

État de l'art sur la consolidation de marchandise

ZINEB ABOUTALIB^{1,2}, BRUNO AGARD^{1,2}

¹ Laboratoire en Intelligence des Données
Département de mathématiques et génie industriel,
École Polytechnique de Montréal, CP 6079, succursale Centre-Ville, Montréal, Québec, Canada
zineb.aboutalib@polymtl.ca, bruno.agard@polymtl.ca

² Centre Interuniversitaire de Recherche sur les Réseaux d'Entreprise, la Logistique et le Transport (CIRRELT)

Résumé – La consolidation de marchandise consiste à grouper différents produits en un seul lot de marchandises, afin de maximiser l'espace de chargement dans un même véhicule, réduire le nombre de voyages, le kilométrage et les coûts logistiques. Il existe actuellement différentes stratégies de consolidation de marchandise qui visent notamment à rallier deux coûts interdépendants, mais antipodes : les coûts d'inventaire et les coûts de transports.

La diversité des stratégies et méthodes appliquées pour comprendre la complexité de la consolidation de marchandise et des variables qui la régissent, montre une forme d'interdépendance entre la fluctuation de la demande et son impact sur les gains au niveau de la logistique de distribution. Ceci influence la prise de décision et la qualité de la performance des systèmes logistiques d'une entreprise. Nous présentons ici une revue de littérature, qui décrit la consolidation de marchandise, les différentes méthodes et stratégies proposées, l'impact de la demande sur la consolidation, sans oublier la relation entre la consolidation, le dernier kilomètre et l'Internet Physique.

Abstract – Freight consolidation consists of grouping different products into a single batch of goods, in order to maximize the loading space in the same vehicle, reduce the number of trips, mileage and logistics costs. There are currently various freight consolidation strategies that aim to address a fairly common supply chain issue of how to build an optimal order consolidation policy that combines two interdependent but antipodal costs. "inventory and transportation costs".

The diversity of the different strategies and methods applied to understand the complexity of freight consolidation and the variables that govern it, shows a form of interdependence between the fluctuation of demand and its impact on gains in distribution logistics. This influences decision-making and the quality of performance of a company's logistics systems. We present here a literature review, which describes freight consolidation, different methods and strategies proposed, the impact of demand on consolidation, not to mention the relationship between consolidation, the last mile and the physical Internet.

Mots clés : Consolidation de marchandise, transport de marchandises, Internet physique, dernier-kilomètre

Key words: Freight consolidation, freight transport, physical internet, last-mile.

1 INTRODUCTION

Dans un contexte de consommation de masse, à la suite de la révolution du commerce électronique et au passage à l'ère du big data et de l'information en temps réel, la turbulence et la volatilité des marchés sont devenues une norme alors que les forces économiques et concurrentielles mondiales créent une incertitude supplémentaire.

Pour la satisfaction d'un consommateur versatile et exigeant et en tenant compte du risque lié aux canaux logistiques lents, les organisations sont obligées de revoir la façon dont leurs chaînes d'approvisionnement sont structurées et gérées. [Christopher, 2000] suggère que la clé de la survie dans ces conditions changeantes passe par « l'agilité », notamment par la création de chaînes d'approvisionnement réactives (raccourcir les cycles de

planification, réduire les délais de fabrication et accélérer la distribution).

Avec un horizon de planification plus court et un objectif global de réduction des stocks dans la chaîne de valeur, le transport est devenu un élément essentiel du processus de distribution.

Dans l'optique de minimiser simultanément les coûts d'inventaire et de transport, et de remplir les engagements de service, les prestataires logistiques sont dans l'urgence d'ajuster et d'adapter leurs politiques en considérant la consolidation de marchandise.

La consolidation de marchandise est une stratégie qui consiste à grouper et à combiner différents articles, produits utilisés sur différents lieux et à différents moments, en un seul chargement ou tournée [Hall, 1987].

Dans le présent article, nous proposons un état de l'art sur la consolidation de marchandise.

La structure de l'article se décompose de la manière suivante : la section 2.1) présente différentes définitions et les objectifs de la consolidation, la section 2.2) propose les stratégies de consolidation et les différentes classifications associées, la section 2.3) présente un exemple synthétique de l'apport de la consolidation de marchandise, 2.4) se concentre sur les modèles de résolutions des différentes stratégies, la section 2.5) fait part de la consolidation de marchandise et la remise, la section 2.6) nous montre l'interdépendance de la consolidation et de la demande, la section 2.7) montre un aperçu de l'influence du dernier kilomètre sur le transport et son rapport avec la consolidation et l'Internet Physique. Pour clore, la section 3) présente une synthèse de l'état de l'art et souligne les différents points à traiter dans les prochaines recherches sur la consolidation de marchandise.

2 ÉTAT DE L'ART

Selon [Tyan et al, 2003], la consolidation de marchandise est une notion assez ancienne "The consolidation concept has been known for hundreds of years and the practices are widely used in rail, ground, sea, and air transport", mais toujours d'actualité. De ce fait, au cours des années sont apparues différentes définitions de la consolidation de marchandise notamment en relation avec une variabilité des objectifs recherchés.

2.1 Définitions et objectifs de la consolidation de marchandise.

Dans la littérature, il existe différentes définitions de la consolidation de marchandise, ces définitions sont classées en trois grandes familles (consolidation spatiale, consolidation temporelle et consolidation de produit) selon les stratégies employées par les entreprises.

[Tyan et al, 2003] et [Çetinkaya et Lee, 2002] définissent la consolidation de marchandise comme étant la combinaison de nombreuses petites expéditions de sorte qu'une charge plus importante et plus économique peut être regroupée sur le même véhicule.

La consolidation peut se faire au niveau amont et aval de la chaîne logistique.

Les objectifs de la consolidation recensés dans la littérature, incluent les suivants :

- Prendre avantage de la réduction des charges liées au transport, communes aux industries ferroviaires, aux transporteurs routiers et aux compagnies aériennes par le biais d'une plus grande taille de chargement [Hall, 1987].
- Réduire de façon générale les coûts de transport [Jackson, 1981] mais aussi réduire ceux causés par la distribution de petites expéditions, dans un environnement juste à temps [Gupta et Bagchi, 1987].
- Améliorer la performance d'un système logistique, pour réduire les coûts et / ou améliorer le service [Pooley et al, 1992].
- Gérer les coûts de distributions de façon efficiente et efficace [Hall, 1987], [Sheffi, 1986], [Pooley et al., 1992], [Bookbinder et Hingginson, 2002], [Hanbazazah et al., 2019].

En groupant et en combinant des produits sur différents lieux et à différents moments en un seul chargement ou tournée, la consolidation de marchandise permet d'augmenter les gains et de réduire des pertes liées aux transports et à l'inventaire.

Pour clore, on retient que les stratégies de consolidations visent à trouver un compromis entre les bénéfices et pénalités de la consolidation [Hall, 1987].

La littérature fournit différentes taxonomies de la consolidation de marchandise dépendamment sur quoi elle est appliquée, de même que des classifications complémentaires.

2.2 Classification de la consolidation et des différentes stratégies.

Cette section décrit les principales stratégies de consolidation puis leurs classifications.

2.2.1 Stratégies de consolidation

Il existe plusieurs stratégies de consolidation. [Cooper, 1984], [Min et Cooper, 1990], [Min, 1996], [Bookbinder et Hingginson, 2002] et [Zhou et al, 2011] ont tous repris la classification de [Brennan, 1981] définie comme suit :

a) Consolidation temporelle.

La consolidation temporelle est l'agrégation de petites commandes à travers le temps pour équilibrer un bon service client et des coûts d'inventaire élevé contre un coût de livraison bas.

La consolidation des expéditions peut être implémentée sans avoir recours à une coordination. C'est ce qu'on appelle une politique de consolidation pure connue comme étant de la consolidation temporelle.

Selon [Hingginson et Bookbinder, 1994], il y a deux types de politiques de consolidation temporelle :

- **Une politique basée sur le temps**, qui consiste à expédier un chargement consolidé à chaque période T. Elle permet de libérer toutes les commandes en suspens.
- **Une politique basée sur la quantité**, qui consiste à expédier un chargement consolidé lorsqu'une quantité économique d'expédition est disponible.

Un autre type de consolidation temporelle est mis en lumière par [Hingginson et Bookbinder, 1994], il s'agit de **la consolidation hybride**, qui consiste à allier les deux politiques vues ci-dessus.

[Çetinkaya, 2005] explique les cas d'utilisation des différentes politiques comme suit :

- La politique basée sur le temps est appliquée pour des articles de classe A [volume inférieur/valeur plus élevée].
- La politique basée sur la quantité est employée pour des articles de classe B et classe C [volume supérieur/valeur inférieure].
- La politique hybride apparaît implicitement dans la gestion des opérations au jour le jour et dans le dépannage associé aux commandes accélérées. Il explique que cette politique se retrouve le plus souvent dans les contrats dans le but d'atteindre une livraison rapide et un chargement optimisé.
- La consolidation intégrée: coordination de l'inventaire avec le transport.

Dans le cas où les décisions liées à l'inventaire sont coordonnées ou intégrées avec la consolidation des expéditions, on passe à une autre approche qui vise à équilibrer le compromis entre la livraison opportune et l'économie sur la taille d'expédition du coût de possession de l'inventaire.

[Çetinkaya, 2005], présente trois exemples de coordination de la consolidation des expéditions avec l'inventaire : le **VMI [Vendor Management Inventory]** qui est un exemple d'intégration de l'inventaire et des décisions de transport, car il permet de synchroniser l'inventaire avec la consolidation des expéditions, le **3 PW/D [ThirdParty Warehousing/ Distribution]** et le **TDD [Time Definite Delivery]** qui sont des contrats basés sur un arrangement qui visent à optimiser aussi bien les chargements que le temps de livraison. Ces exemples permettent de concevoir un système de distribution efficace.

De manière générale, la consolidation temporelle permet l'identification des facteurs managériaux et externes (la taille moyenne des commandes, la moyenne des expéditions poids/volume, le volume annuel des commandes, le nombre moyen des points de consolidations, la durée du temps d'attente de la commande ainsi que la fréquence de livraison.) qui peuvent affecter les coûts de transport, l'inventaire et le niveau du service client.

b) Consolidation spatiale

La consolidation spatiale consiste à déterminer le point de départ et le point d'arrivée, l'itinéraire et le regroupement des petites commandes à expédier en un seul grand envoi [Min, 1996].

Les études sur la consolidation spatiale se sont focalisées sur la détermination des coûts minimums liés par la combinaison des petites expéditions dans un terminal de consolidation. Ce qui peut être assimilé au problème du chemin le plus court qui permet de trouver l'arrêt qui coûte le moins, et ce d'un point A à un point B. À l'opposé de [Min, 1987], qui considère que la consolidation spatiale est similaire un problème de tournée de véhicules à entrepôt multiples, [Pooley et Stenger, 1992] estiment que ce qui différencie un problème de consolidation d'un problème de tournée de véhicules est que le responsable logistique ne combine pas uniquement chaque expédition, mais combine aussi le fait d'utiliser un aller simple. Une combinaison sélective des expéditions permet de réduire les coûts et d'améliorer le service. Cependant, [Min, 1987] rejoint [Pooley et Stenger, 1992] en expliquant que le problème de consolidation spatiale inclut la tournée de véhicules par le biais de la consolidation de point plutôt qu'une tournée directe des dépôts aux clients.

Selon [Min, 1987], la consolidation des transports est incluse dans la consolidation spatiale, la consolidation de transport de manière générale et la consolidation des expéditions de façons particulières sont considérées comme un moyen important d'améliorer la performance logistique d'un système.

La consolidation des transports, selon [Pooley et Stenger, 1992]) et en se basant sur la classification de [Sheffi, 1987] peut être illustrée sous différentes formes :

- **Indépendante** : l'expéditeur soumet de petits envois aux transporteurs de chargements partiels qui évaluent chaque expédition de façon indépendante à chaque destination, bien que ces transporteurs effectuent manifestement leurs propres regroupements pour offrir le service de manière économique.
- **Par consolidation de réseau** : l'expéditeur prend les dispositions nécessaires pour expédier un groupe de petites expéditions dans un seul véhicule jusqu'à un point de chargement, où ce transporteur ou un autre assure

l'acheminement des envois individuels à leur destination. Dans ce cas, la facturation à une destination particulière correspondra plus étroitement à la situation indépendante du transporteur LTL.

- **Par tournées de véhicules** : l'expéditeur a accès à une flotte de véhicules (privés ou dédiés à lui par un transporteur). Grâce à une certaine procédure, l'expéditeur sélectionne les itinéraires de livraison de sorte qu'il utilise un nombre minimum de véhicules, parcourant le moins de kilomètres possible, pour effectuer toutes les livraisons et retourner à la base d'attache. Encore une fois, les coûts dépendront des routages.
- **Par consolidation des expéditions** : l'expéditeur regroupe plusieurs petits envois attribués à des destinations différentes, mais groupés, en une charge complète et les soumet à un transporteur de TL qui s'arrête à chaque destination en cours de route dans un seul camion jusqu'à ce que toutes les livraisons aient été effectuées. Ensuite, le camion est libre pour la circulation des autres expéditeurs. Le transporteur TL charge un montant fixe par mile pour le voyage, et un montant fixe pour chaque arrêt. Cela fait que les coûts d'approvisionnement d'une destination dépendent du nombre et de l'emplacement des autres arrêts.

La consolidation spatiale prend en compte plusieurs paramètres et son application permet de réaliser potentiellement d'important gain.

c) Consolidation de produits

[Min, 1987, p.24] définit la consolidation de produit comme la combinaison de différents types de produits en un seul envoi, pour augmenter la quantité livrée à chaque client par livraison.

La consolidation de produits considère aussi la possibilité que deux ou plusieurs centres de distribution puissent partager le même canal de distribution et que chaque client demande différents produits à petites quantités.

[Ulku, 2009] informe qu'une entreprise peut réaliser d'importants gains, si elle consolide différents articles dans une seule boîte à emballage.

La consolidation de produits est pauvre en article, les études qui se sont intéressées à la consolidation ont traité la jointure entre la consolidation spatiale et la consolidation de produits.

2.2.2 Classification de la consolidation de marchandise.

La consolidation de marchandise peut prendre plusieurs formes. [Brennan, 1981], propose la classification suivante : la consolidation temporelle, la consolidation spatiale et la consolidation de produit.

[Cooper, 1984] présente une classification en trois niveaux, semblable à celle de [Brennan, 1981] :

- Par unité de temps, ce qui est équivalent à la consolidation temporelle.
- Par client, ce qui est équivalent à la consolidation spatiale.
- Par produits.

En se basant sur cette classification, [Cooper, 1984] compare la consolidation aux coûts de distribution et aux délais de livraison pour des caractéristiques de certains produits et les modèles de demande sélectionnés.

[Sheffi, 1986] propose diverses taxinomies de consolidation des transports que les responsables logistiques utilisent pour transporter la marchandise.

D'après [Pooley et Stenger, 1992] l'utilisation la classification de [Sheffi,1986] permet d'appliquer une consolidation de marchandise en la définissant comme suit : *“shimpemt consolidation is the strategy of discriminantly combining shipments across vehicles, units time, and tours“*. Il définit sa classification comme suit :

- La consolidation par unité de véhicule consiste à avoir recours à des entités discrètes pour déplacer un groupe d'articles.
- La consolidation par conteneur se fait en deux étapes : la collecte des articles dans un conteneur et l'assemblage ultérieur de conteneurs dans une unité mobile.
- La consolidation des canaux est considérée comme l'enchaînement des mouvements de véhicules qui s'effectue en canaux (tels que des voies, des voies de distribution, des couloirs de service, des voies de navigation, etc.).
- La consolidation par mise en réseau est réalisée quand l'expéditeur s'organise pour expédier un groupe d'envois dans un même véhicule à un point de rupture. Là le transporteur s'organise à consolider le flux le long des canaux d'un réseau pour acheminer les envois vers leur destination (les expéditeurs utilisent des centres de distribution et des pools pour effectuer une fonction de consolidation du réseau.).
- La consolidation par unité de temps est quand, au lieu d'expédier les envois séparément à des intervalles de temps distincts, ils sont regroupés de telle sorte à programmer l'expédition à un intervalle de temps donnés afin de transporter des volumes plus importants.
- La consolidation de tournée s'effectue à bord des véhicules en tournée. Cela est évident dans les opérations de ramassage ou

de livraison dans lesquelles un seul véhicule est utilisé pour plusieurs tâches de collecte ou de dépôt.

La classification de [Hall, 1987] est un sous-ensemble de celle de [Brennan, 1981].

Selon [Hall, 1987], la classification des différentes consolidations est définie comme suit :

- La consolidation de l'inventaire implique le stockage des articles qui sont produits à différentes périodes jusqu'à atteindre une taille minimale de chargement pour les expédier vers un point donné à une date prédéterminées, et ce dans un même chargement. C'est une forme temporelle de consolidation.
- La consolidation de véhicules implique le ramassage et le dépôt d'objets de différentes origines et destinations. C'est une forme de consolidations spatiale.
- La consolidation des terminaux permet de regrouper des articles d'origines différentes à un seul endroit, de les trier, de les charger dans de nouveaux véhicules et de les transporter vers différentes destinations. C'est une forme de consolidation de produit.

Le tableau 1 résume l'évolution de cette classification comme expliquée ci-dessus. On retiendra que [Brennan,1981], [Cooper,1984] et [Hall,1987] proposent des classifications de la consolidation moins nombreuses que celles de [Sheffi,1986]. [Cooper et Min,1990] soulignent la redondance dans la répartition de [Sheffi,1986]. Cette redondance [Sheffi,1986] l'explique par la ressemblance entre la consolidation par unité de véhicule et la consolidation par conteneurs.

Tableau 1 Récapitulatif sur la répartition des différentes stratégies de consolidation de marchandise.

[Brennan, 1981]	[Cooper, 1984]	[Sheffi, 1986]	[Hall, 1987]
Consolidation spatiale	Consolidation par client	Consolidation par unité de véhicule	Consolidation de l'Inventaire
Consolidation par produits [marchandise]	Consolidation par produits	Consolidation par conteneurs	Consolidation de Véhicules
Consolidation temporelle	Consolidation par unité de temps	Consolidation des canaux	Consolidation de Terminaux
		Consolidation par mise en réseau	
		Consolidation par unité de temps	
		Consolidation de tournée	

2.3 Exemple synthétique de l'apport de la consolidation

La figure 1 montre un exemple synthétique de l'apport des stratégies de consolidation spatiales et temporelles.

Dans notre exemple, il y a 4 zones géographiques (zone A, zone B, zone C et zone D). Chaque zone correspond à une région géographique qui sera livrée de manière indépendante.

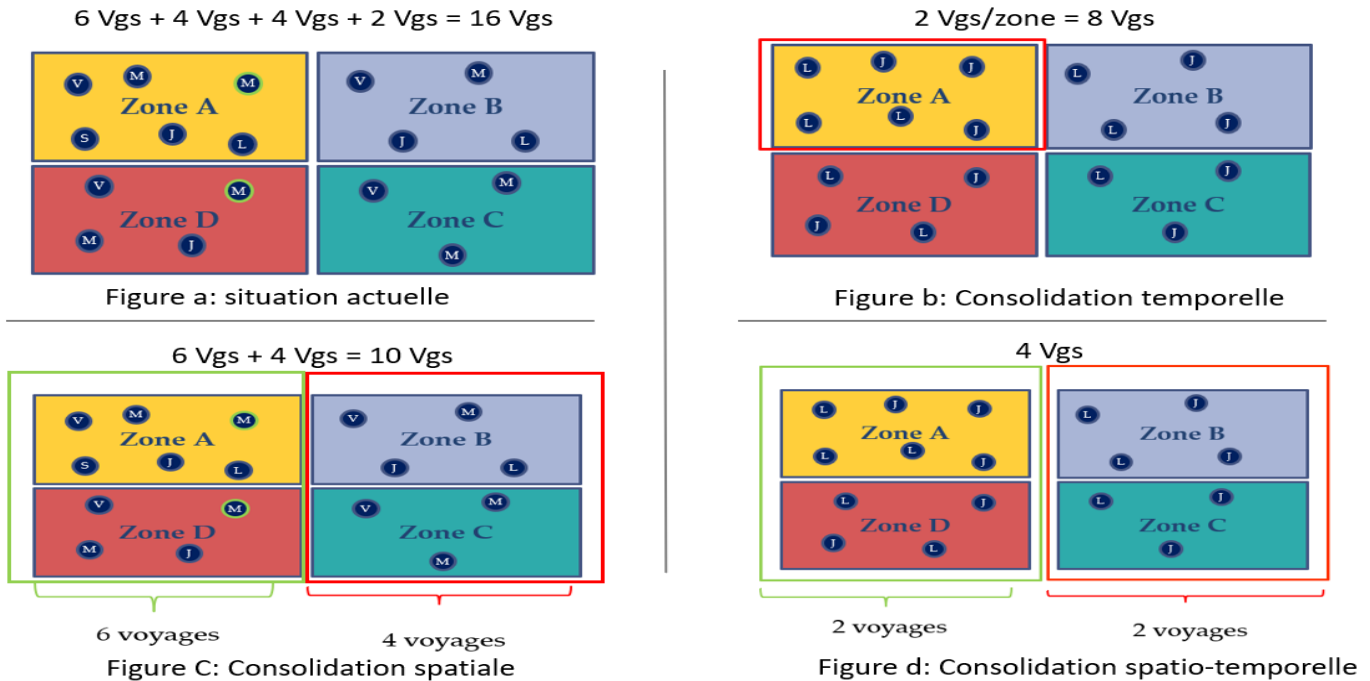


Figure 1 : Exemple synthétique de l'apport des consolidations spatiale et temporelles.

Dans la figure 1, Vgs identifie le nombre de voyages de livraison. Les jours de livraison sont identifiés par la première lettre du jours (L : pour lundi, M pour mardi, etc, mercredi est différencié du mercredi par un contour vert caractéristique)

- **La figure 1.a** traite d'un fonctionnement en temps normal (sans applications de consolidation).
La zone A est livrée du lundi au samedi (6 voyages)
La zone B est livrée le lundi, mardi, jeudi et vendredi (4 voyages).
La zone C est livrée le mardi et vendredi (2 voyages)
La zone D est livrée le mardi, mercredi, jeudi et vendredi (4 voyages)
Soit un total de 16 voyages pour livrer les commandes aux clients habitants les différentes régions.
- **La figure 1.b** représente l'application de la consolidation temporelle. Pour cela, on suppose que les livraisons n'ont lieu que les lundis-jeudis de chaque semaine :
Les commandes reçues Lundi-Mardi-Mercredi seront livrées les jeudis., et celles reçues Jeudi-Vendredi-Samedi-Dimanche seront livrées les lundis. Soit 2 voyages par zones géographiques pour un total de 8 voyages. L'idée de vouloir livrer chaque lundi-jeudi de la semaine peut permettre d'avoir

une taille de lots économique pour remplir les conteneurs ou véhicules.

- **La figure 1.c** décrit la consolidation spatiale. Pour cela, les zones BC et AD sont consolidées (consolidation de la zone B avec C et A avec D). On remarque une réduction de 10 voyages à 6 voyages pour la zone AD et de 6 à 4 voyages pour la zone BC soit un passage à 10 voyages au total par semaine voyages au lieu de 16 voyages par semaine.
- **La figure 1.d** représente l'application de la consolidation Spatio-temporelle. Pour cela, les deux consolidations expliquées ci-dessus sont appliquées simultanément, il s'en suit une livraison de 2 voyages par zones géographiques soit un total de 4 voyages par semaine.

Cet exemple montre l'apport de la consolidation en matière de réduction du nombre de voyages, donc de kilométrage et coût de transport, mais souligne aussi l'influence sur les taux de remplissage des conteneurs ou véhicules optimaux. Dans cet exemple, seules les consolidations temporelle et spatiale ont été exploitées.

La prise en compte de la consolidation de produits se fait au niveau de l'entrepôt, cette dernière permettra en plus de gérer efficacement l'espace de stockage, réduire l'emballage ainsi que le temps de chargement des véhicules. De plus cet exemple ne se

limite pas uniquement à un modèle d'activité business to business mais également business to Consumers.

2.4 Modèles de résolutions des différentes stratégies.

2.4.1 Modèles de résolutions des différentes politiques de consolidation temporelle.

Pour évaluer l'impact des facteurs sur les coûts et le service, cinq différents modèles peuvent être identifiés dans la littérature :

Le modèle conceptuel est utilisé pour identifier et gérer les coûts associés aux expéditions et à la réception des matières premières et des composants [Lambert et Sterling, 1984]. D'après [Min et Cooper, 1990], ce modèle ne peut examiner les différentes stratégies de consolidation.

Le modèle dynamique, comme celui présenté par [Brennan, 1981] considère des périodes multiples de consolidation où la taille et le temps d'arrivée de chaque commande sont connus. Ce modèle est conçu pour analyser les échanges entre les coûts d'expédition et un bon service client.

Selon [Min, 1987] l'inventaire théorique est un modèle conçu pour déterminer la valeur économique de la consolidation des expéditions en analysant son impact sur les coûts de stockage et les coûts de commande Min (1987, p.75). Ce modèle considère uniquement le potentiel de réduction des coûts en traitant le temps de transport comme un paramètre plutôt qu'une variable [Min et Cooper, 1990].

Selon [Stidham, 1974], le modèle de compensation stochastique (stochastic clearing model) est caractérisé par un processus d'entrée stochastique non décroissant, où $Y(t)$ est la quantité cumulée entrant dans le système en $[0, t]$. ce modèle peut être appliqué pour résoudre les problèmes de consolidation dans un environnement juste à temps. Par exemple, [Gupta et Bagchi, 1987] ont construit un modèle de compensation pour calculer la quantité économique minimale au centre de consolidation. [Bookbinder et Higginson, 2002] ont utilisé la théorie de compensation stochastique de [Stidham, 1974, 1977] pour obtenir une politique basée sur le temps et la quantité. Les modèles de simulation ont la capacité d'expérimenter différentes stratégies de consolidation dans une variété de situations réaliste, par exemple, [Pooley et Stenger, 1992] ont utilisé une approche de simulation pour évaluer la performance logistique d'un programme de consolidation d'expédition. [Higginson et Bookbinder, 1994] ont utilisé le modèle de simulation pour comparer trois politiques de consolidation.

La simulation est souvent adoptée pour la consolidation temporelle.

2.4.2 Modèles de résolutions des différents problèmes consolidation.

Les modèles utilisés, pour répondre aux stratégies, cités ci-dessus suivent une classification selon deux modèles : (1) le modèle conceptuel qui se base sur un flux logique pour la prise de décision en ce qui concerne la consolidation et (2) le modèle mathématique qui est une représentation quantitative de la situation étudiée dans le monde réel. le modèle mathématique peut-être soit déterministe (les paramètres d'entrée sont connus), soit stochastique (les paramètres d'entrée sont inconnus et variables sous des conditions probabilistes par exemple : l'aspect temporel de la livraison et du stockage d'article pour la consolidation). Ces deux modèles sont indépendamment classés en trois catégories : Heuristique, Stochastique et Optimisation, qui ne sont rien d'autre que des solutions techniques en vue de résoudre les modèles logistiques.

Dans l'étude comparative sur l'analyse des différentes études faites sur la consolidation et la gestion des retours, [Min et Cooper, 1990] ont élaboré un tableau classifiant les études selon la stratégie de consolidation et les différentes catégories des modèles choisis pour répondre aux problématiques.

Le tableau 2 est un récapitulatif du tableau de [Min et Cooper, 1990].

Tableau 2 : Les différents modèles de résolution en fonction du Type de consolidation et des états d'implémentation.

Problème	Méthodologie	Implémentation
Consolidation temporelle	Stochastique, heuristique	Non implémenté par l'entreprise., Échantillon de données/théorique.
	Stochastique, Simulation	Non implémenté par l'entreprise, Données réelles utilisées pour l'étude
	Déterministe, Optimisation	Non implémenté par l'entreprise, Échantillon de données
Consolidation spatiale-produit	Déterministe, Optimisation	Non implémenté par l'entreprise, Échantillon de données
		Implémenté par l'entreprise, Données réelles utilisées pour l'étude.
Consolidation spatiale	Déterministe, Heuristique	Non implémenté par l'entreprise, théorique.
		Implémenté par l'entreprise, Données réelles utilisées pour l'étude
	Déterministe, Optimisation	Implémenté par l'entreprise, Données réelles utilisées pour l'étude
	Modèle conceptuel	Implémenté par l'entreprise, Données réelles utilisées pour l'étude

La majorité des études se sont focalisées sur l'aspect spatial et temporel de la consolidation [Min et Cooper, 1990] ont donné l'explication suivante : *"The reason may be that consolidate shipments often delay the delivery process, while reducing unit shipping cost."*

Pour conclure, la consolidation temporelle prête à confusion du fait de la ressemblance de ses politiques (quantité et hybride) avec la consolidation spatiale et la consolidation de produits.

2.5 Consolidation de marchandise et la remise.

[Hall, 1987] rejoint [Min et Cooper, 1990], en proposant d'introduire l'EOQ (Economic Order Quantity) en combinant la consolidation temporelle et la consolidation spatiale, afin de trouver un équilibre et un juste milieu entre les bénéfices et les pénalités de la consolidation, pour pouvoir tirer profit de la réduction des coûts de transport et réduire les coûts liés à l'inventaire.

Dans son étude sur les remises possible à faire sur les modèles de prix selon différentes structures de commandes (coordination des commandes, consolidation de marchandise et la hiérarchie des commandes multi-tiers), [Gurnani, 2001] explique que l'EOQ est généralement utilisé par les acheteurs quand il n'y a pas de quantité à remiser, afin de minimiser ses coûts. Il a démontré que la consolidation permet généralement de réduire les coûts de l'acheteur ainsi que les coûts joints. Mais si les acheteurs coordonnent leurs commandes, il sera peut-être possible de réaliser des économies plus importantes sur les coûts communs si certaines conditions sont remplies. Pour ce qui est de la hiérarchie des commandes multi-tiers la consolidation de marchandise y présente plus de bénéfices pour les acheteurs et le fournisseur.

[Tyan et al, 2003] se sont intéressés à la consolidation de fret dans l'aérien pour un 3 PL. un prestataire 3PL, Troisième Partie Logistique, est un prestataire de la chaîne logistique qui a pour charge l'exécution d'une partie de la logistique de ses clients. C'est une forme de sous-traitance qui concerne en particulier la gestion d'entrepôt et du transport pour laquelle, ils ont développé un modèle de programmation mathématique afin de faciliter l'évaluation des politiques de consolidation. Pour cela, dans un contexte mondial, ils se sont intéressés à la minimisation du coût total qui s'écrit comme suit :

$$\text{Total cost} = \text{Operating cost} + \text{Capacity lost cost}$$

Où les coûts opératoires s'écrivent comme suit :

$$\begin{aligned} \text{Operating Cost} &= \text{Linehaul cost} \\ &+ \text{Consolidation operating cost} \\ &+ \text{Inventory holding cost} + \text{Penalty cost} \end{aligned}$$

Avec :

- *Linehaul cost* : le coût de transport représente le coût d'allocation interne de la compagnie pour la section du transport aérien puisque le 3 PL mondial exploite sa propre flotte d'avions. Le coût du transport de ligne est basé sur le kilométrage de vol accumulé.
- *Consolidation operating cost* : le coût de consolidation comprend le coût de la main-d'œuvre, les frais de dédouanement, l'amortissement du capital et les frais d'exploitation connexes.
- *Inventory holding cost* : le coût d'inventaire se produit lorsque les envois sont détenus dans des terminaux et il s'agit d'un coût unitaire fixe pour les trois premiers jours de cette étude.
- *Penalty cost* : le coût de la pénalité est le coût de la garantie de remboursement en cas de défaillance du service.

Capacity lost cost : le coût perdu de capacité (CLC) est le revenu attendu perdu pour n'importe quelle unité de chargement. Le facteur de charge est défini comme le pourcentage d'utilisation d'une telle unité.

La minimisation du coût total consiste à minimiser les coûts opératoires afin de satisfaire les contraintes capacitaires et les engagements de service.

Les résultats de calcul révèlent une économie de coûts substantielle et une amélioration du niveau de service d'environ 20 % à la suite de la mise en œuvre d'une politique de consolidation collaborative. Ce résultat peut être transposé dans différents contextes de consolidation et notamment dans l'industrie de distribution [Tyan et al., 2003].

Par souci d'économie d'échelle et de réduction des coûts, [Hanbazazah et al, 2019] se sont aussi intéressés au problème de consolidation de la marchandise en transit dans un réseau de transport à deux échelons, pour un 3 PL qui expédie les produits provenant de plusieurs fournisseurs à un seul client selon une fenêtre de temps donnée.

La méthode proposée se prête à la relaxation de la charge du conteneur, à la décomposition temporelle et à la génération de coupe valide. L'efficacité de l'algorithme proposé est démontrée par le biais d'un problème réel rencontré par un 3PL. Une étude est réalisée pour examiner la sensibilité de la méthode proposée à des facteurs clés tels que la structure de la demande, les fenêtres de délai de livraison, le nombre de passerelles et les seuils de coûts de consolidation.

2.6 Interdépendance de la consolidation et de la demande.

La livraison de la marchandise du vendeur à l'acheteur dépend de la prévision de la demande ce qui permet de dire que la consolidation de marchandise dépend de la distribution de la demande et de sa variation au cours du temps.

2.6.1 La corrélation entre la consolidation de marchandise et de la demande.

[Nguyen et al., 2014] ont étudié l'effet du changement de la distribution de la demande sur les bénéfices de la consolidation, dans un contexte de demande stochastique, pour des produits périssables (la demande de la distribution est dynamique et change donc entre les périodes). Ils ont résolu le problème d'optimisation en utilisant une approche de programmation stochastique dynamique. Ils observent que la consolidation de la demande dans le temps peut générer suffisamment de volume pour être économiquement rentable au tarif FTL (camion complet) le moins cher. Ils démontrent que les avantages de la consolidation varient en fonction de la taille de la demande. La consolidation donne les meilleurs résultats lorsque les niveaux de demande sont modérés. À des niveaux de demande très faibles, la consolidation ne profite pas des taux de chargement complets moins élevés. Au niveau de la très forte demande, il n'est pas nécessaire de consolider pour réaliser des économies d'échelle.

2.6.2 La demande dans un environnement de consolidation collaboratif (centralisée) vs non collaboratif (décentralisée).

a) Coordination entre 3 parties prenantes

Comme [Nguyen et al,2014], [Ke, et Bookbinder,2018] se sont intéressés à l'aspect sensible de la demande par rapport au prix.

Pour cela, ils ont développé une approche de programmation à trois niveaux pour coordonner les décisions des membres de la chaîne d'approvisionnement (le fournisseur, l'acheteur et le transporteur) sur les politiques de réduction. Des scénarios décentralisés et centralisés ont été examinés, et un algorithme heuristique est présenté pour aider les trois parties à établir leurs plans de réduction dans un environnement non collaboratif. Trois types de remises ont été étudiées : la remise au détail que l'acheteur offre aux clients finaux, la remise en gros offerte par le fournisseur à l'acheteur, et le rabais de transport offert par le transporteur au fournisseur.

La situation centralisée dite collaborative a également été étudiée. Dans ce cas, les trois parties prenantes évaluent et négocient une situation qui doit être bénéfique à tout le monde. Le bénéfice de tous les membres de la chaîne d'approvisionnement concernés, doit être optimisé, plutôt que chaque membre maximisant son propre bénéfice. La procédure heuristique et la praticité des modèles proposés ont été illustrées en se basant sur une courbe de demande linéaire, ce qui a révélé que le système peut être considérablement amélioré en passant d'un système décentralisé à centraliser à la fois avant et après les remises.

[Ke, et Bookbinder,2018] ont montré que la sensibilité au prix est une motivation clé, pour toutes les parties, en particulier le transporteur, pour offrir des réductions. Spécifiquement pour le rabais de quantité en gros, les analyses de données ont également illustré les différents objectifs et structures correspondantes des cas suivants : le cas **décentralisé** où la réduction est basée sur la quantité, ce qui encourage l'acheteur à augmenter la quantité pour chaque commande individuelle ; tandis que pour le cas **centralisé**, la réduction est basée sur le volume, ce qui est utilisé pour stimuler la demande annuelle.

b) Consolidation collaborative de la marchandise cas des Transporteurs

Zhou et al. (2011) ont montré l'importance de la consolidation collaborative de la marchandise en utilisant une politique hybride (basée sur le temps et la quantité). Pour cela, ils ont pris l'exemple de trois transporteurs (A, B, C) où A et B travaillent en partenariat et C travaille de façon indépendante.

Pour les transporteurs A et B, deux modèles de partenariat ont été testés en utilisant deux types de dispatching :

- L'alliance stratégique qui consiste à faire des transferts de marchandises entre les deux prestataires de services afin de minimiser les coûts de transport (une remise est offerte pour la livraison de la marchandise du partenaire).
- La collaboration totale qui permet aux deux prestataires d'agir comme étant une seule entreprise.

Le résultat de l'expérimentation a montré que l'alliance stratégique est plus performante que la collaboration totale dans le cas de petits intervalles d'expédition et inversement pour de longues dates limites d'expédition.

En se basant sur le profit optimal des différentes capacités de camions, les deux modèles de partenariat restent plus efficaces que le modèle indépendant.

Ainsi le modèle collaboratif facilite la consolidation de la marchandise et permet d'avoir un nombre de tournées programmées inférieur à celui du modèle indépendant, ce qui permet de réduire les coûts opératoires.

2.7 Relation entre la consolidation, l'Internet physique et dernier kilomètre

Selon [Montreuil, 2011], la manière dont les objets physiques sont actuellement transportés, manipulés, stockés, réalisés, fournis et utilisés dans le monde entier n'est pas durable sur les plans économique, environnemental et social. L'Internet Physique vient pallier ces défis par le biais des objectifs qui sont traduits comme suit :

- **D'un point de vue économique**, l'objectif est de déverrouiller des gains très significatifs dans la logistique globale, la production, le transport et la productivité des entreprises.
- **D'un point de vue environnemental**, l'objectif est de réduire d'un ordre de grandeur la consommation énergétique mondiale, la pollution directe et indirecte, y compris l'émission de gaz à effet de serre, associée à la logistique, à la production et au transport.
- **D'un point de vue sociétale**, l'objectif est d'améliorer la qualité de vie des activités logistiques, de production et des travailleurs des transports, ainsi que de la population en rendant beaucoup plus accessible les objets et fonctionnalités dont ils ont besoin.

La consolidation de marchandise est extrêmement liée au concept de l'Internet Physique, car elle permet de revoir la manière dont les objets physiques seront manipulés, stockés et livrés au client, pour remplir les engagements de services, maximiser l'espace de chargement dans un même véhicule, réduire le nombre de voyages, le kilométrage, les coûts logistiques et diminuer son empreinte carbone.

D'après [Crainic et Montreuil, 2016] la consolidation est l'un des concepts clés pour la logistique urbaine et l'Internet physique. En allant dans le même sens que [Montreuil, 2011], [Browne et al.2011] et [Taniguchi,2014] expliquent que la logistique urbaine peut contribuer à supporter des systèmes de transport de fret urbain plus efficaces et plus respectueux de l'environnement par le biais de centre de consolidation urbain.

De plus, la logistique urbaine est le dernier segment de l'Internet Physique. Ce qui nous permet d'introduire la notion du « dernier kilomètre ».

Les travaux concernant la logistique urbaine et le dernier kilomètre sont nombreux. Le « dernier kilomètre » est considéré comme la dernière des étapes de la livraison dans les réseaux logistiques. Nous nous référons aux livraisons de colis du dernier kilomètre comme le dernier voyage d'un colis entre le dépôt de colis local et le client qui a acheté les marchandises [Bates et al, 2018]. [Harrington et al.,2016] le définissent comme « *the final component of a B2C delivery process* ».

Le coût du dernier kilomètre augmente les frais généraux des entreprises, les coûts du carburant et les pressions sur l'immobilier dans les centres urbains (poussant les dépôts plus loin des lieux de livraison) et contribuent à faire de ce secteur un marché très concurrentiel souffrant de profits marginaux [Allen et al, 2016].

[McLeod et al.,2006] expliquent que lors de la livraison et en raison de la non-présence du client à son domicile le véhicule de livraison se trouve face à un échec de livraison. Pour pallier ce problème, le véhicule de livraison déposera la livraison perdue dans un point de collecte/livraison comme un point de relais, une station d'essence ou bien un bureau de poste pour que le client

puisse faire la collecte plus tard. L'avantage principal de ce type de livraison est d'offrir une flexibilité par rapport à la récupération du colis, de réduire les kilométrages perdus et d'avoir une livraison sécurisée.

Sachant que consolidation spatiale consiste à déterminer le point de départ et le point d'arrivée, l'itinéraire et le regroupement des petites commandes à expédier en un seul grand envoi [Min, 1996]. Les études sur la consolidation spatiale se sont focalisées sur la détermination des coûts minimums liés par la combinaison des petites expéditions dans un terminal de consolidation. Ce qui peut être assimilé au problème du chemin le plus court qui permet de trouver l'arrêt qui coûte le moins.

La consolidation spatiale est l'une des solutions au problème dernier kilomètre. [Aljohani et Thompson, 2019] le confirment par "Freight carriers, receivers and citizens in the inner-city area suffer the most from issues impacting last mile delivery due to exacerbated traffic congestion, limited parking and unsustainable Delivery vehicles. Freight consolidation policies offer a sustainable solution to address these problems. "

[De Souza et al, 2014] définissent la livraison du dernier kilomètre comme la dernière étape de la chaîne d'approvisionnement au cours de laquelle l'envoi est livré au destinataire (final). La distribution des commandes peut, à son tour, être définie comme une tâche consistant à desservir un ensemble de clients avec une flotte de véhicules à capacité limitée située dans un ou plusieurs dépôts et a été établie comme le problème de tournée des véhicules. L'importance de la résolution du problème de tournée est de plus en plus évidente non seulement pour les organisations impliquées, mais pose également des implications nationales et internationales significatives en raison de l'escalade de la congestion du trafic et de la pollution atmosphérique rencontrées par de nombreuses villes urbaines dans le monde. Ainsi la planification d'un système capable de produire des itinéraires de livraison efficaces n'est plus surprenante avec la flambée des prix du carburant, l'inflation et de l'autre côté, faire pression à la baisse sur les coûts des clients.

Pour répondre aux enjeux territoriaux cités implicitement ci-dessus, la gestion du dernier kilomètre emploi, en plus de la consolidation spatiale, la consolidation de produits.

Chose qu'on retrouve, selon [Durand, 2002] dans le concept de préparation de commandes mixtes celles préparées par le consommateur lors de l'achat de ses produits et celles préparées dans l'entrepôt pour être livrées à un point de relais donné.

Pour clore, l'Internet Physique est un paradigme qui vise à créer un écosystème logistique durable et efficace [Ballot et al, 2014], pour lequel la consolidation est l'un des facteurs clés et le dernier kilomètre en est un de ses segments (car la logistique urbaine est le dernier segment de l'Internet physique).

3 CONCLUSION

Dans cet état de l'art, nous avons tenté de dresser un portrait sur la consolidation de marchandise et son impact sur la performance des systèmes logistiques. Avant de mettre en avant les différentes stratégies et classifications de consolidation, nous avons pu donner en premier temps quelques définitions et objectifs de la consolidation. Suivi d'un exemple synthétique de l'apport de la consolidation, pour s'intéresser ensuite aux principaux modèles de résolutions des différentes stratégies de consolidation.

Après avoir expliqué le lien entre la consolidation et la remise ainsi que l'interdépendance de la consolidation avec la demande. Dans la section finale nous avons présenté la relation entre la consolidation, l'Internet Physique et le dernier kilomètre ainsi que les défis qui peuvent être palliés par ces derniers.

Les stratégies de consolidation et le choix des métriques est tellement divers que cela pourra influencer la prise de décision et la qualité de la performance des systèmes logistiques d'une entreprise donnée. Dans nos futures recherches, dans le cadre de notre projet avec Logistik Unicorp, nous tenterons d'étudier d'avantage le positionnement de la consolidation par rapport à l'Internet Physique. tout en utilisant les techniques de datamining on essaiera de faire ressortir les principales variables influençant la consolidation afin de développer une nouvelle stratégie de consolidation qui sera support aide à la décision pour répondre aux besoins de l'entreprise.

4 REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment leur reconnaissance au partenaire industriel Logistik Unicorp pour sa collaboration au projet et la fourniture des données. Les auteurs soulignent également le support financier de MITACS (projet IT 12058).

5 REFERENCES

- Aljohani, K., & Thompson, R. (2019). A Stakeholder-Based Evaluation of the Most Suitable and Sustainable Delivery Fleet for Freight Consolidation Policies in the Inner-City Area. *Sustainability*, 11(1), 124.
- Allen, J., Piecyk, M., & Piotrowska, M. (2016). An analysis of the parcels market and parcel carriers' operations in the UK. *Freight Traffic Control*, 2050.
- Ballot, E., Montreuil, B., & Meller, R. (2014). The physical internet. *The network of logistics networks, la documentation Française*.
- Bates, O., Friday, A., Allen, J., Cherrett, T., McLeod, F., Bektas, T., ... & Davies, N. (2018). Transforming last-mile logistics: Opportunities for more sustainable deliveries. *In Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (p. 526). ACM.
- Bookbinder, J. H., & Higginson, J. K. (2002). Probabilistic modeling of freight consolidation by private carriage. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 38(5), 305-318.
- Browne, M., Allen, J. and Leonardi, J. (2011). Evaluating the use of an urban consolidation centre and electric vehicles in central London, *IATSS Research*, 35(1), 1-6.
- C.Nguyen,M.Dessouky,A.Toriello (2014) Consolidation strategies for the delivery of perishable products, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* ,69(8):108-121
- Çetinkaya, S., & Lee, C. Y. (2002). Optimal outbound dispatch policies: Modeling inventory and cargo capacity. *Naval Research Logistics (NRL)*, 49(6), 531-556.
- Çetinkaya, S. (2005). Coordination of inventory and shipment consolidation decisions: A review of premises, models, and justification. *In Applications of supply chain management and e-commerce research*,92(2), 3-51.
- Crainic, T. G., & Montreuil, B. (2016). Physical internet enabled Hyperconnected City logistics. *Transportation Research*

- Procedia*, 12, 383-398.
- Christopher, M. (2000). The agile supply chain: competing in volatile markets. *Industrial marketing management*, 29(1), 37-44.
- Cooper, M. (1984). Cost and Delivery Time Implications of Freight Consolidation and Warehousing Strategies, *International Journal of Physical Distribution & Materials Management*, 14 (6):47-67.
- De Souza, R., Goh, M., Lau, H. C., Ng, W. S., & Tan, P. S. (2014). Collaborative urban logistics—synchronizing the last mile a Singapore research perspective. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 125, 422-431.
- Durand, B. (2002). Les modèles logistiques de l'e-grocery. In *5ème colloque Etienne THIL* (Vol. 26).
- Gupta, Y. P., & Bagchi, P. K. (1987). Inbound Freight Consolidation Under Just-In-Time Procurement. *Journal of Business Logistics*, 8(2), 74.
- Gurnani, H. (2001). A study of quantity discount pricing models with different ordering structures: Order coordination, order consolidation, and multi-tier ordering hierarchy. *International Journal of Production Economics*, 72(3), 203-225.
- Hall, R. W. (1987). Consolidation strategy: inventory, vehicles and terminals. *Journal of business logistics*, 8(2), 57.
- Hanbazazah, A. S., Abril, L., Erkoc, M., & Shaikh, N. (2019). Freight consolidation with divisible shipments, delivery time windows, and piecewise transportation costs. *European Journal of Operational Research*, 276(1), 187-201.
- Harrington, T. S., Singh Srani, J., Kumar, M., & Wohlrab, J. (2016). Identifying design criteria for urban system 'last-mile' solutions—a multi-stakeholder perspective. *Production Planning & Control*, 27(6), 456-476.
- Higginson, J. K., & Bookbinder, J. H. (1994). Policy recommendations for a shipment-consolidation program. *Journal of Business Logistics*, 15(1), 86-112.
- Jackson, G. C. (1981). Evaluating order consolidation strategies using simulation. *Journal of Business Logistics*, 2(2), 110-138.
- Ke, G. Y., & Bookbinder, J. H. (2018). Coordinating the discount policies for retailer, wholesaler, and less-than-truckload carrier under price-sensitive demand: A tri-level optimization approach. *International Journal of Production Economics*, 196, 82-100.
- Lambert, D. M., & Sterling, J. U. (1984). Managing inbound transportation: A case study. *Journal of Supply Chain Management*, 20(2), 22-29.
- McLeod, F., Cherrett, T., & Song, L. (2006). Transport impacts of local collection/delivery points. *International Journal of Logistics*, 9(3), 307-317.
- Min, H. (1987). The vehicle routing problem with product/spatial consolidation and backhauling (*Doctoral dissertation, The Ohio State University*).
- Min, H., & Cooper, M. (1990). A comparative review of analytical studies on freight consolidation and backhauling. *Logistics and Transportation Review*, 26(2), 149-169.
- Pooley, J., & Stenger, A. J. (1992). Modeling and evaluating shipment consolidation in a logistics system. *Journal of Business Logistics*, 13(2), 153.
- Montreuil, B. (2011). Toward a Physical Internet: meeting the global logistics sustainability grand challenge. *Logistics Research*, 3(2-3), 71-87.
- Sheffi, Y. (1986). Carrier Shipper Interactions in the Transportation Market: An Analytical Framework. *Journal of Business Logistics*, 7(1).
- Stidham Jr, S. (1974). Stochastic clearing systems. *Stochastic Processes and their Applications*, 2(1), 85-113.
- Taniguchi, E. (2014). Concepts of city logistics for sustainable and liveable cities. *Procedia-social and behavioral sciences*, 151, 310-317.
- Tyan, J. C., Wang, F. K., & Du, T. C. (2003). An evaluation of freight consolidation policies in global third party logistics. *Omega*, 31(1), 55-62.
- Ulku, M. A. (2009). Analysis of shipment consolidation in the logistics supply chain. Ph.D. Dissertation, Management Sciences, University of Waterloo, Canada.
- Zhou, G., Van Hui, Y., & Liang, L. (2011). Strategic alliance in freight consolidation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(1), 18-29.