M. (2022). Global number of containers ships 2022. *Statista*. Retrieved January 26, 2023, from <https://www.statista.com/statistics/198227/forecast-for-global-number-of-containerships-from-2011/>.
- Railway Association of Canada. (sd). *Rail Trends 2019*. Railway Association of Canada, 42 p.
- Reinhardt, L. B., & Pisinger, D. (2011). A branch and cut algorithm for the container shipping network design problem. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 24(3), 349–374.
- Statistics Canada. (2021). *Canadian Freight Analysis Framework (CFAF)*. Government of Canada.
- Unnikrishnan, A., & Waller, S. T. (2009). Freight transportation network design problem for maximizing throughput under uncertainty. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2090(1), 105–114.
- Veldman, S. (2011). On the ongoing increase of containership size. *Advances in Maritime Logistics and Supply Chain Systems*, 201–228.
- Wang, T., Meng, Q., & Wang, S. (2012). Robust optimization model for liner ship fleet planning with container transshipment and uncertain demand. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2273(1), 18–28.