

Louvain School of Management

Conception de réseau logistique collaboratif avec un coût d'ouverture de dépôt variable

Auteur : Calcagno Livio
Promoteur(s) : Tancrez Jean-Sébastien
Année académique 2025-2026
Intitulé du master et de la finalité : Master en Ingénieur de Gestion à
finalité spécialisée en « Transportation Management and Supply
Chain »

DECLARATION

La déclaration ci-dessous est **obligatoire et doit apparaître à la première page (après la couverture) de votre TFE**

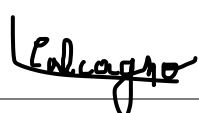
DECLARATION D'UTILISATION D'IA GÉNÉRATIVE

Confirmez soit les quatre premières déclarations, soit, le cas échéant, la dernière :

Déclarations relatives à l'usage responsable de l'IA générative	Réponse
Le contenu de mon/notre TFE est mon/notre production originale, même si j'ai/nous avons utilisé l'IA générative pour m'/nous aider à le préparer.	☒ oui ☐ non
Je/nous maîtrise/maîtrisons les théories, outils et méthodes que j'utilise/nous utilisons pour le mémoire.	☒ oui ☐ non
J'ai/nous avons vérifié que le contenu présenté dans le mémoire est exact et valide, et qu'il ne contient ni hallucination, ni fausse référence, etc.	☒ oui ☐ non
J'atteste/nous attestons maîtriser le résultat final et être capable(s) de l'expliquer et de répondre aux questions à son sujet.	☒ oui ☐ non
J'ai/nous avons pris toutes les mesures nécessaires afin de ne pas donner accès à des informations ou données confidentielles à des outils d'IA générative	☒ oui ☐ non

SIGNATURE

Signez votre déclaration

Auteur Nom de famille, prénom(s)	Date	Signature
1 CALCAGNO Livio	30/07/2026	

NOTE

Lors de la rédaction de ce mémoire, j'affirme avoir utilisé l'intelligence artificielle (ChatGPT) dans le but de :

- **Correction et reformulation grammaticale et linguistique** : des outils tels que Reverso, DeepL et ChatGPT ont été utilisés afin d'améliorer la fluidité du texte, de supprimer certaines redondances et de vérifier l'orthographe et la grammaire, sans modifier le fond ni la structure argumentative du mémoire.
- **Assistance à la programmation** : ChatGPT a été utilisé comme outil d'aide pour relire, comprendre, corriger et adapter certaines parties du code informatique utilisé dans les modèles d'optimisation. Les propositions générées ont été vérifiées, testées et, lorsque nécessaire, modifiées avant leur intégration.
- **Aide à la création de supports visuels** : ChatGPT a été utilisé pour proposer ou adapter des scripts permettant de produire certains graphiques, tableaux et représentations cartographiques à partir des résultats obtenus. Les représentations obtenues ont été vérifiées avant leur utilisation dans le mémoire.

Remerciements

Je remercie tout particulièrement Monsieur Jean-Sébastien Tancrez, promoteur de ce mémoire, pour la qualité de son accompagnement, pour sa disponibilité et pour ses conseils tout au long de la réalisation de ce travail.

Je tiens aussi à remercier l'ensemble de l'équipe enseignante de l'UCLouvain FUCaM Mons de m'avoir permis d'acquérir les compétences nécessaires pour la réalisation de ce mémoire.

Enfin, j'aimerais remercier ma famille et mes proches pour leur soutien tout au long de ce parcours.

Résumé

La coopération horizontale permet à plusieurs entreprises de mutualiser leurs ressources logistiques afin de réduire leurs coûts tout en maintenant un niveau de service satisfaisant. Dans ce contexte, les modèles de conception de réseaux logistiques considèrent généralement un coût d'ouverture identique pour tous les centres de distribution, une hypothèse qui s'écarte des réalités opérationnelles. Ce mémoire vise à analyser l'impact d'une modélisation plus réaliste des coûts d'ouverture sur les décisions de localisation.

À partir du modèle de référence de Hacardiaux et Tancrez (2022), quatre extensions ont été développées. Elles font dépendre le coût d'ouverture du stock moyen, de la fréquence des expéditions, de la racine carrée de la demande desservie ou encore de paliers de capacité. Les différents modèles ont ensuite été implémentés et évalués sur plusieurs instances générées aléatoirement afin de comparer leurs performances à celles du modèle de référence.

Les résultats montrent que les modèles basés sur le stock moyen, la fréquence des expéditions et la racine carrée de la demande modifient principalement l'organisation du réseau tout en conservant des performances proches de celles du modèle de référence. À l'inverse, le modèle à paliers modifie davantage la structure du réseau logistique en influençant le nombre, la capacité et la localisation des centres de distribution, ce qui entraîne une diminution plus marquée des synergies.

Ce travail montre ainsi qu'une modélisation plus réaliste des coûts d'ouverture permet d'enrichir les modèles de conception de réseaux logistiques coopératifs sans remettre en cause l'intérêt de la coopération horizontale.

Table des matières

1. Introduction	1
1.1. Contexte général	1
2. Contexte théorique	3
2.1. Coopération horizontale.....	3
2.1.1. Formes de coopération horizontale.....	3
2.1.2. Applications et bénéfices de la coopération horizontale	4
2.1.3. Limites de la coopération horizontale	5
2.2. Conception des réseaux logistiques - Modèles location-inventory.....	7
2.3. Économies d'échelle et coûts d'ouverture des centres de distribution	9
2.4. Formulation du modèle d'optimisation.....	10
2.4.1. Les ensembles.....	10
2.4.2. Les paramètres	10
2.4.3. Les variables de décision	12
2.4.4. La fonction objective.....	13
2.4.5. Les contraintes	14
3. Modélisation d'un coût d'ouverture variable des DC	15
3.1. Coût d'ouverture linéaire en fonction du stock moyen	15
3.2. Coût d'ouverture linéaire en fonction de la fréquence des expéditions	16
3.3. Coût d'ouverture non linéaire en fonction de la racine carrée de la demande au DC ..	17
3.4. Coût d'ouverture linéaire par paliers de capacité	18
4. Analyse numérique	19
4.1. Paramétrage des expériences	19
4.2. Indicateurs d'analyse.....	23
4.2.1. Valeur de synergie	23
4.2.2. Taux de chargement	23
4.3. Résultats du modèle de référence	24
4.4. Résultats du modèle en fonction du stock moyen	27
4.5. Résultats du modèle basé sur la fréquence d'expédition	30
4.6. Résultats du modèle basé sur la racine carrée	33
4.7. Résultats basés sur le modèle à paliers de capacité	36
5. Conclusion	40
6. Annexes	41
<i>Annexe A - Illustration d'une fonction de coût en forme de S inversé.....</i>	<i>41</i>
<i>Annexe B – Bénéfices provoqués par la coopération horizontale</i>	<i>41</i>
<i>Annexe C – Modèle complet - coût d'ouverture basé sur le stock moyen</i>	<i>42</i>

<i>Annexe D – Modèle complet - coût d'ouverture basé sur la fréquence des expéditions</i>	<i>44</i>
<i>Annexe E – Modèle complet - coût d'ouverture basé sur la racine carrée de la demande au DC ..</i>	<i>46</i>
<i>Annexe F – Modèle complet - coût d'ouverture par paliers de capacité</i>	<i>48</i>
<i>Annexe G – Tests complémentaires du modèle à racine carrée pour une part fixe cible de 10%....</i>	<i>50</i>
7. Bibliographie	51

Liste des tableaux

Table 1 : Les ensembles du modèle de référence	10
Table 2 : Les paramètres du modèle de référence	11
Table 3 : Les variables du modèle	12
Table 4 : Paramètres fixes utilisés dans les expérimentations.....	20
Table 5 : Valeurs des paramètres expérimentaux étudiés	21
Table 6 : Paramétrage des capacités et des coûts d'ouverture du modèle à paliers	22
Table 7 : Résultats selon $Cap\%$ du modèle de référence.....	25
Table 8 : Résultats selon Fd du modèle de référence.....	25
Table 9 : Analyse des bénéfices de la coopération des composantes de l'objectif (modèle de référence).....	26
Table 10 : Effet de l'introduction d'un coût variable d'ouverture pour $Cap\% = 40\%$ (modèle stock moyen)	28
Table 11 : Effet de l'introduction d'un coût variable d'ouverture pour $Cap\% = 40\%$ (modèle fréquence d'expédition).....	31
Table 12 : Effet de l'introduction d'un coût variable d'ouverture pour $Cap\% = 40\%$ (modèle racine carrée)	34
Table 13 : Résultats du modèle à paliers – première configuration de coûts	37
Table 14 : Résultats du modèle à paliers – seconde configuration de coûts	38

Table des figures

Figure 1 : Répartition des composantes du coût total moyen dans le modèle de référence	24
Figure 2 : Répartition des composantes du coût total moyen dans le modèle basé sur le stock moyen	27
Figure 3 : Synergie en fonction du coût total d'ouverture de DC (modèle de référence et stock moyen)	27
Figure 4 : Comparaison des réseaux du modèle de référence et du modèle stock moyen (Cap% = 40%)	29
Figure 5 : Répartition des composantes du coût total moyen dans le modèle basé sur la fréquence des expéditions.....	30
Figure 6 : Synergie en fonction du coût total d'ouverture de DC (modèle de référence et fréquence d'expédition)	31
Figure 7 : Comparaison des réseaux du modèle de référence et du modèle fréquence d'expédition (Cap% = 40%)	32
Figure 8 : Répartition des composantes du coût total moyen dans le modèle basé sur la racine carrée	33
Figure 9 : Synergie en fonction du coût total d'ouverture de DC (modèle de référence et racine carrée de la demande).....	33
Figure 10 : Comparaison des réseaux du modèle de référence et du modèle racine carrée (Cap% = 40%)	35
Figure 11 : Répartition des composantes du coût total moyen dans le modèle à paliers de capacité.....	36
Figure 12 : Comparaison des réseaux du modèle de référence et du modèle à paliers – seconde configuration de coûts (Cap% = 40%)	39

1. Introduction

1.1. Contexte général

De nos jours, il est important de trouver de nouveaux outils afin de diminuer les coûts et d'augmenter la qualité de service offerte aux clients. La conception des réseaux logistiques influence l'efficacité de la chaîne d'approvisionnement (Malandri et al., 2026).

Pour ce faire, le Supply Chain Management doit impérativement jouer le rôle de levier entre les coûts et le niveau de service (Schuster Puga & Tancrez, 2017). Par exemple, une augmentation de la fréquence des livraisons, visant à améliorer le service au client et à réduire le coût de stockage, engendre des transports présentant un taux de remplissage plus faible ainsi qu'un coût de transport plus élevé. À l'inverse, la maximisation du chargement des poids lourds provoque une diminution de la fréquence de livraison. Dans le but d'améliorer cet équilibre, les entreprises peuvent décider de coopérer. Cette coopération permettra de réduire les coûts de transport tout en augmentant le taux de remplissage.

Afin d'améliorer cet équilibre, les entreprises peuvent recourir à la coopération horizontale. Il s'agit d'une collaboration entre entreprises concurrentes, actives au même niveau de la chaîne d'approvisionnement. Les entreprises partenaires peuvent partager des ressources et bénéficier de synergies (R. Li et al., 2024). Cette forme de collaboration permet notamment d'améliorer le taux de remplissage des véhicules et de réduire les coûts logistiques.

Dans ce contexte, Hacardiaux et Tancrez (2022) proposent un modèle de conception de réseau logistique collaboratif permettant d'évaluer les bénéfices économiques et logistiques de la coopération horizontale. Ce modèle met en évidence les gains liés à la mutualisation des ressources et des flux logistiques. Cependant, certaines hypothèses de modélisation peuvent être revues afin de mieux refléter la réalité opérationnelle.

Le modèle proposé par Hacardiaux et Tancrez (2022) considère les coûts d'ouverture des centres de distribution (DC) comme des coûts fixes. Ces coûts sont payés une seule fois lors de l'ouverture du site et sont indépendants du niveau d'activité, de la taille et de la capacité du centre logistique. Cependant, dans la réalité, lorsqu'une entreprise ouvre une nouvelle infrastructure, elle doit généralement payer un coût fixe initial ainsi qu'un coût variable lié au dimensionnement de l'installation. En effet, une infrastructure plus importante nécessite davantage de ressources. La taille du centre de distribution peut également être liée au volume des flux ou au niveau d'activité traité par celui-ci.

Dès lors, il est légitime de s'interroger sur l'impact de cette hypothèse de coût fixe :

Dans quelle mesure la modélisation d'un coût variable modifie-t-elle les décisions de localisation et l'évaluation des bénéfices de la coopération horizontale ?

Ce mémoire a donc pour objectif d'analyser l'influence de différentes méthodes d'implémentation d'un coût variable (concave ou linéaire).

La structure de ce mémoire est organisée comme suit :

- Un **contexte théorique** abordera les sujets relatifs à la coopération horizontale ainsi qu'aux modèles location-inventory. Le modèle proposé par Hacardiaux et Tancrez (2022) y sera également présenté.
- Ensuite, les différentes formulations proposées pour intégrer un **coût d'ouverture variable** des centres de distribution seront présentées et discutées.
- Le chapitre 4 présentera **l'implémentation** de ces nouvelles formulations avec **l'analyse des résultats** dans le but de répondre à la question de recherche.
- Enfin, ce mémoire se conclura par une présentation des principales contributions, les limites de l'étude ainsi que les pistes de recherche futures.

2. Contexte théorique

L'objectif de cette partie théorique est d'aborder les différents concepts et modèles d'optimisation développés dans la littérature scientifique en matière de conception de réseaux logistiques. Plus précisément, cette section s'intéresse à la coopération horizontale, aux modèles de localisation et de gestion des stocks (location-inventory), ainsi qu'aux différentes approches de modélisation des coûts dans les centres de distribution.

L'analyse de ces travaux permet de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents à la conception de réseaux logistiques performants et de s'inspirer des contributions existantes afin de proposer des améliorations pertinentes au modèle étudié dans ce mémoire.

2.1. Coopération horizontale

La **coopération horizontale** constitue une approche de plus en plus étudiée dans la littérature dans le domaine de la Supply Chain dans un contexte où les entreprises font face à une concurrence de plus en plus importante. Afin d'en tirer un avantage concurrentiel, la coopération horizontale repose sur la collaboration entre acteurs opérant au même niveau de la chaîne d'approvisionnement. En effet, ils rassemblent leurs ressources afin d'améliorer leur efficacité opérationnelle et leur performance globale. Cette forme de collaboration permet également de coordonner les flux de transport, de partager des infrastructures (les centres de distribution et les véhicules), de partager des émissions provoquant la pollution de l'air ou encore de centraliser le service client ([Annexe B](#)) (Hacardiaux & Tancrez, 2022).

2.1.1. Formes de coopération horizontale

La coopération horizontale ne se limite pas à une forme unique de collaboration entre entreprises mais elle peut prendre différentes formes selon le degré d'interaction et les objectifs propres à chaque organisation. Dans ce contexte, quatre types différents de coopération horizontale sont présentés (Czakon, 2009) :

- Premièrement, la **coexistence** est présentée comme l'une des quatre formes théoriques de relations pouvant exister entre entreprises. Aucune interaction particulière entre coopération et compétition n'est mise en évidence dans cette forme de relation (Czakon, 2009).

- Deuxièmement, la **coopération** : les entreprises établissent des objectifs communs, partagent des ressources, des informations ou des activités qui permettent le bon fonctionnement de la coopération (Bengtsson & Kock, 2000).
- Troisièmement, la **compétition** décrit une relation classique entre entreprises concurrentes par un comportement d'action-réaction (Bengtsson & Kock, 2000).
- Enfin, la **coopétition** constitue une forme hybride particulièrement pertinente dans le domaine logistique. Elle désigne une situation dans laquelle des entreprises concurrentes coopèrent sur certaines activités tout en restant en concurrence sur d'autres (Bengtsson & Kock, 2000).

2.1.2. Applications et bénéfices de la coopération horizontale

Dans la littérature récente, la coopération horizontale a été utilisée dans des contextes et des domaines variés grâce à ses nombreux avantages opérationnels et économiques. Dans le domaine **du transport et de la distribution**, la coopération horizontale est principalement mobilisée, comme illustré dans ce mémoire, pour optimiser les flux logistiques et améliorer l'utilisation des ressources.

Différentes analyses ont été réalisées dans le domaine **agricole** comme dans la production de pisco (eau-de-vie de vin provenant d'Amérique Latine). Basso et al. (2025) montrent que la coopération entre les producteurs de raisins engendre une réduction de 13,4% des coûts de transport. Les auteurs soulignent également que les bénéfices associés à la coopération deviennent progressivement plus limités lorsque le nombre d'acteurs impliqués augmente. En effet, une coalition trop dense, avec un grand nombre d'acteurs, provoque des problèmes organisationnels. Dans ce secteur, un nombre maximal de trois agriculteurs permet de capturer presque 94% des bénéfices potentiels.

Au-delà du secteur agricole, la coopération horizontale est également étudiée dans le domaine de la **logistique urbaine**. Dans ce contexte, elle constitue une réponse aux problématiques croissantes de congestion et d'impact environnemental. Dans ce but, la coopération horizontale permet de mutualiser la flotte de véhicules des différents concurrents. Les marchandises sont regroupées dans des véhicules uniques. De plus, les itinéraires empruntés sont souvent identiques, la coordination permet donc d'améliorer le taux de remplissage et d'accroître l'efficacité globale de la logistique en milieu urbain (Cleophas et al., 2019).

Ces différents exemples montrent que la coopération horizontale constitue un levier pertinent pour améliorer la performance des systèmes de distribution.

2.1.3. Limites de la coopération horizontale

La coopération horizontale présente toutefois certaines limites structurelles qui complexifient sa mise en œuvre opérationnelle. En effet, la **coordination des flux logistiques** entre acteurs nécessite une planification conjointe. Cela devient particulièrement complexe dans des environnements décentralisés où les entreprises disposent d'un accès limité à l'information et prennent des décisions de manière autonome. Sans communication claire entre les partenaires, des difficultés d'alignement des décisions peuvent apparaître et provoquer une réduction de l'efficacité globale de la coopération.

Par ailleurs, la question du **partage des gains** constitue un enjeu central : il n'existe pas de méthode unique unanimement reconnue. Cela complique la mise en place et la pérennité des collaborations (Gansterer & Hartl, 2018). Ces difficultés sont renforcées par le **manque de confiance** entre les partenaires engagés dans une coopération horizontale (Cruijssen et al., 2007). Enfin, le fait que peu de travaux intègrent simultanément les problématiques d'optimisation logistique et de partage des bénéfices souligne la complexité intrinsèque de ces collaborations (Gansterer & Hartl, 2018).

La mise en œuvre de la coopération horizontale est également limitée par des enjeux liés au **partage de l'information** et aux **comportements stratégiques** des acteurs. En effet, les entreprises sont généralement réticentes à divulguer des données sensibles telles que leurs clients ou leurs coûts opérationnels. Cela limite la transparence nécessaire à une coordination optimale. Dans ce contexte, le manque d'information empêche une planification centralisée efficace. Les entreprises doivent alors recourir à des mécanismes de coordination, comme des systèmes d'enchères, qui permettent aux acteurs de proposer des offres sans révéler directement leurs informations internes. Toutefois, ces dispositifs n'éliminent pas les comportements opportunistes, certains acteurs pouvant être incités à manipuler leurs informations ou leurs offres pour maximiser leur profit individuel, au détriment de l'efficacité globale de la coopération (Berger & Bierwirth, 2010).

Enfin, au-delà des enjeux informationnels et organisationnels, la coopération horizontale est également limitée par la **divergence des intérêts** entre les entreprises. Bien que les firmes collaborent, elles restent concurrentes sur le marché. Cela peut générer des tensions et fragiliser

la relation. Cette situation de coopétition implique que chaque acteur cherche avant tout à maximiser son propre profit ce qui peut conduire à une instabilité dans la coopération. Dès lors, la mise en place de mécanismes spécifiques est indispensable pour maintenir un équilibre entre les partenaires et assurer la viabilité de la collaboration sur le long terme (R. Li et al., 2024).

Ces limites soulignent la nécessité de recourir à des approches analytiques permettant d'évaluer les configurations logistiques dans un cadre structuré. À cet égard, les modèles d'optimisation, notamment les modèles de type location-inventory, constituent des outils particulièrement pertinents pour analyser les arbitrages entre coûts, niveaux de service et organisation du réseau.

2.2. Conception des réseaux logistiques - Modèles location-inventory

La **conception des réseaux logistiques** occupe une place centrale dans la performance des chaînes d'approvisionnement puisqu'elle détermine la manière dont les flux physiques sont organisés entre les centres de distribution et les points de demande. Dans un contexte de coopération horizontale, cette question devient encore plus importante car le partage d'infrastructures et la mutualisation des flux modifient les arbitrages entre coûts de transport, coûts de stockage et niveau de service. Dès lors, les modèles d'optimisation apparaissent comme des outils essentiels pour analyser ces décisions de manière structurée.

Dans cette perspective, les modèles dits **location-inventory** constituent une extension des approches classiques de localisation en intégrant explicitement les décisions de gestion des stocks. Alors que les modèles de localisation traditionnels se concentrent principalement sur la **localisation des centres** de distribution et l'affectation des clients, les modèles location-inventory prennent également en compte les coûts liés aux **niveaux de stock** tels que les coûts de détention et de commande. Cette intégration permet de mieux représenter les interactions entre la structure du réseau logistique et la gestion des stocks (Schuster Puga & Tancrez, 2017).

Dans ces modèles location-inventory, les décisions de conception du réseau reposent principalement sur un **arbitrage entre coûts de transport et coûts de stockage**. Il résulte de l'interdépendance entre le nombre et la localisation des centres de distribution et les niveaux de stock nécessaires pour satisfaire la demande. La littérature met en évidence qu'une **structure décentralisée** repose sur un nombre plus important de DC. Cela permet de réduire les distances de transport et d'améliorer le niveau de service (Shen, 2007). Cependant, cela engendre une augmentation des coûts d'inventaire en raison de la duplication des stocks ainsi que des coûts d'installation liés à l'ouverture d'un plus grand nombre de DC. À l'inverse, une **structure centralisée** permet de mutualiser les flux et de réduire les niveaux de stock, au prix de distances de transport plus élevées. Cet arbitrage montre l'intérêt d'une approche intégrée permettant de déterminer une configuration optimale du réseau logistique.

Ensuite, **l'incertitude de la demande** constitue un élément central dans les modèles location-inventory dans la mesure où elle influence directement les décisions de localisation et de gestion des stocks. En pratique, la demande peut varier de manière significative ce qui conduit à une augmentation du stock de sécurité (safety stock). En effet, celui-ci permet de limiter les risques de ruptures de stock mais affecte directement les coûts d'inventaire.

Afin de prendre en compte cette incertitude, certaines approches stochastiques représentent la demande à travers différents scénarios. Plus précisément, ces modèles reposent sur une structure en deux étapes :

- **Les décisions stratégiques**, telles que la localisation et l'ouverture des centres de distribution, sont prises avant la réalisation de la demande.
- Une fois la demande réelle observée, **les décisions opérationnelles**, notamment celles relatives à la gestion des stocks, sont adaptées en fonction de cette demande.

Cette approche permet ainsi de mieux intégrer les fluctuations de la demande et leurs conséquences sur le réseau logistique (Boussouf et al., 2026).

Quelle que soit la manière dont la demande est modélisée, les modèles location-inventory poursuivent un objectif commun : minimiser le coût total du réseau logistique. Dans la littérature, ce coût total est principalement composé des coûts de transport, des coûts de stockage ainsi que des coûts d'ouverture des centres de distribution. Les coûts de transport représentent les dépenses associées aux flux de marchandises entre les différents acteurs du réseau logistique. Les coûts de stockage incluent quant à eux les coûts liés au cycle stock et au safety stock comme évoqué précédemment. Enfin, les coûts d'ouverture correspondent aux investissements nécessaires à la mise en service des entrepôts de stockage (Hacardiaux & Tancrez, 2022).

Malgré les avancées importantes des modèles location-inventory, les auteurs font face à **plusieurs défis** dans la conception des modèles mathématiques. Comme le soulignent Najy et al. (2026), l'intégration simultanée des décisions de localisation, de gestion des stocks, de l'incertitude de la demande et des politiques de réapprovisionnement devient complexe. Cette difficulté explique la diversité des approches développées dans la littérature. Certains travaux intègrent des dimensions supplémentaires, c'est notamment le cas de Ding et al. (2021) qui ajoutent des considérations financières telles que les coûts de financement et les mécanismes de trade credit. D'autres auteurs formulent des modèles avec des économies et déséconomies d'échelle dans les coûts d'exploitation des DC (Y. Li et al., 2023).

2.3. Économies d'échelle et coûts d'ouverture des centres de distribution

Le coût d'ouverture des centres de distribution représente une composante importante des modèles de conception de réseau logistique. En effet, ce coût correspond aux investissements nécessaires pour mettre en service une infrastructure logistique. Dans de nombreux modèles de la littérature, celui-ci est considéré comme **fixe**, c'est d'ailleurs le cas dans l'article de Hacardiaux & Tancrez (2022). Cela signifie qu'un montant choisi au préalable est associé à l'ouverture d'un DC. De cette manière, deux centres de distribution auront le même coût d'ouverture même si leurs niveaux d'activité varient énormément.

Cependant, dans la réalité, ce coût n'est pas fixe mais **variable**. Il dépend de plusieurs paramètres notamment la taille de l'infrastructure et le volume d'activité traité. Cette observation est liée à la notion d'économies d'échelle. En économie, elles correspondent à une situation dans laquelle le coût total augmente moins que proportionnellement au niveau d'output. Autrement dit, lorsque la production est multipliée par un facteur $X > 1$, le coût total augmente moins que X fois, soit $C(Xy) < XC(y)$ (Panzar & Willig, 1977).

Dans la littérature sur la conception de réseaux logistiques et les problèmes de localisation, il est assez fréquent d'introduire des fonctions de coût non linéaires afin de capturer des effets d'économies d'échelle (Y. Li et al., 2023). Plus précisément, ces auteurs expliquent qu'initialement le coût marginal décroît grâce aux économies d'échelle. Cela correspond parfaitement à la fonction concave. Cependant, une augmentation excessive de la demande provoque des déséconomies d'échelle ([Annexe A](#)). Un autre auteur modélise le coût global d'une installation comme une fonction concave de la quantité servie. Il explique que si la capacité double, le coût total ne va pas doubler mais il va augmenter moins que proportionnellement (Dupont, 2008)

Ces travaux montrent que la fonction concave est une approche pertinente pour représenter les économies d'échelle dans les problèmes de localisation et de conception de réseaux logistiques.

2.4. Formulation du modèle d'optimisation

Cette section présente le modèle développé par Hacardiaux et Tancrez (2022), il correspond à un problème de location-inventory sous coopération horizontale dans lequel plusieurs entreprises peuvent partager des centres de distribution afin de mutualiser leurs activités logistiques. Le problème consiste à déterminer quels centres de distribution doivent être ouverts ainsi que l'affectation des détaillants à ces centres. Le modèle intègre simultanément les décisions de localisation et de gestion des stocks afin de minimiser le coût total du réseau logistique. Celui-ci comprend notamment les coûts de transport, les coûts de stockage et les coûts d'ouverture des centres de distribution.

La présentation du modèle est structurée de la manière suivante : les ensembles et paramètres sont d'abord introduits, puis les variables de décision, la fonction objective et enfin les différentes contraintes du modèle.

2.4.1. Les ensembles

La Table 1 introduit les ensembles des indices utilisés par les variables et paramètres de ce modèle.

Ensemble	Taille	Description
$S_D = \{1, \dots, D\}$	$D = 60$	L'ensemble des DC, indexé par d .
$S_R = \{1, \dots, R\}$	$R = 60$	L'ensemble des retailers, indexé par r .
$S_I = \{1, \dots, I\}$	$I = 2$	L'ensemble des entreprises qui veulent collaborer (ou le produit unique de ces entreprises), indexé par i .

Table 1 : Les ensembles du modèle de référence

2.4.2. Les paramètres

La Table 2 a pour objectif de présenter les différents paramètres qui sont utilisés dans le modèle.

Paramètre	Description
F_d	Coût fixe d'ouverture du DC d , en €/période.
T	Coût de transport par km pour un véhicule, en €/km.
D_{dr}	Distance entre le DC d et le retailer r , en km.
H_r^i	Coût de possession unitaire au retailer r pour le produit i , en €/item/période.
h_d^i	Coût de possession au DC d pour le produit i , en €/item/période.

C_{dr}	Capacité du véhicule du DC d au retailer r, en items/véhicule.
K_d^i	Coût fixe de commande au DC d pour l'entreprise i.
LT_{dr}	Délai d'approvisionnement entre le DC d et le retailer r, en période
LT_d^i	Délai d'approvisionnement entre le DC d et l'entreprise i, en période
z_α	Facteur de niveau de service correspondant au niveau de service α .
σ_r^i	Écart-type de la demande de l'entreprise i chez le retailer r.
λ_r^i	Demande moyenne pour le produit i au retailer r, en items/période.
$\Lambda_r = \sum_i \lambda_r^i$	Demande moyenne pour tous les produits au retailer r, en items/période.
$\Lambda^i = \sum_r \lambda_r^i$	Demande moyenne pour les produits i pour tous les retailers, en items/période.
q_{dr}^i	Quantité expédiée du produit i du DC d vers le retailer r, en items/période.
q_d^i	Quantité commandée au DC d pour l'entreprise i, en items.
$Q_{dr} = \sum_i q_{dr}^i$	Quantité totale expédiée du DC d vers le retailer r, en items/véhicule

Table 2 : Les paramètres du modèle de référence

À noter que les quantités expédiées et commandées sont calculées à l'aide de l'EOQ (Economic Order Quantity). Il s'agit d'un modèle classique de gestion des stocks qui vise à minimiser les coûts logistiques afin de trouver la taille des lots.

Dans le modèle de Hacardiaux et Tancrez (2022), le **coût de transport** correspond au coût par trajet multiplié par le nombre de trajets : $Transport = T D_{dr} \frac{\Lambda_r}{Q_{dr}}$.

Le **coût de stockage** correspond au stock moyen détenu chez le retailer, estimé à $\frac{Q_{dr}}{2}$ selon la logique EOQ, multiplié par un coût moyen de possession. Ce dernier est calculé en pondérant le coût de possession de chaque produit par sa part dans la demande totale du retailer :

$$Stockage = \frac{Q_{dr}}{2} \sum_i H_r^i \frac{\lambda_r^i}{\Lambda_r}.$$

En effet, la **quantité expédiée** Q_{dr} est obtenue en minimisant les coûts de transport ainsi que les coûts de stockage selon la logique EOQ (Hacardiaux & Tancrez, 2022) :

$$Q_{dr} = \sqrt{\frac{2T D_{dr} \Lambda_r}{\sum_i H_r^i \frac{\lambda_r^i}{\Lambda_r}}}$$

Ensuite, les différents **produits à un même retailer sont transportés** dans un même véhicule. La quantité transportée pour chaque produit q_{dr}^i est donc déterminée proportionnellement à sa demande moyenne, selon la relation suivante (Hacardiaux & Tancrez, 2022):

$$q_{dr}^i = \frac{\lambda_r^i}{\Lambda_r} Q_{dr}$$

Enfin, au niveau du DC, les **quantités de réapprovisionnement pour chaque produit** sont également déterminées à l'aide du modèle EOQ. La quantité optimale commandée pour chaque produit est obtenue en minimisant les coûts de commande et de stockage (Hacardiaux & Tancrez, 2022) : $q_d^i = \sqrt{\frac{2K_d^i \Lambda_d^i}{h_d^i}}$.

La **demande totale d'un produit** au sein d'un DC dépend directement des retailers qui lui sont affectés et peut être exprimée comme : $\Lambda_d^i = \sum_r \lambda_r^i x_{dr}$.

En remplaçant la quantité optimale de commande ainsi que la demande au DC dans la fonction de coût associée au DC, l'expression du coût minimal combinant les coûts de commande et de possession de stocks :

$$q_d^i = \sum_{d,i} \sqrt{2K_d^i h_d^i \left(\sum_r \lambda_r^i x_{dr} \right)}$$

2.4.3. Les variables de décision

La Table 3 permet d'exposer les variables dont le modèle choisira les valeurs afin d'optimiser la solution. Les variables auxiliaires permettent de reformuler certains termes non linéaires apparaissant dans la fonction objective ci-dessous.

Variable	Description
y_d	Vaut 1 si le DC d est ouvert, sinon 0.
x_{dr}	Vaut 1 si le DC d sert le retailer r (pour tous les produits), 0 sinon.
v_{1d}^i, v_{2d}^i	Variables auxiliaires pour les entreprises i et DC d.

Table 3 : Les variables du modèle

2.4.4. La fonction objective

Cette section explique la fonction objective qui est utilisée dans le modèle. Celle-ci comporte 6 objectifs individuels.

$$\min \quad \sum_d F_d y_d \quad (1)$$

$$+ \quad \sum_{d,r} T D_{dr} \frac{\Lambda_r}{Q_{dr}} x_{dr} \quad (2)$$

$$+ \quad \sum_{d,r,i} H_r^i \frac{Q_{dr}}{2} \frac{\lambda_r^i}{\Lambda_r} x_{dr} \quad (3)$$

$$+ \quad \sum_{d,i} \sqrt{2K_d^i h_d^i} v_{1d}^i \quad (4)$$

$$+ \quad \sum_{d,r,i} H_r^i z_\alpha \sigma_r^i \sqrt{LT_{dr}} x_{dr} \quad (5)$$

$$+ \quad \sum_{d,i} h_d^i z_\alpha \sqrt{LT_d^i} v_{2d}^i \quad (6)$$

La formulation du **coût d'ouverture** (1) dans ce modèle est fixe. Dans la section suivante, ce coût sera modifié en un coût variable. Plusieurs modèles seront proposés.

La deuxième équation de l'objectif (2) concerne le **coût total de transport** entre les DC et les retailers. Pour chaque livraison, une distance est attribuée à un coût de transport T. Elle dépend également du nombre de livraisons nécessaires pour satisfaire la demande du retailer.

Ensuite, le **coût de stockage « cyclique » chez le retailer** (3) correspond au coût moyen de stockage des produits au niveau des retailers. Il dépend du coût de possession du stock, du stock moyen total ainsi que de la proportion du produit dans le camion.

Le quatrième terme (4) représente le **coût de commande et de stockage au niveau des DC**. Il est obtenu à partir de la formulation EOQ. La variable v_{1d}^i permet de représenter la racine carrée de la demande agrégée au DC $\sum_r \lambda_r^i x_{dr}$ tout en conservant une formulation compatible avec la résolution du problème.

Enfin, les coûts du **stock de sécurité** chez les retailers et les DC sont illustrés respectivement aux équations (5) et (6). Généralement, le safety stock est déterminé avec une demande aléatoire à l'aide de la variabilité de la demande (facteur lié au niveau de service et l'écart-type) et du

délai d'approvisionnement. En effet, dans ce modèle, la demande suit une loi de distribution normale. La variable v_{2d}^i est liée au calcul du stock de sécurité au niveau du DC. La variabilité de la demande au DC dépend de la demande agrégée des retailers qui lui sont affectés. Comme celles-ci sont représentées par les variables de décision x_{dr} , l'écart-type de la demande devient non linéaire. La variable auxiliaire permet de calculer le coût de stock de sécurité dans la fonction objective tout en représentant cette variabilité agrégée.

2.4.5. Les contraintes

Cette section illustre les contraintes présentes dans le modèle.

$$\text{s.t.} \quad \sum_r \lambda_r^i (x_{dr})^2 \leq (v_{1d}^i)^2 \quad \forall d, i \quad (7)$$

$$\sum_r (\sigma_r^i)^2 (x_{dr})^2 \leq (v_{2d}^i)^2 \quad \forall d, i \quad (8)$$

$$\sum_d x_{dr} = 1 \quad \forall r \quad (9)$$

$$x_{dr} \leq y_d \quad \forall d, r \quad (10)$$

$$v_{1d}^i, v_{2d}^i \geq 0 \quad \forall d, i \quad (11)$$

$$x_{dr}, y_d \in \{0, 1\} \quad \forall d, r \quad (12)$$

Les contraintes (7) et (8) permettent de relier les variables auxiliaires aux expressions originales. La première permet d'associer la variable auxiliaire v_{1d}^i à la demande totale du produit i au DC d . La seconde contrainte relie la variable auxiliaire v_{2d}^i à la variabilité de la demande agrégée au niveau du DC. Ces contraintes permettent de reformuler les termes comportant des racines carrées apparaissant dans la fonction objective tout en conservant une structure conique quadratique compatible avec la résolution du modèle.

La contrainte (9) impose que chaque retailer doit être affecté à un seul centre de distribution d . De son côté, l'équation (10) assure qu'un retailer peut être servi par un DC uniquement si celui-ci est ouvert. Enfin les contraintes (11) et (12) imposent, respectivement, la non-négativité des variables auxiliaires et la binarité des variables de décision x_{dr} et y_d .

Dans le chapitre suivant, différentes manières d'aborder notre problématique concernant la modélisation du coût d'ouverture des centres de distribution sont présentées.

3. Modélisation d'un coût d'ouverture variable des DC

Dans ce chapitre, quatre différentes approches permettant de représenter un coût d'ouverture variable des centres de distribution sont proposées. Leur but est d'étudier l'impact de cette hypothèse sur les décisions de localisation et sur les bénéfices de la coopération.

3.1. Coût d'ouverture linéaire en fonction du stock moyen

Le premier modèle présente la formulation complète du modèle location-inventory après remplacement du coût fixe d'ouverture par un coût linéaire dépendant du **niveau de stock du centre de distribution** (voir [Annexe C](#)). Contrairement aux formulations classiques où ce coût est considéré comme fixe, cette approche vise à mieux refléter la taille effective du DC en fonction de l'activité qu'il supporte. Ce modèle capture principalement la dimension de capacité physique des centres de distribution.

Toutes les équations du modèle de référence présenté à la section 2.4 sont conservées. Seule la formulation du coût d'ouverture est modifiée afin d'intégrer une composante variable.

Le **cycle stock** est estimé à partir de la formule Economic Order Quantity (EOQ) qui permet de déterminer la quantité de commande optimale minimisant les coûts de commande et de stockage. Cette équation permet d'écrire le terme de cycle stock sous la forme simplifiée : $q =$

$\sqrt{\frac{2K_d^i}{h_d^i}} v_{1d}^i$ où v_{1d}^i représente la racine carrée de la demande agrégée au centre de distribution.

Concernant le **safety stock**, celui-ci est modélisé de la même manière que l'équation (6) du

modèle de référence : $\sum_{d,i} h_d^i z_\alpha \sqrt{LT_d^i v_{2d}^i}$

Le niveau de **stock total** est ensuite introduit afin de représenter les coûts d'infrastructure et d'exploitation nécessaires pour gérer le stock tels que l'espace de stockage, les équipements ou encore les ressources humaines. Le coût variable d'ouverture ($CInf$) est alors proportionnel au niveau de stock : plus un centre de distribution a besoin de stocker un volume important, plus la taille du DC sera grande et le coût d'ouverture sera également plus élevé.

Enfin, un **coût fixe** d'ouverture est conservé, conformément au modèle de référence. Ce coût représente les dépenses incompressibles liées à l'ouverture d'un DC telles que les coûts administratifs, les investissements initiaux ainsi que les coûts liés à la mise en service du site. Il est indépendant du niveau d'activité du centre de distribution.

La nouvelle équation du coût d'ouverture est la suivante :

$$\sum_d (Fy_d + CInf \sum_i (\sqrt{\frac{2K_d^i}{h_d^i}} v_{1d}^i + z_\alpha \sqrt{LT_d^i} v_{2d}^i)) \quad (1)$$

3.2. Coût d'ouverture linéaire en fonction de la fréquence des expéditions

Dans ce second modèle, le coût d'ouverture d'un centre de distribution est lié à la **fréquence des expéditions** c'est-à-dire au nombre de livraisons nécessaires pour satisfaire la demande des retailers. La formulation complète du modèle est présentée en [Annexe D](#). Contrairement au modèle précédent, ce modèle met davantage l'accent sur l'intensité opérationnelle que sur le volume traité.

Toutes les équations du modèle de référence présenté à la section 2.4 sont conservées. Seule la formulation du coût d'ouverture est modifiée afin d'intégrer une composante variable dépendant de la fréquence des expéditions. Le **nombre de livraisons** associé à un produit i entre un DC et un retailer est approximé par le ratio : $\frac{\lambda_r^i}{Q_{dr}}$

L'idée sous-jacente de ce modèle est que le coût d'un centre de distribution ne dépend pas uniquement du volume traité mais également du nombre d'opérations logistiques à gérer. En effet, chaque expédition implique une série d'activités telles que la préparation de commande, la manutention et le chargement des véhicules. Plus précisément, une fréquence élevée de livraisons implique un nombre plus important de passages aux quais. Il est donc nécessaire de dimensionner le DC en fonction de la quantité journalière de livraisons à traiter.

Le coût variable d'ouverture est ainsi formulé comme une fonction du nombre total de livraisons multiplié par le coût opérationnel associé au traitement d'une expédition (*COpe*). Comme dans le modèle précédent, un coût fixe d'ouverture est conservé afin de représenter les coûts incompressibles liés à la mise en service du DC :

$$\sum_d (Fy_d + COpe \sum_{d,r,i} \frac{\lambda_r^i}{Q_{dr}} x_{dr}) \quad (1)$$

3.3. Coût d'ouverture non linéaire en fonction de la racine carrée de la demande au DC

Dans ce troisième modèle, le coût d'ouverture d'un centre de distribution est formulé comme une **fonction de la racine carrée de la demande agrégée** qui lui est affectée (voir [Annexe E](#)). Cette approche introduit une non-linéarité visant à intégrer explicitement la notion d'économies d'échelle dans le coût d'ouverture des DC.

Toutes les équations du modèle de référence présenté à la section 2.4 sont conservées. Seule la formulation du coût d'ouverture est modifiée afin d'intégrer une composante non linéaire dépendant de la demande agrégée affectée au centre de distribution.

Le modèle vise à représenter des **économies d'échelle** dans le coût d'ouverture des centres de distribution. En effet, certaines ressources peuvent être mutualisées comme les zones de préparation ou le chargement des camions. Une fonction concave croissante de la demande agrégée permet de représenter une situation où les coûts augmentent moins que proportionnellement au niveau de l'activité. Parmi les différentes fonctions concaves proposées dans la littérature, Elhedhli, Wang et Saif (2018) utilisent une fonction racine carrée pour modéliser le coût de capacité d'une installation.

La présence de la fonction racine carrée introduit une non-linéarité dans le modèle. Afin de conserver une formulation compatible avec les outils d'optimisation utilisés, une variable auxiliaire est introduite pour représenter cette racine carrée. Cette variable est ensuite reliée à la demande agrégée du DC à l'aide d'une contrainte :

$$\sum_{r,i} \lambda_r^i (x_{dr})^2 \leq (v_{3d})^2 \quad \forall d \quad (9)$$

Comme dans les modèles précédents, un coût fixe d'ouverture est conservé afin de représenter les dépenses incompressibles liées à l'ouverture du site. Un coût d'infrastructure ($CInf$) est quant à lui associé à la demande agrégée afin de la convertir en coût d'ouverture. L'équation du coût d'ouverture dans la fonction objective devient alors :

$$\sum_d Fy_d + CInf v_{3d} \quad (1)$$

Ce modèle permet ainsi de mettre en évidence les gains d'efficacité associés à la concentration des flux.

3.4. Coût d'ouverture linéaire par paliers de capacité

Dans ce quatrième modèle, le coût d'ouverture d'un centre de distribution est déterminé en fonction de **niveaux de capacité discrets**, appelés paliers. La formulation complète du modèle est présentée en [Annexe F](#). Les équations (2) à (9) du modèle de référence présenté à la section 2.4 sont conservées.

En pratique, un DC ne peut pas être dimensionné de manière parfaitement continue. Les entreprises doivent choisir parmi différents niveaux de capacité, chacun étant associé à une capacité maximale Cap^k et un coût d'ouverture $CopeK^k$. Afin de représenter ce choix, la variable d'ouverture y_d du modèle de référence est remplacée par une variable binaire y_d^k . Elle indique si le centre de distribution est ouvert avec le niveau de capacité k . Le coût d'ouverture du DC devient alors :

$$\sum_{d,k} CopeK^k y_d^k \quad (1)$$

En parallèle, une **contrainte de capacité** est introduite afin de garantir que la demande totale affectée à un centre de distribution ne dépasse pas la capacité du palier sélectionné :

$$\sum_{r,i} \lambda_r^i x_{dr} \leq \sum_k Cap^k y_d^k \quad \forall d \quad (10)$$

La contrainte d'ouverture du modèle de référence est également adaptée afin de tenir compte des différents niveaux de capacité :

$$x_{dr} \leq \sum_k y_d^k \quad \forall d, r \quad (11)$$

Enfin, afin d'éviter qu'un même centre de distribution soit associé à plusieurs niveaux de capacité simultanément, la contrainte suivante est ajoutée :

$$\sum_k y_d^k \leq 1 \quad \forall d \quad (12)$$

Cette approche permet de capturer de manière plus réaliste les décisions d'investissement. En effet, les infrastructures logistiques sont généralement dimensionnées par paliers plutôt que de manière continue.

4. Analyse numérique

Les quatre modèles mathématiques ainsi que celui comportant un coût d'ouverture des DC fixe tel que présenté dans l'article de Hacardiaux et Tancrez (2022) ont été implémentés dans l'application Xpress, développée par l'entreprise FICO.

L'objectif de cette section est d'analyser les résultats obtenus pour les différents modèles développés dans ce mémoire et de les comparer au modèle de référence. Cette analyse vise à évaluer l'impact des différentes formulations du coût d'ouverture des centres de distribution sur les décisions de localisation et sur les bénéfices de la coopération horizontale.

4.1. Paramétrage des expériences

Une série d'expériences numériques a été réalisée afin d'évaluer les performances des différents modèles sur la coopération entre deux entreprises similaires en termes de taille et de caractéristiques de marché. Les expérimentations sont basées sur les mêmes structures de données que celles utilisées dans l'article de référence afin de garantir une comparaison cohérente des résultats obtenus (Hacardiaux & Tancrez, 2022).

Les expériences ont été réalisées sur **cinq cartes géographiques** (maps). Chaque carte représente une configuration différente du réseau logistique. L'utilisation de ces cinq maps permet de tester les modèles sur plusieurs répartitions spatiales et d'obtenir des résultats plus robustes qu'avec une seule configuration (Hacardiaux & Tancrez, 2022).

Soixante retailers ont été localisés de manière aléatoire sur un **rayon de 500km**. Les coordonnées des DC et des retailers ont été générées à l'aide de deux coordonnées (x, y) représentant leur position géographique conformément à l'article de référence (Hacardiaux & Tancrez, 2022). Ensuite, les **distances D_{dr}** ont été calculées à l'aide de la distance euclidienne

souvent utilisée pour des distances courtes (Baskar, 2021) : $D_{dr} = \sqrt{(x_r - x_d)^2 + (y_r - y_d)^2}$

où x_r et y_r représentent les coordonnées du retailer r , tandis que x_d et y_d représentent les coordonnées du centre de distribution d .

La **demande des retailers** a également été générée de manière aléatoire afin de reproduire différents profils. Une valeur entière comprise entre **50 et 250 unités** a été tirée pour chacun des retailers, chaque valeur ayant la même probabilité d'être sélectionnée. Cette approche permet de représenter une diversité de niveaux de demande au sein du réseau.

Les **délais d'approvisionnement** (lead times) présents dans les modèles sont calculés à partir des distances qui séparent les retailers et les DC avec une vitesse moyenne de **50km/h**. Les délais sont exprimés en nombre de périodes, une période correspondant dans cette étude à une semaine (168 heures) (Hacardiaux & Tancrez, 2022) : $LT = \frac{D_{dr}}{50.168}$ Afin de simplifier les expérimentations et de limiter le nombre de paramètres à calibrer, il a été supposé dans cette étude que ces deux délais sont identiques. Cette hypothèse permet de conserver une structure cohérente du modèle tout en réduisant sa complexité.

Comme expliqué dans les sections précédentes, l'objectif de cette étude est de déterminer les avantages de la collaboration horizontale entre différentes entreprises. Dans les modèles présentés, trois scénarios ont été étudiés :

- Scénario 1 (**SA1**) : entreprise 1 seule, il s'agit donc de la situation initiale sans collaboration ;
- Scénario 2 (**SA2**) : optimisation du réseau logistique de l'entreprise 2 de manière indépendante, également sans coopération ;
- Scénario 3 (**COOP**) : optimisation conjointe du réseau logistique des deux entreprises dans le cadre d'une coopération horizontale.

Les valeurs des différents paramètres ont été fixées comme indiqué dans la Table 4 ci-dessous.

Paramètre	Description	Valeur utilisée
R	Nombre de retailers	60
D	Nombre de centres de distribution potentiels	60
T	Coût de transport par véhicule	1€/km
V	Vitesse moyenne véhicule	50km/h
K_d^i	Coût fixe de commande	250€
$h_d^i = H_r^i$	Coût de possession (holding cost)	0,25€/item

Table 4 : Paramètres fixes utilisés dans les expérimentations

La **capacité des véhicules** C_{dr} constitue un paramètre important dans cette étude puisque l'amélioration du taux de remplissage représente l'un des principaux bénéfices attendus de la coopération horizontale. La quantité économique optimale Q_{dr}^* , utilisée pour déterminer cette capacité, a été définie dans la section 2.4.2 selon la formulation proposée par Hacardiaux et Tancrez (2022). Dans le cadre des expérimentations, le paramètre $Cap\%$ reprend le principe de l'article de référence. Pour chaque carte, les quantités économiques optimales Q_{dr}^* sont d'abord

calculées pour les deux premiers scénarios où les entreprises ne coopèrent pas. L'ensemble de ces valeurs est ensuite trié et $Cap\%$ détermine le percentile retenu de cette distribution. La capacité des véhicules est alors fixée à cette valeur et conservée identique pour les trois scénarios (SA1, SA2 et COOP). Une faible valeur de $Cap\%$ conduit à une capacité de véhicule plus restrictive, limitant les quantités pouvant être expédiées à chaque livraison. À l'inverse, une valeur élevée sélectionne une capacité plus importante ce qui réduit l'effet de cette contrainte, conformément à l'approche retenue par Hacardiaux & Tancrez (2022).

Les différentes valeurs des paramètres étudiés provoquent plusieurs **combinaisons expérimentales** permettant d'évaluer le comportement des différents modèles dans diverses configurations logistiques. Les différentes valeurs considérées dans cette étude sont présentes dans la Table 5 ci-dessous. À noter, les valeurs du paramètre F_d ont été réduites à 500, 1000 et 2000 afin d'analyser un coût total d'ouverture proche des valeurs choisies pour le modèle de référence.

Paramètre	Valeurs testées	Nombre de niveaux
Map	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5	5
Cap%	10% ; 40% ; 70% ; 100%	4
F_d	1000 ; 2000 ; 4000 ; 8000	4
Scénario	1(SA1) ; 2(SA2) ; 3(COOP)	3

Table 5 : Valeurs des paramètres expérimentaux étudiés

Les nouveaux modèles se distinguent également par l'introduction d'un paramètre spécifique associé au coût d'ouverture ($CInf$ pour les modèles basés sur le stock moyen et sur la racine carrée de la demande, et $COpe$ pour le modèle basé sur la fréquence des expéditions). Plutôt que de fixer directement ces paramètres, une procédure de calibration a été mise en place afin de garantir des comparaisons cohérentes avec le modèle de référence. Pour chaque combinaison de carte, de capacité des véhicules ($Cap\%$) et de coût fixe d'ouverture (F_d), deux instances de calibration sont d'abord résolues. Elles permettent de déterminer automatiquement la valeur du paramètre variable de manière à obtenir une part prédéfinie du coût fixe dans le coût total d'ouverture des centres de distribution. Cette part, appelée **part fixe (PF)**, correspond au rapport entre le coût fixe d'ouverture et le coût total d'ouverture (coût fixe + coût variable). Trois niveaux ont été retenus dans cette étude : **40%, 60% et 80%**.

Enfin, le **modèle à paliers** repose, contrairement aux trois extensions précédentes, sur des niveaux de capacité discrets. Quatre niveaux de capacité sont considérés, correspondant

respectivement à 1000, 2000, 4000 et 8000 unités. Les coûts d'ouverture associés sont présentés dans la Table 6 selon deux jeux de paramètres. Dans les deux cas, le coût augmente d'un facteur 1,5 entre deux paliers successifs tandis que la capacité double, ce qui permet de représenter des économies d'échelle. La seconde configuration conserve ainsi la même progression entre les paliers mais double les coûts d'ouverture du premier afin d'évaluer la sensibilité des résultats au niveau de ces coûts.

Palier	Capacité	Configuration de coût 1	Configuration de coût 2
1	1000	1000	2000
2	2000	1500	3000
3	4000	2250	4500
4	8000	3375	6750

Table 6 : Paramétrage des capacités et des coûts d'ouverture du modèle à paliers

Les valeurs retenues conduisent à un nombre de configurations différent selon les modèles. Le modèle de référence comprend 240 configurations ($5 \times 4 \times 4 \times 3$). Chacun des trois modèles intégrant une composante variable du coût d'ouverture comprend 540 configurations ($5 \times 4 \times 3 \times 3 \times 3$), soit 1 620 configurations au total. Enfin, chacune des deux analyses du modèle à paliers comporte 60 configurations ($5 \times 4 \times 3$) soit 120 configurations pour le modèle à paliers. Au total, **1 980 configurations expérimentales sont analysées**. Les instances de calibration nécessaires au calcul de *Cope* et *CInf* ne sont pas comptabilisées puisqu'elles constituent une étape préalable au paramétrage.

Afin de maintenir des temps de calcul raisonnables compte tenu du nombre important d'expériences, une limite temporelle a été imposée à chaque expérience. Pour le modèle de référence ainsi que les modèles basés sur le stock moyen, la fréquence des expéditions et la racine carrée de la demande, cette limite a été fixée à **300 secondes**. Les calculs sont interrompus lorsqu'un gap inférieur à **1%** est obtenu ou lorsque cette limite temporelle est atteinte. Pour le modèle par paliers de capacité, plus complexe en raison de l'ajout de variables binaires indexées par niveau de capacité, la limite a été portée à **900 secondes**. Un seuil de gap de **2%** a également été retenu pour limiter les temps de résolution.

Concernant la qualité des solutions, les gaps moyens restent globalement faibles pour les quatre premiers modèles, variant de 0,69% à 1,94%. Pour le modèle à paliers, ils atteignent respectivement 2,86% et 2,26% pour les deux configurations de coûts. Au total, l'ensemble des expérimentations représente environ 89 heures de calcul cumulées.

4.2. Indicateurs d'analyse

Afin d'évaluer les performances des différents modèles étudiés, deux indicateurs principaux sont analysés, conformément à l'article de référence (Hacardiaux & Tancrez, 2022). Ils correspondent à la valeur de synergie et au taux de chargement des véhicules. Ces indicateurs permettent d'évaluer les bénéfices économiques de la coopération horizontale ainsi que de la mutualisation des moyens de transport.

4.2.1. Valeur de synergie

La **synergie** mesure le gain économique obtenu grâce à la coopération entre les entreprises. Elle est calculée à partir des coûts totaux observés dans les scénarios sans coopération (SA1 et SA2) et dans le scénario coopératif (COOP) (Hacardiaux & Tancrez, 2022) :

$$Synergie = \frac{C_{SA1} + C_{SA2} - C_{COOP}}{C_{SA1} + C_{SA2}}$$

Où C_{SA1} et C_{SA2} représentent les coûts totaux des deux entreprises lorsqu'elles restent concurrentes. Tandis que C_{COOP} correspond au coût total obtenu dans le scénario coopératif.

Une valeur positive de synergie signifie que la coopération permet de réduire le coût global du réseau logistique.

4.2.2. Taux de chargement

Le taux de chargement (Loading Rate) permet d'évaluer le niveau d'utilisation de la capacité des véhicules. Dans ce mémoire, il est calculé comme le rapport entre la quantité totale transportée et la capacité totale des véhicules utilisés sur l'ensemble des liaisons :

$$Loading\ Rate = \frac{\sum_{d,r} Q_{dr} x_{dr}}{\sum_{d,r} C_{dr} x_{dr}}$$

Un taux de chargement élevé traduit une meilleure utilisation des capacités de transport et constitue l'un des bénéfices potentiels de la coopération horizontale comme expliqué dans les sections précédentes.

4.3. Résultats du modèle de référence

Avant de débiter les analyses des différentes extensions proposées dans ce mémoire, il est essentiel de vérifier que le modèle de référence reproduit un comportement cohérent avec celui présenté dans l'article de Hacardiaux et Tancrez (2022). Cette étape permet également d'avoir une base afin de réaliser des comparaisons avec les extensions.

Les résultats obtenus confirment l'existence d'un bénéfice économique associé à la coopération horizontale. Sur l'ensemble des configurations testées, la valeur moyenne de synergie atteint **30,19%** comme l'indique la Figure 1 ci-dessous.

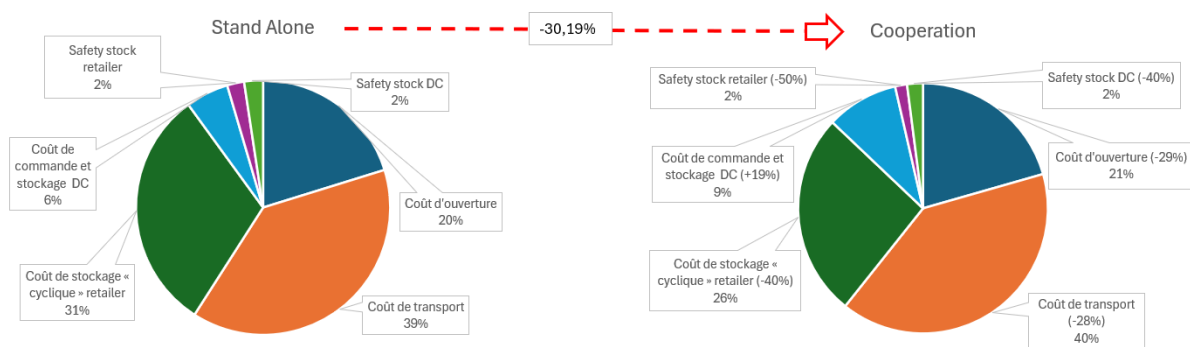


Figure 1 : Répartition des composantes du coût total moyen dans le modèle de référence

Les bénéfices observés proviennent principalement de trois composantes :

- Tout d'abord, les **coûts d'ouverture des centres de distribution** diminuent de 29%. Ce résultat est cohérent avec l'un des principes fondamentaux de la coopération horizontale à savoir le partage des infrastructures logistiques. Comme le montre la Table 7, le nombre moyen de centres ouverts dans le réseau des deux entreprises sans coopération ($NombredeDCStandAlone1 + NombredeDCStandAlone2$) passe de 4,38 dans les scénarios sans coopération à 3,10 dans le scénario coopératif ce qui traduit une mutualisation des infrastructures logistiques.
- Ensuite, les **coûts de transport** diminuent de 28%. Cette réduction met en évidence l'intérêt de la mutualisation des activités logistiques entre les entreprises partenaires. Cet effet est également illustré par la Table 7, le taux de chargement en coopération (76%) est supérieur qu'en situation de non coopération (66%).
- Enfin, les **coûts de stockage chez les retailers** diminuent quant à eux de 40 %. Cette réduction indique que la coopération permet de limiter les coûts liés aux stocks détenus en aval de la chaîne logistique.

À l'inverse, les **coûts de commande et de stockage** au niveau des DC augmentent de 19 %. Cette hausse s'explique par le fait que les entreprises utilisent des centres de distribution communs en coopération. Cela concentre davantage les flux dans certains DC ce qui augmente la demande agrégée traitée par les centres ouverts et peut donc accroître les coûts de commande et de stockage au niveau des DC. Toutefois, cette augmentation reste largement compensée par les économies réalisées sur les autres composantes du coût total.

Cap%	10	40	70	100	Moyenne TOTAL
Synergie	27,0%	30,3%	31,7%	32,2%	30,2%
Taux de chargement SA	88%	76%	60%	42%	66%
Taux de chargement COOP	92%	87%	77%	48%	76%
Nombre de DC SA	5,40	4,15	4,00	3,95	4,38
Nombre de DC COOP	4,10	2,95	2,75	2,60	3,10

Table 7 : Résultats selon Cap% du modèle de référence

La Table 7 présente l'**évolution des principaux indicateurs en fonction du paramètre Cap%**. La synergie s'améliore en passant de 27% à 32,2% lorsque Cap% augmente. Il s'agit d'un résultat semblable à l'article de référence de Hacardiaux et Tancrez (2022).

Le taux de chargement diminue progressivement dans les deux configurations (de 88% à 42% pour les entreprises seules et de 92% à 48% pour la coopération), ce phénomène est causé par un Cap% élevé. En effet, lorsque ce paramètre est faible, la capacité des camions est plus contrainte ce qui conduit à un taux de chargement proche de la capacité maximale.

Ensuite, **le nombre moyen de centres de distribution ouverts** est systématiquement plus faible en coopération. Il s'élève en moyenne à 3,10 contre 4,38 dans les scénarios sans coopération. Cet effet est lié à la mutualisation des infrastructures logistiques.

F_d	1000	2000	4000	8000	Moyenne TOTAL
Synergie	30,5%	30,8%	29,8%	30,1%	30,3%
Taux de chargement SA	60%	69%	73%	64%	67%
Taux de chargement COOP	65%	73%	81%	85%	76%
Nombre de DC SA	8,30	4,70	2,50	2,00	4,38
Nombre de DC COOP	5,50	3,60	2,05	1,25	3,10

Table 8 : Résultats selon F_d du modèle de référence

Une seconde analyse a été réalisée en fonction du coût fixe d'ouverture des DC F_d . Comme l'indique la Table 8, la synergie reste relativement stable lorsque F_d devient plus élevé autour de 30,3%. Ce résultat s'éloigne des conclusions de l'article de référence où la synergie était croissante (Hacardiaux & Tancrez, 2022). Une analyse plus détaillée a été réalisée en Table 9

afin d'identifier la non-monotonie lorsque $F_d = 4000$. Les gains liés au coût d'ouverture des DC sont plus faibles (18%) pour $F_d = 4000$ par rapport aux autres valeurs de ce paramètre ce qui peut expliquer une diminution de la synergie.

F_d	Gain ouverture	Gain transport	Gain stock retailers	Gain stock DC	Synergie
1000	32,1%	31,7%	39,6%	-16,5%	30,5%
2000	23,4%	32,3%	42,0%	-23,7%	30,8%
4000	18,0%	29,7%	41,5%	-26,7%	29,8%
8000	37,5%	20,9%	38,7%	-10,1%	30,1%

Table 9 : Analyse des bénéfices de la coopération des composantes de l'objectif (modèle de référence)

Le **taux de chargement** évolue également de manière régulière conformément à la Table 8. En situation stand-alone, il augmente jusqu'à $F_d = 4000$ avant de diminuer lorsque F_d atteint 8000. En coopération, il progresse plus nettement passant de 65% à 85%. Cette hausse s'explique par la concentration des flux dans un nombre plus réduit de DC lorsque le coût d'ouverture augmente.

Dans l'ensemble, le modèle de référence confirme donc l'intérêt économique de la coopération horizontale. Les résultats obtenus sont cohérents avec les mécanismes identifiés dans l'article de référence (Hacardiaux & Tancrez, 2022). Ce modèle constitue ainsi une base de comparaison pertinente pour analyser ensuite l'impact des différentes formulations de coûts d'ouverture variables.

4.4. Résultats du modèle en fonction du stock moyen

Cette section permet d'illustrer les résultats obtenus lors des analyses du modèle basé sur le stock moyen. La Figure 2 présente la répartition obtenue des différentes composantes de coût du modèle basé sur le stock moyen comme illustré précédemment en section 3.1.

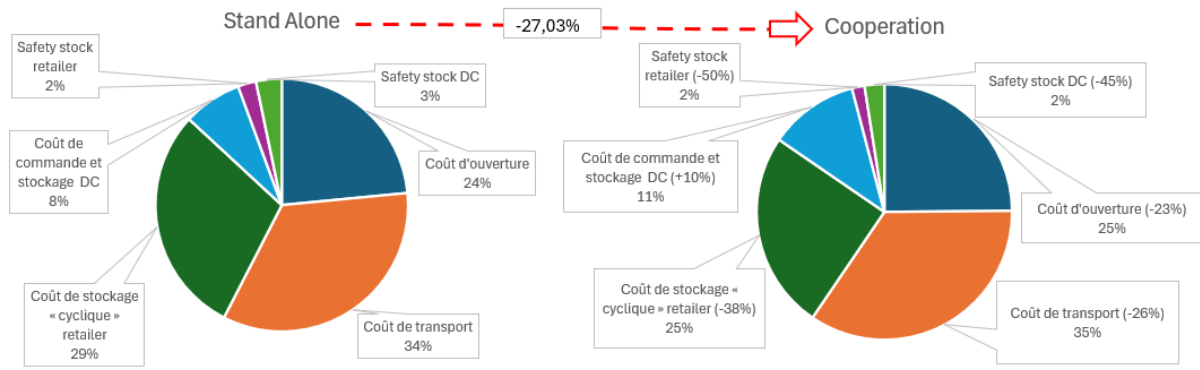


Figure 2 : Répartition des composantes du coût total moyen dans le modèle basé sur le stock moyen

La valeur moyenne de synergie atteint 27,03% soit une valeur légèrement plus faible que celle observée dans le modèle de référence (30,19%). Cependant, les bénéfices associés à la coopération horizontale restent du même ordre de grandeur malgré l'introduction d'une composante variable basée sur le stock moyen.

La **structure des coûts** demeure également très proche de celle observée dans le modèle de référence. Les principales sources d'économies proviennent toujours des coûts d'ouverture des centres de distribution, des coûts de transport et des coûts de stockage chez les retailers.

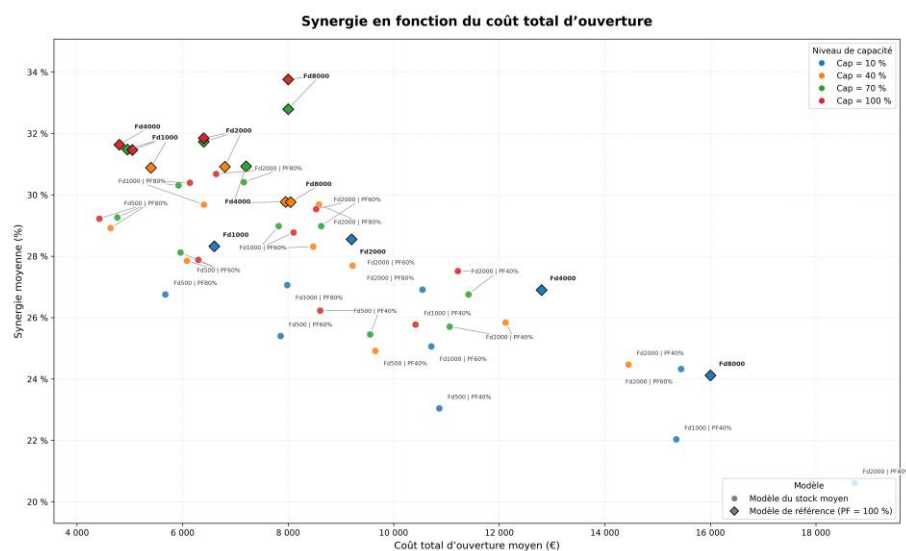


Figure 3 : Synergie en fonction du coût total d'ouverture de DC (modèle de référence et stock moyen)

Une seconde analyse a été réalisée afin d'évaluer plus précisément **l'impact de l'introduction d'une composante variable** dans le coût d'ouverture. La Figure 3 compare, pour un même niveau de capacité, le modèle de référence et le modèle du stock moyen lorsque leurs coûts totaux d'ouverture sont similaires. Si seul le montant total du coût d'ouverture influençait les résultats, les deux modèles devraient produire des niveaux de synergie comparables. Les résultats montrent toutefois que ce n'est pas systématiquement le cas.

Un premier exemple, pour un Cap% de 40%, est illustré par la Table 10. Elle permet de comparer différentes configurations présentant des coûts totaux d'ouverture relativement proches. Le modèle de référence avec un coût d'ouverture fixe $F_d = 4000$ présente un coût total d'ouverture de 8000. Il est comparé aux configurations $F_d = 1000$ -PF60% et $F_d = 500$ -PF40% du modèle basé sur le stock moyen dont les coûts totaux d'ouverture atteignent respectivement 8475 et 9652. La première configuration présente ainsi un coût d'ouverture proche de celui du modèle de référence tandis que la seconde permet d'observer les effets d'une composante variable plus importante.

Concernant la synergie, celle-ci évolue avec l'introduction de la composante variable. Elle diminue de 5% lorsque la partie variable représente 40% du coût d'ouverture, puis de 16% lorsqu'elle atteint 60%, comme l'illustre la Table 10. L'écart devient ainsi plus marqué lorsque la composante variable occupe une place plus importante dans la structure du coût d'ouverture.

Configuration	Part variable du coût d'ouverture	Δ Coût d'ouverture total	Δ Nombre de DC	Δ Transport	Δ Taux de chargement	Δ Synergie
Référence – $F_d 4000$	0%	-	-	-	-	-
$F_d 2000$, PF60%	40%	6%	2	-32%	-10%	-5%
$F_d 500$, PF40%	60%	21%	3,2	-38%	-14%	-16%

Table 10 : Effet de l'introduction d'un coût variable d'ouverture pour Cap% = 40% (modèle stock moyen)

Les **modifications apportées au coût d'ouverture changent le comportement du modèle**. Lorsque la composante variable liée au stock moyen prend davantage d'importance, la concentration d'un stock élevé dans un nombre limité de centres de distribution devient plus coûteuse. Le modèle peut alors privilégier une répartition des flux et des stocks entre davantage de DC afin de limiter le stock moyen supporté par chaque entrepôt.

Cette évolution apparaît dans le nombre de DC ouverts, en moyenne 2 DC sont ouverts contre 4 DC lorsque la partie variable représente 40% du coût d'ouverture et 5,2 DC lorsqu'elle atteint 60%. Cette décentralisation s'accompagne d'une diminution du coût de transport de respectivement 32% et 38% par rapport au modèle de référence. En parallèle, le taux moyen de

chargement des camions diminue de 10% puis de 14%. La multiplication des DC permet ainsi de rapprocher les infrastructures des retailers desservis et de réduire les distances de transport mais répartit les flux entre davantage de centres.

Afin d'illustrer plus concrètement les modifications apportées à la structure du réseau, la Figure 4 compare, pour la Map 1 et un Cap% de 40%, le modèle de référence avec $F_d = 2000$ au modèle basé sur le stock moyen avec $F_d = 500$ et une part fixe de 60%. Le modèle de référence concentre davantage les affectations autour d'un nombre limité de centres. À l'inverse, l'introduction d'une composante liée au stock moyen conduit à répartir les retailers entre davantage de DC.

Cette réorganisation correspond à l'objectif de la composante variable introduite dans le coût d'ouverture. En effet, le modèle stock moyen fait dépendre ce coût de la quantité moyenne de stock supportée par le centre. Le modèle dispose donc d'une incitation à limiter la concentration du stock dans un même DC afin de réduire la composante variable du coût d'ouverture.

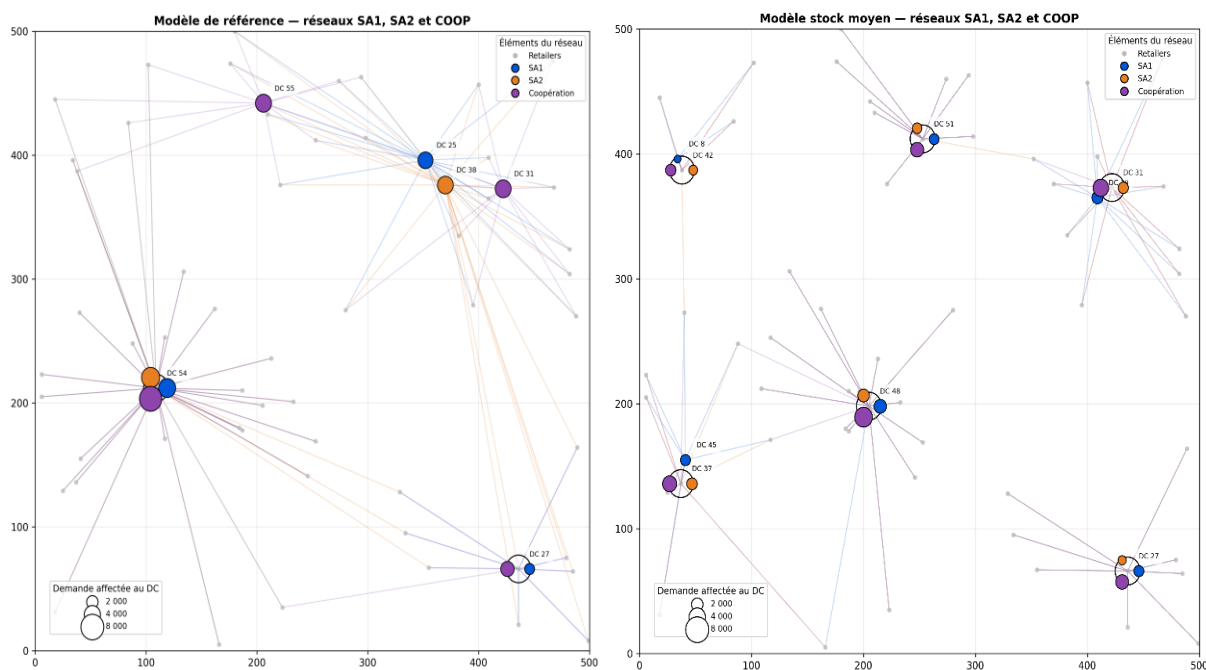


Figure 4 : Comparaison des réseaux du modèle de référence et du modèle stock moyen (Cap% = 40%)

Dans l'ensemble, l'introduction d'une composante variable basée sur le stock moyen modifie donc la structure du réseau en favorisant une plus grande décentralisation. En effet, le modèle répartit les stocks entre davantage de DC afin de limiter le coût variable supporté par chaque infrastructure. Cette réorganisation réduit les coûts de transport mais diminue également le taux de chargement des véhicules. Dans les configurations étudiées, elle s'accompagne finalement d'une diminution de la synergie par rapport au modèle de référence.

4.5. Résultats du modèle basé sur la fréquence d'expédition

Cette section analyse les effets de l'introduction d'une composante variable basée sur la fréquence des expéditions dans le coût d'ouverture des centres de distribution. La Figure 5 présente la répartition des différentes composantes du coût total moyen du modèle basé sur la fréquence d'expédition comme présenté à la section 3.2. La valeur moyenne de synergie atteint 28,55% soit une valeur légèrement inférieure à celle observée pour le modèle de référence (30,19%). Cependant, les bénéfices associés à la coopération horizontale restent du même ordre de grandeur malgré l'introduction d'une composante variable liée à la fréquence des expéditions.

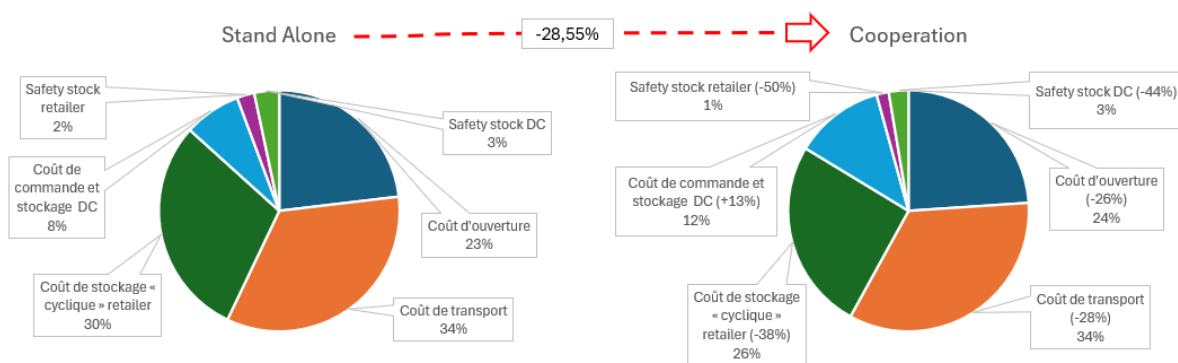


Figure 5 : Répartition des composantes du coût total moyen dans le modèle basé sur la fréquence des expéditions

La structure des coûts demeure également très proche de celle observée dans le modèle de référence. Les principales sources d'économies proviennent toujours des coûts d'ouverture des centres de distribution, des coûts de transport et des coûts de stockage chez les retailers.

Une seconde analyse a été réalisée afin d'évaluer **l'impact de l'introduction d'une composante variable du coût d'ouverture basée sur la fréquence des expéditions**. Cette analyse vise à mettre en évidence les effets de cette nouvelle variable sur la structure du réseau logistique et sur la synergie obtenue en coopération.

La Figure 6 met en relation la synergie moyenne et le coût total d'ouverture pour les différentes configurations du modèle basé sur la fréquence des expéditions et du modèle de référence. Les résultats montrent que des configurations présentant des coûts totaux d'ouverture proches peuvent conduire à des niveaux de synergie différents.

De plus, une tendance à la diminution de la synergie lorsque le coût total d'ouverture augmente apparaît principalement pour les niveaux de capacité les plus contraignants. À l'inverse, pour les Cap% de 70% et 100%, les variations sont plus limitées. L'évolution de la synergie semble donc également dépendre du niveau de capacité considéré.

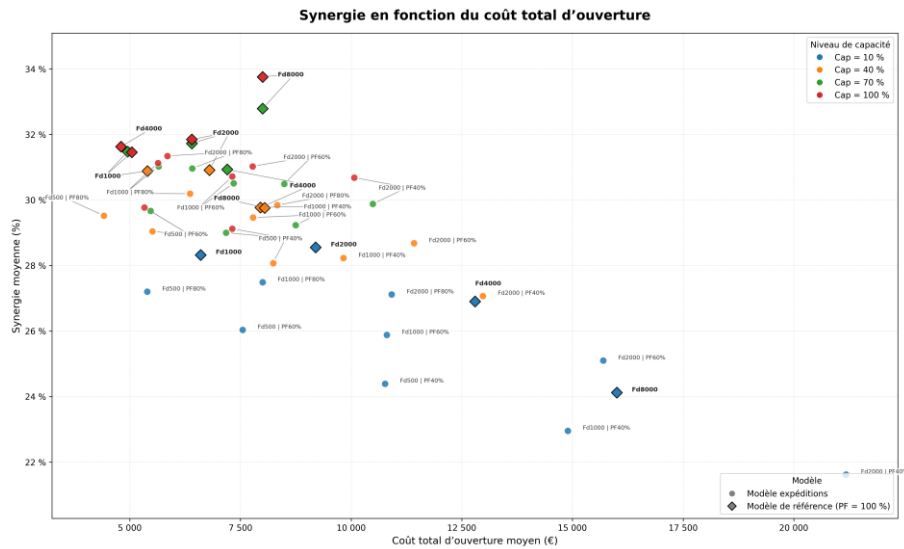


Figure 6 : Synergie en fonction du coût total d'ouverture de DC (modèle de référence et fréquence d'expédition)

Comme l'indique la Table 11, la comparaison porte sur un Cap% de 40%. Le modèle de référence ($F_d = 4000$) présente un coût total d'ouverture de 8000€. Deux configurations du modèle basé sur la fréquence des expéditions sont retenues en raison de coûts totaux d'ouverture très proches : $F_d = 1000$ avec une part fixe cible de 60% (7784€) et $F_d = 500$ avec une part fixe cible de 40% (8238€). Les écarts par rapport au modèle de référence ne sont ainsi que de respectivement -3% et $+3\%$, ce qui permet de comparer les configurations pour des niveaux de coût d'ouverture similaires.

Malgré cette proximité, la **structure du réseau évolue sensiblement**. Le nombre moyen de centres de distribution ouverts passe de 2 dans le modèle de référence à 4 lorsque la part fixe cible est de 60%, puis à 5,2 lorsqu'elle atteint 40%. Cette décentralisation s'accompagne d'une diminution du coût de transport de respectivement 32% et 41%. En parallèle, le taux moyen de chargement des camions passe de 91% à 82% puis à 78% traduisant une consolidation moindre des flux lorsque les expéditions sont réparties entre davantage de centres de distribution.

Configuration	Part variable du coût d'ouverture	Δ Coût d'ouverture total	Δ Nombre de DC	Δ Transport	Δ Taux de chargement	Δ Synergie
Référence – $F_d 4000$	0%	-	-	-	-	-
$F_d 1000$, PF60%	40%	-3%	2	-32%	-9%	-1%
$F_d 500$, PF40%	60%	3%	3,2	-41%	-15%	-6%

Table 11 : Effet de l'introduction d'un coût variable d'ouverture pour Cap% = 40% (modèle fréquence d'expédition)

L'introduction de la composante variable basée sur la fréquence des expéditions modifie ainsi les arbitrages du modèle en intégrant le nombre de livraisons nécessaires pour satisfaire la

demande dans le coût d'ouverture. Le terme $\frac{\lambda_r^i}{Q_{dr}}$ pénalise les affectations associées à une fréquence d'expédition plus élevée et incite, toutes choses égales par ailleurs, à limiter le nombre de livraisons. Les résultats montrent ainsi une réorganisation importante du réseau, caractérisée par davantage de DC, des coûts de transport plus faibles et une moindre consolidation des flux. Malgré ces modifications, la synergie reste relativement proche de celle du modèle de référence.

La Figure 7 illustre les différences de structure obtenues pour la Map 1 et un Cap% de 40%. La comparaison se fait sur le modèle de référence avec $F_d = 2000$ et sur le modèle basé sur la fréquence des expéditions avec $F_d = 1000$ et une part fixe cible de 60%. Dans le premier modèle, les affectations sont davantage concentrées autour d'un nombre limité de centres de distribution. Dans le second, le réseau est plus décentralisé avec davantage de DC et une répartition différente des retailers dans les scénarios SA1, SA2 et coopératif.

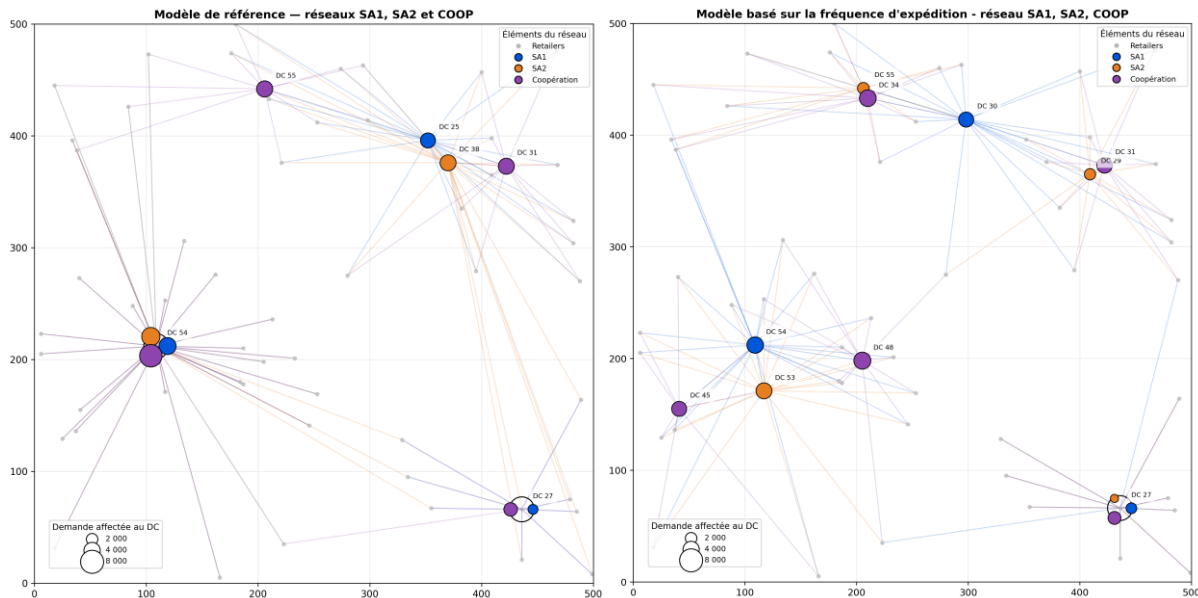


Figure 7 : Comparaison des réseaux du modèle de référence et du modèle fréquence d'expédition (Cap% = 40%)

Cette représentation montre ainsi que la prise en compte de la fréquence des expéditions modifie les décisions de localisation et d'affectation. En intégrant le nombre de livraisons dans le coût d'ouverture, le modèle tient désormais compte de cette dimension opérationnelle lors de la recherche de la solution optimale. Les choix observés résultent néanmoins d'un arbitrage avec les autres coûts du modèle comme les coûts de transport, de stockage et d'ouverture fixe. Malgré cette réorganisation du réseau, les résultats précédents montrent que les gains liés à la coopération horizontale restent proches de ceux obtenus avec le modèle de référence.

4.6. Résultats du modèle basé sur la racine carrée

Cette section analyse les effets de l'introduction d'une composante variable basée sur la racine carrée de la demande. La Figure 8 présente la répartition des différentes composantes de coût obtenues concernant ce modèle. La valeur moyenne de synergie atteint 28,55% soit une valeur proche de celle observée pour le modèle de référence (30,19%). Les bénéfices associés à la coopération horizontale restent donc du même ordre de grandeur malgré l'introduction d'une composante variable basée sur la demande agrégée desservie par les DC.

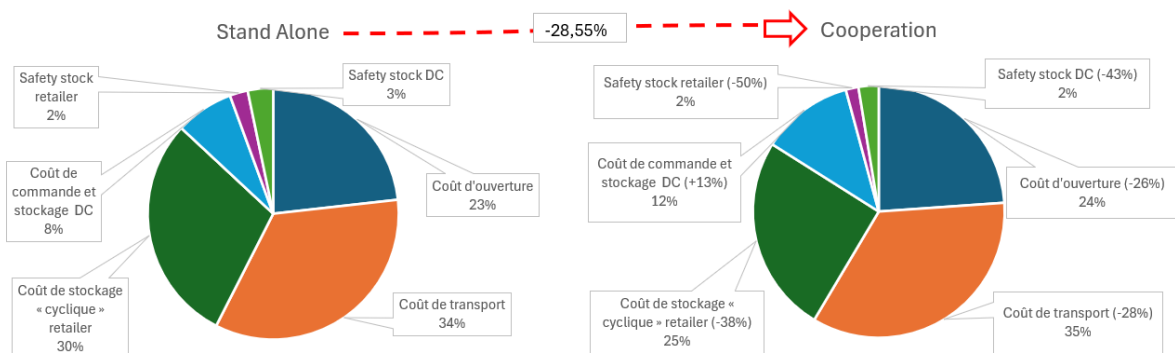


Figure 8 : Répartition des composantes du coût total moyen dans le modèle basé sur la racine carrée

La structure des coûts demeure également très proche de celle observée dans le modèle de référence. Les principales sources d'économies proviennent toujours des coûts d'ouverture des centres de distribution, des coûts de transport et des coûts de stockage chez les détaillants.

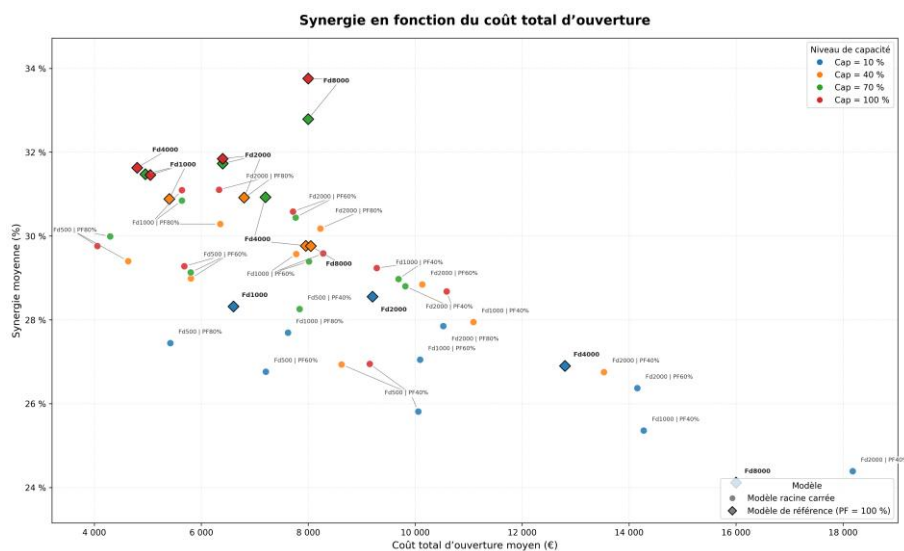


Figure 9 : Synergie en fonction du coût total d'ouverture de DC (modèle de référence et racine carrée de la demande)

La Figure 9 permet d'examiner plus précisément l'évolution de la synergie en fonction du coût total d'ouverture. Les niveaux de synergie les plus élevés sont principalement observés pour

des coûts d'ouverture relativement faibles tandis qu'une tendance à la diminution apparaît lorsque ceux-ci augmentent. Cette relation est particulièrement visible pour un $Cap\%$ de 10% où la synergie atteint ses valeurs les plus faibles lorsque les coûts d'ouverture sont élevés.

La Table 12 compare le modèle de référence et le modèle basé sur la racine carrée de la demande pour un $Cap\%$ de 40%. Le modèle de référence avec $F_d = 4000$ présente un coût total d'ouverture de 8000€. Deux configurations du modèle basé sur la racine carrée de la demande sont retenues en raison de leurs coûts d'ouverture relativement proches : $F_d = 1000$ avec une part fixe de 60% (7773€) et $F_d = 500$ avec une part fixe de 40% (8622€).

Malgré des coûts d'ouverture comparables, **la structure du réseau évolue**. Le nombre moyen de DC ouverts passe de 2 dans le modèle de référence à 4 pour une part fixe de 60%, puis à 5,4 pour une part fixe de 40%. Cette décentralisation s'accompagne d'une diminution des coûts de transport de respectivement 31% et 38%. En parallèle, le taux moyen de chargement des camions diminue de 91% à 81% puis à 77% traduisant une moindre consolidation des flux lorsque ceux-ci sont répartis entre davantage de centres de distribution.

Configuration	Part variable du coût d'ouverture	Δ Coût d'ouverture total	Δ Nombre de DC	Δ Transport	Δ Taux de chargement	Δ Synergie
Référence – $F_d 4000$	0%	-	-	-	-	-
$F_d 500$, PF40%	60%	8%	3,40	-38%	-15%	-10%
$F_d 1000$, PF60%	40%	-3%	2,00	-31%	-10%	-1%

Table 12 : Effet de l'introduction d'un coût variable d'ouverture pour $Cap\% = 40\%$ (modèle racine carrée)

Ces résultats montrent que la diminution de la composante fixe du coût d'ouverture joue un rôle important dans la structure obtenue. Lorsque F_d passe de 4000 à 1000 puis à 500, l'ouverture d'un centre supplémentaire devient moins coûteuse. Cela permet au modèle d'ouvrir davantage de DC et de réduire les coûts de transport. La composante variable basée sur la racine carrée de la demande exerce toutefois un effet opposé puisque sa concavité favorise les économies d'échelle. Lorsque le poids de cette composante augmente (part fixe cible de 10%), le modèle tend à ouvrir un nombre plus restreint de centres de distribution (voir [Annexe G](#)). Dans les configurations observées, cet effet ne suffit cependant pas à compenser l'incitation à la décentralisation liée à la diminution de F_d .

Enfin, la **synergie reste quasiment inchangée** pour une part fixe de 60% avec une diminution de seulement 1% par rapport au modèle de référence. Lorsque celle-ci atteint 40%, la diminution devient plus importante et atteint 10%.

La Figure 10 illustre les modifications de la structure du réseau pour la Map 1 et un Cap% de 40 %. Le modèle de référence, caractérisé par $F_d = 2000$, est comparé au modèle basé sur la racine carrée de la demande avec $F_d = 1000$ et une part fixe de 60%. Ces configurations sont retenues afin de comparer les structures de réseau pour des coûts totaux d'ouverture relativement proches.

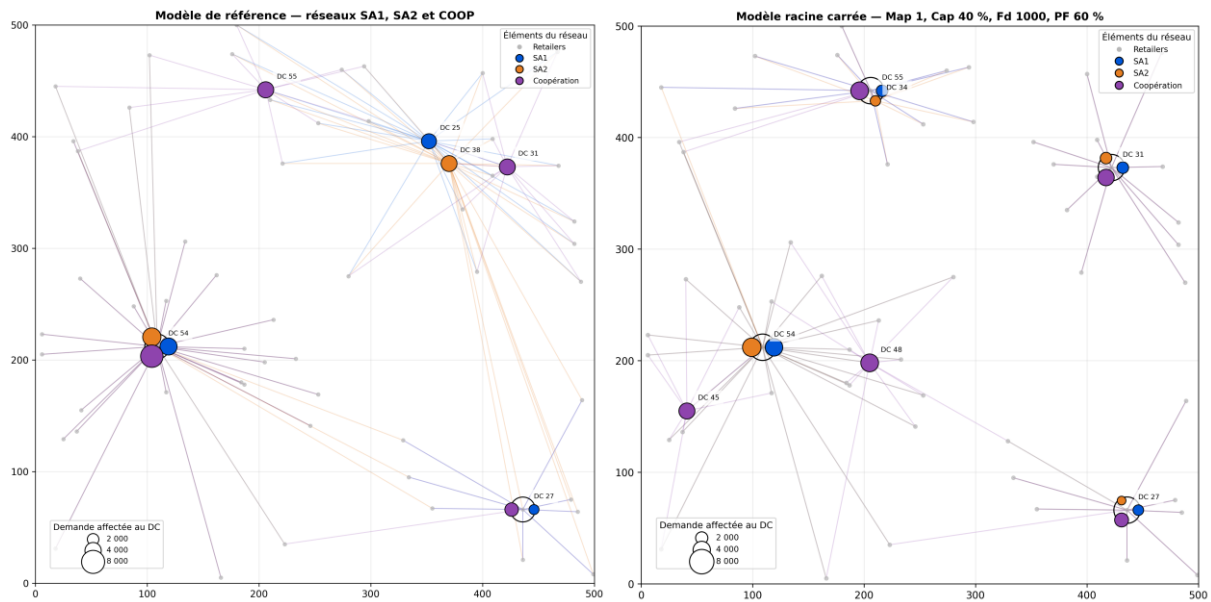


Figure 10 : Comparaison des réseaux du modèle de référence et du modèle racine carrée (Cap% = 40%)

La représentation confirme visuellement la décentralisation observée précédemment. Cette évolution apparaît dans les trois scénarios. Pour SA1 et SA2, le modèle basé sur la racine carrée conduit à l'utilisation d'un plus grand nombre de DC et à une redistribution des détaillants entre ceux-ci. Les localisations retenues sont également modifiées, certains groupes de détaillants étant desservis par de nouveaux centres. Dans le scénario coopératif, le nombre de DC passe de quatre dans le modèle de référence à cinq dans le modèle basé sur la racine carrée. Les affectations sont également réorganisées. Cela montre que l'évolution ne se limite pas à l'ouverture d'un centre supplémentaire mais concerne plus largement la structure spatiale du réseau.

Dans l'ensemble, le modèle basé sur la racine carrée de la demande montre ainsi que l'introduction d'une composante variable concave modifie sensiblement la structure du réseau sans remettre en cause les bénéfices de la coopération horizontale. La synergie reste globalement proche de celle du modèle de référence tandis que les décisions de localisation et d'affectation des détaillants peuvent être davantage modifiées.

4.7. Résultats basés sur le modèle à paliers de capacité

Cette section analyse les effets de l'introduction de niveaux de capacité discrets dans le coût d'ouverture des centres de distribution. L'objectif est d'évaluer l'influence de cette formulation sur les bénéfices de la coopération horizontale ainsi que sur la structure du réseau logistique.

La Figure 11 présente la répartition des différentes composantes de coût obtenues avec le modèle à paliers de capacité. Contrairement aux trois extensions précédentes, cette formulation repose sur des niveaux de capacité discrets selon le paramétrage présenté dans la section précédente. La synergie moyenne atteint 24,92% contre 30,19% pour le modèle de référence. Les bénéfices associés à la coopération horizontale restent donc présents mais apparaissent plus faibles lorsque les décisions d'ouverture sont soumises à des choix discrets de capacité.

La structure des coûts demeure également très proche de celle observée dans le modèle de référence. Les principales sources d'économies proviennent toujours des coûts d'ouverture des centres de distribution, des coûts de transport et des coûts de stockage chez les retailers.

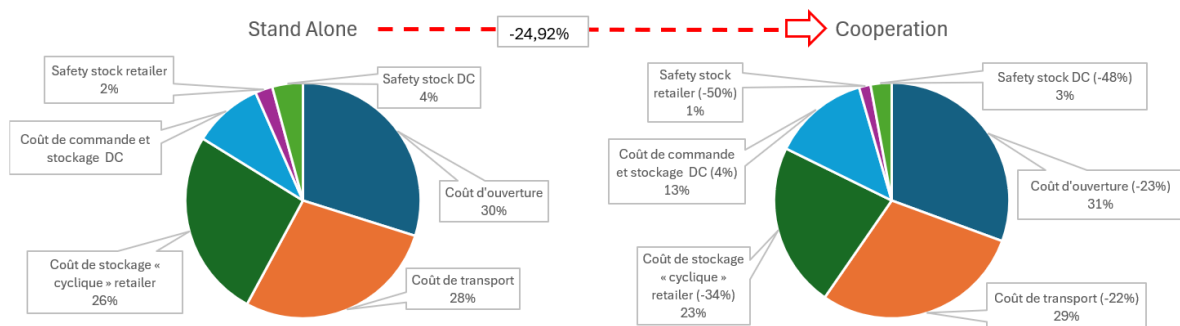


Figure 11 : Répartition des composantes du coût total moyen dans le modèle à paliers de capacité

La Table 13 présente l'évolution des principaux indicateurs en fonction du paramètre *Cap%*. La **synergie augmente de manière progressive** passant de 22,4% pour un *Cap%* de 10% à 26,4% pour un *Cap%* de 100%. Les bénéfices associés à la coopération apparaissent donc plus limités lorsque la capacité des véhicules est fortement contrainte.

Le **taux de chargement diminue** lorsque *Cap%* augmente, aussi bien dans les scénarios sans coopération que dans le scénario coopératif. Il passe respectivement de 77% à 26% et de 84% à 37%. Cette évolution est cohérente avec les observations réalisées dans les autres modèles. Le taux de chargement reste par ailleurs systématiquement supérieur en coopération, traduisant une meilleure consolidation des flux.

Cap%	10	40	70	100	Moyenne TOTAL
Synergie	22,4%	25,1%	25,8%	26,4%	24,9%
Taux de chargement SA	77%	59%	46%	26%	52%
Taux de chargement COOP	84%	76%	64%	37%	65%
Nombre de DC SA capacité 1000	5,80	3,60	2,60	3,40	3,85
Nombre de DC SA capacité 2000	5,80	5,40	5,60	4,80	5,40
Nombre de DC SA capacité 4000	0,60	1,20	1,20	1,60	1,15
Nombre de DC SA capacité 8000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL SA	12,20	10,20	9,40	9,80	10,40
Nombre de DC COOP capacité 1000	1,60	0,40	0,00	0,00	0,50
Nombre de DC COOP capacité 2000	4,20	1,80	2,60	2,20	2,70
Nombre de DC COOP capacité 4000	1,60	2,60	1,40	2,00	1,90
Nombre de DC COOP capacité 8000	0,40	0,60	1,00	0,80	0,70
TOTAL COOP	7,80	5,40	5,00	5,00	5,80

Table 13 : Résultats du modèle à paliers – première configuration de coûts

L'analyse du nombre de DC ouverts apporte un éclairage complémentaire sur ces résultats. En moyenne, 10,40 centres sont ouverts dans les scénarios sans coopération contre 5,80 dans le scénario coopératif. De la même manière que dans le modèle de référence, la coopération permet donc de réduire le nombre d'infrastructures utilisées.

L'étude des niveaux de capacité montre toutefois que cette réduction s'accompagne d'une **modification du dimensionnement des DC ouverts**. En Stand Alone, les capacités 1000 et 2000 représentent environ 89% des centres ouverts, tandis qu'elles n'en représentent plus qu'environ 55% en coopération. À l'inverse, les capacités de 4000 et 8000 sont davantage mobilisées dans le scénario coopératif. Le palier de 8000 unités n'est d'ailleurs jamais sélectionné en Stand Alone alors qu'il apparaît en coopération.

Cette structure se distingue toutefois nettement de celle du modèle de référence, qui ouvre en moyenne seulement 4,38 DC en Stand Alone et 3,10 DC en coopération. Le recours à des capacités discrètes semble ainsi favoriser l'ouverture d'un plus grand nombre d'infrastructures, notamment de petite capacité. Afin d'examiner dans quelle mesure ce résultat dépend du niveau des coûts associés aux différents paliers, les résultats obtenus avec la seconde configuration de coûts présentée précédemment sont également analysés.

La Table 14 présente les résultats obtenus avec la seconde configuration de coûts. La synergie reste très proche de celle observée avec la première configuration, avec une moyenne de 24,5% contre 24,9%. La modification du niveau des coûts associés aux paliers influence donc peu les bénéfices relatifs de la coopération.

En revanche, la **structure du réseau évolue davantage**. Le nombre moyen de DC diminue de 10,40 à 6,45 en Stand Alone et de 5,80 à 3,60 en coopération. Ces valeurs se rapprochent de celles du modèle de référence qui ouvre respectivement 4,38 et 3,10 DC en moyenne. Ce rapprochement peut notamment s'expliquer par l'augmentation des coûts des différents paliers dont les niveaux deviennent plus comparables aux coûts fixes d'ouverture considérés dans le modèle de référence. L'ouverture de plusieurs centres de petite capacité devient alors moins avantageuse conduisant à une plus grande concentration du réseau et à un recours accru aux capacités supérieures.

Cap%	10	40	70	100	Moyenne TOTAL
Synergie	22,0%	25,2%	24,7%	26,1%	24,5%
Taux de chargement SA	85%	69%	56%	33%	61%
Taux de chargement COOP	91%	85%	74%	44%	73%
Nombre de DC SA capacité 1000	1,80	1,40	1,40	1,40	1,50
Nombre de DC SA capacité 2000	4,00	2,20	1,80	1,00	2,25
Nombre de DC SA capacité 4000	2,20	2,40	2,20	2,20	2,25
Nombre de DC SA capacité 8000	0,00	0,40	0,60	0,80	0,45
TOTAL SA	8,00	6,40	6,00	5,40	6,45
Nombre de DC COOP capacité 1000	0,00	0,00	0,20	0,20	0,10
Nombre de DC COOP capacité 2000	1,60	0,80	0,20	0,60	0,80
Nombre de DC COOP capacité 4000	2,20	1,00	1,00	0,60	1,20
Nombre de DC COOP capacité 8000	0,80	1,60	1,80	1,80	1,50
TOTAL COOP	4,60	3,40	3,20	3,20	3,60

Table 14 : Résultats du modèle à paliers – seconde configuration de coûts

L'analyse de sensibilité montre ainsi que le nombre et le dimensionnement des DC sont fortement influencés par le niveau des coûts attribués aux différents paliers.

La Figure 12 permet d'illustrer ces différences dans la configuration du réseau pour la Map 1 et un Cap% de 40%. Le modèle à paliers, basé sur la seconde configuration de coûts, est comparé au modèle de référence avec un coût fixe d'ouverture $F_d = 2000$.

Une première comparaison peut être effectuée pour le scénario coopératif. Le modèle de référence concentre les flux autour de quatre centres de distribution tandis que le modèle à paliers les regroupe sur trois infrastructures. Parmi celles-ci, deux utilisent une capacité de 8000 unités et la troisième une capacité de 4000 unités. La coopération permet ainsi de concentrer davantage la demande sur des centres de plus grande capacité afin de bénéficier des économies d'échelle associées aux paliers.

À l'inverse, les scénarios Stand Alone présentent une utilisation différente des capacités. La demande étant plus faible pour chaque entreprise en l'absence de coopération, le recours à des centres de très grande capacité est moins pertinent. Le modèle privilégie alors l'ouverture d'un plus grand nombre de centres de capacité plus réduite ce qui permet de maintenir une proximité entre les retailers et les centres de distribution et de limiter les coûts de transport.

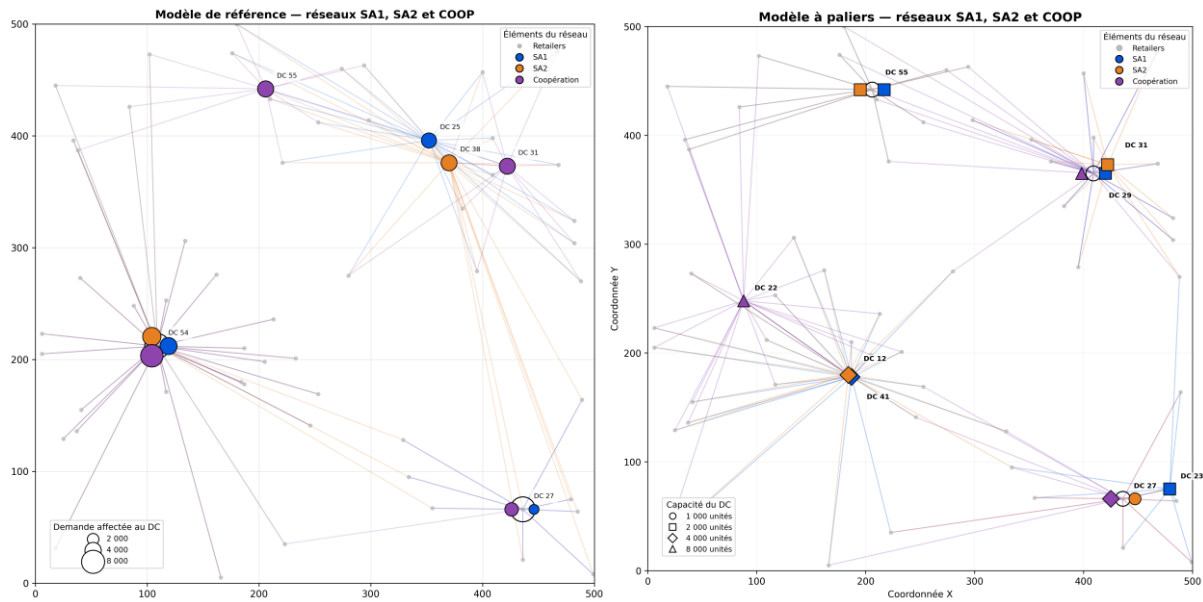


Figure 12 : Comparaison des réseaux du modèle de référence et du modèle à paliers – seconde configuration de coûts ($Cap\% = 40\%$)

5. Conclusion

Ce mémoire avait pour objectif d'analyser l'impact d'une modélisation plus réaliste des coûts d'ouverture des centres de distribution dans un contexte de coopération horizontale. Le modèle proposé par Hacardiaux et Tancrez (2022) suppose que tous les centres de distribution ont le même coût d'ouverture. Pourtant, cette hypothèse est rarement vérifiée en pratique. L'objectif était donc d'évaluer dans quelle mesure une représentation comportant un coût variable pouvait influencer les décisions de localisation, les coûts logistiques et la synergie.

Pour répondre à cette problématique, quatre extensions du modèle de référence ont été développées et implémentées. Le premier modèle intègre un coût d'ouverture dépendant du stock moyen détenu dans chaque centre de distribution. Le deuxième fait varier ce coût selon la fréquence des expéditions reflétant ainsi le niveau d'activité des infrastructures. Le troisième relie le coût d'ouverture à la racine carrée de la demande desservie. Enfin, le quatrième modèle introduit des paliers de capacité avec des tailles d'entrepôt différentes.

Les résultats obtenus montrent qu'une modélisation plus réaliste des coûts d'ouverture influence les décisions d'optimisation du réseau logistique. Les modèles basés sur le stock moyen, la fréquence des expéditions et la racine carrée de la demande conduisent à des performances proches de celles du modèle de référence malgré certaines modifications de la structure du réseau. À l'inverse, le modèle à paliers entraîne des changements plus importants dans les décisions de localisation et le dimensionnement des centres de distribution ce qui réduit davantage les synergies. Ces résultats montrent ainsi qu'une représentation plus réaliste des coûts d'ouverture permet d'enrichir le modèle de référence sans remettre en cause l'intérêt de la coopération horizontale.

Ce travail présente néanmoins certaines limites. Les analyses reposent sur des instances générées aléatoirement ainsi que sur plusieurs hypothèses simplificatrices concernant la demande, les coûts logistiques et les capacités des centres de distribution. En outre, d'autres facteurs susceptibles d'influencer les coûts d'ouverture, tels que les coûts de main-d'œuvre ou certaines contraintes opérationnelles, n'ont pas été pris en compte.

Malgré ces limites, ce mémoire montre qu'une modélisation plus réaliste des coûts d'ouverture permet d'enrichir les modèles de conception de réseaux logistiques sans remettre en cause l'intérêt de la coopération horizontale.

6. Annexes

Annexe A - Illustration d'une fonction de coût en forme de S inversé

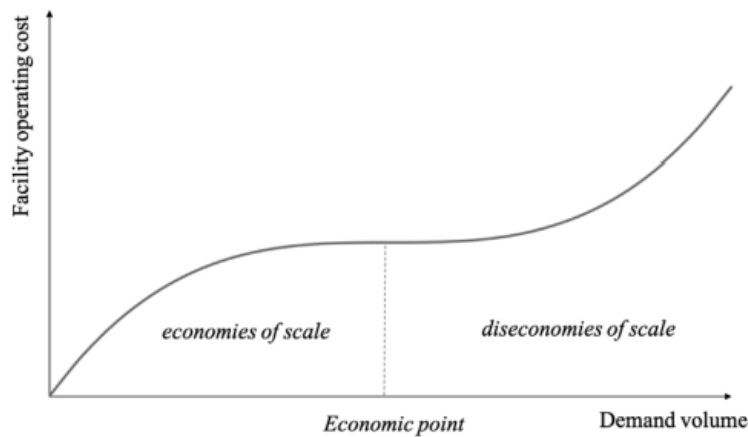


Fig. 1. An illustrative example of inverse S-shaped cost function.

Figure 13 : Illustration de la fonction de coût en S inversé représentant les économies et les déséconomies d'échelle.

Source : Li, Y., Lin, X., & Shu, J. (2023). Joint location–inventory problem with economies and diseconomies of scale in facility operating cost. Computers & Industrial Engineering.

Annexe B – Bénéfices provoqués par la coopération horizontale

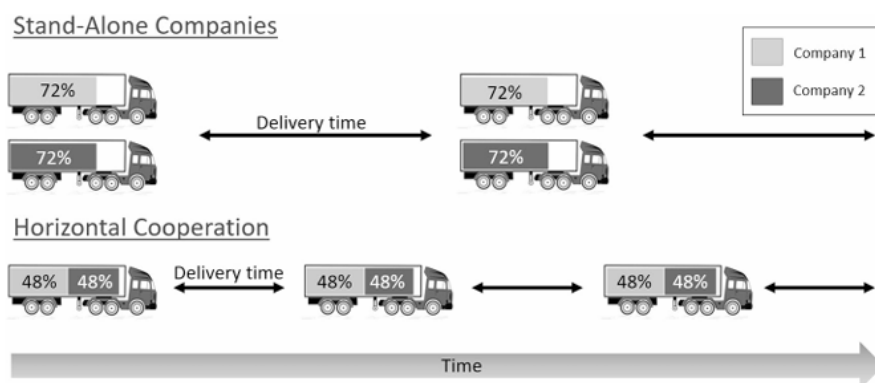


Fig. 1 Illustration of the delivery schedule to a retailer by two independent companies, and by the joint supply network when they are cooperating

Figure 14 : Illustration des bénéfices de la coopération horizontale sur les tournées de livraison.

Source : Hacardiaux, T., & Tancrez, J.-S. (2022). Assessing the benefits of horizontal cooperation for the various stages of the supply chain. Operational Research, 22(4), 3901-3924.

Annexe C – Modèle complet - coût d'ouverture basé sur le stock moyen

Ensemble	Taille	Description
$S_D = \{1, \dots, D\}$	$D = n_D$	L'ensemble des DC, indexé par d .
$S_R = \{1, \dots, R\}$	$R = n_R$	L'ensemble des retailers, indexé par r .
$S_I = \{1, \dots, I\}$	$I = n_I$	L'ensemble des entreprises qui veulent collaborer (ou le produit unique de ces entreprises), indexé par i .

Table 15 : Les ensembles du modèle

Paramètre	Description
T	Coût de transport par km pour un véhicule, en €/km.
D_{dr}	Distance entre le DC d et le retailer r , en km.
H_r^i	Coût de possession unitaire au retailer r pour le produit i , en €/item/période.
h_d^i	Coût de possession au DC d pour le produit i , en €/item/période.
C_{dr}	Capacité du véhicule du DC d au retailer r , en items/véhicule.
K_d^i	Coût fixe de commande au DC d pour l'entreprise i .
LT_{dr}	Délai d'approvisionnement entre le DC d et le retailer r , en période
LT_d^i	Délai d'approvisionnement entre le DC d et l'entreprise i , en période
z_α	Facteur de niveau de service correspondant au niveau de service α .
σ_r^i	Écart-type de la demande de l'entreprise i chez le retailer r .
λ_r^i	Demande moyenne pour le produit i au retailer r , en items/période.
$\Lambda_r = \sum_i \lambda_r^i$	Demande moyenne pour tous les produits au retailer r , en items/période.
$\Lambda^i = \sum_r \lambda_r^i$	Demande moyenne pour les produits i pour tous les retailers, en items/période.
q_{dr}^i	Quantité expédiée du produit i du DC d vers le retailer r , en items/période.
q_d^i	Quantité commandée au DC d pour l'entreprise i , en items.
$Q_{dr} = \sum_i q_{dr}^i$	Quantité totale expédiée du DC d vers le retailer r , en items/véhicule
F_d	Coût d'infrastructure lié à l'ouverture d'un DC, en €
C_{Inf}	Coût d'Infrastructure par unité de stock hébergé au DC, en €/items

Table 16 : Les paramètres du modèle

Variable	Description
y_d	Vaut 1 si le DC d est ouvert, sinon 0.
x_{dr}	Vaut 1 si le DC d sert le détaillant r (pour tous les produits), 0 sinon.
v_{1d}^i, v_{2d}^i	Variables auxiliaires pour les entreprises i et DC d.

Table 17 : Les variables du modèle

$$\text{Min} \quad \sum_d (F_d y_d + C \inf \sum_i (\sqrt{\frac{2K_d^i}{h_d^i}} v_{1d}^i + z_\alpha \sqrt{LT_d^i} v_{2d}^i)) \quad (1)$$

$$+ \quad \sum_{d,r} T D_{dr} \frac{\Lambda_r}{Q_{dr}} x_{dr} \quad (2)$$

$$+ \quad \sum_{d,r,i} H_r^i \frac{Q_{dr}}{2} \frac{\lambda_r^i}{\Lambda_r} x_{dr} \quad (3)$$

$$+ \quad \sum_{d,i} \sqrt{2K_d^i h_d^i} v_{1d}^i \quad (4)$$

$$+ \quad \sum_{d,r,i} H_r^i z_\alpha \sigma_r^i \sqrt{LT_{dr}} x_{dr} \quad (5)$$

$$+ \quad \sum_{d,i} h_d^i z_\alpha \sqrt{LT_d^i} v_{2d}^i \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_r \lambda_r^i (x_{dr})^2 \leq (v_{1d}^i)^2 \quad \forall d, i \quad (7)$$

$$\sum_r (\sigma_r^i)^2 (x_{dr})^2 \leq (v_{2d}^i)^2 \quad \forall d, i \quad (8)$$

$$\sum_d x_{dr} = 1 \quad \forall r \quad (9)$$

$$x_{dr} \leq y_d \quad \forall d, r \quad (10)$$

$$v_{1d}^i, v_{2d}^i \geq 0 \quad \forall d, i \quad (11)$$

$$x_{dr}, y_d \in \{0, 1\} \quad \forall d, r \quad (12)$$

Annexe D – Modèle complet - coût d'ouverture basé sur la fréquence des expéditions

Ensemble	Taille	Description
$S_D = \{1, \dots, D\}$	$D = n_D$	L'ensemble des DC, indexé par d .
$S_R = \{1, \dots, R\}$	$R = n_R$	L'ensemble des retailers, indexé par r .
$S_I = \{1, \dots, I\}$	$I = n_I$	L'ensemble des entreprises qui veulent collaborer (ou le produit unique de ces entreprises), indexé par i .

Table 18 : Les ensembles du modèle

Paramètre	Description
T	Coût de transport par km pour un véhicule, en €/km.
D_{dr}	Distance entre le DC d et le retailer r , en km.
H_r^i	Coût de possession unitaire au retailer r pour le produit i , en €/item/période.
h_d^i	Coût de possession au DC d pour le produit i , en €/item/période.
C_{dr}	Capacité du véhicule du DC d au retailer r , en items/véhicule.
K_d^i	Coût fixe de commande au DC d pour l'entreprise i .
LT_{dr}	Délai d'approvisionnement entre le DC d et le retailer r , en période
LT_d^i	Délai d'approvisionnement entre le DC d et l'entreprise i , en période
z_α	Facteur de niveau de service correspondant au niveau de service α .
σ_r^i	Écart-type de la demande de l'entreprise i chez le retailer r .
λ_r^i	Demande moyenne pour le produit i au retailer r , en items/période.
$\Lambda_r = \sum_i \lambda_r^i$	Demande moyenne pour tous les produits au retailer r , en items/période.
$\Lambda^i = \sum_r \lambda_r^i$	Demande moyenne pour les produits i pour tous les retailers, en items/période.
q_{dr}^i	Quantité expédiée du produit i du DC d vers le retailer r , en items/véhicule.
q_d^i	Quantité commandée au DC d pour l'entreprise i , en items.
$Q_{dr} = \sum_i q_{dr}^i$	Quantité totale expédiée du DC d vers le retailer r , en items/véhicule.
F_d	Coût d'Infrastructure lié à l'ouverture d'un DC, en €

<i>COpe</i>	Coût Opérationnel associé à une livraison (un Véhicule) au départ du centre de distribution
--------------------	---

Table 19 : Les paramètres du modèle

Variable	Description
y_d	Vaut 1 si le DC d est ouvert, sinon 0.
x_{dr}	Vaut 1 si le DC d sert le retailer r (pour tous les produits), 0 sinon.
v_{1d}^i, v_{2d}^i	Variables auxiliaires pour les entreprises i et DC d.

Table 20 : Les variables du modèle

$$\min \quad \sum_d (F_d y_d + COpe \sum_{d,r,i} \frac{\lambda_r^i}{Q_{dr}} x_{dr}) \quad (1)$$

$$+ \quad \sum_{d,r} T D_{dr} \frac{\Lambda_r}{Q_{dr}} x_{dr} \quad (2)$$

$$+ \quad \sum_{d,r,i} H_r^i \frac{Q_{dr}}{2} \frac{\lambda_r^i}{\Lambda_r} x_{dr} \quad (3)$$

$$+ \quad \sum_{d,i} \sqrt{2K_d^i h_d^i} v_{1d}^i \quad (4)$$

$$+ \quad \sum_{d,r,i} H_r^i z_\alpha \sigma_r^i \sqrt{LT_{dr}} x_{dr} \quad (5)$$

$$+ \quad \sum_{d,i} h_d^i z_\alpha \sqrt{LT_d^i} v_{2d}^i \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_r \lambda_r^i (x_{dr})^2 \leq (v_{1d}^i)^2 \quad \forall d, i \quad (7)$$

$$\sum_r (\sigma_r^i)^2 (x_{dr})^2 \leq (v_{2d}^i)^2 \quad \forall d, i \quad (8)$$

$$\sum_d x_{dr} = 1 \quad \forall r \quad (9)$$

$$x_{dr} \leq y_d \quad \forall d, r \quad (10)$$

$$v_{1d}^i, v_{2d}^i \geq 0 \quad \forall d, i \quad (11)$$

$$x_{dr}, y_d \in \{0, 1\} \quad \forall d, r \quad (12)$$

Annexe E – Modèle complet - coût d'ouverture basé sur la racine carrée de la demande au DC

Ensemble	Taille	Description
$S_D = \{1, \dots, D\}$	$D = n_D$	L'ensemble des DC, indexé par d .
$S_R = \{1, \dots, R\}$	$R = n_R$	L'ensemble des retailers, indexé par r .
$S_I = \{1, \dots, I\}$	$I = n_I$	L'ensemble des entreprises qui veulent collaborer (ou le produit unique de ces entreprises), indexé par i .

Table 21 : Les ensembles du modèle

Paramètre	Description
T	Coût de transport par km pour un véhicule, en €/km.
D_{dr}	Distance entre le DC d et le retailer r , en km.
H_r^i	Coût de possession unitaire au retailer r pour le produit i , en €/item/période.
h_d^i	Coût de possession au DC d pour le produit i , en €/item/période.
C_{dr}	Capacité du véhicule du DC d au retailer r , en items/véhicule.
K_d^i	Coût fixe de commande au DC d pour l'entreprise i .
LT_{dr}	Délai d'approvisionnement entre le DC d et le retailer r , en période
LT_d^i	Délai d'approvisionnement entre le DC d et l'entreprise i , en période
z_α	Facteur de niveau de service correspondant au niveau de service α .
σ_r^i	Écart-type de la demande de l'entreprise i chez le retailer r .
λ_r^i	Demande moyenne pour le produit i au retailer r , en items/période.
$\Lambda_r = \sum_i \lambda_r^i$	Demande moyenne pour tous les produits au retailer r , en items/période.
$\Lambda^i = \sum_r \lambda_r^i$	Demande moyenne pour les produits i pour tous les retailers, en items/période.
q_{dr}^i	Quantité expédiée du produit i du DC d vers le retailer r , en items/période.
q_d^i	Quantité commandée au DC d pour l'entreprise i , en items.
$Q_{dr} = \sum_i q_{dr}^i$	Quantité totale expédiée du DC d vers le retailer r , en items/véhicule
F_d	Coût d'Infrastructure lié à l'ouverture d'un DC, en €
$CInf$	Coût d'Infrastructure unitaire de la demande desservie, en €/items

Table 22 : Les paramètres du modèle

Variable	Description
y_d	Vaut 1 si le DC d est ouvert, sinon 0.
x_{dr}	Vaut 1 si le DC d sert le retailer r (pour tous les produits), 0 sinon.
v_{1d}^i, v_{2d}^i	Variables auxiliaires pour les entreprises i et DC d.
v_{3d}	Variables auxiliaires pour les DC d.

Table 23 : Les variables du modèle

$$\min \quad \sum_d F_d y_d + C \ln f v_{3d} \quad (1)$$

$$+ \quad \sum_{d,r} T D_{dr} \frac{\Lambda_r}{Q_{dr}} x_{dr} \quad (2)$$

$$+ \quad \sum_{d,r,i} H_r^i \frac{Q_{dr}}{2} \frac{\lambda_r^i}{\Lambda_r} x_{dr} \quad (3)$$

$$+ \quad \sum_{d,i} \sqrt{2K_d^i h_d^i} v_{1d}^i \quad (4)$$

$$+ \quad \sum_{d,r,i} H_r^i z_\alpha \sigma_r^i \sqrt{LT_{dr}} x_{dr} \quad (5)$$

$$+ \quad \sum_{d,i} h_d^i z_\alpha \sqrt{LT_d^i} v_{2d}^i \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_r \lambda_r^i (x_{dr})^2 \leq (v_{1d}^i)^2 \quad \forall d, i \quad (7)$$

$$\sum_r (\sigma_r^i)^2 (x_{dr})^2 \leq (v_{2d}^i)^2 \quad \forall d, i \quad (8)$$

$$\sum_{r,i} \lambda_r^i (x_{dr})^2 \leq (v_{3d})^2 \quad \forall d \quad (9)$$

$$\sum_d x_{dr} = 1 \quad \forall r \quad (10)$$

$$x_{dr} \leq y_d \quad \forall d, r \quad (11)$$

$$v_{1d}^i, v_{2d}^i, v_{3d} \geq 0 \quad \forall d, i \quad (12)$$

$$x_{dr}, y_d \in \{0, 1\} \quad \forall d, r \quad (13)$$

Annexe F – Modèle complet - coût d'ouverture par paliers de capacité

Ensemble	Taille	Description
$S_D = \{1, \dots, D\}$	$D = n_D$	L'ensemble des DC, indexé par d .
$S_R = \{1, \dots, R\}$	$R = n_R$	L'ensemble des retailers, indexé par r .
$S_I = \{1, \dots, I\}$	$I = n_I$	L'ensemble des entreprises qui veulent collaborer (ou le produit unique de ces entreprises), indexé par i .
$S_K = \{1, \dots, K\}$	$K = n_K$	L'ensemble des capacités des DC, indexé par k .

Table 24 : Les ensembles du modèle

Paramètre	Description
T	Coût de transport par km pour un véhicule, en €/km.
D_{dr}	Distance entre le DC d et le retailer r , en km.
H_r^i	Coût de possession unitaire au retailer r pour le produit i , en €/item/période.
h_d^i	Coût de possession au DC d pour le produit i , en €/item/période.
C_{dr}	Capacité du véhicule du DC d au retailer r , en items/véhicule.
K_d^i	Coût fixe de commande au DC d pour l'entreprise i .
LT_{dr}	Délai d'approvisionnement entre le DC d et le retailer r , en période
LT_d^i	Délai d'approvisionnement entre le DC d et l'entreprise i , en période
z_α	Facteur de niveau de service correspondant au niveau de service α .
σ_r^i	Écart-type de la demande de l'entreprise i chez le retailer r .
λ_r^i	Demande moyenne pour le produit i au retailer r , en items/période.
$\Lambda_r = \sum_i \lambda_r^i$	Demande moyenne pour tous les produits au retailer r , en items/période.
$\Lambda^i = \sum_r \lambda_r^i$	Demande moyenne pour les produits i pour tous les retailers, en items/période.
q_{dr}^i	Quantité expédiée du produit i du DC d vers le retailer r , en items/période.
q_d^i	Quantité commandée au DC d pour l'entreprise i , en items.
$Q_{dr} = \sum_i q_{dr}^i$	Quantité totale expédiée du DC d vers le retailer r , en items/véhicule.
$CapMax^k$	CAPacité MAXimale du DC si le niveau k est choisi.

$COpeK^k$	Coût d'Ouverture du DC avec une capacité k.
-----------	---

Table 25 : Les paramètres du modèle

Variable	Description
y_d^k	Vaut 1 si le DC d est ouvert avec la capacité k, sinon 0.
x_{dr}	Vaut 1 si le DC d sert le retailer r (pour tous les produits), 0 sinon.
v_{1d}^i, v_{2d}^i	Variables auxiliaires pour les entreprises i et DC d.

Table 26 : Les variables du modèle

$$\min \quad \sum_{d,k} COpeK^k y_d^k \quad (1)$$

$$+ \quad \sum_{d,r} T D_{dr} \frac{\Lambda_r}{Q_{dr}} x_{dr} \quad (2)$$

$$+ \quad \sum_{d,r,i} H_r^i \frac{Q_{dr}}{2} \frac{\lambda_r^i}{\Lambda_r} x_{dr} \quad (3)$$

$$+ \quad \sum_{d,i} \sqrt{2K_d^i h_d^i} v_{1d}^i \quad (4)$$

$$+ \quad \sum_{d,r,i} H_r^i z_\alpha \sigma_r^i \sqrt{LT_{dr}} x_{dr} \quad (5)$$

$$+ \quad \sum_{d,i} h_d^i z_\alpha \sqrt{LT_d^i} v_{2d}^i \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_r \lambda_r^i (x_{dr})^2 \leq (v_{1d}^i)^2 \quad \forall d, i \quad (7)$$

$$\sum_r (\sigma_r^i)^2 (x_{dr})^2 \leq (v_{2d}^i)^2 \quad \forall d, i \quad (8)$$

$$\sum_d x_{dr} = 1 \quad \forall r \quad (9)$$

$$\sum_{r,i} \lambda_r^i x_{dr} \leq \sum_k Cap^k y_d^k \quad \forall d \quad (10)$$

$$x_{dr} \leq \sum_k y_d^k \quad \forall d, r \quad (11)$$

$$\sum_k y_d^k \leq 1 \quad \forall d \quad (12)$$

$$v_{1d}^i, v_{2d}^i \geq 0 \quad \forall d, i \quad (13)$$

$$x_{dr}, y_d^k \in \{0, 1\} \quad \forall d, k, r \quad (14)$$

Annexe G – Tests complémentaires du modèle à racine carrée pour une part fixe cible de 10%

<i>F_d</i>	<i>CInf</i>	Nombre de DC SA1	Nombre de DC SA2	Nombre de DC COOP	Coût d'ouverture total SA1	Coût d'ouverture total SA2	Coût d'ouverture total COOP	Synergie
500	117,5	1	1	3	11832	11559	25908	17,34%
1 000	203,4	1	1	1	20623	20150	28418	25,90%
2 000	303,1	1	1	1	31239	30535	42856	26,90%

Table 27 – Effet d'une part fixe cible de 10 % sur le nombre de DC, les coûts d'ouverture et la synergie du modèle racine carrée (Map 1, Cap% = 40 %)

7. Bibliographie

- Baskar, A. (2021). Simple Single and Multi-Facility Location Models using Great Circle Distance. *ITM Web of Conferences*, 37, 01001. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20213701001>
- Basso, F., Monardes-Concha, C. A., Lorca, F., Pezoa, R., & Varas, M. (2025). A horizontal collaboration approach for grape transportation in a pisco cooperative. *Computers & Industrial Engineering*, 200, 110797. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110797>
- Bengtsson, M., & Kock, S. (2000). "Coopetition" in Business Networks—To Cooperate and Compete Simultaneously. *Industrial Marketing Management*, 29(5), 411-426. [https://doi.org/10.1016/S0019-8501\(99\)00067-X](https://doi.org/10.1016/S0019-8501(99)00067-X)
- Berger, S., & Bierwirth, C. (2010). Solutions to the request reassignment problem in collaborative carrier networks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(5), 627-638. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.12.006>
- Boussouf, O., Lamghari, A., El Hallaoui, I., Messaoudi, M., & El Hachemi, N. (2026). A two-stage stochastic approach to location, production, and inventory planning with demand uncertainty. *Socio-Economic Planning Sciences*, 105, 102490. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2026.102490>
- Cleophas, C., Cottrill, C., Ehmke, J. F., & Tierney, K. (2019). Collaborative urban transportation: Recent advances in theory and practice. *European Journal of Operational Research*, 273(3), 801-816. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.04.037>
- Cruijssen, F., Dullaert, W., & Fleuren, H (2007). *Horizontal Cooperation in Transport and Logistics : A Literature Review*.
- Czakon, W. (2009). Power asymmetries, flexibility and the propensity to coopete : An empirical investigation of SMEs' relationships with franchisors. *International Journal of*

- Entrepreneurship and Small Business*, 8(1), 44.
<https://doi.org/10.1504/IJESB.2009.024104>
- Ding, Y., Jiang, Y., Wu, L., & Zhou, Z. (2021). Two-echelon supply chain network design with trade credit. *Computers & Operations Research*, 131, 105270.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105270>
- Dupont, L. (2008). Branch and bound algorithm for a facility location problem with concave site dependent costs. *International Journal of Production Economics*, 112(1), 245-254.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.04.001>
- Elhedhli, S., Wang, Y., & Saif, A. (2018). Service system design with immobile servers, stochastic demand and concave-cost capacity selection. *Computers & Operations Research*, 94, 65-75. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.01.019>
- Gansterer, M., & Hartl, R. F. (2018). Collaborative vehicle routing : A survey. *European Journal of Operational Research*, 268(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.10.023>
- Hacardiaux, T., & Tancrez, J.-S. (2022). Assessing the benefits of horizontal cooperation for the various stages of the supply chain. *Operational Research*, 22(4), 3901-3924.
<https://doi.org/10.1007/s12351-021-00688-5>
- Li, R., Yan, J.-J., & Wang, X.-Y. (2024). Horizontal cooperation strategies for competing manufacturers in a capital constrained supply chain. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 181, 103369.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103369>
- Li, Y., Shu, J., Wang, L., & Wu, T. (2023). Joint location–inventory problem with economies and diseconomies of scale : A general model and an efficient column generation algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 183, 109537.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109537>

- Malandri, C., Mantecchini, L., Costa, F. P. N., & Rizzello, V. (2026). Logistics facilities location choice modeling: Effects of environmental constraints. *Journal of Transport Geography*, 131, 104529. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2025.104529>
- Max Shen, Z.-J. & ,Department of Industrial Engineering & Operations Research, University of California, Berkeley, CA 94720. (2007). Integrated supply chain design models : A survey and future research directions. *Journal of Industrial & Management Optimization*, 3(1), 1-27. <https://doi.org/10.3934/jimo.2007.3.1>
- Najy, W., Elbassioni, K., & Diabat, A. (2026). A column generation algorithm for a stochastic location-inventory network design problem. *Operations Research Letters*, 64, 107386. <https://doi.org/10.1016/j.orl.2025.107386>
- Panzar, J. C., & Willig, R. D. (1977). Economies of Scale in Multi-Output Production. *The Quarterly Journal of Economics*, 91(3), 481. <https://doi.org/10.2307/1885979>
- Schuster Puga, M., & Tancrez, J.-S. (2017). A heuristic algorithm for solving large location–inventory problems with demand uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 259(2), 413-423. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.10.037>

