



**HAL**  
open science

# Contribution à la conception des réseaux logistiques durables et résilients: Modélisation, évaluation de performances et optimisation

Aymen Aloui

► **To cite this version:**

Aymen Aloui. Contribution à la conception des réseaux logistiques durables et résilients: Modélisation, évaluation de performances et optimisation. Informatique [cs]. Université de Picardie Jules Verne, 2022. Français. NNT: . tel-04225531

**HAL Id: tel-04225531**

**<https://theses.hal.science/tel-04225531>**

Submitted on 2 Oct 2023

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

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

Copyright



# Thèse de Doctorat

*Mention : Sciences de l'ingénieur  
Spécialité : Génie informatique*

présentée à l'Ecole Doctorale en Sciences Technologie et Santé (ED 585)

de l'Université de Picardie Jules Verne

par

**Aymen ALOUI**

pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Picardie Jules Verne

***Contribution à la conception des réseaux logistiques durables et résilients: Modélisation, évaluation de performances et optimisation***

Soutenue le 10/06/2022, après avis des rapporteurs, devant le jury d'examen :

M. D. Trentesaux, Professeur, Université polytechnique Hauts-de-France	Président
M. N. Rezg, Professeur, Université de Lorraine	Rapporteur
M <sup>me</sup> G. Alpan, Professeur, Université de Grenoble Alpes	Rapporteur
M. I. Nouaouri, Maître de Conférences, Université d'Artois	Examineur
M. L. Delahoche, Maître de Conférences HDR, Université de Picardie Jules Verne	Directeur de thèse
M <sup>me</sup> N. Hamani, Maître de Conférences, Université de Picardie Jules Verne	Co-encadrant



# Dédicaces

A mes très chers parents Mohsen et Saliha,  
A ma chère sœur,  
A ma chère Amel,  
A mes chers cousins,  
A toute ma famille,  
A tous mes collègues et mes amis,  
A tous ceux qui, de près ou de loin, ont participé à ce travail.

# Remerciements

Mes sincères remerciements s'adressent à mon directeur de thèse M. Laurent Dela-hoche pour la confiance, la liberté et la rigueur scientifique qu'il m'a accordé tout au long de ce travail. Je le remercie pour avoir toujours prêté une oreille attentive et une vue objective à tous les problèmes rencontrés au cours de la thèse.

Je suis très reconnaissant envers Mme. Nadia Hamani pour son soutien moral et de m'avoir guidée au cours de ma thèse. Je suis tout particulièrement reconnaissant pour les discussions fructueuses et les conseils précieux qu'elle m'a donné tout au long de la préparation de cette thèse. C'est un grand honneur de travailler avec elle toutes ces années.

J'exprime également toute ma sincère reconnaissance aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter de juger ce travail : Prof. Nidhal Rezg, Prof. Gulgun Alpan, Prof. Damien Trentesaux et Dr. Issam Nouaouri.

Je remercie aussi Prof. Oussama Habachi et Dr. Jaouher Chroua pour leurs précieux conseils et leurs aides pendant toutes les étapes de la thèse que ça soit sur le plan scientifique ou sur le plan humain.

J'adresse un grand remerciement à tous les professeurs et les doctorants du LTI et tout particulièrement à Nassim Mrabti qui était toujours là pour me conseiller.

Enfin, je tiens à remercier ceux qui me sont chers et qui m'ont accompagné par leur attention et leurs encouragements tout au long de ces années. Je tiens à remercier ma famille, qui m'a toujours entouré, qui m'a beaucoup donné et qui continue à le faire. Je suis très reconnaissant envers mes parents pour leur soutien moral, matériel et leur confiance en moi et en mes choix. Merci à ma sœur et mes cousins qui m'ont toujours soutenu et aidé. Je remercie également Amel qui m'a encouragé tout au long de cette thèse et qui a toujours cru en moi. Je remercie enfin les personnes dont le rôle dépasse largement celui des amis : Rami, Hamza, Mossaab, Nidhal, Obaied, Anis, Sami, Ilyes, Rym, Manel, Haifa et Naourez.

# Publications

## Articles dans des revues internationales

1. **Aloui, A.**, Hamani, N., Derrouiche, R. and Delahoche, L., 2021. Systematic literature review on collaborative sustainable transportation : overview, analysis and perspectives. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 9, p.100291.
2. **Aloui, A.**, Hamani, N., Derrouiche, R. and Delahoche, L., 2021. Assessing the benefits of horizontal collaboration using an integrated planning model for two-echelon energy efficiency-oriented logistics networks design. *International Journal of Systems Science : Operations & Logistics*, pp.1-22.
3. **Aloui, A.**, Hamani, N. and Delahoche, L., 2021. An integrated optimization approach using a collaborative strategy for sustainable cities freight transportation : A Case study. *Sustainable Cities and Society*, 75, p.103331.
4. **Aloui, A.**, Hamani, N. and Delahoche, L., 2021. Designing a resilient and sustainable logistics network under epidemic disruptions and demand uncertainty. *Sustainability*, 13(24), p.14053.

## Conférences internationales et nationales

1. **Aloui, A.**, Derrouiche, R., Hamani, N. and Delahoche, L, 2020. Collaboration horizontale durable des réseaux de transport de marchandises : État de l'art et perspectives. *13ème Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation MOSIM'20*, Agadir, Maroc.
2. **Aloui, A.**, Hamani, N., Derrouiche, R., and Delahoche, L, 2021. Collaborative logistics and sustainability in freight distribution systems. *35th Belgian Conference on Operations Research ORBEL 35*, Antwerpen, Belgique.
3. **Aloui, A.**, Mrabti, N., Hamani, N., and Delahoche, L, 2021. Towards a collaborative and integrated optimization approach in sustainable freight transportation. *17th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2021*, Budapest, Hungary.
4. **Aloui, A.**, Hamani, N., and Delahoche, L, 2021. Couplage des heuristiques et l'apprentissage pour la résolution d'un modèle ILRP collaboratif et durable.

*22ème congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision ROADEF 2021*, Mulhouse, France.

5. **Aloui, A.**, Hamani, N., Chroua, J., and Delahoche, L, 2021. Enhancing logistics operations sustainability through resource sharing : The case of French agri-food SMEs. *Second IEEE International Conference on Signal, Control and Communication SCC 2021*, Hammamet, Tunis.
6. **Aloui, A.**, Hamani, N., Chroua, J., and Delahoche, L, 2022. A Two-Stage Stochastic Programming for the Cooperative Supply Network Planning. *IEEE/IFAC 8th International Conference on Control, Decision and Information Technologies CODIT 2022*, Istanbul, Turkey.

# Table des matières

<b>Publications</b>	<b>iv</b>
<b>Table des matières</b>	<b>viii</b>
<b>Table des figures</b>	<b>ix</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>x</b>
<b>Liste des abréviations</b>	<b>xii</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 État de l’art sur la logistique collaborative</b>	<b>5</b>
1.1 Introduction . . . . .	6
1.2 Revue systématique de la littérature . . . . .	7
1.2.1 Questions de recherche et mots-clés . . . . .	8
1.2.2 Critères d’inclusion et d’exclusion . . . . .	8
1.2.3 Recherche de données . . . . .	9
1.2.4 Sélection des papiers . . . . .	9
1.2.5 Cadre d’analyse des résultats . . . . .	10
1.3 Analyse descriptive . . . . .	10
1.3.1 Publications par année . . . . .	10
1.3.2 Publications par revue . . . . .	11
1.4 Analyse et catégorisation de la littérature . . . . .	12
1.4.1 Analyse décisionnelle . . . . .	12
1.4.1.1 Décisions stratégiques . . . . .	12
1.4.1.2 Décisions tactiques . . . . .	18
1.4.1.3 Décisions opérationnelles . . . . .	22
1.4.2 Analyse des dimensions de durabilité . . . . .	25
1.4.2.1 Performance économique . . . . .	26
1.4.2.2 Performance environnementale . . . . .	27
1.4.2.3 Performance sociale/sociétale . . . . .	28
1.4.3 Méthodes de recherche . . . . .	29
1.5 Tendances et lacunes de la recherche . . . . .	30



1.6	Conclusion . . . . .	31
<b>2</b>	<b>Modélisation intégrée des réseaux logistiques à deux échelons en tenant compte des émissions de <math>CO_2</math></b>	<b>32</b>
2.1	Introduction . . . . .	33
2.2	Conception des réseaux logistiques collaboratifs . . . . .	34
2.3	Description du problème . . . . .	37
2.4	Formulation mathématique . . . . .	38
2.4.1	Formulation des coûts et des émissions de $CO_2$ . . . . .	40
2.4.1.1	Modélisation des coûts logistiques . . . . .	40
2.4.1.2	Modélisation des émissions de $CO_2$ . . . . .	42
2.4.2	Modèle ILRP vert et collaboratif . . . . .	44
2.4.3	Modèle ILRP vert et non-collaboratif . . . . .	47
2.5	Approche de résolution . . . . .	48
2.5.1	Optimisation mono-objectif . . . . .	48
2.5.2	Optimisation multi-objectifs . . . . .	48
2.6	Résultats numériques . . . . .	49
2.6.1	Description des instances de test . . . . .	49
2.6.2	Exemple numérique . . . . .	50
2.6.2.1	Résultats de l'optimisation économique . . . . .	50
2.6.2.2	Résultats de l'optimisation écologique . . . . .	52
2.6.3	Résultats des tests d'instances . . . . .	54
2.6.3.1	Analyse des coûts . . . . .	54
2.6.3.2	Analyse des émissions . . . . .	57
2.6.4	Analyse de compromis . . . . .	59
2.7	Conclusion . . . . .	59
<b>3</b>	<b>Approche heuristique d'optimisation intégrée pour la planification durable des réseaux logistiques</b>	<b>62</b>
3.1	Introduction . . . . .	63
3.2	Inventory Location Routing Problem . . . . .	64
3.3	Description du problème et formulation mathématique . . . . .	66
3.3.1	Énoncé du problème . . . . .	66
3.3.2	Formulation du risque d'accident . . . . .	67
3.3.3	Formulation du modèle pour le 2E-CILRP . . . . .	69
3.4	Approche de résolution . . . . .	72
3.4.1	Procédure de Clustering . . . . .	74
3.4.2	Algorithme génétique . . . . .	75
3.5	Résultats, analyse et discussion . . . . .	76
3.5.1	Expérimentations sur les petites et moyennes instances . . . . .	77

3.5.2	Évaluation des performances sur des instances de grande taille : Comparaison des algorithmes . . . . .	80
3.5.3	Étude de cas . . . . .	82
3.5.4	Étude de sensibilité . . . . .	84
3.5.5	Perspectives managériales . . . . .	87
3.6	Conclusion . . . . .	87
<b>4</b>	<b>Conception des réseaux logistiques résilients et durables en cas de perturbations</b>	<b>89</b>
4.1	Introduction . . . . .	90
4.2	Revue de la littérature . . . . .	91
4.3	Modélisation mathématique du problème . . . . .	94
4.3.1	Indicateurs de durabilité évalués . . . . .	95
4.3.1.1	Évaluation de la durabilité économique . . . . .	97
4.3.1.2	Évaluation de la durabilité environnementale . . . . .	97
4.3.1.3	Évaluation de la durabilité sociale . . . . .	98
4.3.2	Évaluation de la résilience . . . . .	98
4.3.3	Modélisation des perturbations épidémiques . . . . .	98
4.3.4	Programmation stochastique à deux étapes . . . . .	100
4.3.5	Formulation des stratégies de résilience . . . . .	103
4.3.5.1	Augmentation des capacités . . . . .	104
4.3.5.2	Collaboration logistique . . . . .	105
4.4	Approche de résolution . . . . .	105
4.4.1	Génération de scénarios par la simulation Monte Carlo . . . . .	105
4.4.2	Approximation Moyenne par Échantillonnage . . . . .	106
4.5	Résultats numériques . . . . .	108
4.5.1	Description et données . . . . .	108
4.5.2	Résultats et discussion . . . . .	109
4.5.2.1	Analyse de la performance économique et de la résilience	110
4.5.2.2	Analyse de la performance environnementale et de la résilience . . . . .	111
4.5.2.3	Analyse de la performance sociale et de la résilience . . . . .	112
4.6	Conclusion . . . . .	113
	<b>Conclusion générale et perspectives</b>	<b>114</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>117</b>

# Table des figures

1.1	Méthodologie de recherche en six étapes . . . . .	8
1.2	Nombre de publications par an . . . . .	11
1.3	Répartition des papiers examinés par revue . . . . .	12
1.4	Répartition des papiers selon les critères de catégorisation . . . . .	13
2.1	Illustration des configurations logistiques sans et avec collaboration. . .	37
2.2	Solutions optimales obtenues par la résolution économique des scénarios non-collaboratif et collaboratif. . . . .	51
2.3	Solutions optimales obtenues par la résolution écologique des scénarios non-collaboratif et collaboratif. . . . .	53
2.4	Synthèse des résultats économiques et écologiques pour les instances testées. . . . .	57
2.5	Compromis entre le coût total et les émissions de $CO_2$ . . . . .	60
3.1	Exemple illustratif du 2E-CILRP. . . . .	67
3.2	Organigramme de l'approche proposée pour résoudre le 2E-CILRP. . .	73
3.3	Performance de l'approche KM-AG par rapport à la méthode PLMNE. . .	79
3.4	Emplacement géographique des fournisseurs, des centres de distribution et des clients dans l'étude de cas. . . . .	83
3.5	Planification initiale de la distribution. . . . .	84
3.6	Planification de la distribution après collaboration. . . . .	85
3.7	Impact de la variation des paramètres sur les économies de durabilité. . .	86
4.1	Représentation du réseau logistique étudié en cas d'incertitude. . . . .	95
4.2	Représentation des perturbations épidémiques et de leurs effets de propagation dans le réseau considéré. . . . .	99
4.3	Impact de la perturbation sur les capacités et les niveaux de stock. . .	100
4.4	Coût total et niveau de service prévus pour chaque configuration dans les instances testées. . . . .	110
4.5	Comparaison des émissions de $CO_2$ et du niveau de service des différentes configurations. . . . .	111
4.6	Comparaison du risque d'accident et du niveau de service des différents modèles . . . . .	112

# Liste des tableaux

1.1	Critères d'inclusion et d'exclusion . . . . .	9
1.2	Classification de la littérature . . . . .	14
2.1	Notations et définitions utilisées dans la modélisation mathématique. . . . .	39
2.2	Demande des détaillants à chaque période. . . . .	50
2.3	Indicateurs clés de performance pour les deux scénarios de minimisation des coûts. . . . .	51
2.4	Indicateurs clés de performance pour les deux scénarios de minimisation des émissions de $CO_2$ . . . . .	52
2.5	Taux de variation des coûts et des émissions en %. . . . .	54
2.6	Indicateurs clés de performance pour les différentes instances de test : Optimisation économique. . . . .	55
2.7	Indicateurs clés de performance pour les différentes instances de test : Optimisation écologique. . . . .	56
2.8	Taux de variation moyen du coût total en %. . . . .	58
2.9	Taux de variation moyen des émissions de $CO_2$ en %. . . . .	58
3.1	Notations. . . . .	68
3.2	Paramètres utilisés dans les expériences numériques. . . . .	77
3.3	Comparaison des solutions obtenues par CPLEX et KM-AG. . . . .	78
3.4	Résultats de comparaison avec deux algorithmes d'optimisation. . . . .	81
3.5	Synthèse des résultats obtenus dans les scénarios initial et collaboratif. . . . .	82
3.6	Résultats de l'analyse de sensibilité. . . . .	85
4.1	Synthèse de la littérature connexe (Aloui et al., 2021b). . . . .	94
4.2	Notations et définitions. . . . .	96
4.3	Taille des problèmes testés. . . . .	109
4.4	Valeurs des paramètres d'entrée utilisés dans les expériences numériques ainsi que les sources de données pertinentes. . . . .	109
4.5	Comparaison des configurations de conception selon cinq indicateurs de performance. . . . .	110

# Liste des abréviations

<b>PIB</b>	<b>Produit Intérieur Brut</b>
<b>LRP</b>	<b>Location Routing Problem</b>
<b>LIP</b>	<b>Location Inventory Problem</b>
<b>IRP</b>	<b>Inventory Routing Problem</b>
<b>JIRP</b>	<b>Joint Inventory Routing Problem</b>
<b>CVRP</b>	<b>Collaborative Vehicle Routing Problem</b>
<b>VRP</b>	<b>Vehicle Routing Problem</b>
<b>FLP</b>	<b>Facility Location Problem</b>
<b>MDCARPFL</b>	<b>Multi-Depot Capacitated Arc Routing Problem with Full Truckloads</b>
<b>B&amp;C</b>	<b>Branch-and-Cut</b>
<b>MCFP</b>	<b>Minimum Cost Flow Problem</b>
<b>MDARP</b>	<b>Multi-Depot Arc Routing Problem</b>
<b>PDP</b>	<b>Pickup and Delivery Problem</b>
<b>PME</b>	<b>Petites et Moyennes Entreprises</b>
<b>MILP</b>	<b>Mixed Integer Linear Programming</b>
<b>PLMNE</b>	<b>Programmation Linéaire Mixte en Nombres Entiers</b>
<b>MIQP</b>	<b>Mixed Integer Quadratic Programming</b>
<b>LP</b>	<b>Linear Programming</b>
<b>FTL</b>	<b>Full Truck Load</b>
<b>LTL</b>	<b>Less Than Truckload</b>
<b>IPCC</b>	<b>Intergovernmental Panel on Climate Change</b>
<b>RSE</b>	<b>Responsabilité Sociale des Entreprises</b>
<b>2E-CILRP</b>	<b>Two-Echelon Collaborative Inventory Location Routing Problem</b>
<b>ILRP</b>	<b>Inventory Location Routing Problem</b>
<b>2S-MILP</b>	<b>Two-Stage Mixed-Integer Linear Program</b>
<b>SNC</b>	<b>Scénario Non-Collaboratif</b>
<b>SC</b>	<b>Scénario Collaboratif</b>
<b>KNNA</b>	<b>K-Nearest Neighbor Algorithm</b>
<b>AG</b>	<b>Algorithme Génétique</b>
<b>PSO</b>	<b>Particle Swarm Optimization</b>
<b>AME</b>	<b>Approximation Moyenne par Échantillonnage</b>
<b>NDM</b>	<b>Non-Disrupted Model</b>

<b>DM</b>	<b>Disrupted Model</b>
<b>DMCE</b>	<b>Disrupted Model with the Capacity Expansion</b>
<b>DMCL</b>	<b>Disrupted Model with a Collaboration Logistics</b>
<b>DMCECL</b>	<b>Disrupted Model with both Capacity Expansion and Logistics Collaboration</b>

# Introduction générale

## Contexte général

**D**E nos jours, la logistique est un élément important et déterminant pour le développement économique et le succès des entreprises. Les activités logistiques concernent la gestion de l’approvisionnement, des stocks, du transport et de la distribution de marchandises (Qaiser et al., 2017). En Europe, le secteur du transport de marchandises représente environ 5% du Produit Intérieur Brut (PIB). En 2016, la part modale du transport routier progresse et représente plus de 80% des activités du transport terrestre grâce à sa souplesse et à sa capacité de fournir des services rapides et performants dans la livraison du dernier kilomètre (Cui, 2020). Cela souligne de plus en plus l’importance du transport de marchandises dans la gestion des chaînes logistiques.

Ces dernières années, l’augmentation constante de la demande de transport de marchandises a entraîné des problèmes majeurs de planification inefficace des transports et de trajets à vide, entraînant des effets négatifs sur les conditions de vie en ville, tels que l’augmentation des coûts, des émissions de carbone, des accidents et de la congestion routière (Cleophas et al., 2019; Pan et al., 2019). En effet, en 2018, 12% des trajets entre les pays de l’union européenne se font à vide, tandis que ce pourcentage peut atteindre jusqu’à 30% dans certains pays européens (Karam et al., 2021). De plus, le secteur des transports est à l’origine de près de 25% des émissions de gaz à effet de serre de l’union européenne (Soysal et al., 2018a). Ces émissions augmenteraient, selon l’agence européenne pour l’environnement, de 25 à 28% par rapport au niveau des émissions de 1990 à l’horizon de 2030.

De nombreux gouvernements ont récemment fixé des objectifs à long terme pour rendre le secteur de la logistique de marchandises plus durable. Il devient donc nécessaire pour les entreprises de logistique de trouver des stratégies performantes et efficaces pour obtenir un avantage concurrentiel dans les chaînes logistiques et faire face aux enjeux du développement durable. C’est dans ce contexte que la collaboration logistique, entre plusieurs acteurs du même niveau des chaînes logistiques, est récemment devenue une pratique prometteuse et émergente pour les entreprises qui souhaitent améliorer à la fois leur efficacité logistique et leur performance en matière de durabilité (Aloui et al., 2021a).

---

Par ailleurs, les systèmes logistiques sont de plus en plus complexes et vulnérables à diverses perturbations (Gholami-Zanjani et al., 2021b; Yavari et al., 2020). En effet, la pandémie de COVID-19 a prouvé que des événements imprévus, affectant négativement les performances des chaînes logistiques, peuvent survenir rapidement, et que les réseaux logistiques peuvent être confrontés à des vulnérabilités sans précédent dues aux perturbations de la structure du réseau et à la forte fluctuation de la demande. Afin de relever ces défis, les gestionnaires des opérations logistiques doivent tenir compte des perturbations inattendues pour assurer la continuité de leurs activités. Des stratégies de résilience proactives et réactives pourraient être incorporées dans les modèles de planification afin d'augmenter la flexibilité et d'améliorer la résilience des réseaux logistiques (Tordecilla et al., 2021).

Les travaux rapportés dans cette thèse s'inscrivent dans ce contexte. Ils visent à proposer aux décideurs des outils d'aide à la décision permettant d'améliorer les performances de durabilité et d'atténuer les risques liés à l'incertitude de la demande et aux perturbations épidémiques dans la planification des réseaux logistiques.

## Problématiques et contributions de la thèse

Différentes approches et modèles de planification collaborative ont été proposés au cours de la dernière décennie dans le but d'atteindre les objectifs de durabilité économique, environnementale et sociétale. De ce fait, il est indispensable de répondre à la question suivante : "Quelles sont les approches et les lacunes existantes de la recherche dans le domaine de la planification collaborative durable des réseaux logistiques?". Cette question de recherche a fait l'objet d'un papier de revue de la littérature (Aloui et al., 2021e). Ce dernier fournit une analyse exhaustive et fine de la littérature sur la planification collaborative. Les chercheurs pourront tirer profit de cette synthèse car elle est l'une des premières revues qui vise à analyser les approches de planification existantes dans une perspective de durabilité.

Souvent, les chercheurs et les praticiens classent les décisions de planification des réseaux logistiques en trois catégories : stratégique, tactique et opérationnelle. La revue de la littérature a montré que la majorité des travaux existants traite des problèmes opérationnels avec des objectifs économiques. Or, en raison de l'interdépendance entre les niveaux de décisions, l'optimisation intégrée des différentes décisions de planification avec des considérations environnementales et sociales peut apporter des économies importantes et assurer une meilleure réactivité des réseaux logistiques. Ce travail de thèse apporte également des réponses à la question suivante : "Quels sont les avantages de la collaboration logistique dans la planification intégrée des décisions en termes des coûts, des émissions de  $CO_2$ , du risque d'accident de transport pour les entreprises qui décident de collaborer, et comment concevoir des réseaux logistiques durables?".



---

Ces problématiques de recherche ont été traitées dans deux contributions. La première contribution vise à modéliser le problème de planification intégrée et à analyser les avantages environnementaux et économiques de la collaboration logistique (Aloui et al., 2021d). La deuxième contribution porte sur le développement d'une approche d'optimisation intégrée pour concevoir des réseaux logistiques durables à deux échelons, et l'analyse d'une étude de cas de quatre PME agroalimentaires françaises (Aloui et al., 2021c).

Enfin, la durabilité et la résilience sont deux nouvelles pratiques qui cherchent à développer et à améliorer l'efficacité de la planification et de l'évaluation des réseaux logistiques dans une perspective plus large. Malgré une littérature riche sur la planification des réseaux logistiques, la gestion durable des réseaux logistiques en tenant compte des perturbations reste un sujet important qui n'a pas encore été largement étudié. De ce fait, cette recherche vise à répondre à la problématique suivante : "Comment concevoir des réseaux logistiques à la fois durables et résilients?". La dernière contribution (Aloui et al., 2021b) répond à cette question en intégrant des perturbations épidémiques et de l'incertitude de la demande dans la conception intégrée des décisions, et en évaluant l'avantage de l'augmentation des capacités et de la collaboration logistique en termes de durabilité et de résilience.

## Plan de la thèse

Cette thèse est constituée de quatre chapitres. Le premier chapitre passe en revue la littérature existante relative à la logistique collaborative. Au total, 89 articles publiés entre 2010 et 2020 sont examinés. Ces travaux sont analysés et classés selon les problèmes de décision abordés, les dimensions de durabilité considérées et la méthodologie de recherche utilisée. Ensuite, les tendances et les lacunes de la littérature sont discutées. Enfin, une synthèse et le positionnement de notre étude sont évoqués.

Le deuxième chapitre porte sur la modélisation du problème de planification intégrée de localisation, de routage et d'inventaire en tenant compte à la fois des critères économiques et environnementaux dans un contexte collaboratif et non-collaboratif. Un modèle à deux objectifs est proposé et adapté pour traiter les deux scénarios logistiques. Les modèles sont résolus par la méthode exacte et sont testés sur des nouvelles instances générées aléatoirement. Ainsi, une méthode d'agrégation des objectifs est appliquée pour trouver le bon compromis entre les coûts et les émissions de  $CO_2$ . À partir des résultats obtenus, une analyse économique et environnementale est effectuée.

Le troisième chapitre vise à développer une approche d'optimisation pour la conception durable des réseaux logistiques. Une nouvelle approche hybride combinant un algorithme génétique et un algorithme modifié de Clustering  $K$ -means est développée pour résoudre le problème étudié. En guise de validation, des comparaisons avec la méthode

---

exacte et d'autres approches sont fournies. Ainsi, une étude de cas est réalisée pour évaluer l'application de l'approche proposée dans le monde réel. De plus, une analyse de sensibilité est effectuée pour évaluer l'impact de la variation des paramètres d'entrée sur les objectifs de durabilité.

Le quatrième chapitre propose un modèle stochastique à deux étapes pour résoudre le problème de conception des réseaux résilients et durables en tenant compte des perturbations épidémiques et de l'incertitude de la demande. Une modélisation mathématique du problème est présentée et deux stratégies de résilience sont considérées. Afin de traiter les incertitudes, plusieurs échantillons de scénarios sont générés par la méthode Monte Carlo et les programmes d'approximation de la moyenne des échantillons correspondants sont résolus pour obtenir la meilleure configuration logistique en cas de perturbations. Des expérimentations sont menées et une évaluation des stratégies introduites, en termes des coûts, des émissions, du risque d'accident et du niveau de service attendus, est réalisée pour choisir la configuration appropriée du point de vue de la durabilité et de la résilience.

Ce rapport s'achève par une conclusion générale récapitulant l'ensemble des travaux réalisés et présentant quelques perspectives de nos futures travaux de recherche.

# Chapitre 1

## État de l'art sur la logistique collaborative


### Sommaire

---

<b>1.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>6</b>
<b>1.2</b>	<b>Revue systématique de la littérature</b>	<b>7</b>
1.2.1	Questions de recherche et mots-clés	8
1.2.2	Critères d'inclusion et d'exclusion	8
1.2.3	Recherche de données	9
1.2.4	Sélection des papiers	9
1.2.5	Cadre d'analyse des résultats	10
<b>1.3</b>	<b>Analyse descriptive</b>	<b>10</b>
1.3.1	Publications par année	10
1.3.2	Publications par revue	11
<b>1.4</b>	<b>Analyse et catégorisation de la littérature</b>	<b>12</b>
1.4.1	Analyse décisionnelle	12
1.4.2	Analyse des dimensions de durabilité	25
1.4.3	Méthodes de recherche	29
<b>1.5</b>	<b>Tendances et lacunes de la recherche</b>	<b>30</b>
<b>1.6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>31</b>

---

## 1.1 Introduction

 E monde économique d'aujourd'hui est influencé par la mondialisation des marchés, l'évolution rapide des exigences des clients et les préoccupations de développement durable. Par conséquent, les entreprises sont constamment à la recherche de stratégies efficaces pour améliorer leurs performances globales et assurer leur compétitivité sur le marché actuel. En particulier, elles doivent faire face à de nombreux défis, notamment en ce qui concerne la logistique et les transports de marchandises, qui ont fait des progrès considérables ces dernières années (Lafkihi et al., 2019; Muñoz-Villamizar et al., 2019a). Dans ce contexte, la collaboration logistique est considérée comme l'un des mécanismes les plus efficaces pour les entreprises qui souhaitent à la fois accroître leur efficacité logistique et atteindre les objectifs de durabilité économique, environnementale et sociale (Jouida et al., 2017; Vanovermeire and Sörensen, 2014). Cette stratégie se base principalement sur la coordination et l'intégration des processus entre les acteurs des réseaux logistiques (Stellingwerf et al., 2019). Elle peut être horizontale entre un groupe d'acteurs de différentes chaînes logistiques qui travaillent ensemble au même niveau, verticale en considérant les relations hiérarchiques dans une chaîne logistique ou intégrée en combinant les synergies horizontales et verticales, ce que l'on appelle la collaboration latérale (Soysal et al., 2018b).

La collaboration horizontale suscite depuis quelques années un intérêt croissant des chercheurs et des praticiens et cela grâce aux multiples bénéfices qu'elle apporte par le partage des ressources et des moyens (entrepôts, centres de distribution, véhicules, etc.) entre les acteurs de différents réseaux logistiques (Pan et al., 2019). Cette stratégie a été appliquée à différents niveaux de planification des réseaux logistiques. Au niveau stratégique, la conception des réseaux logistiques collaboratifs est visée pour consolider les flux et réaliser des économies d'échelle (Ballot and Fontane, 2010; Nataraj et al., 2019; Pan et al., 2013; Verdonck et al., 2016). Sur le plan tactique et opérationnel, l'optimisation et l'organisation des routes sont les questions les plus discutées dans la littérature (Buijs et al., 2014; Defryn et al., 2019; Montoya-Torres et al., 2016; Wang et al., 2017a, 2018a, 2020b). En effet, la plupart des études, du niveau stratégique au niveau opérationnel, sont axées sur l'optimisation et l'évaluation de la dimension de durabilité économique. Cependant, comme évoqué précédemment, les performances des réseaux logistiques ne peuvent pas être évaluées uniquement sur la base des indicateurs économiques mais doivent aussi intégrer de plus en plus d'autres aspects écologiques et sociaux.

Les études et les pratiques industrielles sur ce sujet soulignent de plus en plus que la collaboration horizontale est un moyen efficace pour atteindre le triple objectif du développement durable. Toutefois, la littérature sur la collaboration horizontale et l'intégration des trois dimensions de la durabilité est à un stade relativement peu avancée.

De ce fait, il est nécessaire de mener une analyse fine de l'état de l'art existant. Quatre revues de la littérature ont été identifiées dans le cadre de cette étude, qui diffèrent des objectifs de cette recherche. En effet, [Guajardo and Rönnqvist \(2016\)](#) ont passé en revue les méthodes de partage des gains générés par la collaboration horizontale dans le transport de marchandises. Par ailleurs, au niveau opérationnel, [Gansterer and Hartl \(2018\)](#) et [Verdonck et al. \(2013\)](#) ont étudié les modèles d'optimisation pour la planification du routage collaboratif. Récemment, [Pan et al. \(2019\)](#) ont fourni un examen complet des solutions de collaboration horizontale existantes et des problèmes de mise en œuvre dans le transport de marchandises. À notre connaissance, aucune étude n'a été menée sur la collaboration horizontale et la durabilité dans le secteur de la logistique et du transport de marchandises. Pour combler cette lacune, ce chapitre présente une revue exhaustive de la littérature sur la logistique et le transport durable collaboratif. Plus précisément, cette étude vise à répondre aux questions suivantes : Quels sont les travaux existants et les tendances actuelles de la recherche sur la collaboration horizontale et la durabilité dans la planification logistique ? Quelles sont les lacunes existantes en matière de recherche et quelles sont les contributions potentielles aux travaux futurs ?

Ce chapitre est organisé de la manière suivante. La section suivante présente la méthodologie de recherche utilisée dans ce chapitre. La troisième section présente une analyse descriptive des articles sélectionnés. La quatrième section catégorise et discute en profondeur les travaux existants selon des critères de catégorisation. La cinquième section aborde les tendances et les lacunes de la littérature existante. La sixième section vise à identifier quelques directions pour les recherches futures. Enfin, la septième section conclut cette étude.

## **1.2 Revue systématique de la littérature**

Afin de répondre aux questions de recherche identifiées dans la section précédente, une revue systématique de la littérature est réalisée afin de fournir une analyse approfondie et complète de l'état de l'art actuel.

Les lignes directrices proposées par [Durach et al. \(2017\)](#) pour réaliser une revue systématique de la littérature dans le domaine de la gestion des chaînes logistiques ont été adoptées. Notre méthodologie de recherche comprend essentiellement six étapes, schématisées par la Figure 1.1. Les différentes étapes sont détaillées dans les sous-sections ci-après.

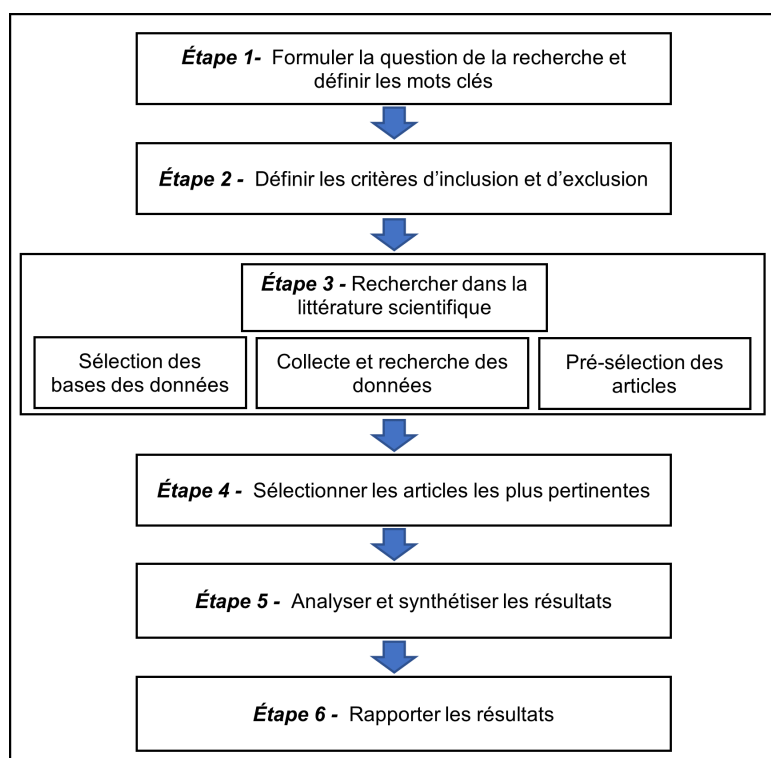


FIGURE 1.1 – Méthodologie de recherche en six étapes

### 1.2.1 Questions de recherche et mots-clés

La première étape consiste à définir clairement une ou plusieurs questions de recherche. En ce sens, l'objectif principal de cette recherche est d'examiner la littérature existante traitant le transport collaboratif et d'étudier comment les aspects de développement durable sont inclus dans la prise de décision stratégique, tactique et opérationnelle. Il est nécessaire, en outre, de définir une liste de mots clés, en se basant sur les questions de recherche. Trois catégories de mots sont définies. Les principaux mots-clés de la première catégorie sont : "*collaborative*", "*horizontal collaboration*", "*co-operative*", "*coalition*", "*alliance*", "*resource sharing*" et "*pooling*". Dans la deuxième catégorie, nous avons identifié les mots clés suivants : "*transportation*", "*logistic*", "*shipper*", "*carrier*", "*distribution*", "*location*", "*routing problem*" et "*inventory management*". Finalement, la dernière catégorie contient les mots suivants : "*sustainable development*", "*sustainability*", "*economic*", "*social*", "*ecological*", "*green*" et "*environmental*".

### 1.2.2 Critères d'inclusion et d'exclusion

Après avoir défini les mots clés, nous avons établi une liste de critères d'inclusion et d'exclusion afin de limiter la recherche documentaire et sélectionner les articles sur

lesquels se concentrer. L'ensemble des critères utilisés dans cette recherche est présenté dans le Tableau 1.1.

TABLEAU 1.1 – Critères d'inclusion et d'exclusion utilisés pour sélectionner les articles.

	Critères	Justifications
Inclusion	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Articles publiés entre 2010 et le premier semestre de 2020.</li> <li>- Publications dans des revues à comité de lecture, des articles de conférences et des chapitres d'ouvrages.</li> <li>- Articles traitant la collaboration horizontale, le transport et la logistique.</li> <li>- Études empiriques et expérimentales et articles de synthèse.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se concentrer sur les publications les plus récentes.</li> <li>- Se concentrer sur les articles de haute qualité et d'autres documents pour une recherche documentaire plus large et plus complète.</li> <li>- Accent mis sur les travaux liés à la collaboration horizontale dans le domaine de la logistique et du transport.</li> <li>- Pour inclure diverses approches de recherche.</li> </ul>
Exclusion	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Documents portant uniquement sur la collaboration verticale.</li> <li>- Études avec une autre langue que l'anglais et le français.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'objectif de cette recherche est de passer en revue la littérature existante sur la collaboration horizontale en logistique.</li> <li>- Nous ne pouvons pas lire les autres langues.</li> </ul>

### 1.2.3 Recherche de données

Dans cette étape, nous avons défini trois sous-étapes. La première sous-étape concerne la sélection des bases de données. Pour ce faire, nous avons sélectionné les bases de données sources suivantes : *Google Scholar*, *Web of Science*, *Taylor & Francis*, *Springer*, *Science Direct* et *Wiley Online Library*. Dans la deuxième sous-étape, nous avons commencé une recherche dans les différentes bases de données, en combinant les mots-clés définis dans la première étape, par exemple, "*horizontal collaboration*" OU "*collaborative*" ET "*transportation*" OU "*logistics*" ET "*sustainability*" OU "*economic*". Dans la dernière sous-étape, nous avons pré-sélectionné une première série de papiers en fonction de la pertinence du titre et le contexte de l'étude. Au total, 156 papiers ont été générés dans cette phase.

### 1.2.4 Sélection des papiers

Afin de réduire la taille de la base de données construite dans l'étape précédente et d'examiner un nombre raisonnable de papiers, nous avons mené un processus de filtrage

en utilisant les critères d'inclusion et d'exclusion. Cette étape vise à identifier les études les plus pertinentes sur lesquelles on doit se concentrer. Pour ce faire, nous avons lu le texte intégral de chaque papier et consulté la liste des références pour chacun d'entre eux. De plus, nous avons identifié les principaux auteurs contribuant à l'optimisation collaborative du transport de marchandises afin d'effectuer une seconde recherche basée sur leurs noms. Ensuite, nous avons ajouté les papiers qui n'avaient pas été trouvés initialement dans notre base de données. Finalement, un ensemble de 89 articles a été sélectionné pour l'examen et l'analyse comme des études pertinentes.

### **1.2.5 Cadre d'analyse des résultats**

Après avoir identifié les papiers pertinents, les étapes (5) et (6) visent à synthétiser la littérature et à rapporter les résultats. Premièrement, une analyse descriptive de la littérature identifiée a été réalisée en fonction de la répartition des travaux dans les différentes revues et au fil du temps. Ensuite, sur la base des questions de recherche présentées dans la première section, les articles ont été classés en fonction des problèmes décisionnels abordés (conception de réseau, partage des bénéfices, gestion des stocks, organisation de la distribution, routage des véhicules) et des dimensions de durabilité évaluées (économique, environnementale, sociale). En outre, les travaux examinés ont été classés en fonction de la méthodologie de recherche utilisée. Les articles qui utilisent des modèles mathématiques tels que l'optimisation, la simulation et la théorie des jeux sont classés dans la catégorie expérimentale. La deuxième sous-catégorie contient des recherches exploratoires qui se concentrent sur la définition de nouveaux concepts, des études de cas ou des entretiens avec des praticiens pour identifier les défis de la collaboration horizontale dans le monde réel, et des études empiriques. Enfin, la dernière sous-catégorie contient les revues de littérature ou les enquêtes sur la collaboration horizontale dans le transport de marchandises, en général.

Dans les sections suivantes, nous procédons à une analyse approfondie de la littérature identifiée selon les critères de catégorisation ci-dessus. Cette catégorisation nous permet de déterminer la tendance actuelle de la collaboration horizontale et de la durabilité dans la logistique et le transport de marchandises ainsi que d'identifier les lacunes de la recherche dans ce domaine.

## **1.3 Analyse descriptive**

### **1.3.1 Publications par année**

Dans cette section, une analyse de la distribution des publications identifiées a été effectuée pour étudier les tendances actuelles de la recherche entre 2010 et le premier



semestre de 2020. La Figure 1.2 montre la distribution annuelle des papiers sélectionnés. Nous pouvons constater que le nombre de publications a augmenté ces dernières

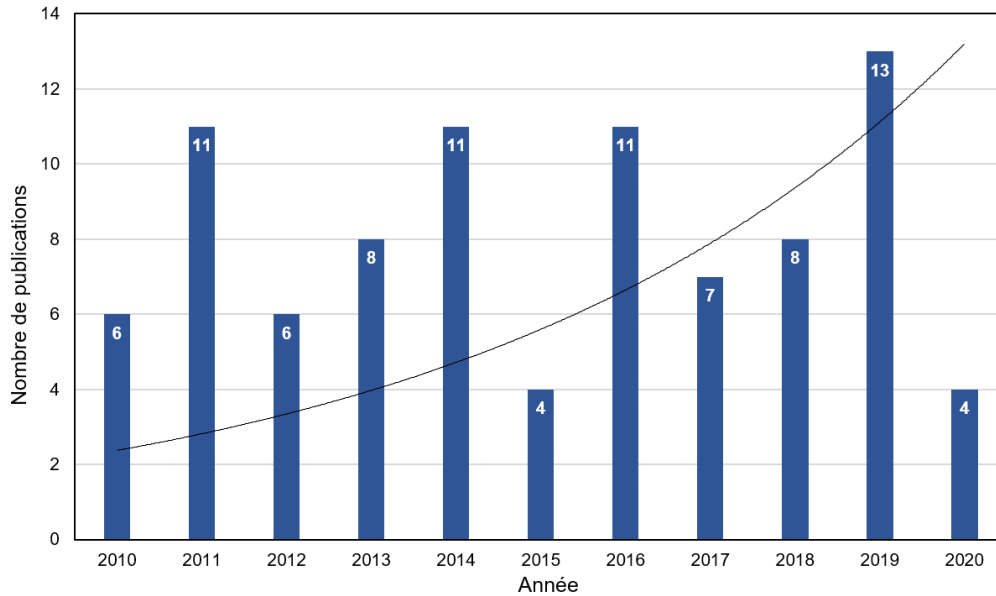


FIGURE 1.2 – Nombre de publications par année.

années, 53% des papiers ont été publiés depuis 2015. Cette analyse reflète les nouvelles tendances et l'attention accrue accordée à la recherche sur la collaboration horizontale dans le domaine de la logistique et du transport de marchandises. En outre, 4 papiers ont été identifiés au premier semestre 2020 (5%), ce qui nous permet de prédire encore des années de croissance pour ces domaines de recherche, notamment en ce qui concerne la durabilité des activités logistiques en raison de la hausse des pressions externes imposées par les autorités sur la politique de développement durable.

### 1.3.2 Publications par revue

Les papiers sélectionnés ont été distribués dans un total de 44 revues internationales et ont été communiqués dans 5 conférences internationales dans le domaine de la logistique et du transport. Comme le montre la Figure 1.3, 16 revues contiennent plus de 50% des articles, tandis que le reste se trouve dans 32 revues différentes et dans 5 conférences différentes. Les revues *European Journal of Operational Research*, *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, *Computers & Operations Research* et *Journal of Cleaner Production* représentent environ un quart de notre échantillon. Les revues *European Journal of Operational Research*, *Transportation Research Part E* et *Journal of Cleaner Production* occupent le premier, le deuxième et le troisième rang, avec respectivement 10, 5 et 5 publications.

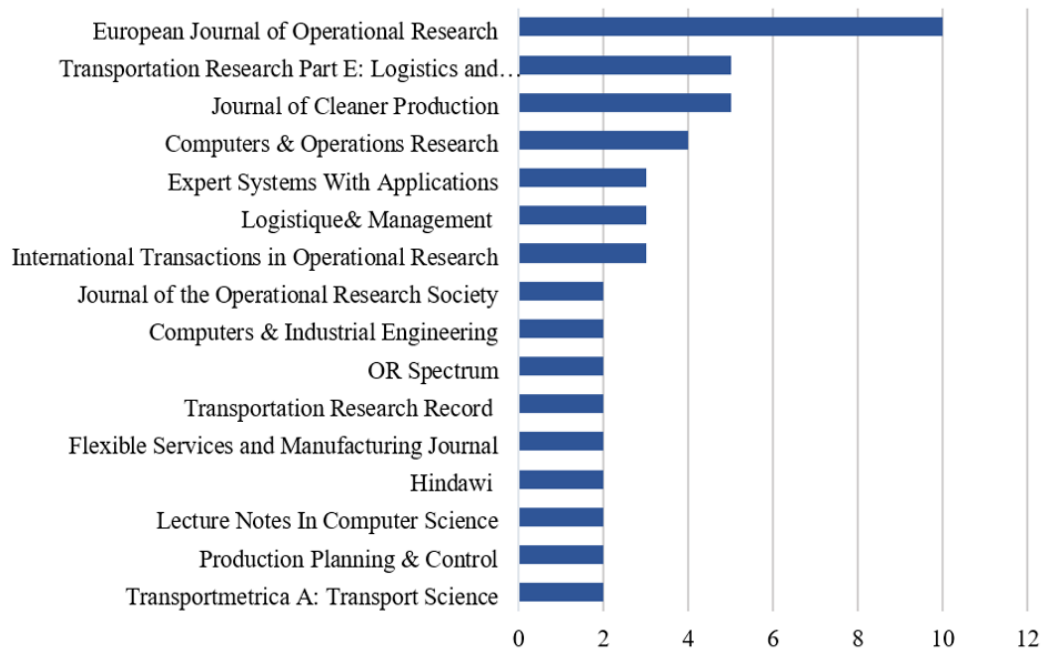


FIGURE 1.3 – Répartition des papiers examinés par revue ayant publié deux papiers ou plus.

## 1.4 Analyse et catégorisation de la littérature

La discussion et l'analyse que nous présentons dans cette section sont faites sur 89 références sélectionnées et sur le cadre d'analyse défini dans la section précédente. Une classification des papiers sélectionnés est présentée dans le Tableau 1.2. De plus, afin de résumer les résultats et d'identifier les lacunes de la recherche, nous répartissons les travaux en fonction des critères de classification comme le montre la Figure 1.4.

### 1.4.1 Analyse décisionnelle

Cette section fournit une analyse complète des travaux existants sur la collaboration dans le domaine du transport de marchandises. Pour structurer l'analyse et améliorer la compréhension des résultats, nous classons la littérature selon le(s) problème(s) de planification traité(s).

#### 1.4.1.1 Décisions stratégiques

Bien que les décisions stratégiques sont les plus cruciales dans la gestion de la chaîne logistique, ces décisions sont moins étudiées dans la littérature. Souvent, les décisions stratégiques dans la logistique et le transport concernent la conception ou la co-conception des réseaux de distribution afin de garantir la compétitivité des entreprises et d'atteindre les objectifs souhaités.

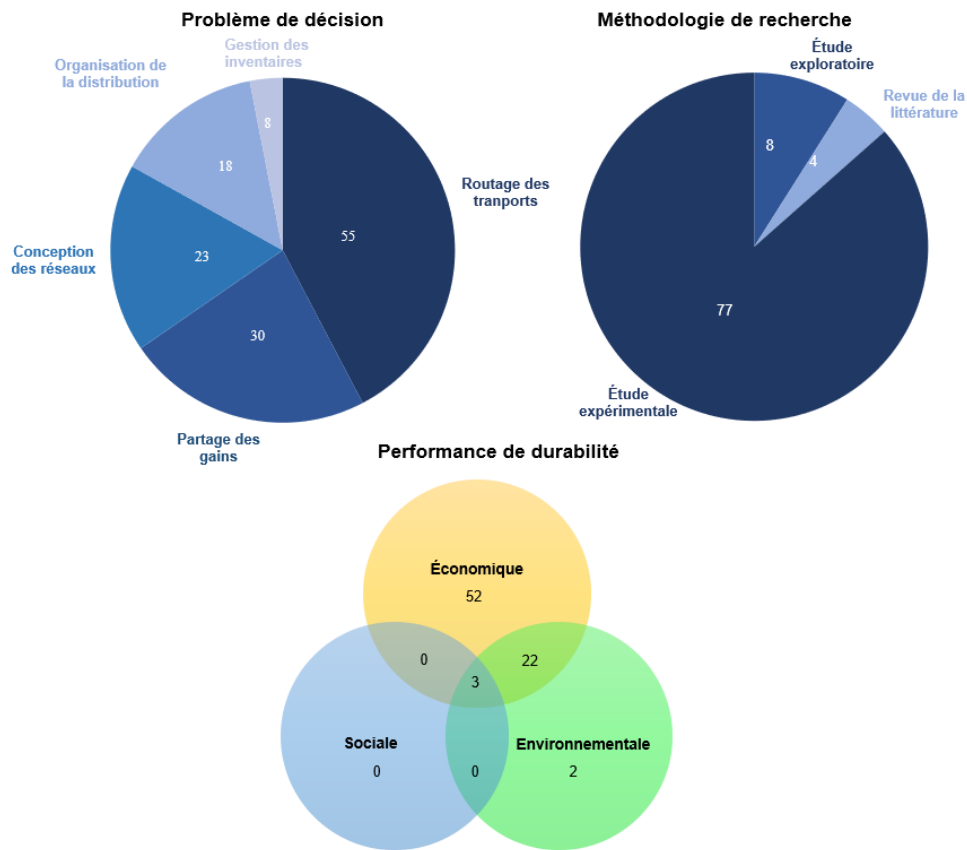


FIGURE 1.4 – Répartition des papiers selon les critères de catégorisation.

Une grande partie de la littérature a mis en oeuvre des stratégies de consolidation des flux pour obtenir des économies d'échelle. Dans ce contexte, [Ballot and Fontane \(2010\)](#) ont été les premiers auteurs qui ont considéré la mutualisation logistique comme une forme de collaboration horizontale permettant de consolider les flux et de réduire les émissions de gaz à effet de serre. De même, [Gonzalez-Feliu \(2011\)](#) a proposé un cadre de simulation intégré combinant un générateur de demande et un modèle d'optimisation de routage pour évaluer les avantages économiques et environnementaux de la mutualisation logistique dans le transport urbain de marchandises de la ville de Lyon. Un cadre structurel et organisationnel est développé par [Leitner et al. \(2011\)](#) pour optimiser les activités de transport entre chargeurs dans le cadre d'une coopération horizontale. Par ailleurs, [Ma et al. \(2013\)](#) ont abordé le problème de la conception et de l'évaluation de scénarios collaboratifs dans le transport urbain de marchandises en se basant sur une technique de clustering hiérarchique et une méthode d'analyse de dominance pour identifier le meilleur scénario collaboratif. En outre, [Pan et al. \(2013\)](#) ont étudié d'une manière indépendante l'impact environnemental et économique de la mutualisation des entrepôts et des centres de distribution entre les expéditeurs. Leurs résultats indiquent que la mutualisation est une stratégie très efficace pour réduire les

TABLEAU 1.2 – Classification de la littérature selon les critères de catégorisation.

Référence	Problème décisionnel				Environnement		Prise de décision		Durabilité			Méthodologie			
	Conception	Partage	Inventaires	Organisation	Routage	Déterministe	Incertain	Séparée	Intégrée	Économique	Environnementale	Sociale	Expérimentale	Exploratoire	Revue
Abbad and Salaun (2019)	✓													✓	
Ackermann et al. (2011)					✓	✓				✓			✓		
Adenso-Díaz et al. (2014a)					✓	✓				✓			✓		
Adenso-Díaz et al. (2014b)					✓	✓				✓			✓		
Allaoui et al. (2019)	✓		✓	✓	✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓		
Ankersmit et al. (2014)					✓	✓				✓			✓		
Audy et al. (2011)		✓				✓				✓			✓		
Audy et al. (2012)		✓				✓				✓			✓		
Bailey et al. (2011)					✓	✓				✓			✓		
Ballot and Fontane (2010)	✓									✓				✓	
Ben Jouida et al. (2017)						✓				✓			✓		
Berger and Bierwirth (2010)					✓	✓				✓			✓		
Björnfot and Torjussen (2012)														✓	
Buijs et al. (2014)	✓				✓	✓				✓			✓		
Buijs et al. (2016)					✓	✓				✓			✓		
Chabot et al. (2018)					✓	✓				✓	✓		✓		
Chai et al. (2013)	✓													✓	
Chen (2016)					✓	✓				✓			✓		
Cruijssen et al. (2010)		✓				✓				✓			✓		
Dahl and Derigs (2011)		✓			✓	✓				✓			✓		
Dai and Chen (2012)						✓				✓			✓		
Defryn et al. (2019)					✓	✓				✓			✓		
Fernández et al. (2016)	✓				✓	✓				✓			✓		
Fernández et al. (2018)		✓			✓	✓				✓			✓		
Fernández and Sgalambro (2020)						✓				✓			✓		
Frisk et al. (2010)	✓			✓		✓				✓			✓		
Gansterer and Hartl (2018)					✓										✓
Gonzalez-Feliu (2011)	✓			✓		✓		✓		✓	✓		✓		
Ma et al. (2013)	✓			✓		✓				✓			✓		
Gonzalez-Feliu and Malhéné (2014)					✓									✓	
Guajardo et al. (2018)		✓				✓				✓			✓		
Guajardo and Rönnqvist (2016)		✓													✓
Habibi et al. (2018)	✓	✓						✓	✓	✓			✓		
Hacardiaux and Tancrez (2020)	✓		✓			✓		✓	✓	✓	✓		✓		
Hernández et al. (2011)					✓	✓				✓			✓		
Hernández et al. (2012)	✓					✓				✓			✓		
Hernández and Peeta (2011)					✓	✓				✓			✓		

La suite est à la page suivante

Tableau 1.2 – Suite de la page précédente

Référence	Problème décisionnel				Environnement		Prise de décision		Durabilité			Méthodologie			
	Conception	Partage	Inventaires	Organisation	Routage	Déterministe	Incertain	Séparée	Intégrée	Économique	Environnementale	Sociale	Expérimentale	Exploratoire	Revue
Hernández and Peeta (2014)					✓	✓				✓			✓		
Kuyzu (2017)					✓	✓				✓			✓		
Leitner et al. (2011)	✓									✓				✓	
Li et al. (2016)		✓					✓			✓			✓		
Liu et al. (2010a)					✓	✓				✓			✓		
Liu et al. (2010b)					✓	✓				✓			✓		
Lozano et al. (2013)		✓				✓				✓			✓		
Makhloufi et al. (2015)					✓		✓			✓	✓		✓		
Martin and Tanguy (2019)	✓													✓	
Molenbruch et al. (2017)					✓	✓				✓			✓		
Montoya-Torres et al. (2016)				✓	✓	✓			✓	✓	✓		✓		
Moutaoukil et al. (2013a)				✓	✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓		
Moutaoukil et al. (2015)					✓	✓				✓	✓		✓		
Muñoz-Villamizar et al. (2019a)				✓	✓	✓			✓	✓	✓		✓		
Muñoz-Villamizar et al. (2019b)					✓	✓				✓	✓		✓		
Munoz-Villamizar et al. (2020)					✓	✓				✓	✓		✓		
Nadarajah and Bookbinder (2013)					✓	✓				✓	✓		✓		
Nataraj et al. (2019)	✓			✓	✓	✓			✓	✓	✓		✓		
Ouhader and El Kyal (2017)	✓	✓		✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓		
Ouhader et al. (2020)	✓	✓		✓	✓	✓			✓	✓	✓		✓		
Özener et al. (2011)					✓	✓				✓			✓		
Özener et al. (2013)		✓			✓	✓				✓			✓		
Pan et al. (2013)	✓		✓			✓				✓	✓		✓		
Pan et al. (2014)	✓		✓	✓		✓		✓		✓	✓		✓		
Pan et al. (2019)	✓	✓			✓					✓	✓		✓		✓
Pérez-Bernabeu et al. (2015)					✓	✓				✓	✓		✓		
Quintero-Araujo et al. (2016)					✓		✓			✓			✓		
Quintero-Araujo et al. (2019)	✓			✓	✓	✓			✓	✓	✓		✓		
Ruel (2019)	✓													✓	
Sanchez et al. (2016)		✓		✓		✓				✓	✓		✓		
Soysal et al. (2018b)			✓		✓		✓		✓	✓	✓		✓		
Sprenger and Mönch (2014)					✓		✓			✓			✓		
Stellingwerf et al. (2018)			✓		✓	✓			✓	✓	✓		✓		
Stellingwerf et al. (2019)		✓	✓		✓	✓				✓	✓		✓		
Tang et al. (2016)	✓					✓				✓			✓		
Vanovermeire and Sörensen (2014)		✓				✓				✓			✓		
Vaziri et al. (2019)					✓	✓				✓			✓		
Verdonck et al. (2013)					✓										✓

La suite est à la page suivante

Tableau 1.2 – Suite de la page précédente

Référence	Problème décisionnel					Environnement		Prise de décision		Durabilité			Méthodologie		
	Conception	Partage	Inventaires	Organisation	Routage	Déterministe	Incertain	Séparée	Intégrée	Économique	Environnementale	Sociale	Expérimentale	Exploratoire	Revue
Verdonck et al. (2016)	✓	✓				✓		✓		✓			✓		
Wang et al. (2014)					✓	✓				✓			✓		
Wang et al. (2017a)		✓		✓	✓	✓			✓	✓			✓		
Wang et al. (2017b)		✓		✓	✓	✓			✓	✓			✓		
Wang et al. (2018a)		✓		✓	✓	✓			✓	✓			✓		
Wang et al. (2018b)		✓		✓	✓	✓			✓	✓			✓		
Wang et al. (2018c)		✓		✓	✓	✓			✓	✓	✓		✓		
Wang et al. (2020b)		✓		✓	✓	✓			✓	✓			✓		
Wang and Kopfer (2014)					✓	✓				✓			✓		
Wang and Kopfer (2015)					✓	✓				✓			✓		
Weng and Xu (2014)					✓	✓				✓			✓		
Wick et al. (2011)		✓				✓					✓		✓		
Xu et al. (2012)		✓				✓				✓	✓		✓		
Yilmaz and Savasaneril (2012)		✓					✓			✓			✓		

émissions de gaz à effet de serre ainsi que les coûts logistiques. Une autre étude a été menée par [Moutaoukil et al. \(2013a\)](#) qui vise à proposer et simuler plusieurs scénarios pour aider les petites et les moyennes entreprises agro-alimentaires à concevoir un réseau de distribution en optimisant les trois dimensions de la durabilité. D'autres scénarios concernant l'organisation logistique ont également été proposés dans [Pan et al. \(2014\)](#). Les chercheurs ont traité le problème de conception du réseau de distribution en optimisant indépendamment les objectifs économiques et environnementaux. Pour résoudre ce problème, des modèles de programmation linéaire ont été proposés pour déterminer le nombre et l'emplacement optimal des hubs parmi un ensemble et définir également les plans de transport.

Tous les travaux évoqués ci-dessus supposent que les décisions relatives à l'emplacement des installations soient préalablement résolues et l'objectif principal de leurs contributions est de définir des nouvelles organisations de consolidation des flux. [Tang et al. \(2016\)](#) ont contribué à ce sujet en étudiant le problème de localisation des centres de distribution régionale dans les réseaux de distribution collaboratifs de produits horticoles en France, tout en minimisant les coûts de transport et d'ouverture des installations. [Verdonck et al. \(2016\)](#) se sont également concentrés sur le problème de la localisation des centres de distribution pour quantifier les avantages économiques de la collaboration horizontale dans les réseaux de distribution à deux échelons. De même, [Hernández et al. \(2012\)](#) ont traité le problème de la localisation des hubs centralisés et hybrides. Le modèle proposé est hybride car il autorise l'expédition directe de marchandises, mais il est centralisé dans le sens où les activités de tous les transporteurs sont regroupées dans un système en étoile pour consolider les flux. Récemment, [Fernández and Sgalambro \(2020\)](#) ont proposé et analysé plusieurs politiques collaboratives pour résoudre le problème de localisation du hub non-centralisé et non-hybride. Un outil d'aide à la décision pour la planification collaborative dans les chaînes logistiques durables a été proposé plus récemment par [Allaoui et al. \(2019\)](#). L'outil proposé permet de générer des scénarios optimisés afin de concevoir des réseaux logistiques selon le poids et les critères de durabilité privilégiés. Évidemment, les décisions stratégiques ont un impact considérable sur la performance logistique à long terme. Par conséquent, les incertitudes concernant les coûts et les données doivent être prises en compte afin de garantir l'efficacité des réseaux logistiques en cas de perturbations. Dans ce contexte, [Habibi et al. \(2018\)](#) sont les seuls qui ont intégré l'incertitude des coûts d'établissement des hubs partagés dans le problème de conception des réseaux logistiques collaboratifs.

Bien que les travaux cités précédemment traitent de niveaux de planification autres que les décisions stratégiques, les différentes décisions sont traitées séparément. Cependant, ces dernières années, quelques travaux proposant des modèles de décision intégrés pour la planification collaborative des transports ont été discutés dans la littérature.

En ce sens, [Ouhader and El Kyal \(2017\)](#) ont étudié la planification intégrée d'un réseau de distribution collaboratif en traitant le problème de localisation et de routage (Location Routing Problem LRP) à deux échelons. L'objectif principal de cette étude est de déterminer les décisions de localisation des centres de distribution et d'optimiser conjointement les futurs itinéraires tout en optimisant simultanément les trois dimensions de la durabilité, à savoir les coûts logistiques, les émissions de  $CO_2$  et les opportunités d'emploi créées. Les résultats expérimentaux ont montré que la collaboration horizontale peut apporter des réductions importantes des émissions de  $CO_2$  et des coûts de transport, mais elle a un impact négatif sur l'aspect social évalué. Une extension de cette étude a été récemment publiée dans ([Ouhader et al., 2020](#)). Dans cette dernière, les auteurs se sont intéressés à la manière d'équilibrer les préoccupations économiques et environnementales dans une coalition en utilisant une approche multi-objectifs. De même, [Quintero-Araujo et al. \(2019\)](#) [Nataraj et al. \(2019\)](#) ont discuté le problème de conception des réseaux de distribution urbains basé sur un modèle LRP. Les chercheurs ont examiné l'utilisation des concepts de collaboration horizontale dans les décisions intégrées de routage et de localisation dans des réseaux logistiques mono-échelle. Plusieurs scénarios avec différents degrés de collaboration ont été proposés et résolus à l'aide de méta-heuristiques avec un seul objectif, à savoir les coûts logistiques. Par ailleurs, [Hacardiaux and Tancrez \(2020\)](#) ont intégré les décisions de localisation et d'inventaire pour analyser les avantages environnementaux de la collaboration horizontale dans les réseaux logistiques à deux échelons. Dans cette étude, le modèle proposé vise principalement à optimiser les coûts logistiques, tandis que la dimension environnementale a été prise en compte a posteriori après la résolution économique.

En plus des études quantitatives analysées ci-dessus, il existe également quelques études empiriques qui explorent les effets stratégiques de la collaboration logistique et leurs obstacles dans les secteurs industriels. [Abbad and Salaun \(2019\)](#) et [Björnfot and Torjussen \(2012\)](#) ont examiné les avantages de la collaboration logistique et les conditions de réussite pour la mise en place d'une stratégie collaborative dans la distribution de marchandises en s'appuyant sur des études de cas réels. Ainsi, en ce qui concerne les freins à la mutualisation logistique, [Chai et al. \(2013\)](#), [Martin and Tanguy \(2019\)](#) et [Ruel \(2019\)](#) ont enquêté des industriels pour identifier les raisons et les obstacles à la mise en œuvre de la mutualisation horizontale. Les résultats des différents travaux montrent que la collaboration entre les concurrents, en raison de la nécessité de partage des informations, est le principal obstacle de la mise en place d'une démarche collaborative.

#### 1.4.1.2 Décisions tactiques

Au niveau tactique, la planification des chaînes logistiques concerne généralement les décisions à moyen terme. C'est à ce niveau que les décisions seront prises par rapport



à la taille de l'expédition, au partage des gains, à la définition des modes de transport ou de distribution, à la fréquence des visites des clients et à la gestion des stocks.

- i **Répartition des gains :** Étant donné que l'objectif principal de la coopération horizontale est d'accroître l'efficacité logistique des participants et que cette pratique s'exprime souvent par des gains ou des économies supplémentaires, de nombreuses études portant sur la planification tactique et la collaboration dans le secteur de la logistique se concentrent sur la manière de répartir équitablement les bénéfices obtenus entre les différentes parties prenantes. La littérature peut être classée en deux sous-catégories. Dans la première, on trouve les travaux qui visent à proposer uniquement des méthodes d'allocation des gains dans le but de réaliser des économies, tandis que la seconde regroupe les travaux qui traitent d'autres niveaux de décision avec la prise en compte du partage des gains là où les méthodes d'allocation existantes sont utilisées.

Une large partie de la littérature traite la première sous-catégorie en se focalisant sur la collaboration entre chargeurs/transporteurs et le partage des coûts. Par exemple, [Yilmaz and Savasaneril \(2012\)](#) ont étudié le problème de la formation de coalitions entre les petits expéditeurs dans un environnement incertain. L'objectif de leur étude est de déterminer la politique optimale de coalition et de proposer des mécanismes d'allocation basés sur la théorie des jeux tout en garantissant un équilibre budgétaire entre les chargeurs. Dans le même contexte, [Crujssen et al. \(2010\)](#) ont abordé le problème de l'externalisation des activités de transport pour les chargeurs en utilisant une étude de cas de quatre épiciers néerlandais. Les auteurs ont proposé une méthode d'allocation basée sur la valeur de Shapley pour allouer les économies obtenues par l'externalisation des activités de transport entre les expéditeurs d'une même coalition. Dans l'étude de [Frisk et al. \(2010\)](#), des mécanismes de partage basés sur la théorie des jeux coopératifs ont été étudiés et une nouvelle méthode a également été proposée pour répartir les gains entre les participants dans le cadre du transport forestier collaboratif. Les mécanismes conçus visent à trouver une allocation stable afin que la différence maximale entre les économies relatives de deux transporteurs soit minimale. Dans le cadre d'une collaboration entre transporteurs, une étude de cas a été réalisée par [Audy et al. \(2011\)](#) avec quatre fabricants de meubles canadiens afin de développer un système d'allocation des coûts et de fournir une analyse de sensibilité du montant minimum d'économies qui pourrait convaincre les fabricants de rejoindre une telle coalition, basé sur les mécanismes de [Frisk et al. \(2010\)](#). Sur la base des deux derniers travaux cités ci-dessus, [Dai and Chen \(2012\)](#) ont amélioré ces mécanismes en étudiant la contribution de chaque transporteur aux demandes d'offres et aux demandes de services. Les mécanismes proposés ont été appliqués pour examiner la répartition des coûts entre plusieurs

transporteurs de chargements partiels (Less Than Truckload LTL) dans une collaboration centralisée. Un programme linéaire mixte en nombres entiers (PLMNE) est proposé par (Lozano et al., 2013) pour estimer les économies de coûts et identifier les scénarios de la coalition les plus rentables. En outre, les auteurs ont examiné le problème de l'allocation conjointe des économies de coûts en utilisant plusieurs méthodes de la théorie des jeux coopératifs.

Parallèlement aux critères de coût dans l'attribution des gains, d'autres critères opérationnels tels que la flexibilité dans l'organisation de la distribution et les émissions de  $CO_2$  ont été inclus dans les mécanismes de partage des coûts. C'est dans ce contexte que Vanovermeire and Sörensen (2014) ont introduit la flexibilité des délais de livraison dans l'optimisation de la planification opérationnelle du transport et la répartition des gains. En plus des économies de coûts, il y a aussi des économies environnementales qui sont généralement quantifiées en termes d'émissions de  $CO_2$ . Par ailleurs, Xu et al. (2012) et Wick et al. (2011) ont proposé des méthodes de répartition des économies environnementales obtenues par la mutualisation logistique en adaptant le concept de valeur de Shapley. De plus, une méthodologie basée sur la valeur de Shapley a récemment été proposée par Stellingwerf et al. (2019) pour allouer les gains monétaires en tenant compte les contributions des partenaires aux économies de coûts et d'émissions dans l'IRP collaboratif. Une revue de la littérature sur les méthodes existantes d'allocation des coûts dans le transport collaboratif a été publiée dans Guajardo and Rönnqvist (2016). Les auteurs ont conclu que la plupart des méthodes proposées sont des combinaisons des modèles d'allocation déjà définis dans la littérature et proviennent souvent de la théorie de jeux coopératifs.

D'autre part, plusieurs études ont utilisé des méthodes existantes pour allouer les gains générés par la collaboration suite à la résolution d'un tel problème d'optimisation, par exemple, le problème de localisation, de routage ou d'inventaire, ce sont les études de la deuxième sous-catégorie. Li et al. (2016) ont utilisé une approche coopérative de la théorie des jeux pour résoudre le problème de répartition des coûts entre les distributeurs LTL de produits périssables, en particulier dans la décision d'affectation des moyens de transport. En outre, Une comparaison des méthodes d'allocation existantes a été faite dans (Ouhader and El Kyal, 2017; Ouhader et al., 2020) pour aider les participants à partager équitablement les gains économiques, environnementaux et sociaux générés dans la planification ingérée et collaborative des décisions de localisation et du routage des véhicules. Dans le même contexte, Verdonck et al. (2016) ont examiné les différents mécanismes de partage des gains pour partager équitablement les économies obtenues en résolvant le problème de localisation des installations. Dans (Guajardo, 2018; Sanchez et al., 2016; Wang

et al., 2017a,b, 2018a,b,c, 2020b), les chercheurs ont utilisé des mécanismes d'allocation des avantages basés sur la théorie des jeux pour répartir les gains obtenus par le routage coopératif des véhicules. Özener et al. (2013) ont comparé les différentes méthodes d'allocation des coûts pour la coopération dans le problème de routage et d'inventaire conjoint (Joint Inventory Routing Problem JIRP).

Étant donné que les mécanismes de partage des gains sont importants pour assurer la stabilité d'une coalition, le problème du partage des gains peut être étendu au problème de la stabilité de la coalition. La plupart des travaux cités ci-dessus ne considèrent qu'une coalition impliquant tous les acteurs, en d'autres termes, la formation d'une grande coalition. Toutefois, les acteurs de la coalition peuvent à tout moment abandonner la coalition (Audy et al., 2012), et certains acteurs peuvent être plus intéressés à rejoindre des sous-coalitions qui ne sont pas forcément de grandes coalitions mais dont les bénéfices sont plus importants pour l'ensemble des membres de la coalition (Crujssen et al., 2010). Par conséquent, la question qui se pose maintenant est de savoir comment trouver les sous-coalitions les plus stables et les plus rentables, quand elles existent. Ce problème correspond à ce que la littérature appelle la formation ou la configuration des coalitions. Cette dernière a reçu moins d'attention dans la littérature. Très peu d'études ont examiné la formation de coalitions dans le transport collaboratif (Audy et al., 2012; Ben Jouida et al., 2017; Defryn et al., 2019).

- ii **Gestion des inventaires** : Les décisions concernant la gestion des stocks ont été combinées avec d'autres décisions de planification afin de les optimiser simultanément. Ces décisions ont été particulièrement incorporées dans la modélisation logistique des produits périssables. Récemment, le problème de routage et d'inventaire (Inventory Routing Problem IRP) a été étudié par Stellingwerf et al. (2019, 2018) dans le cas de la distribution alimentaire à température contrôlée. Dans cette étude, un modèle de programmation linéaire qui minimise les coûts logistiques, les émissions et la combinaison linéaire de deux objectifs est proposé pour trouver le plan optimal de routage et d'inventaire. De même, Soysal et al. (2018b) ont proposé un modèle pour traiter l'IRP écologique sous incertitude de la demande dans le cas de produits périssables. De plus, un programme quadratique en nombres entiers mixtes (Mixed Integer Quadratic Programming MIQP) a été proposé par Hacardiaux and Tancrez (2020) pour optimiser conjointement les décisions de localisation et d'inventaire et évaluer les avantages environnementaux de la collaboration horizontale tout en satisfaisant les demandes incertaines. Dans le même contexte, Pan et al. (2013, 2014) ont intégré les décisions d'inventaire et les décisions d'allocation-localisation des installations pour évaluer les avantages de la mutualisation logistique.
- iii **Organisation de la distribution** : L'organisation de la distribution des marchandises est l'une des questions clés de l'optimisation du transport. L'utilisation

de routes communes et la consolidation des moyens sont considérées comme la principale source d'économies. Plusieurs études ont tenté de proposer des schémas collaboratifs pour optimiser la distribution de marchandises. En effet, les entreprises peuvent mettre en commun leurs moyens de transport et partager leurs ressources pour livrer un ensemble de clients. Par exemple, [Pan et al. \(2014\)](#) et [Pan et al. \(2013\)](#) ont comparé quatre scénarios, y compris le cas d'une distribution conjointe d'itinéraires entre fournisseurs, pour identifier le plan de transport le plus efficace en termes de coût et de réduction des émissions de  $CO_2$ . Dans le même contexte, dans l'étude de [Moutaoukil et al. \(2013a\)](#), différentes configurations ont été examinées pour déterminer la meilleure stratégie durable de distribution de marchandises. D'autres études commencent par un scénario non coopératif, puis analysent les avantages potentiels qui peuvent être obtenus par une pratique collaborative. À titre d'exemple, [Ouhader and El Kyal \(2017\)](#) et [Ouhader et al. \(2020\)](#) ont comparé deux modes d'organisation, un scénario dans lequel il n'y a aucune coopération entre les fournisseurs et un second scénario totalement collaboratif dans lequel les décisions sont prises conjointement. De même, [Quintero-Araujo et al. \(2019\)](#), [Nataraj et al. \(2019\)](#), [Gonzalez-Feliu \(2011\)](#), [Ma et al. \(2013\)](#), [Sanchez et al. \(2016\)](#), [Wang et al. \(2017a,b, 2018a,b,c, 2020b\)](#) et [Montoya-Torres et al. \(2016\)](#) se sont concentrés sur la distribution du dernier kilomètre pour développer et optimiser un réseau de distribution collaboratif. Leur principal objectif est d'évaluer les avantages obtenus par la collaboration et la planification conjointe. Récemment, [Muñoz-Villamizar et al. \(2019\)](#) ont considéré une flotte de véhicules électriques comme une stratégie dans le routage collaboratif en milieu urbain. Une étude de cas à partir de données réelles a été réalisée pour quantifier et analyser les différents avantages de l'utilisation d'une flotte de véhicules mixtes.

#### 1.4.1.3 Décisions opérationnelles

La plupart des travaux sur la logistique collaborative se concentrent principalement sur la planification opérationnelle, comme le montre la Figure 1.4, environ 60% des études examinées traitent ce niveau de décision. Ce dernier consiste à établir des plans de transport optimisés en partageant les ressources en vue d'améliorer l'efficacité opérationnelle des transporteurs ou des expéditeurs. Des synthèses de la littérature, donnant un aperçu détaillé des techniques et des solutions des problèmes de planification opérationnelle, ont été publiées dans ([Gansterer and Hartl, 2018](#); [Verdonck et al., 2013](#)). En ce qui concerne les études expérimentales, la plupart des articles se concentrent sur la quantification des avantages et le rôle de la planification conjointe des itinéraires ([Adenso-Díaz et al., 2014a,b](#); [Buijs et al., 2014](#); [Fernández et al., 2018](#); [Molenbruch et al., 2017](#); [Montoya-Torres et al., 2016](#); [Pérez-Bernabeu et al., 2015](#); [Quintero-Araujo et al., 2016](#); [Sanchez et al., 2016](#); [Soysal et al., 2018b](#); [Sprenger and Mönch, 2014](#);

Wang et al., 2018b). La littérature a révélé que la planification conjointe des itinéraires des véhicules dans le transport de marchandises peut apporter des avantages économiques ainsi que des gains environnementaux (Chabot et al., 2018; Moutaoukil et al., 2015; Muñoz-Villamizar et al., 2019a; Munoz-Villamizar et al., 2020; Muñoz-Villamizar et al., 2019b; Ouhader and El Kyal, 2017; Pan et al., 2014; Stellingwerf et al., 2018; Wang et al., 2018c), ce qui améliore la rentabilité des entreprises grâce à l'inclusion de ressources externes (Wang and Kopfer, 2014).

Plusieurs variantes de problèmes de routage de véhicules collaboratifs (Collaborative Vehicle Routing Problems CVRP) ont été discutées dans la littérature. Le problème de routage d'arc capacitif multi-dépôts avec des charges complètes (Multi-Depot Capacitated Arc Routing Problem with Full Truckloads MDCARPFL) dans le cadre d'une collaboration entre transporteurs a été étudié par Liu et al. (2010a) afin de minimiser les trajets à vide. Une heuristique en deux étapes a été développée pour résoudre le modèle proposé avec des instances de grande taille. Dans un contexte similaire, Fernández et al. (2016) ont développé un modèle d'optimisation pour aborder le problème d'acheminement d'arc non-capacitif. Le problème de routage d'arc multi-dépôts (Multi-Depot Arc Routing Problem MDARP) a également été étudié par Weng and Xu (2014) afin de fusionner les flux de marchandises et d'optimiser le routage du hub des tâches fusionnées. Les auteurs ont souligné que la fusion des activités de transport permet aux entreprises de réaliser des économies d'échelle importantes. Basé sur le concept de mise en commun des ressources, Nadarajah and Bookbinder (2013) ont développé un cadre de modélisation et une approche de résolution pour traiter le problème de routage entre les transporteurs LTL. Sprenger and Mönch (2014) ont développé un outil d'aide à la décision pour la planification du transport coopératif dans l'industrie alimentaire où plusieurs entreprises de fabrication partagent leurs flottes pour réduire les coûts de transport. Une approche basée sur des stratégies de décomposition a été proposée dans (Buijs et al., 2016) pour traiter le problème de la planification collaborative du transport routier de deux entreprises néerlandaises. Outre la collaboration dans le transport routier et ferroviaire, cette stratégie a également été envisagée dans le transport aérien (Ankersmit et al., 2014). Dans ce dernier, les chercheurs ont proposé un cadre conceptuel de simulation pour relever le potentiel de collaboration entre plusieurs transitaires à l'aéroport de Schiphol-Amsterdam pour les courtes distances.

Les demandes d'expédition ne sont souvent pas intégrées efficacement dans l'itinéraire d'un transporteur. Dans ce cas, une collaboration entre les transporteurs qui consiste à allouer ou à échanger des demandes est nécessaire pour améliorer l'efficacité globale du réseau de distribution et le profit de chaque transporteur. Les divers objectifs d'échange des demandes et de la planification collaborative ont été discutés dans de multiples travaux de recherche (Ackermann et al., 2011; Dai and Chen, 2012; Nadarajah and Bookbinder, 2013). Liu et al. (2010b) ont combiné le CVRP avec le problème

de sélection de la demande où les transporteurs reçoivent des commandes d'expédition auxquelles ils doivent répondre soit avec des flottes internes, soit avec des demandes externalisées via un partenaire de transport. L'objectif principal de cette contribution est d'acheminer les véhicules et de faire une sélection des demandes en minimisant le coût total lorsqu'un transporteur répond aux demandes. De même, [Berger and Bierwirth \(2010\)](#) ont étudié le problème de ré-allocation des demandes de transport dans un réseau collaboratif afin de maximiser le profit total des transporteurs. Néanmoins, pour massifier le flux et augmenter le taux de remplissage, les entreprises peuvent effectuer leurs expéditions en charge complète (Full Truck Load FTL) ([Ballot and Fontane, 2010](#); [Pan et al., 2013](#)). Dans ce contexte, [Özener et al. \(2011\)](#) ont développé un mécanisme d'échange des voies pour traiter le problème d'échange des demandes dans le cadre d'une collaboration décentralisée. Par ailleurs, [Kuyzu \(2017\)](#) a étudié la fusion et l'échange de voies dans l'approvisionnement collaboratif entre transporteurs FTL. Un système d'aide à la décision collaboratif destiné aux transporteurs de messagerie express est développé par [Dahl and Derigs \(2011\)](#). Cet outil est conçu pour favoriser l'échange en temps réel des demandes entre transporteurs. Les chercheurs ont démontré qu'avec un système d'échange en temps réel, le réseau peut fonctionner à un niveau similaire à celui obtenu par une planification centralisée. Dans cette dernière, les décisions de planification sont prises par une entité centrale et les demandes sont échangées via cette entité, qui peut être une plateforme en ligne, contrairement à la planification décentralisée [Dai and Chen \(2012\)](#).

[Chen \(2016\)](#) a développé un mécanisme d'échange combinatoire pour les transporteurs LTL. De plus, la planification dynamique est un autre type de planification abordé dans la littérature. Par exemple, [Wang and Kopfer \(2015\)](#) ont abordé la version dynamique du problème de planification collaborative avec un horizon glissant dans lequel les transporteurs peuvent échanger les demandes des clients. La réduction et l'optimisation du temps de trajet, et notamment les retours à vide des camions sont parmi les défis majeurs de la logistique et du transport. [Bailey et al. \(2011\)](#) ont contribué à ce sujet en proposant une méthode efficace qui permet d'ajouter des tâches de livraison et de ramassage lors du routage de retour. Deux modèles d'optimisation ont été développés pour élaborer les itinéraires des véhicules et sélectionner les demandes à expédier. Le premier est modélisé comme un programme linéaire (Linear Programming LP), tandis que le second est formulé comme un MILP. Une heuristique et une recherche tabou sont utilisées pour résoudre ces modèles. Les résultats obtenus à partir de données réelles montrent que le pourcentage de réduction des coûts peut atteindre jusqu'à 27%. Dernièrement, [Vaziri et al. \(2019\)](#) ont étudié le problème de ramassage et de livraison (Pickup and Delivery Problem PDP) dans le contexte des transporteurs FTL. Les auteurs ont proposé un MILP pour répartir équitablement les profits entre les transporteurs et minimiser le temps de déplacement. Un autre modèle a été

introduit dans (Wang and Kopfer, 2014). Dans cette étude, les chercheurs ont supposé que les transporteurs LTL peuvent échanger toutes leurs demandes d'enlèvement et de livraison afin de réduire les coûts de transport. Une extension de cette dernière étude qui inclut la sous-traitance des activités de transport a été publiée dans Wang et al. (2014). Dans une perspective similaire, Hernández and Peeta (2014) se sont penchés sur la question de la collaboration d'un seul transporteur, dans laquelle un transporteur de lots partiels cherche à collaborer avec d'autres partenaires en acquérant des capacités externes afin de répondre à la demande excédentaire.

Dans la pratique, il existe de nombreuses contraintes dans le CVRP. Ces contraintes conduisent à plusieurs variantes de problèmes. En effet, le problème de routage collaboratif doit considérer les contraintes de capacité des transporteurs (Hernández and Peeta, 2011; Hernández et al., 2011). Hernández and Peeta (2011) ont traité le problème de collaboration centralisée entre plusieurs transporteurs lorsque la capacité dépend du temps, en d'autres termes, les transporteurs peuvent utiliser ou fournir une capacité de transport pendant le routage. Le problème a été modélisé comme un problème de flux à coût minimal (Minimum Cost Flow Problem MCFP) et résolu à l'aide d'un algorithme Branch-and-Cut (B&C). Les auteurs ont adressé le problème déterministe et dynamique de la collaboration entre un seul transporteur LTL pour les petites et moyennes entreprises (PMEs). Un autre volet de la recherche vise à intégrer les fenêtres de temps dans la planification collaborative des transports. Par exemple, Moutaoukil et al. (2015) ont résolu le problème de routage de véhicules avec fenêtres de temps, afin d'étudier l'impact de la livraison du dernier kilomètre sur les trois dimensions de la durabilité. Récemment, Wang et al. (2020b) ont abordé la planification collaborative dans un réseau logistique multi-dépôts avec une allocation des fenêtres de temps aux demandes de livraison. Enfin, un système d'aide à la décision basé sur la simulation qui prend en compte les contraintes de temps et la demande stochastique dans le PDP a été proposé par Makhoulfi et al. (2015).

### 1.4.2 Analyse des dimensions de durabilité

Avec la préoccupation croissante pour le développement environnemental et social durant les deux dernières décennies, les aspects de durabilité sont désormais des mesures importantes dans l'organisation et l'optimisation des réseaux logistiques. Ces considérations de durabilité ont, en effet, été progressivement incluses dans l'optimisation de la logistique collaborative, notamment dans les décisions stratégiques qui ont un impact significatif à long terme sur la performance globale des entreprises (Aloui et al., 2020; Ouhader and El Kyal, 2017). L'état de l'art actuel dans ce domaine repose essentiellement sur l'intégration d'objectifs économiques et environnementaux, tandis que l'aspect social est moins abordé comme le montre la Figure 1.4. Il est important de noter qu'en classant la littérature, nous nous sommes concentrés sur les études qui

abordent une ou plusieurs dimensions de la durabilité, les autres travaux abordant la collaboration dans une perspective générale à travers des enquêtes ou des revues ne sont pas considérés dans cette classification.

En s'appuyant sur la Figure 1.4 et le Tableau 1.2, on peut constater que la dimension économique a dominé les autres dimensions de durabilité. Sur les 89 articles examinés, 52 traitent uniquement des objectifs économiques, 22 considèrent les objectifs économiques et environnementaux et seulement trois articles abordent le problème de l'optimisation des réseaux de distribution en considérant les trois aspects de la durabilité. Deux études ont évalué uniquement la dimension environnementale dans l'organisation de la distribution de marchandises. Enfin, aucune contribution n'aborde les problèmes de planification dans une seule perspective sociale et à l'intersection entre les dimensions sociale et environnementale ou économique.

#### 1.4.2.1 Performance économique

Dans une chaîne logistique, les principaux objectifs sont de garantir la satisfaction des demandes des clients et la fonctionnalité des processus globaux du réseau (Chen et al., 2017). Comme discuté précédemment, la littérature traitant de la planification logistique collaborative se concentre principalement sur la dimension économique pour atteindre ces objectifs. De même que les modèles d'optimisation traditionnels, la plupart des contributions cherchent à minimiser les coûts ou à maximiser les bénéfices dans les problèmes de décision, que ce soit au niveau stratégique, tactique, opérationnel ou dans la combinaison de ces différentes décisions. Toutefois, la maximisation des bénéfices pour évaluer la performance économique dans les modèles de décision a reçu un intérêt très limité. Cela peut être exprimé par le fait que les entreprises cherchent toujours à obtenir un avantage concurrentiel en optimisant leur réseau logistique. Dans les papiers examinés, la mesure la plus classique pour évaluer l'impact économique est le coût total du réseau, qui peut dépendre des décisions de planification traitées. Par exemple, au niveau stratégique, le coût de l'ouverture ou du choix de l'emplacement d'une installation logistique est abordé dans 9 études sur la conception de réseaux collaboratifs (Allaoui et al., 2019; Habibi et al., 2018; Hacardiaux and Tancrez, 2020; Hernández and Peeta, 2011; Nataraj et al., 2019; Ouhader and El Kyal, 2017; Ouhader et al., 2020; Quintero-Araujo et al., 2019; Tang et al., 2016). Au niveau opérationnel et tactique, le coût dû au transport est la principale composante utilisée pour évaluer la performance économique. Ce coût est évoqué dans quasiment toutes les études examinées et son calcul est basé généralement sur la distance parcourue entre une origine et une destination donnée (Defryn et al., 2019; Habibi et al., 2018; Li et al., 2016; Liu et al., 2010b,b; Ouhader and El Kyal, 2017; Sanchez et al., 2016; Wang et al., 2014, 2017b, 2018c; Weng and Xu, 2014). En plus de ces deux composantes économiques,



d'autres études prennent en compte les coûts d'inventaire (Allaoui et al., 2019; Haccardiaux and Tancrez, 2020; Özener et al., 2013; Pan et al., 2013, 2014; Soysal et al., 2018b; Stellingwerf et al., 2019, 2018) et les coûts logistiques liés aux opérations de maintenance et à l'utilisation des moyens de transport (Allaoui et al., 2019; Moutaoukil et al., 2013a, 2015; Nataraj et al., 2019; Ouhader and El Kyal, 2017; Ouhader et al., 2020; Pan et al., 2013, 2014) dans la modélisation du critère économique. Par ailleurs, Moutaoukil et al. (2015) et Chabot et al. (2018) ont tenté d'évaluer le niveau de service de la collaboration horizontale dans le transport de marchandises en tant qu'une autre mesure de la performance économique ; mesure dite opérationnelle.

#### 1.4.2.2 Performance environnementale

Outre les objectifs économiques, les questions environnementales ont fait l'objet d'une attention croissante ces dernières années. Les questions environnementales de la demande de protection de l'environnement et de la consommation responsable des ressources naturelles ont incité les entreprises à intégrer les facteurs environnementaux dans leurs décisions de planification, donnant naissance à l'optimisation des réseaux logistiques dans une perspective verte. En général, l'un des impacts les plus importants causés par les activités de logistique et de transport provient de la surexploitation des ressources (énergie, eau, etc.). L'utilisation de l'énergie entraîne certains problèmes de pollution indirecte, appelés gaz à effet de serre, qui sont considérés comme les principaux responsables du changement climatique et du réchauffement de la planète en raison de leur impact sur l'effet de serre (Pan, 2010). Par ailleurs, selon le rapport du IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), le secteur de la logistique génère environ 25% des émissions mondiales liées à la quantité d'énergie consommée, dont 80% proviennent du transport routier. La combustion de carburants à base de pétrole dans des moteurs à combustion interne est la principale source de ces émissions. Bien que les émissions soient composées d'autres gaz en plus du dioxyde de carbone ( $CO_2$ ), tels que le méthane ( $CH_4$ ) et l'oxyde nitreux ( $NO_x$ ), leur quantité est relativement faible par rapport à la quantité de  $CO_2$  qui représente environ 77% de tous les gaz à effet de serre<sup>1</sup>. Pour cette raison, les mesures d'impact environnemental se concentrent principalement sur la réduction des émissions de  $CO_2$  du transport. Toutefois, le calcul des émissions de  $CO_2$  liées au transport nécessite des méthodologies plus complexes et plus sophistiquées, qui ne peuvent être que des estimations en raison de la difficulté à estimer divers aspects tels que les conditions météorologiques et les embouteillages. C'est pourquoi la plupart des recherches proposent et utilisent généralement des méthodes d'estimation simples basées sur la distance (Gonzalez-Feliu, 2011; Leitner et al., 2011; Makhloufi et al., 2015; Montoya-Torres et al., 2016) et/ou sur la consommation

---

1. SOeS. Données et études statistiques pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement, et les transports. France, Europe et Monde.Édition 2021.

d'énergie (Chabot et al., 2018; Wang and Kopfer, 2014; Wang et al., 2014, 2017a,b, 2018a,b,c). Nataraj et al. (2019) et Quintero-Araujo et al. (2019) ont appliqué le modèle d'estimation proposé par Ubeda et al. (2011) pour évaluer l'impact environnemental des différents scénarios de collaboration. Ce modèle est basé sur la distance et la charge transportée par chaque véhicule. En outre, sur la base d'études antérieures, Ballot and Fontane (2010) et Pan et al. (2013, 2014) ont développé un modèle d'estimation des émissions de  $CO_2$  qui prend en compte la charge transportée, la capacité utilisée, la vitesse moyenne de déplacement et la distance parcourue. Ce modèle est couramment utilisé dans la littérature pour évaluer d'une manière très précise les émissions de  $CO_2$  dans le transport collaboratif (Hacardiaux and Tancrez, 2020; Moutaoukil et al., 2013a, 2015; Ouhader and El Kyal, 2017; Ouhader et al., 2020).

En ce qui concerne la prise en compte de l'environnement dans le modèle d'optimisation, la plupart des travaux de recherche considérant les deux aspects de la durabilité économique et environnementale optimisent principalement les objectifs économiques et évaluent la dimension environnementale a posteriori. Seuls les travaux de Ouhader and El Kyal (2017), Ouhader et al. (2020), Muñoz-Villamizar et al. (2019b) et Wang et al. (2018c) optimisent simultanément les deux objectifs en utilisant des approches multi-objectifs.

### 1.4.2.3 Performance sociale/sociétale

Comme nous l'avons mentionnée ci-dessus, la dimension sociale a été moins étudiée que la durabilité économique et environnementale. En effet, la durabilité sociale dans les chaînes logistiques concerne, par nature, le bien-être social. L'intégration de la Responsabilité Sociétale des Entreprises (RSE) dans les décisions de planification permet de mieux évaluer l'impact d'une chaîne logistique pour ses parties prenantes : clients, employés et communautés locales. La RSE permet également de prendre en compte les effets négatifs et néfastes de la logistique et du transport sur la vie humaine. Les lignes directrices pour la responsabilité sociale des entreprises et l'engagement des organisations dans le développement durable sont présentées dans le Guide ISO 26000<sup>2</sup>. Ce dernier identifie sept problématiques centrales de la responsabilité sociétale : la gouvernance de l'organisation, les droits de l'homme, les relations et conditions de travail, l'environnement, les loyautés des pratiques, les questions relatives aux consommateurs et les communautés et développement local. Dans le sous-domaine des relations et conditions de travail, l'emploi est le principal indicateur social retenu dans l'évaluation de la performance sociale, 2 sur 3 études considérant l'aspect social se concentrent sur la quantification du nombre d'emplois. Par exemple, Ouhader and El Kyal (2017) ont évalué l'aspect social par le calcul des opportunités d'emplois variables créés qui varient en fonction de la capacité des installations. Dans (Allaoui et al., 2019), l'aspect social

---

2. <https://www.iso.org/fr/standard/42546.html>

est évalué par la quantification du nombre total des travailleurs, de la satisfaction des employeurs et d'autres indicateurs liés à la sécurité et à la santé des employeurs tel que le taux d'accident. Dans (Moutaoukil et al., 2013a), les chercheurs se sont intéressés à la sécurité des transporteurs et au confort des habitants. En raison de la difficulté à quantifier ces deux aspects, Moutaoukil et al. (2013a) ont utilisé une estimation du risque d'accident et une quantification du nombre de véhicules utilisés pour pouvoir évaluer le risque d'accident et la congestion dans le réseau de transport.

### 1.4.3 Méthodes de recherche

Comme le montrent la Figure 1.4 et le Tableau 1.2, la plupart des études utilisent des concepts d'optimisation et des méthodes expérimentales. Ces études se sont concentrées sur la résolution des problèmes de planification en utilisant des outils d'aide à la décision basés sur des approches mathématiques et des techniques de simulation. En ce qui concerne les approches mathématiques, le MILP ou la programmation non linéaire en nombres entiers mixtes (Mixed Integer Non-Linear Programming MINLP), les heuristiques et les méta-heuristiques sont les plus utilisées dans la littérature pour traiter le problème d'optimisation des réseaux logistiques. Comme la plupart des travaux ne traitent qu'une seule dimension de la durabilité, l'optimisation mono-objectif est la plus fréquemment appliquée dans les modèles d'optimisation analytique (Adenso-Díaz et al., 2014b; Buijs et al., 2014; Hacardiaux and Tancrez, 2020; Nataraj et al., 2019; Pan et al., 2013, 2014; Quintero-Araujo et al., 2016). L'optimisation multi-objectifs a également été utilisée dans certaines études pour intégrer des considérations environnementales et sociales dans les modèles de décision économique. Dans ce contexte, Munoz-Villamizar et al. (2020); Muñoz-Villamizar et al. (2019b) ont utilisé la technique de la somme pondérée pour intégrer les objectifs environnementaux et économiques dans la planification et l'organisation du transport du dernier kilomètre. De même, Allaoui et al. (2019) ont agrégé les trois objectifs de la durabilité en un seul objectif. Ouhader and El Kyal (2017); Ouhader et al. (2020) ont appliqué la méthode  $\epsilon$ -contrainte pour optimiser simultanément la dimension économique, environnementale et sociale dans la conception du réseau de distribution à deux échelons. Dans le problème de partage des gains, la théorie de jeux coopératifs est la principale approche adoptée dans la résolution de ce problème (Ben Jouida et al., 2017; Frisk et al., 2010; Lozano et al., 2013; Vanovermeire and Sörensen, 2014; Yilmaz and Savaseneril, 2012). Par ailleurs, la simulation à événements discrets et les systèmes multi-agents sont très répandus pour la planification opérationnelle du transport (Berger and Bierwirth, 2010; Buijs et al., 2014; Makhloufi et al., 2015; Sprenger and Mönch, 2014).

La deuxième catégorie de méthodologie de recherche la plus utilisée est celle des études exploratoires. Près de dix pour cent de la littérature examinée dans ce chapitre

porte sur la définition et l'exploration de nouveaux concepts de collaboration horizontale à l'aide d'études de cas (Ballot and Fontane, 2010; Gonzalez-Feliu, 2011; Leitner et al., 2011) ou d'entretiens avec des industriels (Abbad and Salaun, 2019; Björnfort and Torjussen, 2012; Chai et al., 2013; Martin and Tanguy, 2019; Ruel, 2019). Enfin, seuls quatre articles ont été identifiés qui passent en revue l'état de l'art des modèles d'optimisation (Gansterer and Hartl, 2018; Guajardo and Rönnqvist, 2016; Verdonck et al., 2013) et des solutions de collaboration horizontale dans le transport de marchandises (Pan et al., 2019).

## 1.5 Tendances et lacunes de la recherche

La première remarque notable de la Figure 1.4 est que différentes décisions de planification, du niveau stratégique au niveau opérationnel, ont été abordées dans la littérature sur la collaboration horizontale dans la distribution de marchandises. Cela montre l'importance et le développement de la coopération horizontale dans la logistique et le transport. En outre, les préoccupations environnementales et les questions sociales ont gagné en importance ces dernières années pour étendre les aspects économiques et inclure d'autres aspects du développement durable. Cela prouve également la pertinence et l'importance de l'intégration des aspects du développement durable dans les décisions de planification en vue de parvenir à une logistique efficace et efficiente.

Une deuxième constatation est que la plupart des travaux se sont concentrés sur le développement de modèles de prise de décision, en particulier pour le problème de l'acheminement du transport et du partage des bénéfices. En revanche, la planification stratégique, l'organisation de la distribution et la gestion des stocks ont reçu beaucoup moins d'attention que les décisions mentionnées précédemment.

Troisièmement, l'inclusion des décisions de planification dans un seul modèle d'optimisation, afin d'optimiser ces décisions simultanément, a attiré l'attention de certains chercheurs au cours des trois dernières années. D'après notre revue, il existe trois types de problèmes : le LRP qui consiste à combiner le routage des véhicules lors de la conception des réseaux logistiques, l'IRP qui intègre les décisions d'inventaire et de routage des véhicules, et le LIP qui combine les décisions d'inventaire et de localisation. D'autres études seraient nécessaires en raison des avantages de la prise en compte simultanée de diverses décisions.

Quatrièmement, il existe très peu de recherches sur la collaboration avec les concurrents et les fournisseurs de services logistiques. La plupart des recherches se concentrent sur la collaboration en amont, entre fournisseurs. Il serait donc intéressant d'étudier la collaboration avec plusieurs entités internes et externes.

Cinquièmement, du point de vue de la durabilité, l'évaluation des performances de la collaboration horizontale dans le transport de marchandises a évolué, passant des

aspects principalement économiques pour inclure également la dimension environnementale. Cependant, comme mentionné précédemment, très peu de recherches ont été menées sur la dimension sociale de la durabilité ou la prise en compte des trois dimensions simultanément. Cette conclusion démontre la nécessité de trouver et d'inclure des aspects sociaux pour évaluer toutes les considérations de durabilité.

Enfin, en termes de méthodologie de recherche, de nombreuses études ont utilisé des méthodes expérimentales basées sur des modèles mathématiques. Cela peut s'expliquer par l'intérêt des chercheurs pour les méthodes de recherche opérationnelle et par la nécessité de modéliser une grande variété de problèmes. En effet, la plupart des travaux se concentrent sur le développement de modèles d'optimisation déterministe et ne prennent pas en compte la nature stochastique des paramètres. De plus, très peu de recherches ont utilisé des approches multi-objectifs pour considérer deux ou plusieurs objectifs de durabilité. En outre, les études empiriques ont reçu beaucoup moins d'attention dans la littérature malgré leur importance dans la modélisation expérimentale des problèmes d'optimisation. Par exemple, pour étudier la collaboration entre des acteurs concurrents, des études empiriques sont nécessaires pour explorer les opportunités et les obstacles de la mise en œuvre d'une telle stratégie de collaboration.

## **1.6 Conclusion**

Ce chapitre présente une synthèse de l'état de l'art actuel qui donne un aperçu sur les problèmes de planification collaborative et la durabilité dans le domaine de la logistique et du transport de marchandises. Des tendances en pleine expansion peuvent être observées, notamment la planification collaborative et intégrée. Les lacunes existantes incitent à aborder de nouvelles questions de recherche dans ce domaine. Les chapitres suivants sont consacrés à répondre à ces questions. Plus précisément, le chapitre 2 est consacré à la modélisation du problème de conception intégré et à l'évaluation des impacts de la collaboration sur les aspects économiques et environnementaux. Le chapitre 3 est destiné à la proposition d'une approche d'optimisation heuristique et à la validation de l'approche développée en se basant sur une étude de cas réelle. Le chapitre 4 est consacré à la modélisation stochastique du problème de conception des réseaux logistiques résilients et durables en cas de perturbations épidémiques et d'incertitude de la demande.

## Chapitre 2

# Modélisation intégrée des réseaux logistiques à deux échelons en tenant compte des émissions de $CO_2$

### Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>33</b>
<b>2.2</b>	<b>Conception des réseaux logistiques collaboratifs</b>	<b>34</b>
<b>2.3</b>	<b>Description du problème</b>	<b>37</b>
<b>2.4</b>	<b>Formulation mathématique</b>	<b>38</b>
2.4.1	Formulation des coûts et des émissions de $CO_2$	40
2.4.2	Modèle ILRP vert et collaboratif	44
2.4.3	Modèle ILRP vert et non-collaboratif	47
<b>2.5</b>	<b>Approche de résolution</b>	<b>48</b>
2.5.1	Optimisation mono-objectif	48
2.5.2	Optimisation multi-objectifs	48
<b>2.6</b>	<b>Résultats numériques</b>	<b>49</b>
2.6.1	Description des instances de test	49
2.6.2	Exemple numérique	50
2.6.3	Résultats des tests d'instances	54
2.6.4	Analyse de compromis	59
<b>2.7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>59</b>

---

## 2.1 Introduction

**D**ANS le marché mondial extrêmement compétitif d'aujourd'hui, les entreprises sont obligées de gérer efficacement leurs réseaux logistiques pour améliorer leur efficacité opérationnelle et leur compétitivité dans un environnement très évolutif (Govindan et al., 2014; Mashud et al., 2020; Sayyadi and Awasthi, 2018). Par ailleurs, ces dernières années, les préoccupations socio-environnementales ont été considérées comme des contraintes essentielles que les entreprises doivent prendre en compte dans la planification de leurs réseaux afin de créer des synergies pour des avantages concurrentiels durables (Kazemi et al., 2018; Rabbani et al., 2019).

La collaboration logistique dans les secteurs du transport et de la logistique a pris une ampleur considérable en tant qu'approche performante dans la planification des réseaux logistiques axés sur l'efficacité écologique (Aloui et al., 2021e; Chen et al., 2017; Gonzalez-Feliu et al., 2014; Vanovermeire and Sörensen, 2014). Elle a été envisagée dans les problèmes stratégiques de localisation et d'affectation des installations logistiques (location-allocation problems) (Mrabti et al., 2020; Wang et al., 2020a). De plus, une telle collaboration a été également considérée dans les décisions tactiques et opérationnelles, en particulier dans les décisions de routage et d'inventaire (Gansterer and Hartl, 2018; Stellingwerf et al., 2018). Bien que les décisions de planification soient souvent prises séparément dans une approche collaborative avec une perspective économique, la littérature a montré que l'intégration des différentes décisions de planification dans l'optimisation des réseaux logistiques affecte considérablement l'efficacité des réseaux en raison de leurs interdépendances (Daskin et al., 2002; Diabat et al., 2013; Hiassat et al., 2017; Javid and Azad, 2010; Karakostas et al., 2020). Par conséquent, pour améliorer la compétitivité et l'efficacité des réseaux logistiques, les décisions de planification doivent être abordées simultanément en intégrant des considérations écologiques (Ouhader et al., 2020).

La revue exhaustive de la littérature (Aloui et al., 2021e) montre que le nombre des travaux sur la planification intégrée des décisions dans le domaine de la logistique collaborative est très limité. En effet, très peu de recherches, abordant la mise en œuvre de la collaboration horizontale dans des modèles intégrés combinant deux décisions de planification (à savoir Location-Routing Problem, Inventory-Routing Problem et Location-Inventory Problem), ont été publiées ces dernières années. Toutefois, à notre connaissance, aucune tentative n'a été faite pour étudier la collaboration dans un modèle intégré et exhaustif qui combine les différentes décisions clés de localisation, d'inventaire et de routage. Dans ce chapitre, nous traitons un problème de conception des réseaux logistiques à deux échelons tenant compte des émissions de  $CO_2$  à l'aide d'un modèle intégré et collaboratif. Dans un premier temps, nous proposons et adaptons un modèle de programmation linéaire mixte en nombres entiers (PLMNE) pour

traiter le problème intégré dans deux configurations différentes tout en minimisant les coûts totaux et les émissions de  $CO_2$ . Par la suite, le modèle est résolu d'une manière optimale en utilisant le solveur CPLEX. Finalement, nous menons une optimisation multi-objectifs afin d'analyser le compromis entre les coûts et les émissions de  $CO_2$ .

La suite de ce chapitre est organisée comme suit. La section 2 présente une brève revue de la littérature des approches de conception collaborative des réseaux logistiques. La section 3 décrit les différents scénarios envisagés : Scénario collaboratif et non collaboratif. La formulation du problème et la méthode de résolution sont décrites dans la section 4. La section 5 présente les résultats de calcul sur des instances générées aléatoirement. La section 6 discute les économies obtenues grâce à la collaboration et fournit une analyse des compromis entre les objectifs économiques et écologiques des solutions collaboratives. Enfin, la section 7 fournit quelques conclusions et présente les limites de cette contribution.

## 2.2 Conception des réseaux logistiques collaboratifs

La coopération logistique entre divers fournisseurs dans les réseaux logistiques est devenue de plus en plus importante et réalisable, en particulier avec le développement récent des nouvelles technologies, telles que le *Cloud Computing* et le commerce électronique (Wang et al., 2017a). Cette collaboration peut réduire les coûts logistiques, améliorer l'utilisation des capacités et le niveau de performance logistique (Defryn and Sörensen, 2018; Fernández et al., 2018; Montoya-Torres et al., 2016; Muñoz-Villamizar et al., 2019b). Les problèmes en matière de la logistique et du transport sont essentiellement constitués de trois décisions fondamentales, à savoir les décisions relatives à l'emplacement des installations, à la gestion des stocks et à l'acheminement des moyens de transport (Aloui et al., 2020). Toutefois, en raison de l'importance de gérer les décisions de planification de manière intégrée, certaines études récentes se sont penchées tout particulièrement sur les modèles d'optimisation combinés où plusieurs niveaux de planification sont pris en compte simultanément (Farias et al., 2020). Dans cette section, nous passons en revue les travaux antérieurs pertinents traitant la conception collaborative des réseaux logistiques et nous identifions les limites de la littérature actuelle.

La conception des réseaux de distribution en collaboration a reçu très peu d'attention dans la littérature, malgré ses implications stratégiques à long terme du point de vue économique et environnemental (Mrabti et al., 2020; Pan et al., 2019). Dans ce contexte, Habibi et al. (2018) ont étudié le problème de localisation des hubs dans deux réseaux de distribution collaboratifs prenant en compte l'incertitude sur les coûts d'établissement des hubs partagés. En outre, Hernández et al. (2012) se sont intéressés au problème de localisation des hubs centralisés et collaboratifs pour minimiser



les coûts totaux dans les réseaux de transport. [Fernández and Sgalambro \(2020\)](#) ont également proposé et analysé plusieurs politiques de collaboration pour résoudre le problème de localisation des hubs non centralisés et non hybrides. Par ailleurs, [Tang et al. \(2015\)](#) ont étudié le problème de localisation des centres de distribution régionaux dans un réseau de distribution collaboratif multi-périodes pour les produits horticoles en France. L'objectif est de minimiser les coûts de transport et le coût d'ouverture des installations. [Verdonck et al. \(2016\)](#) se sont intéressés au problème de localisation des centres de distribution afin de quantifier les avantages économiques de la collaboration horizontale dans les réseaux de distribution multi-produits et à deux échelons. Cependant, les recherches citées ci-dessus n'ont considéré que la dimension économique et des flottes de transport homogènes.

Les impacts environnementaux des activités de transport ont rarement été incorporés dans la conception des réseaux de distribution. [Pan et al. \(2013\)](#) ont quantifié pour la première fois les bénéfices des émissions de  $CO_2$  et des coûts logistiques obtenus grâce à la collaboration horizontale dans la conception des réseaux de la grande distribution en France. Dans une autre étude ([Pan et al., 2014](#)), des modèles MILP, basés sur le VRP et le P-hub Median, ont été proposés pour localiser les installations logistiques et définir les itinéraires de transport tout en optimisant les coûts et les émissions de  $CO_2$ . Compte tenu des préoccupations socio-environnementales, un outil de décision pour la planification collaborative dans les chaînes logistiques durables a été développé par [Allaoui et al. \(2019\)](#). Cet outil permet de générer des scénarios logistiques pour optimiser indépendamment la conception de la chaîne logistique, les décisions de routage et d'inventaire en fonction des poids préférentiels et des critères de durabilité choisis. [Moutaoukil et al. \(2013a\)](#) ont proposé et simulé plusieurs scénarios pour aider les petites et moyennes entreprises agro-alimentaires à concevoir un réseau de distribution et à sélectionner la meilleure configuration logistique tout en optimisant les trois dimensions de durabilité. Récemment, [Mrabti et al. \(2020\)](#) ont développé une approche analytique de la mutualisation du transport durable de marchandises. Les auteurs ont traité le problème de localisation-allocation en minimisant les émissions et les coûts logistiques dans un réseau de distribution à deux échelons. Toutefois, les études citées ci-dessus n'ont traité que le problème de la planification stratégique, à l'exception des travaux de recherche menés par [Allaoui et al. \(2019\)](#); [Pan et al. \(2014\)](#) où les problèmes de conception et de décisions de routage ont été résolus indépendamment ou séquentiellement, c'est-à-dire FLP au départ et VRP ensuite.

Les modèles décisionnels de planification intégrée ont, en effet, suscité un intérêt accru ces dernières années en raison de l'interdépendance des décisions dans la conception et l'optimisation des chaînes logistiques ([Delfani et al., 2020](#); [Garcia and You, 2015](#)). Dans le domaine de la planification collaborative de la logistique, quelques études récentes ont tenté de combiner deux problèmes de décision. Par exemple, [Ouhader and](#)

El Kyal (2017) ont examiné le problème de conception collaborative des réseaux de distribution appliquant un modèle LRP à deux échelons avec des flottes homogènes. Les auteurs avaient pour objectif principal de déterminer l'emplacement des centres de distribution et les tournées des véhicules dans le deuxième échelon en optimisant les coûts, les émissions et le nombre d'emplois créés. Cependant, les auteurs n'ont pas pris en compte la consommation d'énergie et la charge transportée dans la modélisation des coûts. De plus, les décisions d'inventaire ont été négligées. Une autre contribution, basée sur un modèle LRP à un seul échelon, a été proposée dans (Nataraj et al., 2019; Quintero-Araujo et al., 2019). Les auteurs ont analysé l'impact environnemental et économique de la mise en œuvre de la collaboration horizontale dans la prise des décisions intégrées de routage et de localisation dans les zones urbaines. Trois scénarios avec différents degrés de collaboration ont été envisagés et évalués du point de vue économique et environnemental : scénarios non-coopératif, semi-collaboratif et entièrement coopératif. Néanmoins, les auteurs ont négligé les décisions relatives aux inventaires. Ces dernières ont été combinées récemment avec les décisions de routage dans deux travaux de recherche. Récemment, l'IRP avec un seul échelon a été étudié par Stellingwerf et al. (2018) dans le cas de la distribution alimentaire à température contrôlée. Un modèle de programmation linéaire qui minimise les coûts logistiques, les émissions ou une combinaison linéaire de deux objectifs a été proposée pour trouver l'itinéraire et le niveau d'inventaire optimaux. De même, Soysal et al. (2018b) ont développé un modèle pour traiter l'IRP vert en présence d'incertitude dans le cas de produits périssables. Leurs résultats expérimentaux montrent que l'IRP collaboratif peut améliorer considérablement le niveau des services logistiques et réduire les coûts et les empreintes environnementales. Cependant, les décisions stratégiques concernant la localisation des centres de distribution n'ont pas été incorporées dans ces deux études. Pour cela, Haccardiaux and Tancrez (2019) ont intégré les décisions d'inventaire et de localisation dans un modèle global afin d'évaluer les bénéfices environnementaux et économiques de la collaboration horizontale, sans considérer les décisions de routage.

Les travaux existants sur la conception collaborative des réseaux logistiques sont présentés, classés et comparés et leurs limites sont énoncées. En effet, quatre lacunes dans la littérature existante peuvent être remarquées :

1. Les impacts environnementaux n'ont pas fait l'objet d'une grande attention.
2. Les décisions d'inventaire n'ont pas été étudiées de manière intensive.
3. La collaboration logistique horizontale n'a pas été étudiée dans un modèle exhaustif ILRP qui combine les différentes décisions de planification.

Pour combler les lacunes existantes, cette étude vise à analyser deux scénarios logistiques dans les décisions intégrées de localisation, de routage et d'inventaire avec des considérations environnementales.

## 2.3 Description du problème

Cette étude examine le problème de conception du réseau de distribution à l'aide d'un modèle ILRP à deux objectifs avec des flottes de transport hétérogènes. La Figure 2.1 compare les deux scénarios de distribution étudiés : le scénario autonome et le scénario collaboratif. La Figure 2.1.(a) décrit le premier scénario dans lequel chaque entreprise livre ses détaillants à partir de son propre centre de distribution et de sa flotte de transport, c'est-à-dire que chaque entreprise planifie ses décisions indépendamment des autres. Dans le scénario collaboratif (Figure 2.1.(b)), les entreprises collaborent en partageant les ressources et les informations pour planifier conjointement leurs décisions de planification.

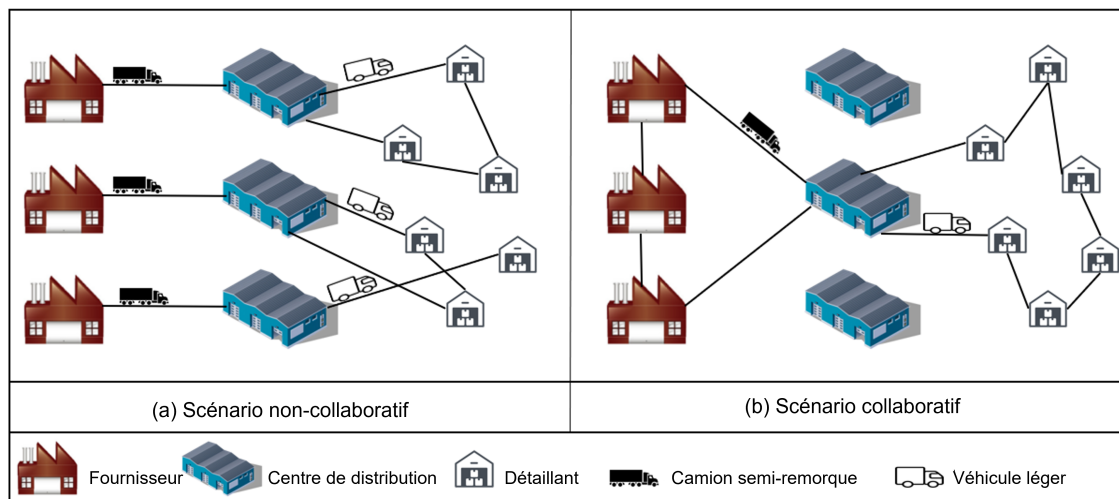


FIGURE 2.1 – Illustration des configurations logistiques sans et avec collaboration.

Le réseau de distribution étudié est composé de deux échelons. Un ensemble de  $M$  fournisseurs est considéré dans le premier échelon  $J = \{1, \dots, M\}$  qui doivent satisfaire une demande non constante et déterministe  $q_{ij}^t$  à chaque période  $t \in T = \{1, \dots, P\}$  et pour chaque détaillant  $i \in I = \{1, \dots, N\}$  au deuxième échelon. Les demandes des détaillants sont consolidées à travers un ensemble de centres de distribution potentiels  $D = \{1, \dots, CD\}$  connus à l'avance. Chaque centre de distribution potentiel  $d \in D$  se caractérise par une capacité de stockage  $C_d$  et un coût d'ouverture/exploitation  $F_d$  lorsqu'il est ouvert. Les arcs du premier échelon forment un ensemble d'arcs de collecte :  $A1 = \{(i, j) : i, j \in J \cup D\}$ ; tandis que les arcs du second échelon constituent un ensemble d'arcs de routage :  $A2 = \{(i, j) : i, j \in D \cup I\}$ . Chaque centre de distribution dispose d'une flotte de camions semi-remorques hétérogènes  $K = \{1, \dots, NT\}$  pour transporter les marchandises des fournisseurs aux centres de distribution. Chaque camion semi-remorque  $k \in K$  part de son centre de distribution avec une quantité égale à

zéro. Ensuite, il collecte les marchandises auprès des fournisseurs affectés au centre de distribution et retourne à ce dernier avec la quantité demandée, tout en respectant la capacité maximale du camion  $QT_k$ . En revanche, pour des contraintes réglementaires dans les villes urbaines, une flotte hétérogène de véhicules  $V = \{1, \dots, NV\}$  est disposée dans les centres de distribution pour servir les détaillants du deuxième échelon. Chaque véhicule  $v \in V$  quitte le centre de distribution  $d \in D$  avec une quantité de marchandises inférieure ou égale à la capacité du véhicule  $QV_v$  et égale à la quantité demandée par les détaillants affectés à cette tournée. Comme les flottes de transport sont hétérogènes, les coûts d'exploitation du véhicule  $v$  et du camion  $k$  sont donnés respectivement par  $CV_v$  et  $CT_k$ .

Enfin, l'objectif de l'ILRP est de déterminer les centres de distribution à ouvrir, les affectations des détaillants et des fournisseurs, les itinéraires et la quantité de marchandises à stocker à chaque période, tout en minimisant le coût total et les émissions de  $CO_2$  engendrées par les activités de transport et le fonctionnement des installations logistiques. Les caractéristiques du problème étudié peuvent être résumées comme suit :

- Chaque détaillant  $i$  peut être visité une fois par l'un des véhicules  $V$  et servi à partir d'un seul centre de distribution  $d$ .
- Les fournisseurs ont des produits spécifiques mais tous les produits sont compatibles.
- Les véhicules et les camions semi-remorques sont situés dans des centres de distribution. Par conséquent, ils partent des centres de distribution et y retournent après avoir accompli leur mission de collecte ou de livraison.
- Les véhicules et les camions semi-remorques peuvent effectuer plusieurs trajets dans chaque période.
- Les demandes doivent être satisfaites sur tous les horizons de planification et ne peuvent pas être divisées sur plusieurs périodes (Al Chami, 2018).
- La politique d'inventaire au niveau maximum, dans laquelle les niveaux d'inventaire initiaux sont nuls au début de l'horizon de planification, est appliquée dans les centres de distribution (Cheng et al., 2017; Stellingwerf et al., 2018).

## 2.4 Formulation mathématique

Cette section présente la formulation mathématique utilisée pour modéliser le problème de conception intégrée étudié dans ce chapitre.

Pour formuler le problème, les notations et les définitions utilisées dans ce chapitre sont présentées dans le Tableau 2.1 sous forme d'ensembles, de paramètres et de variables de décision.

TABLEAU 2.1 – Notations et définitions utilisées dans la modélisation mathématique.

Symbole	Définition
<b>Ensembles</b>	
$J$	Ensemble des fournisseurs
$I$	Ensemble des détaillants
$D$	Ensemble des centres de distribution intermédiaires
$K$	Ensemble des camions semi-remorques
$V$	Ensemble des véhicules
$T$	Ensemble des périodes de planification
$A1$ and $A2$	Ensemble des arcs de collecte et de livraison
<b>Paramètres</b>	
$C_d$	Capacité maximale du centre de distribution $d$ , $\forall d \in D$
$QV_v$	Capacité maximale de chargement du véhicule $v$ , $\forall v \in V$
$QT_k$	Capacité maximale de chargement du camion $k$ , $\forall k \in K$
$F_d$	Coût fixe de l'ouverture d'un centre de distribution $d$ , $\forall d \in D$
$EC_d$	Consommation moyenne du centre de distribution $d$ , $\forall d \in D$
$CV_v$	Coût d'exploitation du véhicule $v$ , $\forall v \in V$
$CT_k$	Coût d'utilisation du camion semi-remorque $k$ , $\forall k \in K$
$TVe_v$	Taux de consommation de carburant d'un véhicule $v$ à vide, $\forall v \in V$
$TKe_k$	Taux de consommation de carburant d'un camion $k$ à vide, $\forall k \in K$
$TVf_v$	Taux de consommation de carburant d'un véhicule $v$ à pleine charge, $\forall v \in V$
$TKf_k$	Taux de consommation de carburant d'un camion semi-remorque $k$ à pleine charge, $\forall k \in K$
$C_s$	Coût unitaire du stockage dans les centres de distribution
$c_h$	Coût unitaire de manutention dans les centres de distribution
$FP$	Prix unitaire du carburant
$d_{ij}$	Distance entre deux nœuds $i$ et $j$ : $i, j \in J \cup D \cup I$
$q_{ij}^t$	Demande du détaillant $i$ auprès du fournisseur $j$ dans la période $t$
$FC$	Quantité de $CO_2$ émise par unité de consommation de carburant
$e_c$	Quantité de $CO_2$ émise par unité d'énergie consommée
<b>Variables de décision</b>	
$y_d$	Variable binaire qui vaut 1 si le centre $d$ est ouvert et 0 sinon
$z_{i,d}^t$	Variable binaire égale 1 si le nœud $i$ est affecté au centre $d$ et 0 sinon, $\forall i \in I \cup J, \forall d \in D$
$x1_{i,j}^{k,t}$	Variable binaire qui vaut 1 si le camion traverse l'arc $(i,j)$ à la période $t$ et 0 sinon, $\forall i \in A1, \forall t \in T$
$x2_{i,j}^{v,t}$	Variable binaire qui vaut 1 si le véhicule $v$ traverse l'arc $(i,j)$ à la période $t$ et 0 sinon, $\forall i \in A2, \forall t \in T$
$v_{v,d}$	Égale à 1 si le véhicule $v$ au centre $d$ est utilisé et 0 sinon
$k_{k,d}$	Égale à 1 si le camion $k$ au centre $d$ est utilisé et 0 sinon
$Q_{j,d}^t$	Quantité de produit $j$ livrée au centre $d$ à la période $t$ , $\forall j \in J$
$I_{j,d}^t$	Niveau de stock du produit $j$ dans le centre $d$ à la période $t$ , $\forall j \in J$
$f1_{i,j}^{k,t}$	Quantité de marchandises transportées par le camion $k$ sur l'arc $(i,j)$ , $\forall (i,j) \in A1, \forall k \in K$
$f2_{i,j}^{v,t}$	Quantité de marchandises transportées par le véhicule $v$ sur l'arc $(i,j)$ , $\forall (i,j) \in A2, \forall v \in V$

## 2.4.1 Formulation des coûts et des émissions de $CO_2$

Comme discuté dans la littérature, l'évaluation de la performance des chaînes logistiques repose principalement sur des critères économiques (coût de production, coût de distribution, etc.) et des indicateurs opérationnels (flexibilité, taux de satisfaction, qualité des produits, etc.) (Baumann, 2011; Mrabti et al., 2020; Ouhader et al., 2020; Wang et al., 2020b). Toutefois, les préoccupations environnementales poussent les entreprises à repenser leurs réseaux logistiques en intégrant des objectifs verts dans l'évaluation de la performance globale de leurs chaînes logistiques, en particulier dans leurs réseaux de distribution qui constituent des composantes majeures de toutes les chaînes logistiques (Aloui et al., 2021e; Muñoz-Villamizar et al., 2019b).

Dans cette section, nous présentons la formulation des coûts logistiques et des émissions de  $CO_2$  évalués dans le cadre de cette étude.

### 2.4.1.1 Modélisation des coûts logistiques

Les coûts logistiques sont les objectifs les plus visés par les chercheurs dans la littérature. Ils comprennent les coûts de déplacement, le coût d'ouverture ou d'utilisation des plateformes logistiques et le coût de stockage. Ces coûts peuvent être classés en deux catégories principales. La première concerne les coûts fixes liés à l'utilisation des moyens de transport et les plateformes logistiques, tandis que la deuxième englobe les coûts variables liés aux activités de transport et de logistique.

- i. **Coûts fixes.** Les coûts fixes liés à l'ouverture des centres de distribution et à l'utilisation des moyens de transport influencent considérablement la conception des réseaux logistiques, notamment le choix des centres de distribution et des moyens de transport.

Nous calculons les coûts fixes ( $C_f$ ) avec l'équation (2.1) en additionnant les coûts d'ouverture des installations sélectionnées  $\sum_{d \in D} y_d F_d$  et les coûts d'utilisation des moyens de transport  $\sum_{d \in D} \sum_{k \in K} k_k CK_k + \sum_{d \in D} \sum_{v \in V} v_v CV_v$ .

$$C_f = \sum_{d \in D} y_d F_d + \sum_{d \in D} \sum_{k \in K} k_k CK_k + \sum_{d \in D} \sum_{v \in V} v_v CV_v \quad (2.1)$$

- ii. **Coûts variables.** Les activités de transport et de logistique s'influencent réciproquement. Par exemple, la minimisation des niveaux de stocks nécessite des livraisons plus fréquentes, souvent en petits volumes, et génère des coûts de transport importants. De ce fait, notre objectif est de prendre en considération les différentes composantes pour une évaluation économique plus exhaustive.

Les coûts variables sont calculés en agrégeant les coûts variables de la manutention ( $C_H$ ), de transport ( $C_T$ ) et de stockage ( $C_I$ ).

**Coût de transport.** Le coût de transport pour une distance parcourue ( $d$ ) est très important. Dans la littérature connexe, la plupart des études supposent que ce coût est proportionnel uniquement à la distance traversée (Allaoui et al., 2019; Hacardiaux and Tancrez, 2019; Ouhader and El Kyal, 2017; Ouhader et al., 2020; Quintero-Araujo et al., 2019). Or, la consommation de carburant dépend en réalité de deux facteurs, à savoir la charge transportée et la distance parcourue (Knörr and Reuter, 2008; Pan et al., 2013). Par conséquent, la modélisation de ce coût doit mieux refléter la réalité en intégrant ces deux paramètres. Nous modélisons le coût de transport en se basant sur les travaux de Moutaoukil et al. (2013a). D'une manière générale, le coût du transport  $TC_v$ , pour un véhicule  $v$  (respectivement pour un camion semi-remorque  $k$ ) parcourant une distance  $d$  avec une charge  $q$ , est calculé par l'équation (2.2).

$$TC_v = d [TVe_v + (TVf_v - TVe_v) \frac{q}{QV_v}] FP \quad (2.2)$$

Où  $TVe_v$  et  $TVf_v$  désignent respectivement la consommation de carburant du véhicule  $v \in v$  à vide et à pleine charge (L/Km) et  $QV_v$  est la capacité maximale de chargement du véhicule  $v \in v$ . La consommation de carburant à vide et à pleine charge dépend du type et de la vitesse moyenne de chaque véhicule (respectivement du camion semi-remorque). Pour simplifier le calcul du coût de transport, le facteur de pente de la route est négligé dans l'estimation de la consommation. Ces paramètres sont déterminés en se référant aux rapports MEET (Hickman et al., 1999).

Finalement, le coût total de transport  $C_T$  dans le réseau considéré est calculé selon l'équation (2.3).

$$C_T = \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in A1} d_{i,j} FP [x1_{ij}^{k,t} TKe_k + (TKf_k - TKe_k) \frac{f1_{i,j}^{k,t}}{QT_k}] \\ + \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in A2} d_{i,j} FP [x2_{ij}^{v,t} TVe_v + (TVf_v - TVe_v) \frac{f2_{i,j}^{v,t}}{QV_v}] \quad (2.3)$$

**Coût de stockage.** La logistique collaborative est fondée essentiellement sur les économies d'échelle grâce à la consolidation des flux aux centres de distribution. Afin de mieux organiser la distribution des marchandises, les décisions à moyen terme, liées à la gestion des stocks, doivent être prises en compte pour optimiser la performance économique, et notamment pour augmenter le taux de remplissage des camions semi-remorques et pour réduire également les distances parcourues.

Nous calculons le coût total de stockage ( $C_I$ ) à l'aide de l'équation (2.4).

$$C_I = \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} \sum_{j \in J} C_s I_{j,d}^t \quad (2.4)$$

**Coût de manutention.** Les opérations de chargement, de déchargement et de tri sont nécessaires tout au long des réseaux logistiques. Par exemple, lors de la collecte de marchandises, les opérations de chargement sont réalisées par les chauffeurs sur chaque site de collecte. Le coût de ces opérations peut être estimé en multipliant la quantité à manutentionner par le coût unitaire de manutention. Le coût total de la manutention est calculé par l'équation (2.5).

$$C_H = c_h \left[ \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} \sum_{j \in J} Q_{jd}^t + \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} f1_{j,d}^{k,t} \right. \\ \left. + \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} f2_{d,i}^{v,t} + \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} q_{ij}^t \right] \quad (2.5)$$

#### 2.4.1.2 Modélisation des émissions de $CO_2$

En général, l'évaluation de l'impact environnemental dépend des facteurs internes, tels que la consommation d'énergie, la charge et la vitesse moyenne des véhicules et des camions, et des facteurs externes, tels que les conditions météorologiques et l'état des routes (encombrement, accidents, etc.), qui sont intrinsèquement incertains. Toutefois, comme le suggère la littérature, le facteur d'émission  $CO_2$  constitue le principal facteur de pollution dans la distribution de marchandises (Ubeda et al., 2011). Ici, nous présentons le calcul de la quantité des émissions de  $CO_2$  émise lors du transport et du fonctionnement du centre de distribution.

Pour estimer les émissions liées au transport, trois types de modèles ont été proposés dans la littérature : modèle factoriel, microscopique et macroscopique (Demir et al., 2014).

Les modèles factoriels consistent à convertir la quantité de carburant consommée par un véhicule/semi-remorque en quantité d'émissions de  $CO_2$  en utilisant un simple facteur de conversion. Bien que les modèles factoriels sont simples et faciles à appliquer pour estimer les émissions de  $CO_2$  du transport, ces modèles ne possèdent pas de relation directe avec la massification des flux qui constitue le principal objectif d'une telle collaboration logistique.

Au contraire, les modèles microscopiques offrent la possibilité d'estimer instantanément les émissions de  $CO_2$  du transport. Ces modèles n'ont pas encore été appliqués aux problèmes de conception de réseaux de distribution, car ils nécessitent des données volumineuses et des calculs très complexes (Mrabti et al., 2020).



Par ailleurs, les modèles macroscopiques sont généralement appliqués pour calculer les émissions liées au transport, en appliquant une approche de régression basée sur des paramètres prédéfinis (Bektaş et al., 2016). Selon Bektaş et al. (2019), ces modèles sont très bien connus et fréquemment appliqués dans la littérature.

Nous utilisons dans ce travail le dernier type de modèles pour estimer les émissions du transport, car il offre un bon compromis entre la précision des résultats et la disponibilité des données nécessaires. Plus particulièrement, l'estimation des émissions du transport s'appuie sur l'approche MEET (Hickman et al., 1999) et la modélisation proposée par Pan et al. (2013), qui est couramment adoptée dans la littérature traitant de la planification collaborative des réseaux logistiques (Hacardiaux and Tancrez, 2019; Moutaoukil et al., 2013a, 2015; Mrabti et al., 2020; Ouhader and El Kyal, 2017; Ouhader et al., 2020). En effet, l'approche MEET a l'avantage de prendre en compte le taux de chargement des véhicules, qui est le principe de base de la collaboration entre les expéditeurs. D'où la favorisation de l'approche MEET par rapport aux autres modèles existants.

Nous estimons les émissions de  $CO_2$  totales dues au transport ( $E_m$ ) dans le réseau logistique à l'aide de l'équation (2.6).

$$\begin{aligned}
 E_m = & \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in A1} d_{i,j} FC [x1_{ij}^{k,t} TK e_k + (TK f_k - TK e_k) \frac{f1_{i,j}^{k,t}}{QT_k}] \\
 & + \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in A2} d_{i,j} FC [x2_{ij}^{v,t} TV e_v + (TV f_v - TV e_v) \frac{f2_{i,j}^{v,t}}{QV_v}]
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

Dans la plupart des études existantes, l'évaluation de la performance environnementale s'est limitée à la quantification des émissions de  $CO_2$  générées par les activités de transport. En effet, les centres de distribution consomment une quantité importante d'énergie pour fonctionner (éclairage, climatisation ou ventilation, etc.). Selon le rapport (ADEME, 2005), les installations industrielles émettent jusqu'à 20% des émissions totales. Par conséquent, les émissions de  $CO_2$  provenant de la consommation d'énergie pour le fonctionnement des centres de distribution devraient être intégrées dans l'évaluation de la performance environnementale des réseaux logistiques afin d'améliorer les modèles existants et d'assurer une mesure exhaustive de la dimension environnementale.

En France, la production d'un Kwh d'électricité génère, en moyenne, 85 g de  $CO_2$  (ADEME, 2010). De plus, lors de la transmission sur le réseau très haute tension, les pertes par effet joule représentent en moyenne 3% de la quantité totale d'électricité consommée, soit 2,5 g de  $CO_2$  pour 1 kwh d'électricité transmise. Par conséquent, les

émissions de  $CO_2$  causées par l'énergie consommée et perdue ( $E_c$ ) peuvent être calculées en multipliant la quantité utilisée d'énergie consommée par le facteur d'émission unitaire ( $e_c=87,5 \cdot 10^{-3}$  kg  $CO_2$ /kwh), comme indiqué dans l'équation (2.7).

$$E_c = \sum_{d \in D} e_c EC_d y_d \quad (2.7)$$

## 2.4.2 Modèle ILRP vert et collaboratif

Le problème ILRP vert et collaboratif peut être formulé comme un modèle de Programmation Linéaire Mixte en Nombres Entiers (PLMNE) à deux objectifs.

La fonction objectif (2.8) reflète la durabilité environnementale du réseau logistique étudié. Elle vise à minimiser les émissions de  $CO_2$  résultant des activités de transport et du fonctionnement des centres de distribution. La fonction objectif (2.9) vise à minimiser les coûts fixes, y compris le coût d'ouverture des centres de distribution, l'achat des moyens de transport et les coûts variables comprenant les coûts de collecte, de livraison, de stockage et de manutention.

$$\text{Minimiser } E_m + E_c \quad (2.8)$$

$$\text{Minimiser } C_t + C_I + C_f + C_H \quad (2.9)$$

Les contraintes (2.10) garantissent que les détaillants et les fournisseurs ne peuvent être affectés qu'à un centre de distribution ouvert.

$$z_{i,d}^t \leq y_d \quad \forall t \in T, \forall i \in I \cup J, \forall d \in D \quad (2.10)$$

Les contraintes (2.11) sont appelées contraintes d'affectation. Elles imposent que les détaillant et les fournisseurs ne peuvent être affectés au maximum qu'à un seul centre de distribution dans les périodes de planification.

$$\sum_{d \in D} z_{i,d}^t \leq 1 \quad \forall t \in T, \forall i \in I \cup J \quad (2.11)$$

Les contraintes de capacité (2.12) et (2.13) garantissent que les capacités des centres de distribution ne peuvent être dépassées.

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} z_{j,d}^t q_{i,j}^t \leq C_d y_d \quad \forall t \in T, \forall d \in D \quad (2.12)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} f_{j,d}^{k,t} \leq C_d y_d \quad \forall t \in T, \forall d \in D \quad (2.13)$$

Les contraintes (2.14)-(2.19) éliminent les itinéraires qui ne commencent et ne finissent pas au même centre de distribution et permettent également d'affecter les clients et les fournisseurs aux centres de distribution.

$$x1_{d,j}^{k,t} \leq z_{j,d}^t \quad \forall t \in T, \forall j \in J, \forall d \in D \quad (2.14)$$

$$x1_{j,d}^{k,t} \leq z_{j,d}^t \quad \forall t \in T, \forall j \in J, \forall d \in D \quad (2.15)$$

$$x1_{j,j'}^{k,t} + z_{j,d}^t + z_{j',d'}^t \leq 2 \quad \forall t \in T, \forall j, j' \in J, \forall d, d' \in D \quad (2.16)$$

$$x2_{d,i}^{v,t} \leq z_{i,d}^t \quad \forall t \in T, \forall i \in I, \forall d \in D \quad (2.17)$$

$$x2_{i,d}^{v,t} \leq z_{i,d}^t \quad \forall t \in T, \forall i \in I, \forall d \in D \quad (2.18)$$

$$x2_{i,i'}^{v,t} + z_{i,d}^t + z_{i',d'}^t \leq 2 \quad \forall t \in T, \forall j, j' \in J, \forall d, d' \in D \quad (2.19)$$

Les contraintes (2.20) et (2.21) déterminent les véhicules et les camions semi-remorques utilisés dans les périodes de planification.

$$x1_{d,j}^{k,t} \leq k_{k,d} \quad \forall t \in T, \forall j \in J, \forall d \in D, \forall k \in K \quad (2.20)$$

$$x2_{d,i}^{v,t} \leq v_{v,d} \quad \forall t \in T, \forall i \in I, \forall d \in D, \forall v \in V \quad (2.21)$$

Les contraintes (2.22) permettent d'initialiser le stock initial à zéro pour tous les produits dans tous les centres de distribution.

$$I_{j,d}^0 = 0 \quad \forall j \in J, \forall d \in D \quad (2.22)$$

Les contraintes (2.23) déterminent le niveau de stock dans les centres de distribution à chaque période de planification.

$$I_{j,d}^t = Q_{j,d}^t + I_{j,d}^{t-1} - \sum_{i \in I} q_{i,j}^t z_{i,d}^t \quad \forall j \in J, \forall d \in D, \forall t \in T \quad (2.23)$$

Les contraintes (2.24) assurent que le niveau d'inventaire, dans chaque centre de distribution, ne dépasse pas la capacité disponible.

$$I_{j,d}^t \leq C_d y_d \quad \forall j \in J, \forall d \in D, \forall t \in T \quad (2.24)$$

Les contraintes (2.25) limitent la quantité à livrer à chaque période afin de respecter les capacités des centres de distribution.

$$\sum_{j \in J} Q_{j,d}^t \leq C_d y_d - \sum_{j \in J} I_{j,d}^{t-1} \quad \forall d \in D, \forall t \in T \quad (2.25)$$

Les contraintes (2.26) garantissent que les camions semi-remorques ne visitent pas à nouveau le même fournisseur pendant une période donnée.

$$x1_{j,j}^{k,t} = 0 \quad \forall t \in T, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (2.26)$$

Les contraintes (2.27) garantissent que chaque fournisseur ne doit être visité au maximum que par un seul camion semi-remorque provenant d'un centre de distribution ou d'un autre fournisseur.

$$\sum_{i \in J \cup D} x1_{i,j}^{k,t} \leq 1 \quad \forall t \in T, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (2.27)$$

Les contraintes (2.28) garantissent que, pour chaque centre de distribution, le nombre de camions sortants est égal au nombre de camions entrants.

$$\sum_{j \in J} x1_{d,j}^{k,t} - \sum_{j \in J} x1_{j,d}^{k,t} = 0 \quad \forall t \in T, \forall d \in D, \forall k \in K \quad (2.28)$$

Les contraintes (2.29) éliminent les sous-tours entre deux fournisseurs.

$$x1_{j',j}^{k,t} + x1_{j,j'}^{k,t} \leq 1 \quad \forall t \in T, \forall j, j' \in J, \forall k \in K \quad (2.29)$$

Les contraintes (2.30) sont les contraintes de conservation à chaque nœud. Elles assurent que le même camion semi-remorque arrive chez le fournisseur à servir et quitte ce dernier.

$$\sum_{i \in J \cup D} x1_{i,j}^{k,t} = \sum_{i \in J \cup D} x1_{j,i}^{k,t} \quad \forall t \in T, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (2.30)$$

Les contraintes (2.31) sont des contraintes de conservation du flux pour le processus de collecte au premier échelon.

$$\sum_{i \in J \cup D} f1_{j,i}^{k,t} - \sum_{i \in J \cup D} f1_{i,j}^{k,t} = \sum_{d \in D} Q_{j,d}^t \quad \forall t \in T, \forall j \in J \quad (2.31)$$

Les contraintes (2.32) garantissent que les capacités des camions semi-remorques ne sont pas violées.

$$f1_{j,i}^{k,t} \leq QT_k x1_{j,i}^{k,t} \quad \forall t \in T, \forall i \in J \cup D, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (2.32)$$

Les contraintes (2.33) imposent que la quantité retournée à chaque centre de distribution soit égale à la somme des quantités envoyées.

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in J} f1_{j,d}^{k,t} = \sum_{j \in J} Q_{j,d}^t \quad \forall t \in T, \forall d \in D \quad (2.33)$$

Les contraintes (2.34)-(2.41) concernent le processus de livraison au deuxième échelon. Elles présentent des conditions similaires à celles du processus de collecte (2.26)-(2.33).

$$x2_{i,i}^{v,t} = 0 \quad \forall t \in T, \forall i \in I, \forall v \in V \quad (2.34)$$

$$\sum_{i \in J \cup D} x2_{j,i}^{v,t} \leq 1 \quad \forall t \in T, \forall i \in I, \forall v \in V \quad (2.35)$$

$$\sum_{i \in I} x2_{d,i}^{v,t} - \sum_{i \in I} x2_{i,d}^{v,t} = 0 \quad \forall t \in T, \forall d \in D, \forall v \in V \quad (2.36)$$

$$x2_{i',i}^{v,t} + x2_{i,i'}^{v,t} \leq 1 \quad \forall t \in T, \forall i, i' \in I, \forall v \in V \quad (2.37)$$

$$\sum_{j \in I \cup D} x2_{j,i}^{v,t} = \sum_{j \in I \cup D} x2_{i,j}^{v,t} \quad \forall t \in T, \forall i \in I, \forall v \in V \quad (2.38)$$

$$\sum_{j \in I \cup D} f2_{j,i}^{v,t} - \sum_{j \in I \cup D} f2_{i,j}^{v,t} = \sum_{j \in J} q_{i,j}^t \quad \forall t \in T, \forall i \in I \quad (2.39)$$

$$f2_{j,i}^{k,t} \leq QV_v x2_{j,i}^{k,t} \quad \forall t \in T, \forall j \in I \cup D, \forall i \in I, \forall v \in V \quad (2.40)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{i \in I} f2_{d,i}^{v,t} = \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} q_{ij}^t z_{i,d}^t \quad \forall t \in T, \forall d \in D \quad (2.41)$$

Les contraintes (2.42)-(2.44) spécifient la nature de chaque variable de décision utilisée dans la modélisation du problème. La définition de chaque variable est décrite dans le Tableau 2.1

$$y_d, z_{i,d}^t, k_{k,d}, v_{v,d} \in \{0, 1\} \quad \forall t \in T, \forall i \in I \cup J, \forall d \in D, \forall k \in K, \forall v \in V \quad (2.42)$$

$$x1_{i,j}^{k,t}, x2_{ij}^{v,t} \in \{0, 1\} \quad \forall t \in T, (i, j) \in A1 \cup A2, k \in K, v \in V, d \in D \quad (2.43)$$

$$f1_{i,j}^{k,t}, f2_{i,j}^{v,t}, Q_{j,d}^t, I_{j,d}^t \geq 0 \quad \forall t \in T, (i, j) \in A1 \cup A2, k \in K, v \in V, d \in D \quad (2.44)$$

### 2.4.3 Modèle ILRP vert et non-collaboratif

Dans le scénario autonome, chaque entreprise utilise ses propres moyens et ressources pour satisfaire les besoins de ses clients. Autrement dit, chaque entreprise résout individuellement les différentes décisions de planification. Le PLMNE (2.8)-(2.44), présenté dans la section précédente, est adapté en ajoutant les contraintes d'affectation

et d'unicité (2.45).

$$\sum_{j \in J} z_{j,d}^t \leq 1 \quad \forall t \in T, \forall d \in D \quad (2.45)$$

Ces contraintes garantissent que chaque centre de distribution ne peut être affecté au plus qu'à un seul fournisseur.

## 2.5 Approche de résolution

### 2.5.1 Optimisation mono-objectif

Le logiciel de développement ILOG-OPL et le solveur d'optimisation CPLEX 12.6 ont été utilisés pour résoudre de façon optimale le PLMNE proposé.

Toutes les formulations ont été codées via CPLEX et exécutées avec un processeur Intel Core i5 (2.6 GHz) et de 8 Go de RAM. Les deux configurations logistiques étudiées ont été résolues en considérant un seul objectif et en évaluant, a posteriori, le deuxième objectif. Cette méthodologie nous permet d'identifier quatre scénarios d'optimisation : minimisation coopérative des coûts, minimisation coopérative des émissions de  $CO_2$ , minimisation non-coopérative des coûts et minimisation non-coopérative des émissions.

### 2.5.2 Optimisation multi-objectifs

Il est important de rappeler que très peu d'études sur la planification collaborative ont proposé des modèles de décision multi-objectifs pour analyser le compromis entre les objectifs visés.

Dans ce travail, nous réalisons une analyse de compromis entre les coûts et les émissions en utilisant la méthode d'agrégation relative (Munoz-Villamizar et al., 2020). Dans cette dernière, une analyse relative est effectuée par rapport à chaque critère, car les objectifs ont des unités de mesure différentes. En effet, c'est une méthode très simple pour transformer un problème multi-objectifs en un problème mono-objectif par une sommation pondérée des fonctions à optimiser (Abbassi, 2018). La fonction relative ( $F_r$ ) de PLMNE multi-objectifs devient alors :

$$F_r = \alpha \frac{C_t + C_I + C_f + C_H}{Cout*} + (1 - \alpha) \frac{E_m + E_c}{Emissions*} \quad (2.46)$$

Où  $\alpha$  est le poids de pondération,  $Cout*$  et  $Emissions*$  désignent respectivement, les solutions optimales obtenues dans la résolution des scénarios économiques et environnementaux (optimisation à objectif unique).

## 2.6 Résultats numériques

Cette section présente les résultats d'un certain nombre d'expérimentations menées pour évaluer la performance de différentes configurations logistiques et quantifier les bénéfices potentiels relatifs à la collaboration logistique dans la conception intégrée des réseaux logistiques. La performance des scénarios est évaluée par rapport à un certain nombre d'indicateurs clés de performance, à savoir le coût total défini dans la fonction objectif (2.9), le coût d'ouverture, le coût de transport, le coût de stockage et les émissions de  $CO_2$ .

### 2.6.1 Description des instances de test

La validation des formulations et le test des deux approches de résolution décrites précédemment sont effectuées sur cinq ensembles d'instances de petite et moyenne taille. Pour chaque instance, les coordonnées géographiques des sites des fournisseurs (usines ou entrepôts), des centres de distribution intermédiaires et des détaillants sont générées à partir de la distribution uniforme dans un carré  $200 \times 200$ . La distance entre deux nœuds est calculée à partir de la distance euclidienne :  $d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ , où  $(x_i, y_i)$  sont les coordonnées du nœud  $i$ .

Dans toutes les expériences réalisées pour les deux scénarios logistiques (Scénario Non-Collaboratif SNC et Scénario Collaboratif SC), nous utilisons des données hypothétiques et d'autres provenant de la littérature et des rapports statistiques. Les centres de distribution disposent d'une capacité de stockage maximale égale à 1000 Kg et un coût d'ouverture (d'utilisation) de 30,000 €. La consommation énergétique d'un centre de distribution sélectionné vaut 10,000 kwh (ADEME, 2010).

Sur l'horizon de planification, la demande de chaque détaillant, mesurée en Kg, est générée selon la distribution uniforme  $D \sim \mathcal{U}(10, 200)$ . Nous supposons qu'il existe deux types de camions semi-remorques. Les camions du premier type ont une capacité maximale de chargement de 1000 Kg, un coût d'utilisation de 39,379 €, un taux de consommation de carburant roulant à vide de 0.28 L/km et un taux de consommation à pleine charge de 0.33 L/km. Les camions du deuxième type ont une capacité de chargement de 800 Kg, un coût d'utilisation de 56,731 €, un taux de consommation de carburant roulant à vide de 0.15 L/km et un taux de consommation à pleine charge de 0.20 L/km. Les capacités sont exprimées en poids et non en volume. Nous supposons que la vitesse moyenne des camions semi-remorques pour les routes régionales est égale 70 km/h (Moutaoukil et al., 2013b). De même, nous supposons qu'il existe deux types de véhicules légers. Le premier type a les caractéristiques suivantes : Une capacité maximale de chargement de 300 Kg, un coût d'utilisation de 22,000 €, un taux de consommation de carburant roulant à vide de 0.133 L/km et un taux de consommation à pleine charge de 0.150 L/km. Les véhicules de deuxième type ont un coût d'utilisation

de 23,000 €, une capacité de 200 Kg, un taux de consommation de carburant roulant à vide de 0.130 L/km et un taux de consommation à pleine charge de 0.145 L/km. Les véhicules roulent à une vitesse moyenne de 40 km/h (Mrabti et al., 2021).

Tous les produits ont un coût unitaire de stockage de 0.10 €/période dans les plateformes intermédiaires (Stellingwerf et al., 2018). Le coût de chargement/déchargement est fixé à 0.05 €/kg (Hacardiaux and Tancrez, 2019).

Finalement, le prix unitaire du carburant et le facteur d'émissions par litre de carburant consommé sont fixés respectivement à 1.5 €/L et 2.66 kg  $CO_2$ /L (Bektas et al., 2016; Tassou et al., 2009).

## 2.6.2 Exemple numérique

Un exemple numérique est illustré pour comparer les solutions optimales de la résolution économique et écologique des modèles présentés. Dans cette instance, un réseau de distribution composé de dix-huit nœuds est considéré (4 fournisseurs, 4 centres de distribution CDs et 10 détaillants). Pour mieux illustrer les résultats, nous considérons un horizon de planification de deux périodes. Les demandes des détaillants à chaque période sont répertoriées dans le Tableau 2.2.

TABLEAU 2.2 – Demande des détaillants à chaque période.

Détaillant $i$	Fournisseur $j$	Demande (Kg)	
		Période 1	Période 2
1	2	70	25
2	2	68	15
3	1	196	47
4	4	151	13
5	4	156	112
6	3	37	48
7	2	120	92
8	3	169	78
9	3	171	18
10	1	19	19

### 2.6.2.1 Résultats de l'optimisation économique

Les modèles collaboratif et non-collaboratif sont résolus en optimisant les coûts logistiques. Toutefois, les émissions de  $CO_2$  sont évaluées à partir des solutions obtenues après l'optimisation. Le Tableau 2.3 récapitule les résultats obtenus par l'optimisation économique des scénarios logistiques. La Figure 2.2 illustre les configurations à chaque période dans les deux scénarios logistiques.



TABLEAU 2.3 – Indicateurs clés de performance pour les deux scénarios de minimisation des coûts.

Indicateur clé de performance	ILRP minimisant les coûts		Écart%
	SNC	SC	
Coût d'ouverture des CD (€)	120,000	60,000	50.00
Coût de stockage (€)	46.70	46.70	0.00
Coût de transport (€)	918.43	650.62	29.16
Coût total (€)	<b>366,805.93</b>	<b>183,780.12</b>	<b>49.90</b>
Émissions de transport (kg $CO_2$ )	1591.95	1127.75	29.16
Émissions de fonctionnement (kg $CO_2$ )	3500	1750	50.00
Émissions totales de $CO_2$ (kg $CO_2$ )	5091.95	2877.75	43.48

Les résultats montrent que l'utilisation conjointe des moyens et des ressources dans la planification intégrée des décisions peut entraîner des économies importantes en termes de coûts et d'émissions. Du point de vue économique, la collaboration entre les fournisseurs, ou encore entre les expéditeurs, permet de réduire les coûts totaux agrégés jusqu'à 49,90% par rapport à la situation autonome où chacun d'entre eux planifie ses décisions séparément.

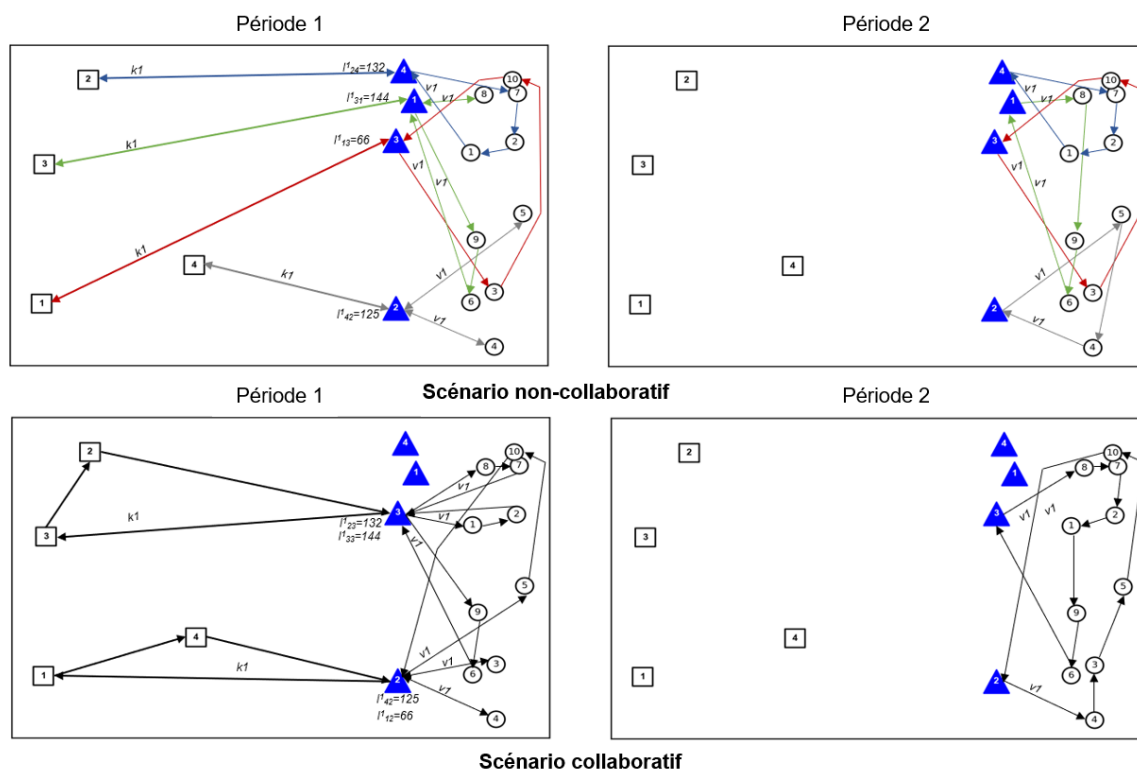


FIGURE 2.2 – Solutions optimales obtenues par la résolution économique des scénarios non-collaboratif et collaboratif.

Comme le montre le Tableau 2.3 et la Figure 2.2, l'utilisation conjointe des ressources et des centres de distribution minimise le nombre des centres de distribution à ouvrir et par conséquent minimise les coûts liés à l'ouverture des plateformes intermédiaires de consolidation des flux. De plus, en regroupant les commandes, la réduction du nombre des routes croisées et l'augmentation du taux de remplissage des véhicules et des camions peuvent réduire environ 29.16% les émissions dues au transport. Par ailleurs, la réduction du nombre de centres de distribution à ouvrir conduit non seulement à une réduction significative des coûts d'ouverture, mais aussi à une diminution de la quantité d'énergie consommée, ce qui permet de réduire les émissions totales dans le réseau. Il est important de noter que dans cet exemple, la collaboration n'a pas affecté les coûts d'inventaire. Toutefois, dans certains cas, ce coût pourrait être atténué par une planification conjointe grâce à une meilleure organisation des routes. Ce coût sera alors analysé dans les sections suivantes en étudiant des problèmes de test différents.

### 2.6.2.2 Résultats de l'optimisation écologique

Le Tableau 2.4 montre que les émissions totales de  $CO_2$  obtenues grâce à l'optimisation environnementale sont réduites dans les scénarios collaboratif et non-collaboratif, comparée à la résolution économique que nous avons effectuée dans la section précédente. En effet, dans le scénario autonome, l'optimisation basée sur des critères environnementaux permet de réduire les émissions totales d'environ 6.17% (voir Tableau 2.5). Par ailleurs, dans le scénario totalement collaboratif, les émissions sont économisées de 3.43%.

TABLEAU 2.4 – Indicateurs clés de performance pour les deux scénarios de minimisation des émissions de  $CO_2$ .

Indicateur clé de performance	ILRP minimisant les émissions		Écart%
	SNC	SC	
Coût d'ouverture des CD (€)	120,000	60,000	50.00
Coût de stockage (€)	46.69	46.69	0.00
Coût de transport (€)	737.14	593.66	19.46
Coût total (€)	506,032.64	242,427.16	52.09
Émissions de transport (kg $CO_2$ )	1277.71	1029.01	26.08
Émissions de fonctionnement (kg $CO_2$ )	3500.00	875.00	50.00
Émissions totales de $CO_2$ (kg $CO_2$ )	<b>4777.71</b>	<b>2779.01</b>	<b>41.83</b>

Il est évident que lorsque le modèle optimise les émissions de  $CO_2$ , la quantité totale de carburant consommée durant le transport et celle utilisée pour le fonctionnement des plateformes, seront réduites autant que possible. De manière plus précise, les émissions de  $CO_2$  dues au transport dans le scénario non-collaboratif sont réduites de 19.74% par rapport à la solution optimale économique, tandis que les émissions du transport

dans le scénario collaboratif sont abaissées de 8.75%. Par contre, les coûts logistiques deviennent plus élevés que dans la résolution économique, soit une augmentation de 37.96% dans la situation autonome et de 31.91% dans le scénario collaboratif. Cette augmentation est principalement due au choix des moyens de transport et au nombre de centres de distribution sélectionnés. En effet, comme le montre la Figure 2.3, lorsque les émissions de  $CO_2$  sont optimisées, les modèles proposent l'utilisation des flottes de transport à faible taux de consommation sans tenir compte de leur coût d'achat, qui est généralement inversement proportionnel au taux de consommation. En outre, les modèles tentent de trouver un bon compromis entre les véhicules à faible consommation et à capacité élevée.

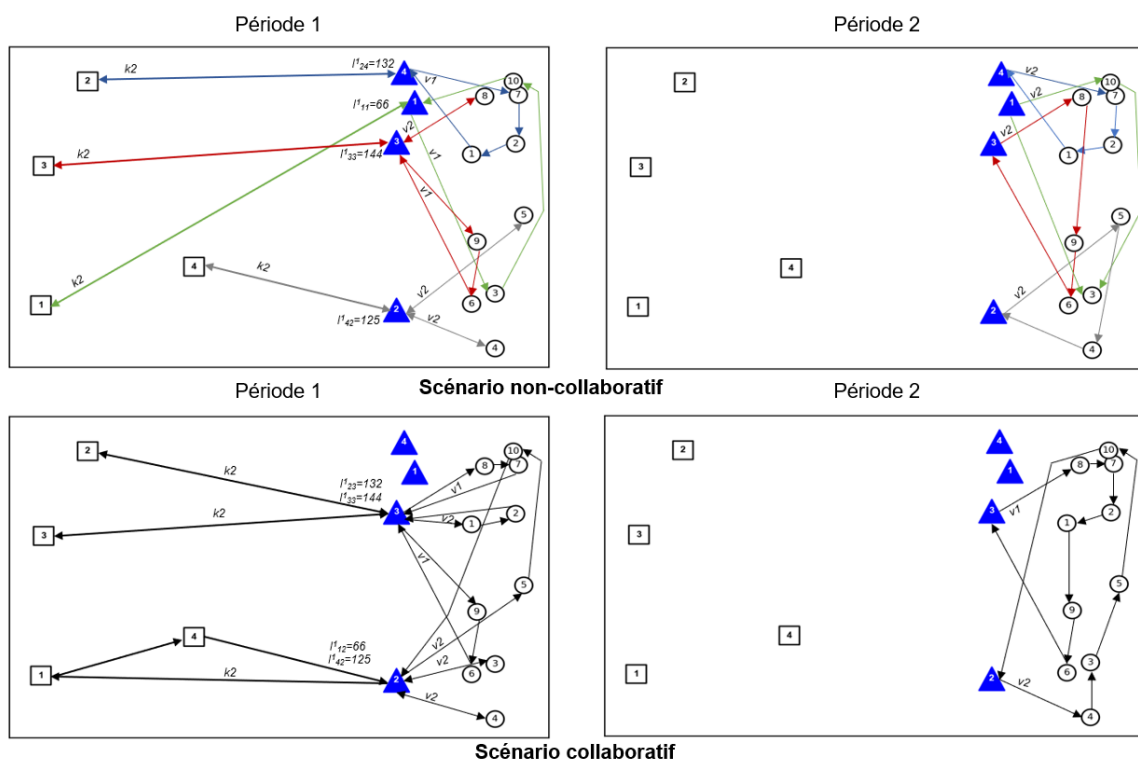


FIGURE 2.3 – Solutions optimales obtenues par la résolution écologique des scénarios non-collaboratif et collaboratif.

Le Tableau 2.5 donne l'écart des émissions et des coûts pour les différents cas de résolution possibles. Ces cas sont évalués en fonction de la valeur optimale de l'objectif. À titre d'exemple, la valeur 49.90% représente l'écart entre les coûts obtenus par la résolution économique des scénarios non-collaboratif et collaboratif. Cette valeur signifie que le SNC est plus coûteux que le CS et montre que ce dernier permet de réduire le coût total d'environ 49,90%, par rapport au SNC lorsque l'optimisation est basée sur les coûts.

Nous pouvons déduire, à partir des résultats présentés dans le Tableau 2.5, que les coûts obtenus lors de la résolution économique du SC sont inférieurs aux autres cas

d'optimisation. Par ailleurs, la résolution environnementale du SC permet de réaliser des économies significatives en termes d'émissions, mais elle entraîne des coûts un peu plus élevés que la résolution basée sur les coûts logistiques.

TABLEAU 2.5 – Taux de variation des coûts et des émissions en %.

Cas	SNC économique		SC économique		SNC environnemental		SC environnemental	
	Coût	Émissions	Coût	Émissions	Coût	Émissions	Coût	Émissions
SNC économique	0.00	0.00	49.90	43.48	-37.96	6.17	33.91	45.42
SC économique	<b>-99.59</b>	-76.94	<b>0.00</b>	0.00	<b>-175.35</b>	-66.02	<b>-31.91</b>	3.43
SNC environnemental	27.51	-6.58	63.68	39.77	0.00	0.00	52.09	41.83
SC environnemental	-51.31	<b>-83.23</b>	24.19	<b>-3.55</b>	-108.74	<b>-71.92</b>	0.00	<b>0.00</b>

### 2.6.3 Résultats des tests d'instances

Dans le but d'analyser en détail l'impact économique et environnemental de la collaboration logistique dans l'ILRP, nous testons ici les modèles proposés sur différentes instances générées aléatoirement. Les noms des instances sont notés  $|J|-|D|-|I|$ . Par exemple, la notation "3-3-9" signifie une instance de test avec 15 nœuds (3 fournisseurs, 3 centres de distribution intermédiaires et 9 détaillants).

Les résultats expérimentaux obtenus en faisant la résolution de différents scénarios d'optimisation sont donnés dans les Tableaux 2.6 et 2.7.

La Figure 2.4 synthétise les coûts et les émissions obtenus dans chaque cas de résolution possible.

#### 2.6.3.1 Analyse des coûts

Bien que les bénéfices en termes de coûts dépendent de plusieurs paramètres, à savoir la taille des instances, les capacités des véhicules et des semi-remorques, les capacités des centres de distribution, les demandes des clients ainsi que l'objectif d'optimisation, les résultats expérimentaux montrent que la collaboration peut apporter des gains économiques significatifs.

Dans toutes les instances testées et quelque soit l'objectif visé, la Figure 2.4 montre des économies substantielles allant de 24% à 66% des coûts totaux obtenus grâce à la collaboration. Quand la résolution est basée sur les coûts, les deux scénarios optimisent les coûts liés à l'ouverture du centre de distribution, à l'utilisation des moyens de transport et aux activités d'inventaire et de transport. En ce qui concerne les coûts d'ouverture et les coûts des moyens de transport, la réduction de ces coûts est significativement réduite dans le scénario de collaboration, jusqu'à 66.70% comparée au scénario SNC. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que le nombre de centres de distribution, de camions semi-remorques et de véhicules utilisés est réduit en raison de la réaffectation des clients et des fournisseurs grâce à la mutualisation des ressources. Les modèles

TABLEAU 2.6 – Indicateurs clés de performance pour les différentes instances de test : Optimisation économique.

Instance	Indicateur clé de performance	ILRP minimisant les coûts		Écart%
		SNC	SC	
3-3-7	Coût d'ouverture des CDs (€)	90,000	30,000	66.70
	Coût de stockage (€)	31.00	14.20	54.19
	Coût de transport (€)	625.89	461.30	26.29
	Coût total (€)	275,000.69	92,061.30	66.52
	Émissions de transport (kg $CO_2$ )	1084.87	799.58	26.29
	Émissions de fonctionnement (kg $CO_2$ )	2625	875	66.67
	Émissions totales de $CO_2$ (kg $CO_2$ )	3709.87	1 674.58	57.86
	Temps CPU (s)	87.53	88.94	–
3-3-9	Coût d'ouverture des CDs (€)	90,000	30,000	66.70
	Coût de stockage (€)	31.00	0.00	100.00
	Coût de transport (€)	556.35	425.24	23.56
	Coût total (€)	274,977.25	92,050.64	66.52
	Émissions de transport (kg $CO_2$ )	964.34	737.08	23.56
	Émissions de fonctionnement (kg $CO_2$ )	2625	875	66.67
	Émissions totales de $CO_2$ (kg $CO_2$ )	3589.34	1612.08	55.08
	Temps CPU (s)	643.51	753.20	–
4-4-12	Coût d'ouverture des CDs (€)	120,000	60,000	50.00
	Coût de stockage (€)	67.40	18.00	73.29
	Coût de transport (€)	751.48	549.55	26.87
	Coût total (€)	366,717.08	183,707.75	49.90
	Émissions de transport (kg $CO_2$ )	1302.57	952.55	26.87
	Émissions de fonctionnement (kg $CO_2$ )	3500	1750	50.00
	Émissions totales de $CO_2$ (kg $CO_2$ )	4802.57	2702.55	43.73
	Temps CPU (s)	6943.31	7428.85	–
4-4-15	Coût d'ouverture des CDs (€)	120,000	90,000	25.00
	Coût de stockage (€)	145.90	0.00	100.00
	Coût de transport (€)	1 031.02	921.28	10.64
	Coût total (€)	367,288.32	275,653.68	24.95
	Émissions de transport (kg $CO_2$ )	1787.11	1596.88	10.64
	Émissions de fonctionnement (kg $CO_2$ )	3500	2625	25.00
	Émissions totales de $CO_2$ (kg $CO_2$ )	5287.11	4221.88	20.15
	Temps CPU (s)	13987.05	14351.58	–

proposés visent, quel que soit l'objectif à optimiser, à réduire le nombre de centres de distribution à ouvrir. En effet, lorsque l'optimisation est basée sur l'empreinte écologique de la logistique, les modèles cherchent à réduire les émissions du transport et celles liées à la consommation d'énergie, qui sont proportionnelles au nombre de centres de distribution ouverts.

De plus, lorsque les expéditeurs coopèrent, les niveaux de stocks peuvent être réduits de manière significative en augmentant le nombre de voyages et en utilisant des centres de distribution conjoints. Par exemple, la résolution économique des instances

TABLEAU 2.7 – Indicateurs clés de performance pour les différentes instances de test : Optimisation écologique.

Instance	Indicateur clé de performance	ILRP minimisant les émissions		Écart%
		SNC	SC	
3-3-7	Coût d'ouverture des CDs (€)	90,000	30,000	66.70
	Coût de stockage (€)	31.00	14.20	54.19
	Coût de transport (€)	474.58	402.36	15.22
	Coût total (€)	373,905.38	132,354.36	64.60
	Émissions de transport (kg $CO_2$ )	822.62	697.42	15.22
	Émissions de fonctionnement (kg $CO_2$ )	2625	875	66.67
	Émissions totales de $CO_2$ (kg $CO_2$ )	3449.62	1572.42	54.39
	Temps CPU (s)	121.84	164.51	–
3-3-9	Coût d'ouverture des CDs (€)	90,000	30,000	66.70
	Coût de stockage (€)	37.50	14.30	61.87
	Coût de transport (€)	437.23	399.90	08.54
	Coût total (€)	351,914.13	132,391.60	66.38
	Émissions de transport (kg $CO_2$ )	757.86	693.16	08.54
	Émissions de fonctionnement (kg $CO_2$ )	2625	875	66.67
	Émissions totales de $CO_2$ (kg $CO_2$ )	3382.86	1568.16	53.64
	Temps CPU (s)	843.22	959.31	–
4-4-12	Coût d'ouverture des CDs (€)	120,000	60,000	50.00
	Coût de stockage (€)	41.90	47.10	-12.41
	Coût de transport (€)	614.59	449.85	26.80
	Coût total (€)	483,962.69	241,341.15	50.13
	Émissions de transport (kg $CO_2$ )	1065.29	799.74	26.80
	Émissions de fonctionnement (kg $CO_2$ )	3500	1750	50.00
	Émissions totales de $CO_2$ (kg $CO_2$ )	4565.29	2529.74	44.59
	Temps CPU (s)	8532.39	9898.85	–
4-4-15	Coût d'ouverture des CDs (€)	120,000	90,000	25.00
	Coût de stockage (€)	145.9	53.80	63.13
	Coût de transport (€)	794.32	734.18	07.57
	Coût total (€)	505,459.62	373,576.38	26.09
	Émissions de transport (kg $CO_2$ )	1376.82	1272.58	07.57
	Émissions de fonctionnement (kg $CO_2$ )	3500	2625	25.00
	Émissions totales de $CO_2$ (kg $CO_2$ )	4876.82	3897.58	20.08
	Temps CPU (s)	19643.31	23654.98	–

3-3-9 et 4-4-15 montre que la planification conjointe élimine le stockage des produits dans les centres de distribution. Ces résultats sont cohérents avec la littérature existante (Hacardiaux and Tancrez, 2019; Soysal et al., 2018b). En revanche, dans la mesure où l'optimisation est basée sur les émissions de  $CO_2$ , le modèle ILRP collaboratif encourage parfois l'utilisation du stockage afin de minimiser le nombre de voyages et donc de réduire les émissions de transport, voir par exemple les résultats de la résolution environnementale de l'instance 4-4-12. Enfin, en ce qui concerne le coût de transport, comme indiqué dans les Tableaux 2.6 et 2.7, le partage des ressources implique toujours des réductions significatives, surtout lorsque l'optimisation est basée sur l'aspect

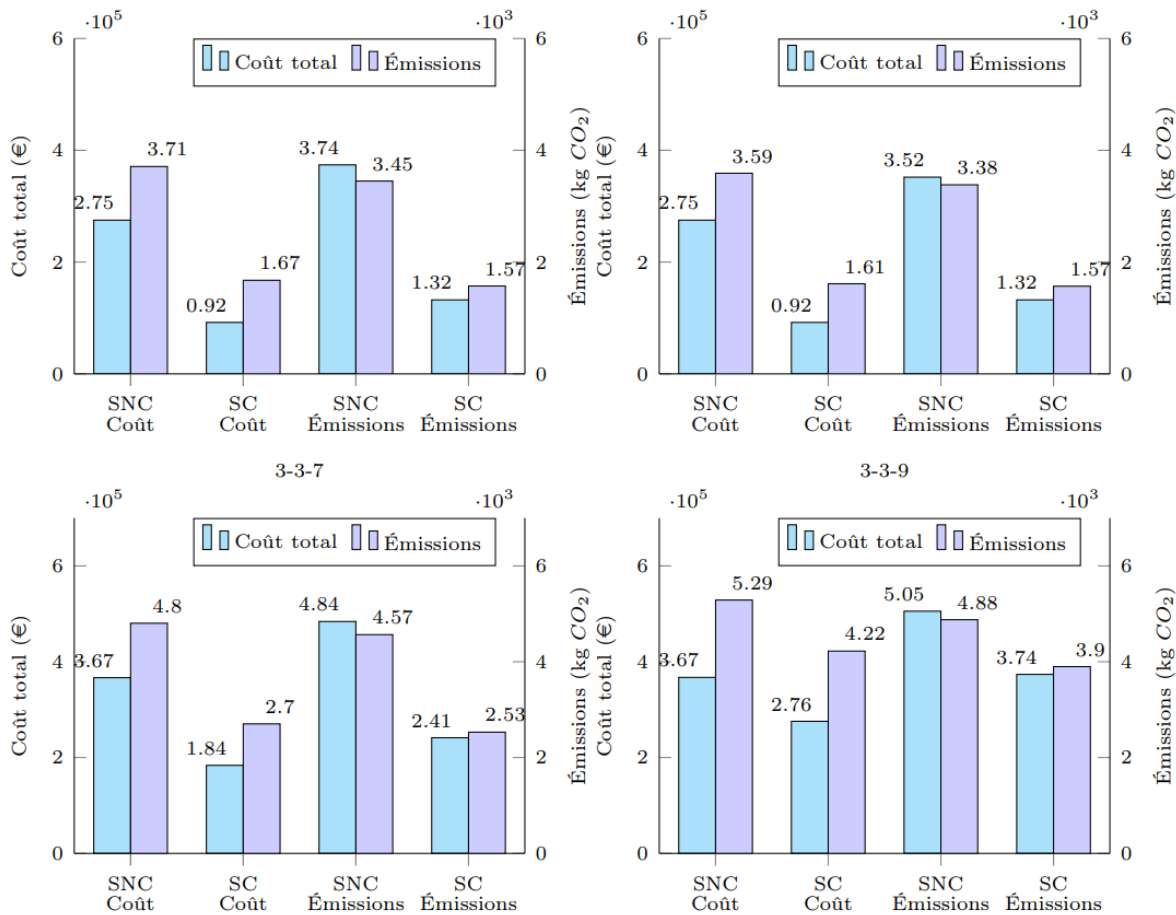


FIGURE 2.4 – Synthèse des résultats économiques et écologiques pour les instances testées.

environnemental, puisque les émissions et les coûts de transport sont modélisés de la même manière.

Dans l'ensemble, le scénario collaboratif surpasse le scénario non-collaboratif en termes de réduction des coûts dans les deux objectifs d'optimisation. La planification collaborative peut générer une réduction moyenne des coûts allant jusqu'à 62.48%, par rapport au scénario autonome. Cependant, la résolution environnementale entraîne une augmentation du coût total plus importante que l'optimisation économique, de l'ordre de 25% en moyenne dans toutes les instances testées. Le Tableau 2.8 montre les écarts moyens entre les coûts obtenus par la résolution économique et ceux évalués en résolvant les modèles avec des objectifs écologiques dans les deux scénarios étudiés.

### 2.6.3.2 Analyse des émissions

En plus des gains économiques évoqués précédemment, d'autres gains environnementaux peuvent être obtenus par le partage des ressources et des moyens. Comme

TABLEAU 2.8 – Taux de variation moyen du coût total en %.

Cas	SNC économique	SC économique	SNC écologique	SC écologique
SNC économique	0.00	49.88	-33.59	31.49
SC économique	-99.54	0.00	-166.56	-36.71
SNC écologique	25.14	62.48	0.00	48.71
SC écologique	-45.96	26.85	-94.99	0.00

le révèlent les Tableaux 2.6 et 2.7, le scénario collaboratif réduit considérablement les émissions de  $CO_2$  allant de 20.08% à 57.86% dans les deux cas d'optimisation. Par exemple, si on considère les résultats de l'instance 4-4-12, le scénario collaboratif entraîne des réductions d'émissions de  $CO_2$  de 44.59% dans l'optimisation des coûts et de 43.73% dans la résolution environnementale.

En conclusion, si on optimise les émissions, il est possible de réaliser des économies d'émissions de  $CO_2$  de 06.41% en moyenne dans le scénario non collaboratif et de 06.30% en moyenne dans le scénario collaboratif, comparé à la résolution économique, voir Tableau 2.9. Ces réductions proviennent principalement de deux facteurs. Le premier est le fait que les entreprises partagent les centres de distribution et choisissent les centres les plus proches de leurs clients, autrement dit, les entreprises regroupent leurs produits pour massifier les flux logistiques et réduire le nombre de voyages. Le second est que les entreprises mutualisent les moyens de transport et choisissent les véhicules et les camions semi-remorques les plus écologiques. Par exemple, pour l'empreinte écologique, les modèles proposés favorisent l'utilisation des véhicules et des camions semi-remorques à faible consommation de carburant (le deuxième type) même si ceux-ci sont généralement très coûteux en termes de coûts d'utilisation.

TABLEAU 2.9 – Taux de variation moyen des émissions de  $CO_2$  en %.

Cas	SNC économique	SC économique	SNC écologique	SC écologique
SNC économique	0.00	41.28	06.41	44.98
SC économique	-70.29	0.00	-59.38	06.30
SNC écologique	-06.85	37.26	0.00	41.21
SC écologique	-81.74	-06.72	-70.10	0.00

À partir des ces résultats, on peut conclure que la coopération entre les entreprises (ou encore entre les expéditeurs ou les fournisseurs) dans la planification intégrée des décisions peut contribuer à la conception de configurations logistiques écologiques. De plus, cette stratégie contribue à réduire notablement la distance parcourue. Cette dernière peut être considérée comme un aspect social puisqu'elle permet de minimiser les problèmes de congestion et le temps de conduite et, par conséquent, d'assurer le confort des conducteurs. En outre, comme le mentionne (Mrabti et al., 2020), les taux des accidents peuvent être minimisés en réduisant le nombre de trajets parcourus dans le réseau.



### 2.6.4 Analyse de compromis

Compte tenu des différentes caractéristiques des moyens de transport en termes de coût d'utilisation, de capacité de chargement et de consommation de carburant, un compromis peut être trouvé entre le coût total et les émissions de  $CO_2$ . En effet, comme nous avons vu dans les sections précédentes, l'ILRP collaboratif peut réduire davantage les coûts et l'empreinte écologique de la logistique. Cependant, la minimisation des coûts produit une solution optimale différente de la minimisation de l'empreinte de  $CO_2$ . De plus, la réduction des émissions totales entraîne un coût légèrement plus élevé que celui de l'optimisation économique. Les études antérieures ont suggéré qu'il serait intéressant d'établir un compromis entre le coût et les émissions dans le contexte de la planification verte et collaborative des réseaux logistiques (Mrabti et al., 2020; Pan et al., 2014; Stellingwerf et al., 2018). Pour cela, nous avons calculé les compromis entre le coût total et les émissions de  $CO_2$  en utilisant la méthode d'agrégation relative des objectifs présentée dans la section 2.5.2.

La Figure 2.5 illustre les frontières d'efficacité économique/écologique pour les différentes instances de test. Le compromis entre le coût et l'empreinte écologique est obtenu en faisant varier les valeurs des pondérations des objectifs avec un pas de 0.1 ( $\alpha$  : poids des coûts et  $1 - \alpha$  : pondération des émissions de  $CO_2$ ).

Comme le montre la Figure 2.5, les solutions économiques sont fortement influencées par les émissions de  $CO_2$  et vice versa. Toutefois, nous pouvons remarquer que les émissions de  $CO_2$  varient légèrement en fonction des pondérations. Ceci peut être exprimé par le fait que le modèle de l'évaluation de la performance écologique est exhaustif, puisqu'il intègre les émissions du fonctionnement des installations. Ce modèle peut constituer un atout potentiel à la coopération car les partenaires ont besoin de se mettre d'accord sur le niveau de compromis des émissions et des coûts qu'ils souhaitent atteindre en partageant les ressources.

Par ailleurs, comme on peut le voir sur la Figure 2.5, il est possible de trouver le meilleur compromis entre les émissions et le coût total à partir d'une valeur de pondération de 0,2. Les pentes des frontières d'efficacité diminuent clairement après cette valeur. Par conséquent, toutes les solutions trouvées avec une pondération de 0,2 ou toute autre valeur de pondération plus élevée constituent des compromis plus avantageux en termes économiques et écologiques.

## 2.7 Conclusion

Les préoccupations économiques et écologiques ont récemment contraint les entreprises à se concentrer davantage sur un système de transport écologique et des méthodes de livraison adéquates. Par conséquent, il devient nécessaire d'organiser et d'accorder

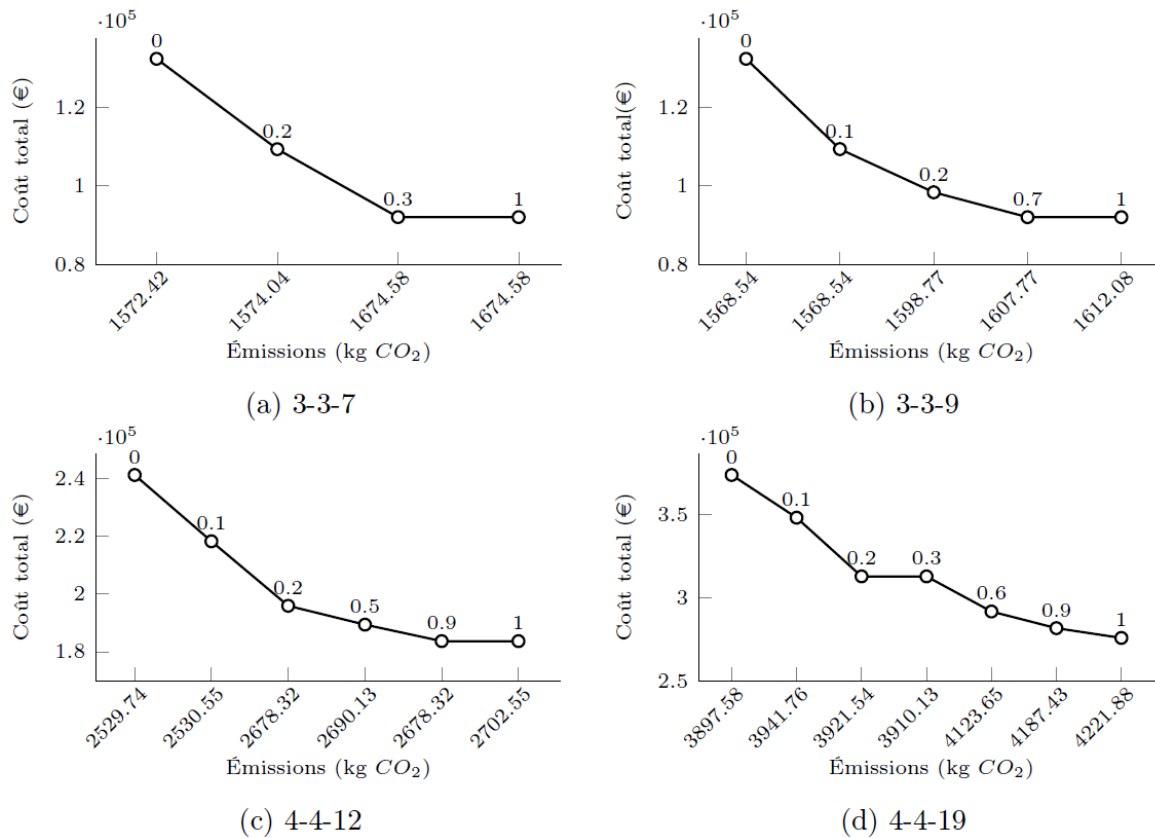


FIGURE 2.5 – Compromis entre le coût total et les émissions de  $CO_2$ .

une attention particulière à la distribution des marchandises. Cette étude présente une approche de planification intégrée, basée sur des stratégies de distribution collaboratives et non-collaboratives, pour concevoir des réseaux logistiques à deux échelons en tenant compte des considérations écologiques. Un modèle bi-objectif, qui optimise les coûts logistiques et les émissions de  $CO_2$ , est développé pour évaluer les avantages de la collaboration dans le modèle ILRP. Les résultats obtenus montrent que la collaboration logistique entre les entreprises est une stratégie de gestion efficace qui apporte des avantages significatifs en termes de performance économique et écologique. Plus précisément, les expériences de calcul, s'appuyant sur des instances de petite et de moyenne taille, ont démontré que la collaboration logistique peut entraîner des économies de coûts et d'émissions allant respectivement jusqu'à 66,52% et 57,86%. Toutefois, un compromis clair entre la minimisation des coûts et la réduction des émissions a été observé. Pour cette raison, une approche d'agrégation relative est utilisée pour aider les décideurs logistiques à choisir la configuration optimale, en fonction de l'importance de ces deux objectifs.

Dans ce chapitre, nous avons résolu les modèles proposés d'une manière optimale en utilisant le solveur CPLEX sur des instances de petite et moyenne taille. Toutefois, comme nous avons montré dans le Tableaux 2.6 et 2.7, le temps de résolution devient

plus important en augmentant la taille des instances. De plus, seuls les aspects de performance économique et écologique ont été évalués. En effet, les aspects sociaux doivent être ingérés dans l'évaluation de la performance des réseaux logistiques. Afin de remédier au problème de temps de résolution pour les instances réelles à grande échelle et à l'évaluation de la durabilité économique, écologique et sociale des réseaux logistiques, le chapitre suivant met l'accent sur ces problèmes en développant une méthode approchée qui prend en compte à la fois des objectifs économiques, écologiques et sociaux lors de la planification des décisions.

## Chapitre 3

# Approche heuristique d'optimisation intégrée pour la planification durable des réseaux logistiques

### Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>63</b>
<b>3.2</b>	<b>Inventory Location Routing Problem</b>	<b>64</b>
<b>3.3</b>	<b>Description du problème et formulation mathématique</b>	<b>66</b>
3.3.1	Énoncé du problème	66
3.3.2	Formulation du risque d'accident	67
3.3.3	Formulation du modèle pour le 2E-CILRP	69
<b>3.4</b>	<b>Approche de résolution</b>	<b>72</b>
3.4.1	Procédure de Clustering	74
3.4.2	Algorithme génétique	75
<b>3.5</b>	<b>Résultats, analyse et discussion</b>	<b>76</b>
3.5.1	Expérimentations sur les petites et moyennes instances	77
3.5.2	Évaluation des performances sur des instances de grande taille : Comparaison des algorithmes	80
3.5.3	Étude de cas	82
3.5.4	Étude de sensibilité	84
3.5.5	Perspectives managériales	87
<b>3.6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>87</b>

---

## 3.1 Introduction

**L**ES réseaux de distribution sont des éléments importants qui permettent aux chaînes logistiques d'atteindre une variété d'objectifs, allant d'un faible coût à une grande réactivité, et d'améliorer leur rentabilité et leur compétitivité globale (Chen et al., 2017; Javid and Azad, 2010). En effet, la conception et la gestion des réseaux logistiques sont des questions cruciales dans l'optimisation des chaînes logistiques en raison de leur rôle primordial dans le développement de la société et la préservation de l'environnement (Comi and Savchenko, 2021; Kermanshah et al., 2020; Kiba-Janiak et al., 2021; Mahmoudi et al., 2019; Muñoz-Villamizar et al., 2021). Par conséquent, afin de rester compétitive sur le marché actuel en pleine expansion, les entreprises devraient mettre en œuvre des stratégies efficaces comme la collaboration logistique pour concevoir et gérer leurs réseaux de distribution (Aloui et al., 2021f). Comme mentionnée précédemment, cette stratégie peut améliorer considérablement l'efficacité des opérations logistiques et contribuer à la croissance de la société sur le plan socio-environnemental (Aloui et al., 2021d; Russo et al., 2021; Strulak-Wójcikiewicz and Wagner, 2021; Vargas et al., 2020).

Depuis quelques années, les pratiques collaboratives ont connu un véritable succès et de nombreuses études ont été menées pour trouver des solutions permettant d'augmenter la performance économique des réseaux logistiques (Akyol and De Koster, 2018; Soysal et al., 2018b). Comme nous l'avons déjà vu, en mutualisant les ressources, les clients peuvent être livrés à partir des centres de distribution les plus proches, ce qui réduit les distances parcourues et les coûts de transport. De plus, les entreprises peuvent réaliser des économies substantielles en augmentant le taux de remplissage des flottes de transport et en réduisant les coûts fixes, les trajets à vide et la consommation de carburant (Aloui et al., 2021d,f).

Les problèmes de localisation et d'allocation, de gestion des stocks et d'acheminement des véhicules sont des problèmes fondamentaux émergents dans la planification et la conception des réseaux de distribution. Traditionnellement, ces décisions ont été prises de manière séquentielle ou indépendante où les décisions de localisation-allocation sont abordées avant l'acheminement des véhicules et la gestion des stocks (Aloui et al., 2021e). La littérature a prouvé que l'intégration des décisions opérationnelles aux côtés des décisions stratégiques et tactiques a un impact majeur sur le succès des chaînes logistiques en termes de coût, de qualité et de temps de service. Bien que l'intégration des décisions de planification a pris de l'ampleur ces dernières années, la recherche sur la planification collaborative et intégrée n'en est qu'à ses débuts. Peu d'études récentes se sont concentrées sur le développement des modèles intégrés pour la conception et la planification collaborative de réseaux. Dans le chapitre précédent, le problème

d'inventaire, de localisation et de routage intégré et collaboratif à deux échelons (Two-Echelon Collaborative Inventory Location Routing Problem 2E-CILRP) tenant compte des critères écologiques et économiques a été modélisé (Aloui et al., 2021d). Dans ce problème, les entreprises/fournisseurs de transport travaillent ensemble pour optimiser les décisions relatives à l'emplacement des plateformes, à l'affectation des clients et des fournisseurs, aux niveaux des inventaires et à l'acheminement des marchandises. Toutefois, les préoccupations sociales et environnementales ont amené les entreprises à se concentrer davantage sur l'intégration des objectifs économiques, environnementaux et sociaux dans l'évaluation de la performance globale de leurs activités logistiques. À notre connaissance, le 2E-CILRP sous des considérations de durabilité n'a pas encore été abordé dans la littérature. Pour combler cette lacune, ce chapitre intègre les décisions de planification et évalue trois dimensions de la durabilité dans la conception d'un réseau logistique collaboratif à deux échelons. À cette fin, une description et une formulation mathématique du problème étudié comme un modèle PLMNE sont présentées. De plus, en raison de la nature NP-difficile du problème considéré, nous proposons une nouvelle approche hybride combinant un algorithme modifié de Clustering  $k$ -means et un algorithme génétique pour résoudre les problèmes à grande échelle. Par ailleurs, nous traitons une étude de cas des PME agro-alimentaires françaises pour évaluer les avantages durables de l'approche d'optimisation développée à la fois pour la société et pour l'environnement.

Le reste de ce chapitre est structuré comme suit. La section 2 fournit un aperçu sur les problèmes d'inventaire, de localisation et de routage intégrés. Le 2E-CILRP multi-objectifs est décrit et modélisé dans la section 3. La section 4 décrit la méthodologie développée pour résoudre le 2E-CILRP. Les résultats de calcul sont présentés dans la section 5. Enfin, la section 6 conclut ce chapitre.

## 3.2 Inventory Location Routing Problem

Pour surmonter les problèmes traditionnels de conception des réseaux logistiques, dans lesquels les décisions sont abordées indépendamment avec des horizons temporels différents, l'intégration des décisions de localisation-allocation, de gestion d'inventaire et de routage des véhicules est devenue une question importante tant dans le secteur industriel que dans le domaine académique.

Dans la littérature, de nombreux cas d'ILRP ont été abordés. L'ILRP à un échelon, impliquant un ensemble de dépôts et un ensemble de détaillants, a été étudié par Guerrero et al. (2013) et Zhang et al. (2014). En effet, le problème a été modélisé à l'aide de la formulation PLMNE en minimisant les coûts stratégiques ainsi que les coûts tactiques et opérationnels. D'autre part, il a été résolu par des méthodes exactes et

approchées. De même, [Yavari et al. \(2020\)](#) ont étudié l'ILRP multi-périodes et mono-échelon pour les produits périssables en cas de perturbations routières durant certaines périodes. Le problème est modélisé sous la forme d'un PLMNE en maximisant le profit total et résolu à l'aide d'un algorithme génétique.

L'ILRP à deux échelons avec un seul fabricant ou fournisseur a été abordé dans plusieurs travaux. Par exemple, [Hiassat et al. \(2017\)](#) et [Rafie-Majd et al. \(2018\)](#) ont traité ce problème dans le cas de produits périssables. Ils ont résolu ce problème en appliquant des algorithmes génétiques et de relaxation lagrangienne qui minimisent les coûts totaux. De même, [Saif-Eddine et al. \(2019\)](#) ont étudié l'ILRP avec un seul fournisseur et en considérant une stratégie d'inventaire chez les clients. Le problème a été formulé de façon à optimiser le coût total de la chaîne logistique et il a été résolu à l'aide d'un algorithme génétique amélioré. [Saragih et al. \(2019\)](#) ont proposé une méthode heuristique pour résoudre l'ILRP à deux échelons (2E-ILRP) dans lequel un fournisseur, un ensemble de dépôts et un ensemble de clients ont été considérés. L'objectif principal de cette étude est de déterminer l'emplacement des dépôts, l'affectation des détaillants aux dépôts ouverts, l'inventaire dans les différentes entités logistiques et l'acheminement des véhicules des dépôts aux détaillants tout en minimisant le coût total. Plus récemment, [Wu et al. \(2021a\)](#) ont étudié l'ILRP multi-périodes à deux échelons en prenant en compte des fenêtres temporelles chez les détaillants et de la consommation de carburant des véhicules. Afin de résoudre ce problème, les auteurs ont développé une approche méta-heuristique hybride en deux étapes pour réduire les coûts totaux.

Bien que l'efficacité des coûts soit une condition préalable à la performance durable des chaînes logistiques, elle n'est pas suffisante pour atteindre les objectifs de développement durable ([Lin et al., 2014](#)). Il existe, en effet, très peu d'études qui intègrent les préoccupations environnementales et sociales dans l'optimisation des décisions intégrées. Par exemple, [Karakostas et al. \(2020\)](#) se sont concentrés sur l'ILRP vert pour optimiser les émissions de  $CO_2$  et le coût total. Les auteurs ont développé un cadre général basé sur la recherche de voisinage variable pour résoudre ce problème. [Zhalechian et al. \(2016\)](#) ont examiné l'ILRP à deux échelons pour une chaîne logistique durable en boucle fermée en tenant compte de l'émission de  $CO_2$ , du gaspillage d'énergie et des impacts négatifs sur le développement économique. Récemment, [Biuki et al. \(2020\)](#) ont abordé l'ILRP multi-échelons pour les produits périssables afin de concevoir des réseaux logistiques durables. Les chercheurs ont développé un PLMNE multi-objectifs sous une politique de taxation du carbone. De plus, ils ont développé deux méta-heuristiques hybrides pour résoudre ce problème.

Comme nous l'avons évoqué dans les chapitres précédents, bien que les chercheurs se sont déjà intéressés à la planification intégrée, il existe peu de travaux qui considèrent la stratégie de collaboration entre les fournisseurs. En outre, la plupart des chercheurs

se sont concentrés sur la proposition de modèles mathématiques et la résolution de problèmes de petite taille à l'aide de solveurs commerciaux. Cependant, avec l'expansion des réseaux logistiques et la taille des problèmes réels, la proposition de méthodes heuristiques efficaces est devenue une question clé pour résoudre les problèmes de planification intégrée à grande échelle. Par ailleurs, la plupart des études se concentrent sur la minimisation des coûts et des impacts environnementaux et n'incluent pas des aspects sociaux dans leurs modèles d'optimisation. De plus, dans l'ILRP classique, la majorité des études considèrent un seul fournisseur et ignorent la collaboration dans les différents échelons. À cet égard, cette partie du travail contribue à la littérature en étudiant une nouvelle variante de l'ILRP, le 2E-CILRP avec des considérations de durabilité. Ce nouveau problème NP-difficile considère une stratégie collaborative dans la conception des réseaux logistiques où les décisions de routage sont considérées dans les deux échelons.

Pour remédier à ces lacunes, les principales contributions de cette étude sont résumées comme suit :

1. Mise en œuvre de la collaboration logistique entre des fournisseurs LTL dans l'ILRP à deux échelons.
2. Proposition d'un modèle multi-objectifs pour concevoir des réseaux logistiques collaboratifs et durables à deux échelons en minimisant le coût total, les émissions de  $CO_2$  et le risque d'accident lié au transport.
3. Résolution exacte et proposition d'une nouvelle heuristique hybride basée sur les algorithmes de Clustering et génétique pour résoudre efficacement le 2E-CILRP à grande échelle en tenant compte des aspects de durabilité.

### 3.3 Description du problème et formulation mathématique

#### 3.3.1 Énoncé du problème

Comparé au 2E-ILRP traditionnel dans lequel les entreprises travaillent de façon autonome, le 2E-CILRP est défini pour optimiser un réseau de distribution à deux échelons par la collaboration et le partage des ressources. En effet, il peut améliorer efficacement le taux de chargement et optimiser les opérations logistiques grâce à la collaboration en amont et en aval. La Figure 3.1 illustre le réseau général du problème étudié.

Le 2E-CILRP est formellement défini comme étant un graphe complet  $G = (V, E)$  où  $V$  désigne l'ensemble des nœuds comprenant l'ensemble des clients  $I = \{1, \dots, N_{Clients}\}$ , l'ensemble des centres de distribution potentiels  $D = \{1, \dots, N_{CDs}\}$  et l'ensemble des



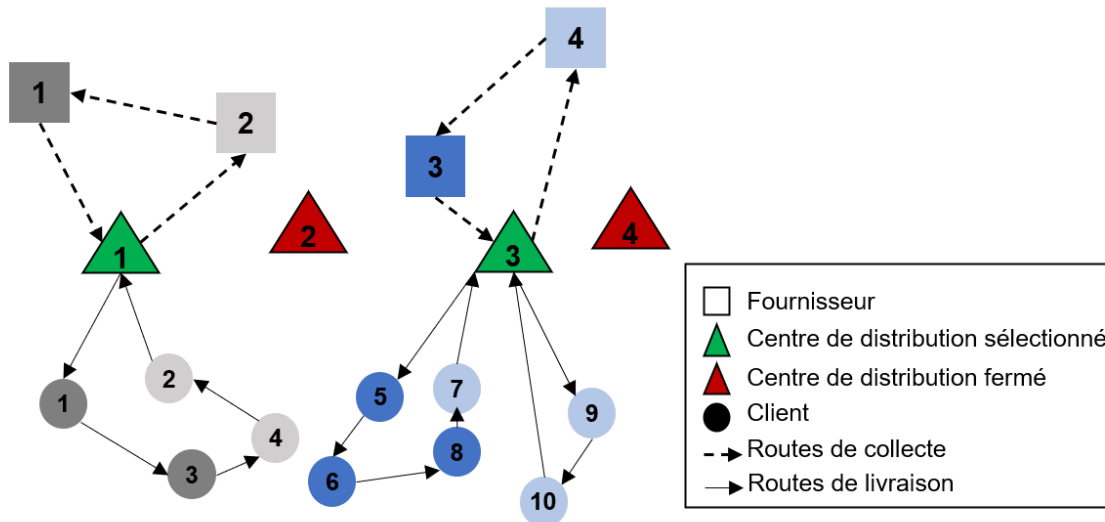


FIGURE 3.1 – Exemple illustratif du 2E-CILRP.

fournisseurs  $J = \{1, \dots, N_{Fournisseurs}\}$ . et  $A = \{(i,j) : i,j \in V; i \neq j\}$  l'ensemble des arêtes comprenant les arcs de livraison et de collecte. Chaque client a une demande non constante et déterministe  $q_{ij}^t$  auprès d'un fournisseur  $j$  à chaque période  $t \in T = \{1, \dots, N_{périodes}\}$ . Afin de réduire la complexité du modèle proposé dans le chapitre précédent, nous supposons que les clients sont desservis par une flotte homogène de véhicules légers avec une capacité fixe  $Q_v$  et un coût fixe  $F_v$ . Les clients  $i$  ne peuvent être visités plus qu'une fois par l'un des véhicules et sont desservis par un seul centre de distribution dans lequel les demandes doivent être consolidées. De plus, chaque centre de distribution potentiel  $d \in D$  dispose d'une capacité de stockage  $C_d$  et d'un coût fixe lorsqu'il est sélectionné. Par ailleurs, nous supposons que la collecte des marchandises auprès des fournisseurs se fait par une flotte homogène de camions lourds ayant une capacité fixe  $Q_s$  et un coût forfaitaire  $F_s$ .

L'objectif du modèle est de minimiser le coût total, les émissions de  $CO_2$  et le risque d'accident du transport en localisant les centres de distribution, en attribuant les fournisseurs/clients aux hubs ouverts, en planifiant les itinéraires de collecte/livraison entre les nœuds et les niveaux des inventaires à chaque période dans les plateformes intermédiaires.

Les notations mathématiques utilisées dans la formulation du modèle sont résumées dans le Tableau 3.1.

### 3.3.2 Formulation du risque d'accident

La modélisation des considérations sociales est une tâche complexe qui n'a pas fait l'objet d'une grande attention dans la littérature (Pan et al., 2019). Dans ce chapitre,

TABLEAU 3.1 – Notations.

Notation	Désignation
Ensembles	
$J$	Ensemble des fournisseurs
$D$	Ensemble des centres de distribution
$I$	Ensemble des clients
$A1, A2$	Ensemble des arcs de collecte et de livraison
$T$	Ensemble des périodes de planification
Paramètres	
$C_d$	Capacité de stockage du centre de distribution $d$
$FO_d$	Coût fixe de l'utilisation du centre de distribution $d$
$EC_d$	Consommation énergétique moyenne du centre de distribution $d$
$Q_s$	Capacité maximale de chargement des camions
$Q_v$	Capacité maximale de chargement des véhicules
$F_s$	Coût opérationnel d'un camion semi-remorque
$F_v$	Coût d'utilisation d'un véhicule
$T_{sE}$	Taux de consommation de carburant du camion à vide
$T_{sL}$	Taux de consommation de carburant du camion à pleine charge
$T_{vE}$	Taux de consommation de carburant du véhicule à vide
$T_{vL}$	Taux de consommation de carburant du véhicule à pleine charge
$c_I$	Coût unitaire de stockage
$c_f$	Prix du carburant par litre
$e_F$	Facteur de conversion du carburant en émissions de $CO_2$
$e_c$	Émissions de $CO_2$ par unité de consommation d'énergie
$A_c$	Nombre annuel d'accidents
$d_{ij}$	Distance entre deux nœuds $i$ et $j : i, j \in J \cup D \cup I$
$q_{ij}^t$	Demande du client $i$ auprès du fournisseur $j$ à la période $t$
Variables de décision	
$y_d$	Égale à 1 si le centre de distribution $d$ est ouvert 1 ; 0 sinon
$z_{id}^t$	Égale à 1 si le nœud $i$ est affecté au centre $d$ ; 0 sinon, $i \in I \cup J, d \in D$
$Q_{jd}^t$	Quantité livrée par le fournisseur $j$ au centre $d$ au cours de la période $t$
$I_{jd}^t$	Niveau de stock du produit $j$ dans le centre $d$ à la période $t$
$x_{ij}^t$	Égale à 1 si l'arc $(i; j)$ est traversé au cours de la période $t$ par un véhicule/camion ; 0 sinon
$f_{ij}^t$	Charge de camion/véhicule sur l'arc $(i; j)$ si un camion/véhicule se déplace directement du nœud $i$ vers le nœud $j$ au cours de la période $t, (i, j) \in A1 \cup A2$

la dimension sociale est représentée par le risque lié aux accidents du transport. En effet, des études antérieures ont montré que le risque d'avoir un accident dépend principalement de la distance parcourue *Distance* et le nombre moyen des accidents par an  $A_c$  (Abdullahi et al., 2021). Pour cela, nous adoptons la formule proposée par (Paľšaitis and Petraška, 2012) pour estimer le risque d'accident  $A_r$  par mille kilomètres (Équation

(3.1)).

$$A_r = \frac{Ac \ 1000}{Distance \ 365} \quad (3.1)$$

Comme on peut le voir dans l'équation (3.1), la distance est inversement proportionnelle aux taux d'accidents. Par conséquent, nous estimons le taux d'accidents  $A$  pour la distance parcourue  $d_{ij}$  entre les nœuds  $i$  et  $j$  par rapport à une distance de référence  $d_{ref}$ .

$$A = A_{ref} \frac{d_{i,j}}{d_{ref}} \quad (3.2)$$

### 3.3.3 Formulation du modèle pour le 2E-CILRP

Le modèle 2E-CILRP multi-objectifs est une extension du modèle ILRP bi-objectifs développé dans le chapitre précédent. Le modèle 2E-CILRP multi-objectifs visant à minimiser le coût total (3.3), les émissions de  $CO_2$  (3.4) et le risque d'accident (3.5) peut être formulé comme suit :

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & \sum_{d \in D} y_d FO_d + \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} \sum_{j \in J} x_{d,j}^t Fs + \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} \sum_{i \in I} x_{d,i}^t Fv + \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} \sum_{j \in J} c_I I_{jd}^t \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in A1} d_{ij} c_f [x_{ij}^t Ts_E + (Ts_L - Ts_E) \frac{f_{ij}^t}{Q_s}] \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in A2} d_{ij} c_f [x_{ij}^t Tv_E + (Tv_L - Tv_E) \frac{f_{ij}^t}{Q_v}] \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & \sum_{d \in D} e_c EC_d y_d + \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in A1} d_{ij} e_F [x_{ij}^t Ts_E + (Ts_L - Ts_E) \frac{f_{ij}^t}{Q_s}] \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in A2} d_{ij} e_F [x_{ij}^t Tv_E + (Tv_L - Tv_E) \frac{f_{ij}^t}{Q_v}] \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\text{Minimize} \quad \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in A1 \cup A2} A_{ref} \frac{d_{i,j}}{d_{ref}} x_{i,j}^t \quad (3.5)$$

Sous contraintes :

— Contraintes de localisation-allocation :

$$z_{id}^t \leq y_d \quad \forall t \in T, \forall i \in I \cup J, \forall d \in D \quad (3.6)$$

$$\sum_{d \in D} z_{id}^t \leq 1 \quad \forall t \in T, \forall i \in I \cup J \quad (3.7)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in I} z_{id}^t q_{ij}^t \leq C_d z_d \quad \forall t \in T, \forall d \in D \quad (3.8)$$

$$\sum_{j \in J} Q_{jd}^t \leq C_d z_d \quad \forall t \in T, \forall d \in D \quad (3.9)$$

$$x_{dj}^t \leq z_{jd}^t \quad \forall t \in T, \forall j \in J, \forall d \in D \quad (3.10)$$

$$x_{jd}^t \leq z_{jd}^t \quad \forall t \in T, \forall j \in J, \forall d \in D \quad (3.11)$$

$$x_{jj'}^t + z_{jd}^t + z_{j'd'}^t \leq 2 \quad \forall t \in T, \forall j, j' \in J, \forall d, d' \in D \quad (3.12)$$

$$x_{di}^t \leq z_{id}^t \quad \forall t \in T, \forall i \in I, \forall d \in D \quad (3.13)$$

$$x_{id}^t \leq z_{id}^t \quad \forall t \in T, \forall i \in I, \forall d \in D \quad (3.14)$$

$$x_{ii'}^t + z_{id}^t + z_{i'd'}^t \leq 2 \quad \forall t \in T, \forall i, i' \in I, \forall d, d' \in D \quad (3.15)$$

— Contraintes de la politique d'inventaire du niveau maximum :

$$I_{jd}^0 = 0 \quad \forall j \in J, \forall d \in D \quad (3.16)$$

$$I_{jd}^t = Q_{jd}^t + I_{jd}^{t-1} - \sum_{i \in I} q_{ij}^t z_{id}^t \quad \forall j \in J, d \in D, t \in T \quad (3.17)$$

$$I_{jd}^t \leq C_d y_d \quad \forall j \in J, \forall d \in D, \forall t \in T \quad (3.18)$$

$$\sum_{j \in J} Q_{jd}^t \leq C_d y_d - \sum_{j \in J} I_{jd}^{t-1} \quad \forall d \in D, \forall t \in T \quad (3.19)$$

— Contraintes de routage au premier échelon :

$$\sum_{i \in J \cup D} x_{ij}^t \leq 1 \quad \forall t \in T, \forall j \in J \quad (3.20)$$

$$\sum_{j \in J} x_{dj}^t = \sum_{j \in J} x_{jd}^t \quad \forall t \in T, \forall d \in D \quad (3.21)$$

$$\sum_{i \in J \cup D} x_{ij}^t = \sum_{i \in J \cup D} x_{ji}^t \quad \forall t \in T, \forall j \in J \quad (3.22)$$

$$\sum_{i \in J \cup D} f_{ji}^t - \sum_{i \in J \cup D} f_{ij}^t = \sum_{d \in D} Q_{jd}^t \quad \forall t \in T, \forall j \in J \quad (3.23)$$

$$f_{ij}^t \leq Q_s x_{ij}^t \quad \forall t \in T, \forall i, j \in J \cup D \quad (3.24)$$

$$\sum_{j \in J} f_{dj}^t \leq 0 \quad \forall t \in T, \forall d \in D \quad (3.25)$$

— Contraintes de routage au deuxième échelon :

$$\sum_{i \in I \cup D} x_{ji}^t \leq 1 \quad \forall t \in T, \forall i \in I \quad (3.26)$$

$$\sum_{i \in I} x_{di}^t = \sum_{i \in I} x_{id}^t \quad \forall t \in T, \forall d \in D \quad (3.27)$$

$$\sum_{j \in I \cup D} x_{ji}^t = \sum_{j \in I \cup D} x_{ij}^t \quad \forall t \in T, \forall i \in I \quad (3.28)$$

$$\sum_{j \in I \cup D} f_{ji}^t - \sum_{j \in J \cup D} f_{ij}^t = \sum_{j \in J} q_{ij}^t \quad \forall t \in T, \forall i \in I \quad (3.29)$$

$$f_{ij}^t \leq Q_v x_{ij}^t \quad \forall t \in T, \forall i, j \in I \cup D \quad (3.30)$$

$$\sum_{i \in I} f_{id}^t \leq 0 \quad \forall t \in T, \forall d \in D \quad (3.31)$$

— Plages des variables de décision :

$$y_d, z_{id}^t, x_{ij}^t \in \{0, 1\} \quad \forall d \in D, \forall i \in I \cup J, \forall t \in T \quad (3.32)$$

$$f_{ij}^t, Q_{jd}^t, I_{jd}^t \geq 0 \quad \forall t \in T, \forall d \in D, \forall j \in J, \forall (i, j) \in A1 \cup A2 \quad (3.33)$$

Les contraintes (3.6) garantissent que les clients et les fournisseurs ne peuvent être affectés à un centre de distribution que si ce dernier est sélectionné. Les contraintes (3.7) imposent que les clients (respectivement les fournisseurs) soient affectés à un seul centre de distribution. Les contraintes (3.8) et (3.9) assurent le non dépassement des capacités des centres de distribution. Les contraintes (3.10)-(3.15) éliminent les itinéraires non autorisés qui ne commencent et ne se terminent pas au même centre de distribution. Plus précisément, les contraintes (3.10) et (3.11) garantissent que l'arc  $(j, d)$  est traversé si et seulement si le fournisseur  $j$  est affecté à la plateforme  $d$  à la période  $t$ . De même, les contraintes (3.13) et (3.14) éliminent les routes infaisables dans le deuxième échelon (Centres de distribution-clients). Les contraintes (3.12) et (3.15) garantissent que les itinéraires entre deux fournisseurs/clients sont éliminés s'ils sont affectés à deux centres de distribution différents.

Les contraintes (3.16) définissent le niveau de stock initial dans les centres de distribution. Les contraintes (3.17) permettent de calculer le niveau de stock dans les centres de distribution à chaque période de planification. Les contraintes (3.18) garantissent que la quantité stockée dans chaque centre de distribution ne dépasse pas la capacité de stockage disponible. Les contraintes (3.19) stipulent que la quantité de marchandises à livrer à la plateforme  $d$  ne dépassera jamais sa capacité disponible à chaque période de planification.

Les contraintes (3.20) garantissent que chaque fournisseur ne doit être visité qu'une fois au maximum dans chaque période. Les contraintes (3.21) et (3.22) assurent que le nombre d'arcs entrants et sortants soit égal. Les contraintes (3.23) assurent la conservation du flux pour le processus de collecte. Les contraintes (3.24) stipulent que la quantité chargée sur un véhicule semi-remorque ne peut pas dépasser sa capacité de chargement sur l'arc  $(i, j)$ . Les contraintes (3.25) garantissent que le camion est vide lorsqu'il part d'une plateforme ouverte. Les contraintes (3.26)-(3.31) sont liées au processus de livraison au deuxième échelon.

Les contraintes (3.32) et (3.33) spécifient les domaines de définition des variables utilisées dans la modélisation du problème.

### 3.4 Approche de résolution

Le 2E-CILRP est un problème important et pratique pour concevoir des réseaux logistiques performants. Notre modèle vise à trouver l'emplacement optimal, l'inventaire et l'acheminement des moyens de transport tout en minimisant les coûts, les émissions et le risque d'accident. Comme mentionné précédemment, le ILRP est connu comme un problème NP-difficile, ce qui signifie qu'il est difficile de trouver des solutions optimales pour des problèmes à grande échelle dans un temps de calcul raisonnable.

Les heuristiques et les méta-heuristiques sont des approches pratiques pour la résolution des problèmes de nature NP-difficile. Elles permettent de fournir des solutions de bonne qualité pour les instances de grande taille (Aloui and Hadj-Hamou, 2021; Goodarzian et al., 2021). En outre, la littérature a montré que les approches hybrides, incluant le Clustering  $k$ -means, peuvent réduire la complexité des réseaux logistiques et améliorer l'efficacité de calcul pour les problèmes à grande échelle (Defryn and Sörensen, 2017; Wang et al., 2021, 2020b).

Dans cette section, nous proposons une approche heuristique hybride combinant un algorithme modifié de  $k$ -means et un algorithme génétique pour résoudre efficacement le modèle 2E-CILRP. L'organigramme de l'approche heuristique développée est présenté dans la Figure 3.2. Les paramètres utilisés dans cet organigramme sont décrits comme suit :  $k$  est le nombre de clusters formés,  $Num_{gen}$  est le nombre actuel de générations,  $Pop$  est la taille de la population d'individus et  $N_{max}$  est le nombre maximal de générations.

L'approche proposée décompose le problème en deux étapes. La première étape consiste à regrouper et à affecter les clients et les fournisseurs aux centres de distribution appropriés à l'aide d'un algorithme de regroupement de type  $k$ -means modifié. Comme les coûts, les émissions et le risque d'accident liés au transport sont proportionnels à la distance parcourue, nous utilisons cette dernière pour évaluer les similarités des éléments de chaque cluster. Plus précisément, les clients géographiquement voisins et ayant des produits similaires sont placés dans le même cluster et affectés au centre de distribution le plus proche. Ensuite, sur la base des résultats du Clustering et de l'affectation, le routage dans les deux échelons et les niveaux de stock dans les centres de distribution sont optimisés en appliquant un algorithme génétique. Enfin, les trois objectifs de durabilité considérés sont évalués et la meilleure configuration logistique est obtenue. La procédure de Clustering et l'algorithme génétique sont présentés en détail dans les sous-sections suivantes.

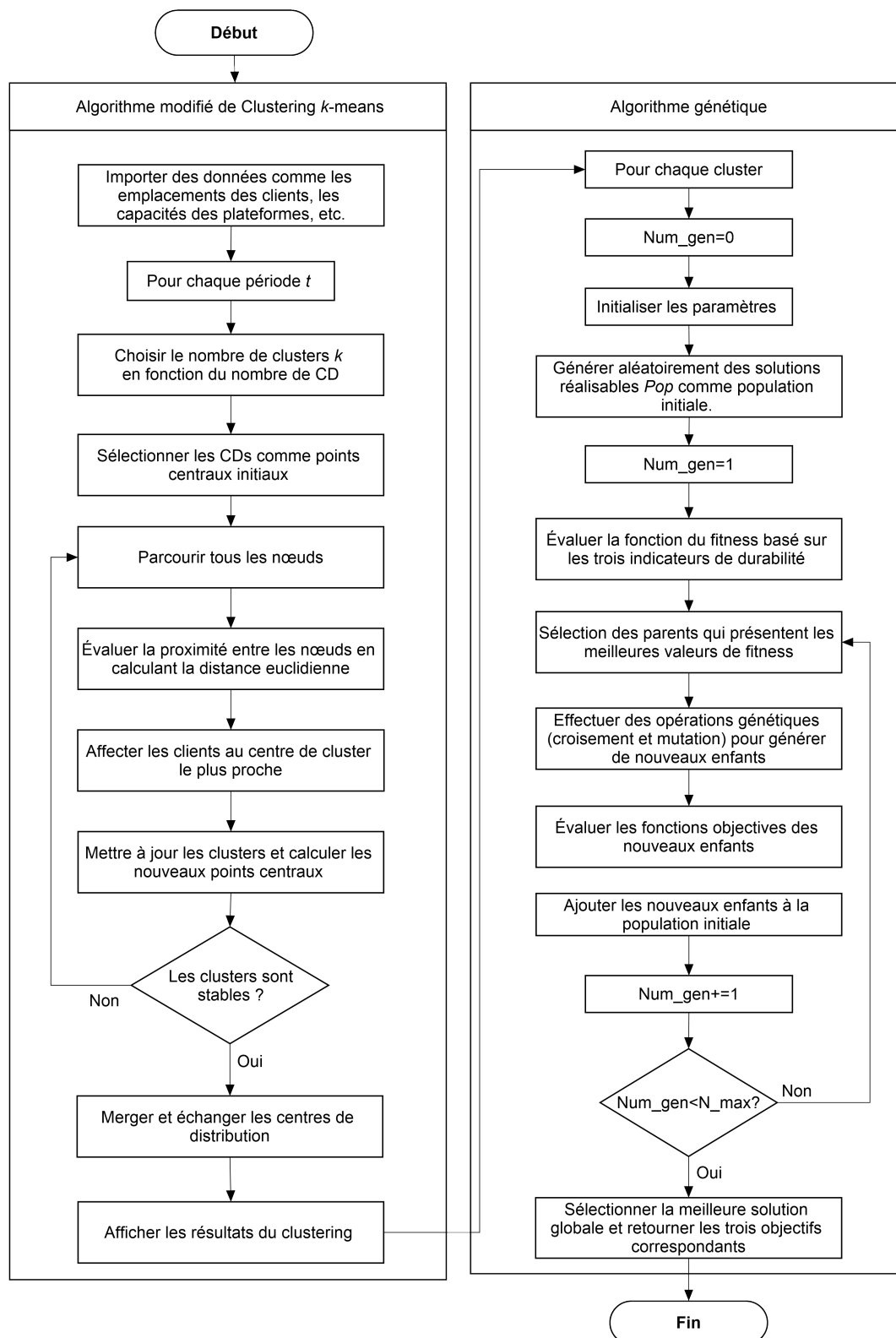


FIGURE 3.2 – Organigramme de l'approche proposée pour résoudre le 2E-CILRP.

### 3.4.1 Procédure de Clustering

Le Clustering fait partie de la famille des algorithmes d'apprentissage non supervisé qui consiste à regrouper un ensemble de données selon des critères spécifiques tels que la fonction de distance. C'est l'une des méthodes les plus performantes utilisées pour réduire la complexité des réseaux à grande échelle et améliorer le temps de calcul (Sever et al., 2018). Les algorithmes de Clustering traditionnels, tels que  $k$ -medoids et  $k$ -means, ont été largement adaptés aux problèmes de routage de véhicules et de localisation (Meng et al., 2018; Rabbani et al., 2017; Wang et al., 2017b, 2018a, 2020a). En effet, le deuxième algorithme est souvent utilisé dans la littérature en raison de sa reproduction, de sa large application et de sa capacité à contrôler l'opération de Clustering. Dans cette étude, nous adaptons une procédure de Clustering  $k$ -means pour affecter les clients et les fournisseurs aux centres de distribution en fonction de la distance euclidienne et de la similarité des produits. Le pseudo-code de l'algorithme  $k$ -means modifié est décrit dans l'Algorithme 1.

---

**Algorithme 1** : ALGORITHME \_K\_MEANS MODIFIÉ

---

**Input** : Ensemble  $I = \{I_1, I_2, \dots, I_{N_c}\}$  de données des clients,  $J = \{J_1, J_2, \dots, J_{N_s}\}$  de données des fournisseurs,  $D = \{D_1, D_2, \dots, D_{N_d}\}$  de données de CDs and  $P = \{1, 2, \dots, N_{per}\}$  des périodes

**Output** : Résultats du clustering et de l'affectation des nœuds

```
1 for  $t = 1$  to  $P$  do
2   Sélectionner les coordonnées des nœuds, la matrice de la demande et les
   capacités des CDs
3   Définir  $k$  comme le nombre de clusters sur la base du nombre de CDs
4   Choisir les DCs comme points centraux initiaux de chaque cluster
5   repeat
6     for  $i = 1$  to  $I$  do
7       Calculer les distances entre le client  $i$  et chaque centre  $k$ 
8       Affecter le client  $i$  au point central le plus proche
9       Mettre à jour les  $k$  clusters et calculer les nouveaux points centraux
10  until La similarité maximale est atteinte et les clusters sont stables
11  Fusionner et échanger les clusters pour minimiser le nombre de centres de
   distribution
12 return Résultats des clusters
```

---

Comme expliqué dans l'Algorithme 1, les positions géographiques des fournisseurs, des centres de distribution, des clients, les capacités des centres de distribution et les demandes des clients sont importées pour construire les jeux de données. Deuxièmement, on définit le nombre  $k$  de clusters maximum à former en fonction du nombre de centres de distribution (CDs) qui vont être sélectionnés comme  $k$  points centraux. Troisièmement, tous les éléments sont parcourus et les distances entre chaque élément



et les points centraux sont calculées. Quatrièmement, chaque élément est affecté aux points centraux en fonction de la proximité des distances et de la similarité des produits. Dans cette étape, les contraintes de capacité des points centraux sont vérifiées. Cinquièmement, les  $k$  clusters sont mis à jour et les nouveaux points centraux sont calculés. Les trois dernières étapes sont appliquées jusqu'à ce que tous les clients soient affectés et les éléments ne changent plus de cluster. Ensuite, nous effectuons une permutation (swap) des centres de distribution afin d'éviter les optima locaux. De plus, les clusters sont fusionnés en respectant les contraintes de capacité afin de minimiser le nombre de centres de distribution à ouvrir. Les différentes étapes de cet algorithme sont itérées jusqu'à la formation des clusters pour toutes les périodes de planification considérées.

### 3.4.2 Algorithme génétique

L'algorithme génétique, qui a été annoncé pour la première fois dans les années 1970 par Holland et al. (1992), est l'une des approches couramment appliquées pour trouver de bonnes solutions à des problèmes d'optimisation NP-difficile grâce à son processus évolutif. Dans cette étude, un algorithme génétique est développé pour traiter le problème de routage et d'inventaire. Le pseudo-code de l'algorithme proposé est donné par l'Algorithme 2.

---

**Algorithme 2** : ALGORITHME GÉNÉTIQUE

---

**Input** : Données du cluster, charge maximale des flottes de transport, paramètres de l'algorithme

**Output** : Meilleure solution pour le problème de routage et d'inventaire

- 1 Générer la population initiale
  - 2 **while**  $Num_{gen} < N_{max}$  **do**
  - 3     Évaluer la valeur du fitness de chaque individu
  - 4     Sélectionner deux parents en fonction du meilleur fitness
  - 5     Réaliser des opérations de croisement et de mutation en deux points
  - 6     Générer la population des enfants et évaluer la fonction du fitness correspondante
  - 7     Combiner les enfants avec la population initiale
  - 8 Sélectionner la solution la plus durable
  - 9 **return** *Meilleure solution globale et les trois objectifs associés*
- 

Tout d'abord, une population initiale de  $Pop$  chromosomes est générée. Chaque chromosome doit contenir des informations pertinentes sur le routage de premier échelon, le plan d'inventaire et le plan de routage de second échelon, à chaque période. Le chromosome prend la forme d'une matrice avec  $T$  lignes et trois chaînes qui représentent respectivement le plan de collecte, la quantité stockée dans chaque centre

de distribution et le plan de livraison. Ensuite, nous calculons la valeur du fitness et obtenons une valeur de performance globale par l'agrégation des objectifs. Les valeurs de chaque indicateur sont normalisées dans un intervalle de  $[0,1]$  à l'aide des bornes supérieures approximatives. Une sélection par rang est ensuite effectuée pour choisir les parents possédant les meilleures valeurs du fitness. Par la suite, la population initiale est améliorée par des opérateurs de croisement et de mutation à deux points afin de produire des nouveaux enfants avec une certaine probabilité. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que le nombre maximal de générations soit atteint. Enfin, la meilleure solution est sélectionnée.

### 3.5 Résultats, analyse et discussion

Cette section présente les résultats des expériences numériques réalisées pour évaluer l'efficacité de l'approche proposée dans la résolution du 2E-CILRP et discuter des perspectives managériales basées sur une étude de cas. L'approche développée a été codée en Python 3. Le modèle PLMNE a été résolu avec IBM ILOG CPLEX 12.9.0 en normalisant et en agrégeant les trois objectifs de durabilité étudiés, comme discuté dans le chapitre précédent. Il est important de noter que la méthode de programmation par compromis a posteriori est appliquée pour capturer la multi-objectivité du problème étudié (Biuki et al., 2020).

À notre connaissance, il n'existe pas d'instances de référence pour le 2E-CILRP avec des considérations de durabilité. Par conséquent, des tests numériques sur 13 instances de petite et moyenne taille générées aléatoirement sont menés et une comparaison entre les résultats heuristiques et CPLEX est effectuée dans la section 3.5.1 afin d'évaluer la performance de l'approche proposée. Pour chaque instance de référence, les demandes entre chaque paire fournisseur-client ont été générées aléatoirement dans l'intervalle  $[1000,3000]$ . De même, les positions géographiques des fournisseurs, des clients et des centres de distribution sont générées de manière aléatoire dans un carré de taille  $200 \times 200$ . La distance entre deux nœuds est calculée sur la base de la distance euclidienne.

Les paramètres utilisés dans toutes les simulations de calcul sont issus de la littérature et sont listés dans le Tableau 3.2. Pour exécuter l'approche proposée, la taille de la population  $Pop$  et le nombre maximal d'itérations  $N_{max}$  sont respectivement fixés à 100 et 1000 itérations. Les probabilités de croisement et de mutation sont respectivement de 0.8 et 0.05. Ces valeurs sont fixées en faisant une analyse de sensibilité.

TABLEAU 3.2 – Paramètres utilisés dans les expériences numériques.

Paramètre	Valeur	Unité	Source
$EC_d$	10000	kwh	ADEME (2010)
$e_c$	0.087	kg $CO_2/L$	ADEME (2010)
$C_d$	20000	Kg	Hypothèse
$FO_d$	6000	€	Wu et al. (2021b)
$F_s$	300	€	Soysal et al. (2018b)
$Q_s$	20000	Kg	Soysal et al. (2018b)
$Ts_E$	0.15	L/km	Hickman et al. (1999)
$Ts_L$	0.31	L/km	Hickman et al. (1999)
$F_v$	200	€	Soysal et al. (2018b)
$Q_v$	10000	Kg	Soysal et al. (2018b)
$Tv_E$	0.13	L/km	Hickman et al. (1999)
$Tv_L$	0.15	L/km	Hickman et al. (1999)
$C_s$	0.01	€/Kg	Stellingwerf et al. (2018)
$e_F$	2.66	kg $CO_2/L$	Tassou et al. (2009)
$c_f$	1.5	€/L	Aloui et al. (2021d)
$A_c$	2768	par an	Mrabti et al. (2020)

### 3.5.1 Expérimentations sur les petites et moyennes instances

La performance de l'approche proposée est évaluée au moyen de la différence par rapport aux solutions trouvées par le solveur CPLEX du modèle PLMNE et du temps de calcul. Pour chaque instance, les meilleures solutions trouvées par l'approche hybride sur 10 exécutions et les résultats CPLEX avec une limite de temps de 3600 secondes sont rapportés. Les résultats numériques de 13 instances sont résumés dans le Tableau 3.3. Plus précisément, les cinq premières colonnes énumèrent les caractéristiques de chaque instance. Les colonnes 6, 7 et 8 représentent respectivement le coût total obtenu par le solveur CPLEX et par la méthode développée ainsi que l'écart en pourcentage entre ces deux solutions. Les colonnes 9, 10 et 11 rapportent respectivement les émissions totales obtenues par le solveur CPLEX, les émissions totales trouvées par la méthode approchée et l'écart de qualité de la solution approchée par rapport à la solution obtenue par CPLEX. Les colonnes 12 à 14 indiquent respectivement le risque d'accident fourni par le modèle PLMNE et l'approche proposée ainsi que l'écart en pourcentage entre les deux méthodes. L'écart en pourcentage entre la solution de l'approche proposée (KM-AG) et celle du solveur CPLEX est calculé en utilisant l'équation suivante :

$$\%Écart = 100 \frac{Valeur_{KM-AG} - Valeur_{CPLEX}}{Valeur_{CPLEX}} \quad (3.34)$$

TABLEAU 3.3 – Comparaison des solutions obtenues par CPLEX et KM-AG.

Caractéristiques des instances		Coût total			Émissions totales			Risque d'accident			Temps CPU (s)				
		J	D	I	T	CPLEX	KM-AG	% Écart	CPLEX	KM-AG	% Écart	CPLEX	KM-AG		
I1	2	2	7	3	15224.73	15253.88	0.19	2769.28	2800.53	1.13	17.34	18.31	5.56	2.54	3.41
I2	3	3	7	3	8737.82	8784.11	0.53	1873.56	2101.84	12.18	18.12	20.45	12.85	33.08	4.65
I3	3	3	8	3	15815.57	16134.37	2.02	2973.38	3154.59	6.09	20.10	23.21	15.46	80.54	4.18
I4	3	3	9	3	8787.18	8848.07	0.69	2107.35	2216.78	5.19	20.38	21.74	6.68	134.54	12.84
I5	3	3	10	3	16105.25	16109.59	0.03	3120.34	3312.91	6.17	21.34	23.93	12.15	379.70	35.32
I6	3	3	12	3	17268.81	17363.34	0.55	3425.95	3836.25	11.98	27.85	33.69	20.98	954.23	32.12
I7	3	3	13	2	14977.92	14823.40	-1.03	2754.65	2932.69	6.46	17.20	19.79	15.05	1845.15	45.32
I8	3	3	13	3	16945.12	17044.94	0.59	3119.84	3475.64	11.40	23.62	28.73	21.61	2680.13	92.54
I9	3	3	14	3	16762.14	17360.66	3.57	3499.40	3831.46	9.49	27.14	33.34	22.86	3251.43	132.27
I10	4	4	15	3	23418.88	23467.00	0.21	4605.88	4839.77	5.08	30.63	33.57	9.60	3570.12	250.38
I11	4	4	17	3	33981.15	26805.04	-21.12	6955.41	6041.38	-13.14	61.42	57.57	-6.28	3600	386.64
I12	4	4	17	4	NA	32165.54	NA	NA	74315.34	NA	NA	61.43	NA	NA	421.54
I13	2	2	20	4	NA	28654.34	NA	NA	6431.54	NA	NA	59.31	NA	NA	432.76
Moyenne					17093.14	18678.02	-1.25	3382.28	9176.21	5.64	25.92	33.47	12.41	1502.86	142.61

Comme le montre le Tableau 3.3, le KM-AG permet d'obtenir des solutions proches de celles obtenues par le solveur CPLEX dans un temps de calcul beaucoup plus rapide dans les dix premières instances. En effet, l'écart des coûts est compris entre -1.03% et 3.75%, avec une moyenne de 0.73%. L'écart des émissions varie de 1.13% à 12.18%, avec une moyenne de 7.52%. En ce qui concerne les aspects sociaux, le KM-AG fournit des solutions réalisables avec un écart variant entre 5.56% et 22.86%, avec une moyenne de 14,28% dans les dix premières instances. Il est important de noter que les solutions obtenues par l'approche heuristique sont proches des solutions optimales pour les instances I1 à I7, notamment pour l'objectif économique. Pour l'instance I11, notre approche produit des solutions meilleures que CPLEX de presque 21% des coûts totaux, 13% des émissions totales de  $CO_2$  et 6% du risque d'accident. En outre, il est clair que le solveur CPLEX ne peut pas résoudre les instances I12 et I13 dans le délai fixé. En effet, comme nous avons montré dans le chapitre précédent, le temps CPU requis pour le solveur CPLEX augmente de manière exponentielle avec l'augmentation de la taille du problème, tandis que le temps de KM-AG est presque linéaire, comme le montre la Figure 3.3.

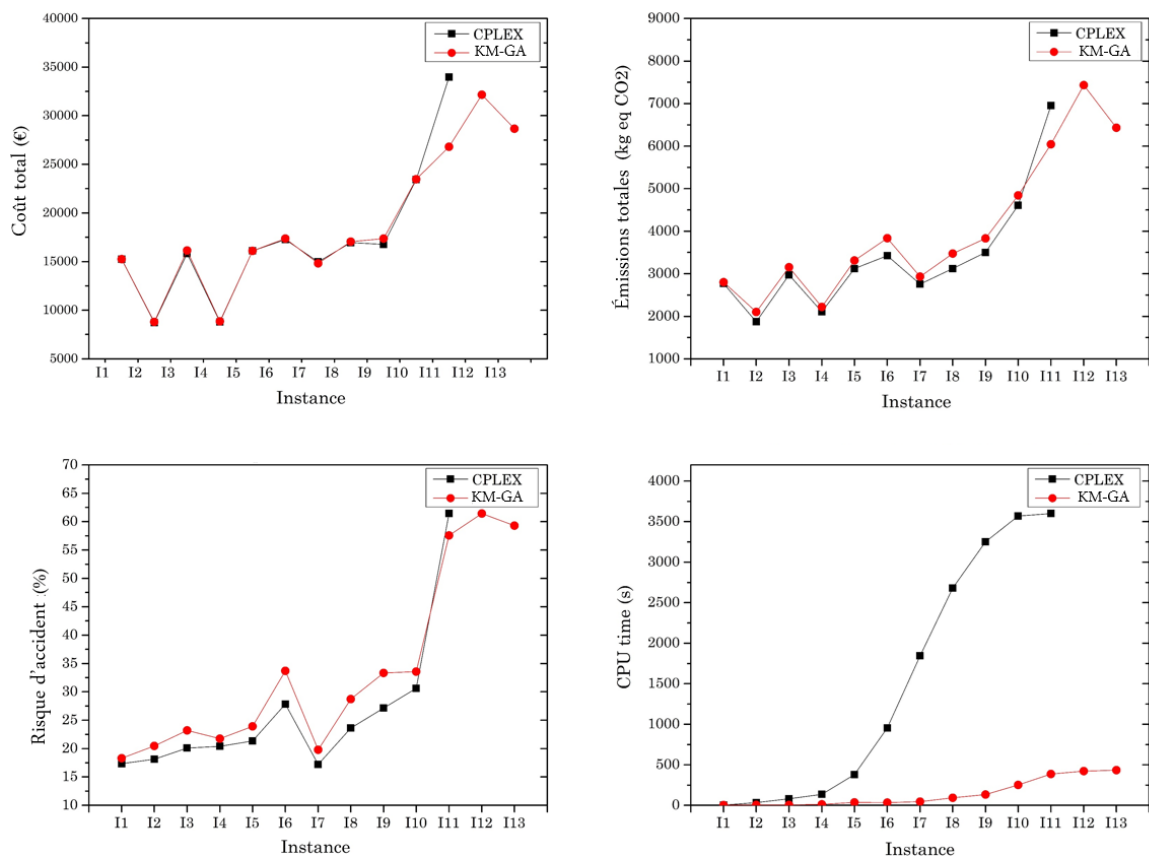


FIGURE 3.3 – Performance de l'approche KM-AG par rapport à la méthode PLMNE.

Globalement, les résultats de la comparaison montrent que l'approche proposée

peut rapidement trouver des bonnes solutions faisables pour les problèmes 2E-CILRP, puisque les écarts entre les solutions ne sont pas significatifs. Par conséquent, notre heuristique peut être utilisée pour résoudre efficacement des problèmes de grande taille dans un temps raisonnable.

### 3.5.2 Évaluation des performances sur des instances de grande taille : Comparaison des algorithmes

Dans le but de vérifier et de valider l'efficacité de l'algorithme génétique dans l'approche proposée, nous avons comparé cet algorithme avec les algorithmes les plus populaires dans la littérature pour résoudre des problèmes complexes d'optimisation logistique, à savoir une heuristique basée sur le plus proche voisin ( $K$ -Nearest Neighbor Algorithm KNNA) (Mohammed et al., 2017) et l'optimisation par essaims de particules (Particle Swarm Optimization PSO) (Chroua et al., 2021; Goksal et al., 2013). Les algorithmes ont été testés et comparés en utilisant 10 instances différentes de grande taille générées de façon aléatoire. Dans les expérimentations numériques, le nombre maximal d'itérations a été fixé à 10000 itérations pour l'approche basée sur KNNA (notée KM-KNNA), les confiances d'apprentissage personnelle et sociale ont été fixées à 2, et un coefficient d'inertie a été fixé à 0.8 pour l'approche basée sur le PSO (notée KM-PSO). Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 3.4.

Comme le montre le tableau ci-dessous, l'approche hybride KM-AG surpasse les deux autres algorithmes en termes de coûts totaux, d'émissions et de risque d'accident dans toutes les instances testées. En effet, les coûts totaux moyens de l'heuristique proposée sont inférieurs à ceux obtenus par les KM-KNNA et KM-PSO de 2.73% et 8.16%, respectivement. En termes d'émissions, l'approche basée sur l'AG a permis d'économiser 8,16% des émissions totales moyennes, par rapport à l'approche KM-KNNA, et 10.73% par rapport à l'algorithme KM-PSO. En outre, l'algorithme proposé peut réduire le risque d'accident moyen de 3.37% par rapport à KM-KNNA et de 8.43% par rapport à KM-PSO. En ce qui concerne les performances de calcul, le KM-AG est plus performant que l'approche KM-KNNA. Il est important de noter que dans certains cas, le KM-PSO est moins performant que le KM-AG en termes des solutions, mais il est plus performant en termes de temps de calcul. En conséquence, nous pouvons conclure que l'approche basée sur l'AG (KM-AG) est supérieure aux deux algorithmes pour l'optimisation intégrée et collaborative des réseaux logistiques à deux échelons.

TABLEAU 3.4 – Résultats de comparaison avec deux algorithmes d'optimisation.

Instance	KM-GA				KM-KNNA				KM-PSO			
	Coût	Émissions	Risque	CPU(s)	Coût	Émissions	Risque	CPU(s)	Coût	Émissions	Risque	CPU(s)
I1	8873.13	1910.94	15.53	36.05	9187.76	2243.37	17.46	41.87	9235.65	2276.43	18.03	37.49
I2	10974.83	2419.27	30.37	44.36	11499.62	2573.75	31.48	45.65	11643.66	2622.01	31.72	49.09
I3	11574.15	2800.87	37.55	46.32	12264.02	2991.01	38.32	51.43	11954.12	2875.33	37.99	51.80
I4	11813.21	3217.44	45.40	48.03	12839.68	3468.00	45.46	63.51	12887.01	3699.56	45.89	52.41
I5	12684.33	3568.83	52.72	62.40	12891.13	3939.68	52.93	72.11	12932.35	3712.89	53.01	61.19
I6	13007.05	3364.23	49.00	54.45	12989.39	3691.23	47.76	79.15	13010.79	3721.25	48.59	60.89
I7	16592.60	2957.43	23.10	70.43	16608.85	2986.56	23.67	86.49	16624.78	3015.13	24.27	66.89
I8	20128.25	4178.17	49.26	112.43	20011.85	4877.91	54.87	93.45	20128.64	4214.43	55.58	97.69
I9	20173.33	4540.15	54.46	128.54	21229.51	4780.15	56.50	136.11	21636.93	5869.46	71.94	116.11
I10	24798.85	7764.58	83.00	127.54	25321.43	8431.54	87.28	142.98	27497.98	9128.27	93.93	118.40
Moyenne	15061.97	3672.19	44.04	73.06	15484.32	3998.32	45.57	81.28	15755.19	4113.48	48.10	71.19

### 3.5.3 Étude de cas

Afin de démontrer la faisabilité et l'efficacité de l'approche d'optimisation proposée dans le monde réel, une étude de cas portant sur quatre PME françaises du secteur agro-alimentaire est présentée dans cette section. Cette étude de cas consiste en quatre entreprises (S1, S2, S3 et S4), quatre centres de distribution (DC1, DC2, DC3 et DC4), 39 clients (C1 à C39) ainsi que quatre périodes de planification dont chacune représente une semaine. Les entreprises en question sont anonymes pour des raisons de confidentialité. Les positions géographiques de chaque nœud sont présentées dans la Figure 3.4 dans laquelle des couleurs différentes sont utilisées pour différencier les fournisseurs et leurs clients.

Dans la situation initiale, chaque entreprise sert ses clients en toute indépendance des autres alors que dans le cadre d'une stratégie coopérative sur plusieurs périodes, les entreprises partagent les moyens et les ressources pour servir leurs clients dans les zones urbaines.

Les résultats d'optimisation des performances obtenus avant et après la collaboration des trois dimensions de la durabilité, à savoir le coût total, les émissions totales de  $CO_2$  et le risque d'accident, sont résumés dans le tableau 3.5. Les résultats de l'optimisation pour chaque période de planification sont illustrés dans les Figures 3.5 et 3.6.

TABLEAU 3.5 – Synthèse des résultats obtenus dans les scénarios initial et collaboratif.

Indicateur de durabilité	Planification intégrée des décisions		% d'économies
	Initiale	Collaborative	
Coût total(€)	35553.26	28422.48	20.06
Émissions totales ( $Kg CO_2$ )	6617.87	5534.64	16.37
Risque d'accident (%)	56.49	52.15	7.69

Les résultats obtenus montrent que la stratégie de collaboration proposée influe positivement sur la durabilité des opérations de transport. En effet, d'un point de vue économique, le coût total diminue de 20.06% suite à la coopération dans 2E-CILRP. Cette réduction est due au fait que la collaboration entre plusieurs entreprises permet de réduire les ressources à exploiter. Par exemple, dans cette étude de cas, les entreprises peuvent bénéficier du partage des ressources pour minimiser le nombre de centres de distribution à utiliser et le nombre de trajets grâce à la massification des flux, comme illustré dans la Figure 3.6. Sur le plan environnemental, la coopération sur plusieurs périodes permet de réduire les émissions de  $CO_2$  de 16% grâce au partage des centres de distribution et au regroupement des marchandises. En ce qui concerne la dimension sociale estimée, les résultats de l'étude de cas montrent que la planification conjointe



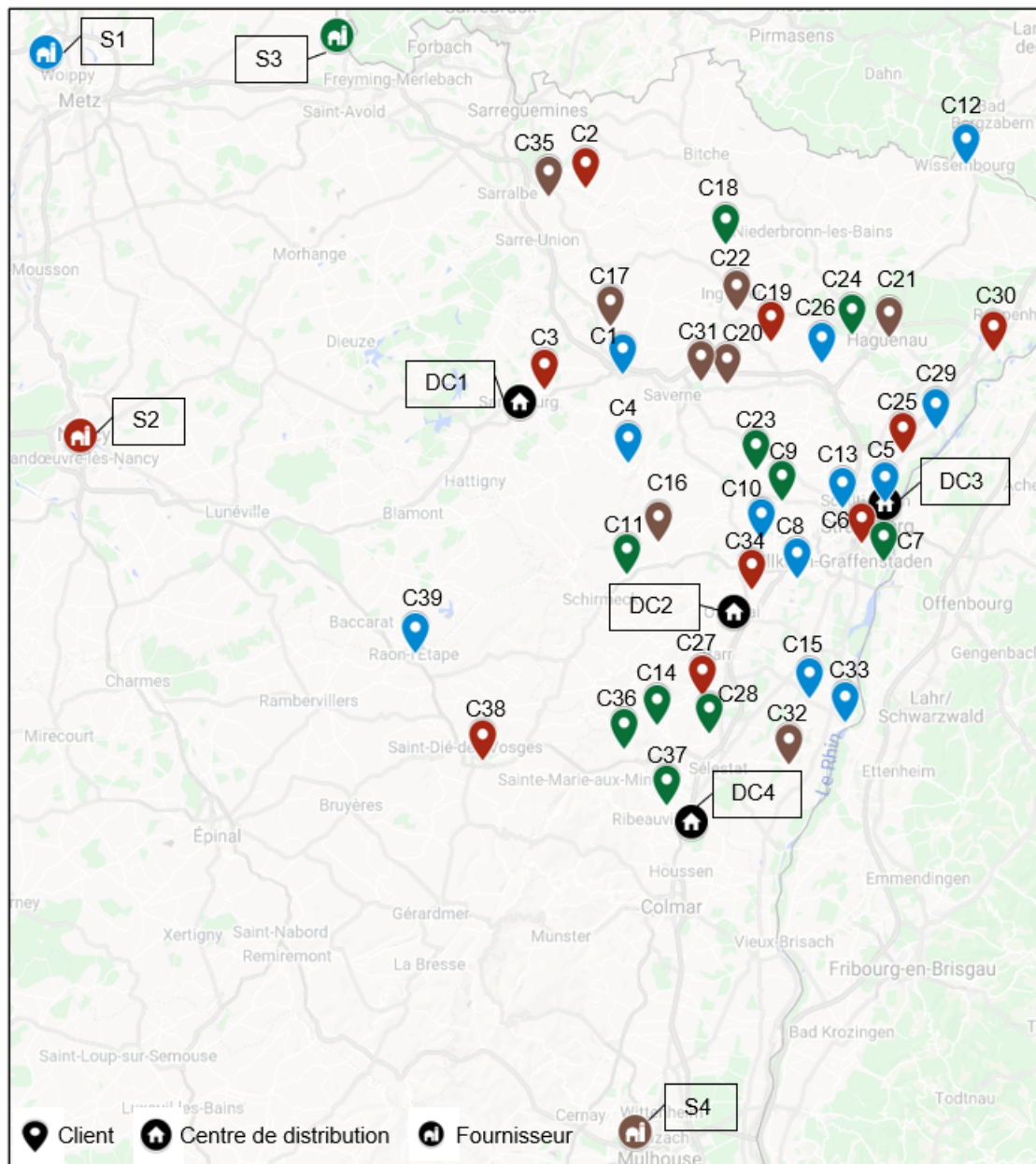


FIGURE 3.4 – Emplacement géographique des fournisseurs, des centres de distribution et des clients dans l'étude de cas.

réduit le risque d'accidents de 7.69%, par rapport à la situation autonome grâce à la réduction de la distance totale parcourue dans toutes les périodes. En effet, grâce à la réaffectation des clients et à la planification conjointe des itinéraires, les distances parcourues peuvent être économisées et les taux de chargement des véhicules et des camions peuvent être augmentés pour obtenir des économies d'échelle.

En résumé, l'optimisation collaborative de 2E-CILRP offre des avantages considérables aux entreprises de logistique qui souhaitent améliorer la durabilité de leurs opérations logistiques à travers la réduction des coûts logistiques, des émissions totales

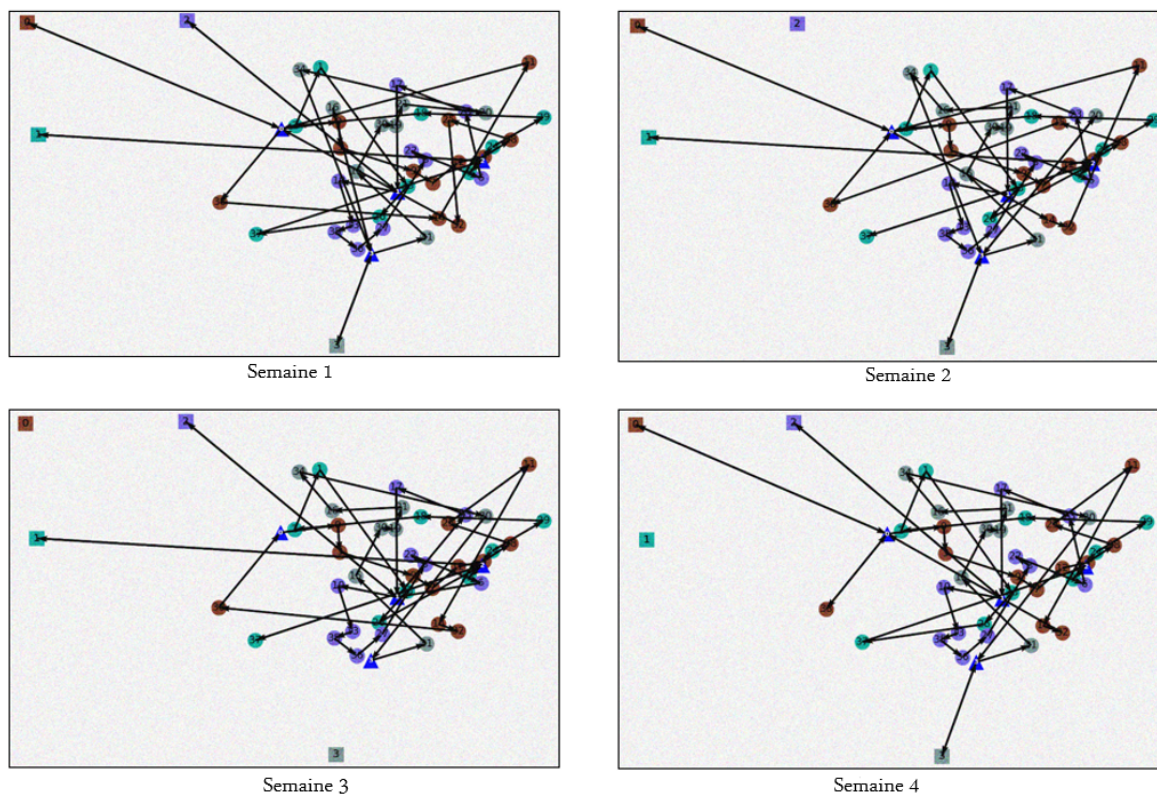


FIGURE 3.5 – Planification initiale de la distribution.

de  $CO_2$  et des risques d'accident.

### 3.5.4 Étude de sensibilité

Étant donné que ce chapitre traite la collaboration et la mise en commun des ressources dans la planification intégrée des décisions, et puisque les demandes, les capacités des centres de distribution, les capacités des véhicules et des camions semi-remorques sont des paramètres d'entrée importants, nous effectuons dans cette section une analyse de sensibilité de ces paramètres. Cette analyse vise à étudier l'impact de la variation de différents paramètres sur les objectifs de durabilité et sur les économies qui peuvent être réalisées grâce à notre approche collaborative.

Nous considérons, par conséquent, des coefficients multiplicateurs pour les valeurs de base de ces paramètres et nous faisons varier ces coefficients pour différentes valeurs. Par exemple, les capacités de référence des véhicules et des camions sont multipliées par les valeurs suivantes : 0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3.

Les résultats de l'analyse de sensibilité sont donnés dans le Tableau 3.6. La Figure 3.7 montre les économies obtenues en termes de coûts, d'émissions et de risque d'accident grâce à la collaboration logistique sur plusieurs périodes dans les différents scénarios considérés.

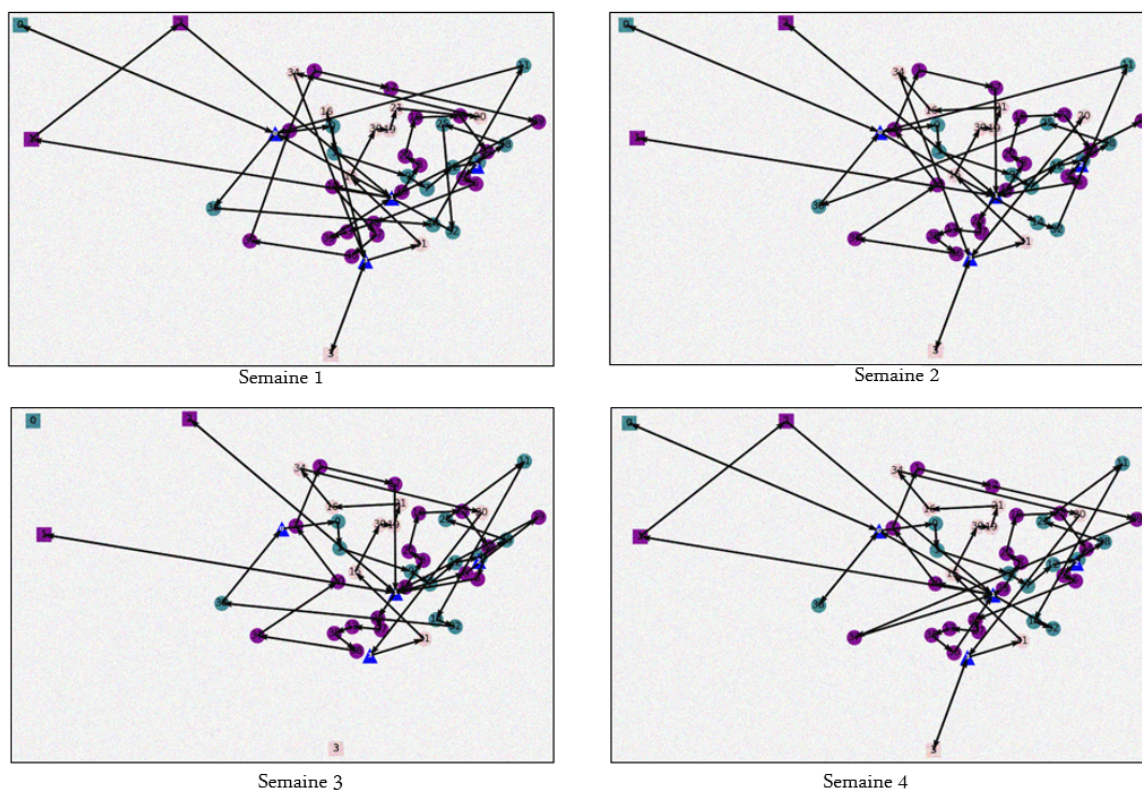


FIGURE 3.6 – Planification de la distribution après collaboration.

TABLEAU 3.6 – Résultats de l'analyse de sensibilité.

	Coefficient	Sans collaboration			Avec collaboration		
		Coût (€)	Émissions (kg)	Risque d'accident (%)	Coût (€)	Émissions (kg)	Risque d'accident (%)
Capacité des véhicules	0.8	36639.33	6772.21	59.68	29142.95	5750.69	56.61
	0.9	36218.75	6735.30	58.96	28481.27	5640.08	54.31
	1	35553.26	6617.87	56.50	28422.48	5534.64	52.15
	1.1	35114.83	6548.93	55.07	28228.54	5545.52	52.45
	1.2	34453.50	6438.95	52.70	27351.90	5408.08	49.50
	1.3	34028.93	6394.90	51.84	27155.10	5413.82	49.66
Capacité des camions	0.8	35528.53	6958.50	61.82	29163.09	5786.81	56.15
	0.9	35924.83	6742.86	57.79	28563.10	5630.47	53.45
	1	35553.26	6617.87	56.49	28422.48	5534.64	52.15
	1.1	35536.96	6588.63	56.50	28084.67	5466.85	51.15
	1.2	35523.38	6564.20	56.50	27747.79	5400.70	50.15
	1.3	35511.89	6543.66	56.50	27735.23	5378.18	50.15
Capacité des CDs	0.8	28796.01	6025.19	58.34	35528.53	6755.28	61.82
	0.9	35924.83	6624.29	57.79	28563.10	5630.47	53.45
	1	35553.26	6617.87	56.50	28422.48	5534.64	52.16
	1.1	35390.27	7013.91	53.17	27663.41	5253.78	47.33
	1.2	35453.78	6922.54	52.47	27578.66	5186.91	46.64
	1.3	35435.88	6843.14	51.87	27452.37	5128.62	45.66
	2	35572.36	6751.70	51.18	27516.95	5046.67	45.09
	3	35572.37	6751.80	51.18	12200.98	3025.27	38.13
	4	35572.38	6751.90	51.18	12193.01	2730.68	34.41
5	12193.02	2730.69	34.41	35572.39	6751.10	51.17	
Demande	0.5	33634.54	5875.97	45.60	26196.47	4683.02	39.23
	0.7	33628.54	5954.72	45.60	26401.98	4906.66	41.43
	0.9	34711.39	6296.14	50.88	27199.85	5157.29	45.37
	1	35553.26	6617.87	56.49	28422.48	5534.64	52.15
	1.2	36669.32	6920.03	61.58	29464.47	6147.95	61.22

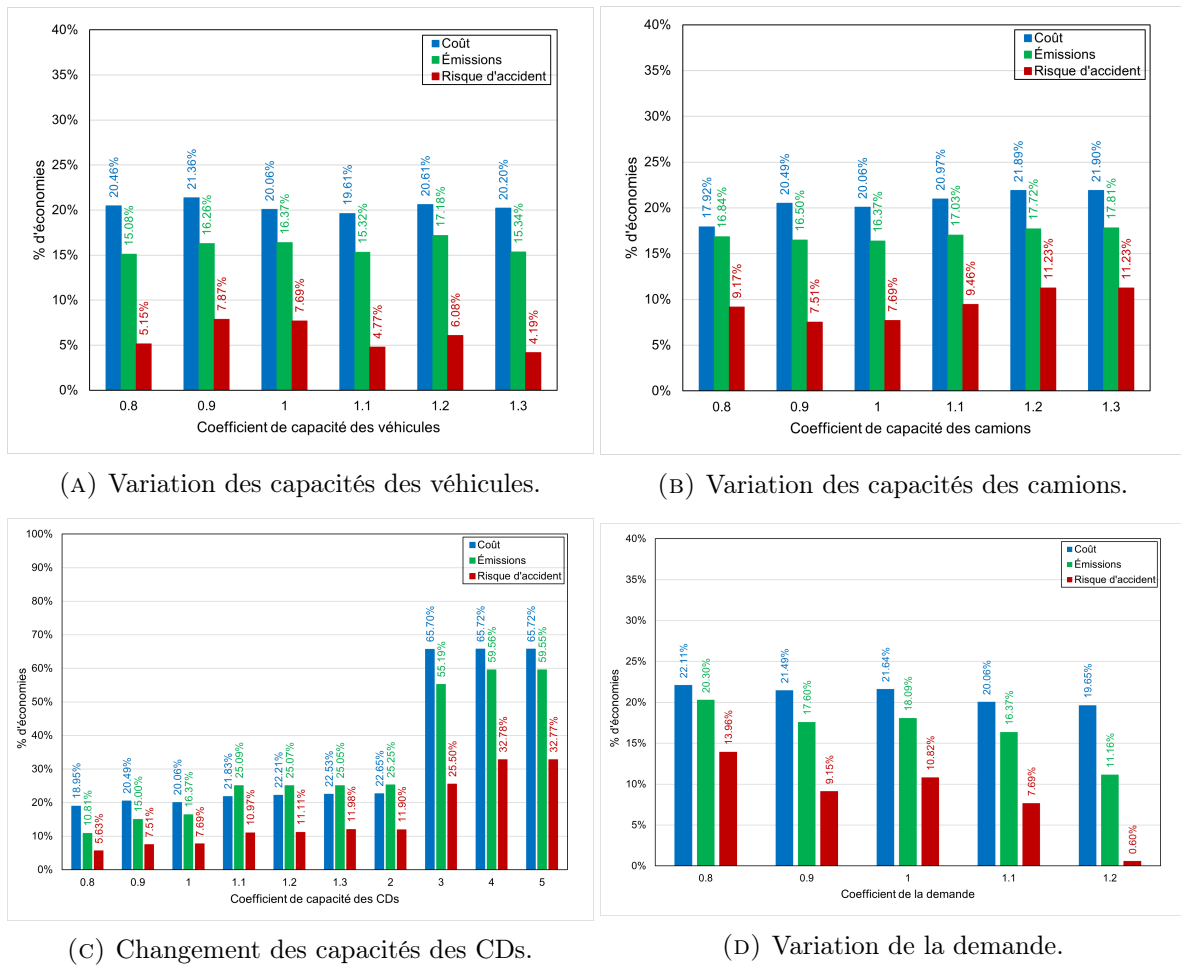


FIGURE 3.7 – Impact de la variation des paramètres sur les économies de durabilité.

Selon les résultats obtenus et présentés dans le Tableau 3.6, la variation des capacités des véhicules et des camions entraîne une modification des objectifs de durabilité dans les deux configurations (avant et après la collaboration). En effet, l'utilisation de moyens de transport à forte capacité permet de minimiser le coût total, les émissions et les risques d'accident. Cette réduction est due à la diminution du nombre de voyages en augmentant le taux de chargement des moyens de transport. Cependant, la diminution ou l'augmentation des capacités des véhicules et des camions permet de réaliser presque les mêmes économies dans les différents scénarios. En outre, les résultats indiquent qu'avec une augmentation des capacités des centres de distribution, les coûts logistiques, les niveaux d'émission et les risques d'accident diminuent continuellement.

En outre, comme le montre la Figure 3.7, lorsque les capacités dépassent une certaine valeur, les économies réalisées grâce à la coopération par rapport au cas non coopératif deviennent très significatives. Cette constatation peut être interprétée par

la réduction des distances parcourues et du nombre de centres de distribution utilisés, ainsi que par l'augmentation des quantités stockées en relâchant les capacités des centres de distribution. Par exemple, dans le cas où les capacités sont multipliées par 3, notre modèle ne sélectionne qu'un seul centre de distribution et augmente la quantité stockée afin de réduire le nombre de voyages au premier échelon. De fait, les capacités des centres de distribution ont des effets importants sur les économies et la prise de décision en général.

Enfin, nous pouvons en déduire qu'une forte variation de la demande nécessite d'envoyer plus de produits, ce qui augmente les coûts, les émissions et les risques d'accident. Pour les économies réalisées grâce à la collaboration, la variation de la demande a un impact considérable sur les économies en termes d'émissions et de risques d'accident, comme le montre la Figure 3.7. Toutefois, les économies en termes des coûts sont très voisines dans la majorité des scénarios.

### 3.5.5 Perspectives managériales

Plusieurs implications managériales importantes peuvent être tirées de cette étude et résumées comme suit : (i) Cette étude peut être utilisée pour souligner l'importance de l'intégration des décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles dans la conception des réseaux logistiques en tenant compte des performances de durabilité ; (ii) L'approche de résolution proposée peut aider les responsables de la logistique et du transport à concevoir des réseaux à deux échelons et multi-périodes et à déterminer les paramètres d'entrée adéquats dans un temps de calcul raisonnable. Ce dernier constitue un aspect crucial dans le processus de décision pour les gestionnaires ; (iii) Le partage des ressources, telles que les moyens de transport et les centres de distribution dans plusieurs périodes, peut améliorer l'utilisation des ressources, réaliser des économies d'échelle et réduire les aspects socio-environnementaux. Cette stratégie peut donc inciter les industriels à établir des alliances avec d'autres acteurs pour atteindre et améliorer leur efficacité logistique.

## 3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons intégré des décisions de localisation, d'inventaire et de routage sur plusieurs périodes avec une stratégie collaborative pour la conception des réseaux logistiques durables à deux échelons. Dans un premier temps, un modèle PLMNE multi-objectif est développé pour formuler le 2E-CILRP en minimisant les coûts logistiques, les émissions de  $CO_2$  et le risque d'accident. Ensuite, en raison de la complexité du problème considéré, une heuristique hybride a été proposée pour résoudre les problèmes à grande échelle. Cette heuristique combine un algorithme de clustering

de type  $k$ -means et un algorithme génétique. Pour évaluer la performance de l'approche proposée, une comparaison des résultats obtenus avec ceux obtenus par PLMNE, sur des instances de petite et moyenne taille, a été effectuée. De plus, une comparaison avec des algorithmes très connus dans la littérature a été réalisée pour évaluer l'efficacité de l'approche KM-AG. Les résultats expérimentaux ont montré que l'approche hybride est en mesure de générer des solutions dans un temps de calcul raisonnable. Par la suite, une étude de cas a été présentée pour évaluer la mise en œuvre du modèle et de l'approche proposés dans le monde réel. Par rapport à une situation autonome, le partage des ressources et la planification conjointe peuvent entraîner des économies de près de 20% des coûts logistiques, d'environ 16% des émissions de  $CO_2$  et de près de 8% des risques d'accident. Finalement, une analyse de sensibilité a été réalisée pour étudier l'impact de la variation des paramètres d'entrée sur les aspects de durabilité étudiés.

Bien que l'approche proposée montre bien son efficacité pour résoudre le problème de conception des réseaux logistiques dans une perspective durable, l'intégration des sources d'incertitudes et de perturbations est une question de recherche importante, en particulier dans le contexte actuel de la pandémie de COVID-19. Pour cette raison, nous allons recourir dans le chapitre suivant à la programmation stochastique et à la simulation Monte Carlo pour traiter le problème de conception des réseaux logistiques durables et résilients en cas de perturbations épidémiques et d'incertitude de la demande.

## Chapitre 4

# Conception des réseaux logistiques résilients et durables en cas de perturbations

### Sommaire

---

<b>4.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>90</b>
<b>4.2</b>	<b>Revue de la littérature</b>	<b>91</b>
<b>4.3</b>	<b>Modélisation mathématique du problème</b>	<b>94</b>
4.3.1	Indicateurs de durabilité évalués	95
4.3.2	Évaluation de la résilience	98
4.3.3	Modélisation des perturbations épidémiques	98
4.3.4	Programmation stochastique à deux étapes	100
4.3.5	Formulation des stratégies de résilience	103
<b>4.4</b>	<b>Approche de résolution</b>	<b>105</b>
4.4.1	Génération de scénarios par la simulation Monte Carlo	105
4.4.2	Approximation Moyenne par Échantillonnage	106
<b>4.5</b>	<b>Résultats numériques</b>	<b>108</b>
4.5.1	Description et données	108
4.5.2	Résultats et discussion	109
<b>4.6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>113</b>

---

## 4.1 Introduction

**D**ÉPUIS quelques années, les chaînes logistiques sont devenues de plus en plus sophistiquées et très vulnérables à diverses perturbations (Dey et al., 2021; Scheibe and Blackhurst, 2018; Toloie et al., 2020). De ce fait, les réseaux de distribution sont soumis à des incertitudes qui peuvent perturber considérablement les opérations de la chaîne logistique. Ces dernières peuvent également être influencées par des catastrophes naturelles, des grèves, des fluctuations du système électrique, des crises économiques ou politiques et des perturbations épidémiques de maladies infectieuses (Butt, 2021; Dolgui et al., 2020; Ivanov, 2020). Par exemple, la pandémie actuelle de COVID-19 a gravement affecté différents domaines, notamment le secteur du transport de marchandises en raison de sa propagation rapide (Sharma et al., 2020). Par ailleurs, les risques opérationnels, causés par l'incertitude inhérente aux données et la nature fluctuante des données d'entrée, peuvent plus ou moins détériorer les performances globales des réseaux logistiques (Aldrighetti et al., 2021). Par conséquent, la propagation des perturbations épidémiques et les risques opérationnels lors de la conception des réseaux logistiques sont devenus des questions clés qui doivent être traitées pour affronter les risques d'incertitude. Récemment, la résilience a été abordée par la communauté des chercheurs comme une approche stratégique appliquée à la conception et à l'évaluation des réseaux logistiques afin d'éviter la dégradation des performances et la propagation des perturbations (Ivanov and Dolgui, 2020; Tordecilla et al., 2021). Elle se définit comme la capacité des chaînes logistiques à revenir rapidement à leur niveau de performance idéal et à préserver la continuité du flux physique après son interruption (Hosseini et al., 2019). Les études récentes ont montré que les perturbations par effet de propagation, telles que la pandémie de COVID-19, ont un impact considérable et une faible fréquence et se propagent en cascade dans les chaînes logistiques (Ivanov et al., 2019b). En outre, la littérature a suggéré que les chaînes logistiques, en particulier les réseaux de distribution, doivent évoluer vers des stratégies et des pratiques logistiques hautement résilientes.

Parallèlement à la vulnérabilité des chaînes logistiques, comme nous l'avons évoqué précédemment, le concept de développement durable est devenu, au cours des dernières décennies, une préoccupation stratégique primordiale compte tenu de la concurrence mondiale et du renforcement des réglementations dans la société (Aloui et al., 2021c). Les concepts de durabilité et de résilience sont deux pratiques relativement récentes qui cherchent à développer et à améliorer l'efficacité de la conception et de l'évaluation des réseaux logistiques dans une perspective plus large (de Oliveira et al., 2018).

La conception des réseaux logistiques englobe des décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles, à savoir les décisions de localisation, de transport et de planification des stocks. Comme discuté dans le chapitre précédent, les décisions de planification



sont généralement prises de façon indépendante ou séquentielle. Toutefois, les perturbations épidémiques influent considérablement les différentes décisions de planification en raison de leurs effets de propagation. De ce fait, il est important de développer des modèles d'optimisation intégrant les différentes décisions de planification et des sources de perturbation. À notre connaissance, le problème de planification ingérée stochastique en tenant compte à la fois des questions de durabilité et des perturbations épidémiques a fait l'objet de très peu d'études. Les principales contributions de ce chapitre sont les suivantes :

1. Modélisation du problème de conception d'un réseau logistique intégré comprenant des décisions de routage, d'inventaire et de localisation-allocation en tenant compte des fluctuations de la demande et des perturbations épidémiques.
2. Simulation par la méthode de Monte Carlo pour générer des scénarios plausibles et modéliser les différentes sources d'incertitude.
3. Étude de deux stratégies de résilience visant à réduire le risque de perturbation à savoir l'augmentation des capacités et la collaboration logistique.
4. Évaluation de trois dimensions de durabilité et étude de l'interaction entre ces aspects et la résilience dans la conception intégrée de réseaux logistiques à deux échelons soumis à des perturbations épidémiques et à l'incertitude de la demande.

Le suite de ce chapitre est organisée comme suit. Dans la section suivante, nous présentons une revue des travaux pertinents portant sur le problème de la conception des réseaux logistiques résilients. Dans la section 3, nous décrivons les mesures de performance et nous modélisons le problème de conception intégrée en cas de perturbations épidémiques et d'incertitude de la demande. Dans la section 4, nous décrivons la méthodologie de solution appliquée pour résoudre le problème étudié. Les résultats de calcul sont présentés dans la section 5. Enfin, quelques conclusions sont présentées dans la dernière section.

## **4.2 Revue de la littérature**

Le problème de conception des réseaux logistiques résilients soumis à des événements perturbateurs a été largement étudié dans la littérature ces dernières années. Plusieurs modèles et approches décisionnelles ont également été proposés afin de résoudre ce problème et de rendre les réseaux logistiques plus performants et mondialisés (Ivanov and Dolgui, 2021; Namdar et al., 2021). Le Tableau 4.1 fournit une classification de la littérature existante et permet de situer le présent travail dans la littérature. Comme le montre le Tableau 4.1, la plupart des études existantes se sont concentrées sur le choix de la localisation et l'allocation des ressources, en considérant des paramètres stochastiques, tels que la demande ou le coût. Cependant, il existe très peu de

recherches qui considèrent l'impact d'autres sources de perturbations dues à des interruptions d'activités multiples provenant d'événements inattendus (Mohammed, 2020). En effet, ces perturbations sont aujourd'hui inévitables. Ces perturbations peuvent être classées en deux catégories : perturbations isolées et perturbations en cascade avec effets de propagation (Ivanov et al., 2019a). Ces dernières sont des cas particuliers des interruptions de la chaîne logistique, car elles sont susceptibles de se propager rapidement et de se disperser dans le monde entier, contrairement aux interruptions isolées (Burgos and Ivanov, 2021).

Plusieurs travaux ont abordé les risques opérationnels et perturbateurs avec des considérations économiques. Par exemple, Klibi and Martel (2012a) ont étudié les perturbations multiples liées aux catastrophes naturelles et aux accidents industriels en utilisant un modèle stochastique de localisation et de transport à deux étapes. Les auteurs ont considéré les paramètres d'incertitude comme des variables aléatoires qui suivent une fonction de distribution cumulative. Ils ont également utilisé des échantillons de scénarios futurs plausibles pour simuler les perturbations. En outre, différentes stratégies ont été proposées pour concevoir des réseaux logistiques résilients. De même, Qin et al. (2013) ont abordé le problème de la conception de réseaux logistiques soumis à des perturbations accidentelles en introduisant deux stratégies d'atténuation des risques (fortification et pré-positionnement des stocks dans un modèle de programmation stochastique mixte à deux étapes). Sept stratégies différentes visant à reconfigurer les réseaux logistiques à l'aide d'un modèle de programmation linéaire et dynamique ont été examinées par Ivanov et al. (2016). Les chercheurs ont utilisé deux indicateurs, à savoir le niveau de service et les volumes de vente comme métriques de résilience pour évaluer la structure logistique la plus résiliente. Par ailleurs, Haghjoo et al. (2020) ont étudié le problème de la conception d'un réseau de chaîne logistique pour la fourniture de sang en traitant les décisions d'allocation d'emplacement en cas de perturbation et d'incertitude des installations en cas de catastrophe. Plus récemment, Kungwalsong et al. (2021) ont abordé le problème de la conception d'un réseau logistique en tenant compte des perturbations possibles des installations. En outre, Toloie et al. (2020) ont résolu le problème de conception d'un réseau logistique en cas de perturbation totale d'une installation et de demande incertaine.

Comme le montre la littérature, l'intégration des décisions devient une préoccupation de plus en plus importante dans la pratique. Dans ce contexte, Asl-Najafi et al. (2015) ont intégré les décisions d'inventaire et de localisation pour concevoir des réseaux logistiques en boucle fermée sous un aléa probabiliste de perturbation des installations. Farahani et al. (2017) ont également abordé le problème intégré de localisation et de gestion des stocks à produits multiples en supposant que les installations peuvent être partiellement défaillantes pendant les perturbations. En outre, Fattahi et al. (2017) ont résolu le problème de conception du réseau logistique sous les risques opérationnels et

de perturbation des installations. Les auteurs ont appliqué certaines stratégies d'atténuation et de résilience préventive pour faire face à la variation aléatoire de la capacité des installations et à l'incertitude de la demande. Récemment, [Zahiri et al. \(2020\)](#) ont traité le problème de la conception du réseau de transport pour les matériaux dangereux en tenant compte du risque de perturbation et de la périssabilité des matériaux. Afin d'étudier les incertitudes, ils ont développé un modèle mathématique stochastique à plusieurs étapes et ont utilisé deux stratégies de résilience, à savoir la criticité des nœuds et la complexité du réseau. De plus, un programme stochastique à deux étapes pour la conception d'un réseau logistique en cas de perturbation a été introduit dans ([Fattahi et al., 2020](#)) pour optimiser les décisions de localisation, d'allocation, d'inventaire et de lot d'approvisionnement.

Au cours des dernières années, la conception des réseaux logistiques verts en cas de risque de perturbation a suscité l'intérêt de la communauté scientifique. À titre d'exemple, [Mari et al. \(2014\)](#) ont traité le problème d'allocation et de localisation dans le secteur du textile avec des objectifs écologiques en cas de perturbation des installations. Motivés par les avantages des décisions de planification intégrées, [Yavari and Geraeli \(2019\)](#); [Yavari and Zaker \(2019\)](#) ont développé un modèle intégré des décisions de localisation, d'inventaire et de routage pour traiter le problème de conception des réseaux multi-périodes et multi-produits périssables en cas de perturbation du réseau électrique et d'incertitude de la demande. Les auteurs ont proposé un modèle PLMNE qui minimise le coût total attendu du réseau ainsi que la quantité d'émissions de carbone. Dans une autre étude, [Hasani et al. \(2021\)](#) ont présenté un modèle d'optimisation multi-objectifs afin de prendre en compte les aspects environnementaux et économiques sous perturbation des installations. Les trois dimensions de durabilité ont été abordées dans quelques études de la littérature. [Zahiri et al. \(2017\)](#) ont proposé un modèle de programmation linéaire en nombres entiers mixtes durable et résilient qui incorpore des décisions de localisation et d'inventaire en cas de perturbation des installations et de fluctuation de la demande. Plus récemment, [Mehrjerdi and Shafiee \(2021\)](#) se sont concentrés, pour la première fois, sur l'interaction entre la durabilité et la résilience dans la conception de réseaux logistiques en boucle fermée en utilisant deux stratégies de résilience, à savoir les stratégies d'approvisionnement multiple et de partage des informations.

Malgré l'impact considérable des perturbations en cascade sur la performance globale des chaînes logistiques, les études mentionnées ci-dessus n'ont pas examiné en profondeur les types de perturbations et leurs effets en cascade sur l'horizon de planification. En effet, peu de recherches ont considéré les perturbations épidémiques avec effets de propagation dans les problèmes de conception. Dans ce contexte, [Gholami-Zanjani et al. \(2021a,c\)](#) ont présenté une approche de modélisation du risque épidémique pour les perturbations isolées et en cascade dans le contexte alimentaire. Les auteurs

TABLEAU 4.1 – Synthèse de la littérature connexe (Aloui et al., 2021b).

Étude	Problème décisionnel			Évaluation de la durabilité			Perturbation		Demande incertaine
	Localisation	Inventaire	Routage	Économique	Environnementale	Sociale	Isolée	En cascade	
Klibi and Martel (2012a)	✓	-	-	✓	-	-	✓	-	✓
Qin et al. (2013)	✓	-	-	✓	-	-	✓	-	-
Ivanov et al. (2016)	✓	-	-	✓	-	-	✓	-	-
Haghjoo et al. (2020)	✓	-	-	✓	-	-	✓	-	✓
Kungwalsong et al. (2021)	✓	-	-	✓	-	-	✓	-	-
Tolooie et al. (2020)	✓	-	-	✓	-	-	✓	-	✓
Asl-Najafi et al. (2015)	✓	✓	-	✓	-	-	✓	-	✓
Farahani et al. (2017)	✓	✓	-	✓	-	-	✓	-	-
Fattahi et al. (2017)	✓	✓	-	✓	-	-	✓	-	✓
Fattahi et al. (2017)	✓	✓	-	✓	-	-	-	-	✓
Mari et al. (2014)	✓	-	-	✓	✓	-	✓	-	-
Yavari and Geraeli (2019)	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	✓
Yavari and Zaker (2019)	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	✓
Hasani et al. (2021)	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	✓
Zahiri et al. (2017)	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	-	-
Mehrjerdi and Shafiee (2021)	✓	-	-	✓	✓	-	✓	-	-
Gholami-Zanjani et al. (2021a,c)	✓	✓	-	✓	-	-	✓	✓	✓
Gholami-Zanjani et al. (2021b)	✓	✓	-	✓	✓	-	✓	✓	✓
Ce travail	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

ont abordé le problème de conception du réseau logistique en combinant les décisions de localisation et d’inventaire et en optimisant le coût total attendu. En outre, ils ont proposé quelques stratégies de résilience en tenant compte de l’aspect économique. Comme les stratégies d’atténuation des risques sont bénéfiques pour l’environnement et l’économie, (Gholami-Zanjani et al., 2021b) ont récemment proposé une approche intégrant des perspectives de résilience et écologiques pour la conception de réseaux alimentaires. Néanmoins, les auteurs n’ont pas évalué la dimension sociale de la durabilité et n’ont pas pris en compte les décisions de routage qui peuvent détériorer les performances du réseau en raison des effets de propagation des perturbations épidémiques.

### 4.3 Modélisation mathématique du problème

Le réseau logistique considéré comprend deux échelons, comme illustré dans la Figure 4.1. Chaque fournisseur dispose d’un produit spécifique et expédie ses marchandises vers un centre de distribution afin de massifier le flux, de maintenir un stock au centre de distribution, si nécessaire, puis de livrer ces marchandises aux détaillants ayant des demandes incertaines. Ces dernières sont générés en fonction d’une distribution connue. Les centres de distribution sont généralement situés à proximité de la ville, tandis que les détaillants se trouvent dans les villes urbaines. De ce fait, une flotte homogène de camions est utilisée pour transporter les marchandises au premier échelon, et une flotte homogène de petits véhicules est utilisée pour desservir les détaillants au deuxième échelon.

L’objectif du problème considéré est de concevoir des réseaux logistiques performants en déterminant les centres de distribution à ouvrir, la répartition des détaillants

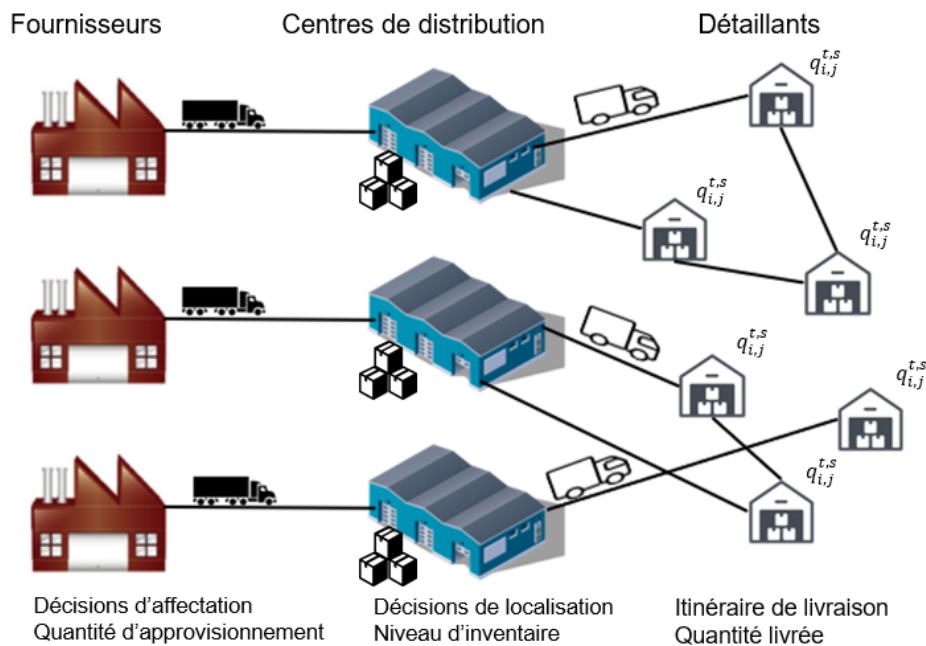


FIGURE 4.1 – Représentation du réseau logistique étudié en cas d'incertitude.

et des fournisseurs, les niveaux de stock ainsi que l'acheminement des expéditions dans chaque période tout en considérant les perturbations épidémiques et l'incertitude de la demande. Les emplacements des centres de distribution sont choisis parmi un ensemble de sites candidats au début de l'horizon de planification car ces décisions sont stratégiques. Cette étude est basée sur les principales hypothèses suivantes :

- Les demandes des détaillants sont supposées être stochastiques et suivre une distribution normale (Zahiri et al., 2017).
- La localisation et l'affectation sont des décisions stratégiques, qui sont indépendantes des périodes de planification et des scénarios plausibles, comme évoqué par Rafe-Majd et al. (2018).
- Chaque fournisseur dispose d'un produit spécifique, mais tous les produits sont compatibles.

Les ensembles, les paramètres et les variables de décision du modèle utilisés dans la formulation mathématique sont énumérés dans le Tableau 4.2.

### 4.3.1 Indicateurs de durabilité évalués

Dans la présente étude, nous utilisons les trois indicateurs de durabilité présentés dans les chapitres précédents. Du point de vue économique, nous considérons les différentes composantes des coûts stratégiques et des coûts tactiques et opérationnels attendus. En ce qui concerne la dimension environnementale, nous évaluons les émissions

TABLEAU 4.2 – Notations et définitions.

Notation	Désignation
<b>Ensembles</b>	
$J$	Ensemble des fournisseurs
$D$	Ensemble des centres de distribution
$I$	Ensemble des clients
$A1, A2$	Ensemble des arcs de collecte et de livraison
$T$	Ensemble des périodes de planification
$S$	Ensemble de scénarios plausibles
<b>Paramètres d'entrée indépendants des scénarios</b>	
$Cap_j$	Capacité maximale de débit ( <i>Throughput</i> ) du fournisseur $j$
$Cap_d$	Capacité maximale de débit du centre de distribution $d$
$FO_d$	Coût fixe d'utilisation du centre de distribution $d$
$EC_d$	Consommation énergétique moyenne du centre de distribution $d$
$Q_s$	Capacité maximale de chargement des camions
$Q_v$	Capacité maximale de chargement des véhicules
$F_s$	Coût opérationnel d'un camion
$F_v$	Coût d'utilisation d'un véhicule
$Ts_E$	Taux de consommation de carburant du camion à vide
$Ts_L$	Taux de consommation de carburant du camion à pleine charge
$Tv_E$	Taux de consommation de carburant du véhicule à vide
$Tv_L$	Taux de consommation de carburant du véhicule à pleine charge
$c_I$	Coût unitaire de stockage
$c_p$	Coût unitaire de pénalité due à la demande non satisfaite
$c_f$	Prix du carburant par litre
$e_F$	Facteur de conversion du carburant en émissions de $CO_2$
$e_c$	$CO_2$ émissions par unité de consommation d'énergie
$A_c$	Nombre annuel d'accidents
$d_{i,j}$	Distance entre deux nœuds $i$ et $j : i, j \in J \cup D \cup I$
$q_{ij}^t$	Demande du client $i$ auprès du fournisseur $j$ à la période $t$
<b>Paramètres d'entrée dépendants des scénarios</b>	
$q_{i,j}^{t,s}$	Demande du détaillant $i$ auprès du fournisseur $j$ à la période $t$ pour le scénario $s$
$p_s$	Probabilité d'occurrence du scénario $s$ telle que $\sum_{s \in S} p_s = 1$
<b>Variables de décision de la première étape</b>	
$y_d$	Égale à 1 si le centre de distribution $d$ est ouvert 1 ; 0 sinon
$z_{id}$	Égale à 1 si le nœud $i$ est affecté au centre $d$ ; 0 sinon, $i \in I \cup J, d \in D$
<b>Variables de décision de la deuxième étape</b>	
$Q1_{j,d}^{t,s}$	Quantité livrée par le fournisseur $j$ au centre $d$ à la période $t$ pour le scénario $s$
$Q2_{j,d,i}^{t,s}$	Quantité de produits du fournisseur $j$ livrés par le centre $d$ au client $i$ à la période $t$ pour le scénario $s$ .
$I_{j,d}^{t,s}$	Niveau de stock des produits du fournisseur $j$ dans le centre $d$ à la période $t$
$x_{i,j}^{t,s}$	Égale à 1 si l'arc $(i;j)$ est traversé au cours de la période $t$ par un véhicule/camion dans le scénario $s$ ; 0 sinon
$f_{i,j}^{t,s}$	Charge de camion/véhicule sur l'arc $(i;j)$ si un camion/véhicule se déplace directement du nœud $i$ au nœud $j$ au cours de la période $t$ dans le scénario $s$ , $(i,j) \in A1 \cup A2$

de  $CO_2$  attendues causées par les activités de transport et celles du fonctionnement des centres de distribution. Quant à la durabilité sociale, nous évaluons les risques d'accidents liés au transport de marchandises.

#### 4.3.1.1 Évaluation de la durabilité économique

L'indicateur économique est calculé en faisant la somme des coûts de localisation-allocation ( $CF$ ) dans la première étape et des coûts prévus des stocks ( $CI_s$ ), du transport ( $CT_s$ ) et des pénalités ( $CP_s$ ) dans la deuxième étape.

Les coûts de la première étape sont calculés en additionnant les coûts d'ouverture des centres de distribution sélectionnés selon l'équation (4.1).

$$CF = \sum_d y_d FO_d \quad (4.1)$$

Le coût de stockage ( $CI_s$ ) pour le scénario  $s$  est calculé en multipliant la quantité stockée dans chaque période par le coût unitaire de stockage avec l'équation (4.2).

$$CI_s = \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} \sum_{j \in J} I_{j,d}^{t,s} c_I \quad (4.2)$$

Pour estimer le coût de transport du scénario  $s$ , nous adaptons la formule présentée dans les chapitres précédents selon l'équation (4.3).

$$CT_s = cf \left[ \sum_{t \in T} \sum_{d \in D, j \in J} d_{d,j} (Ts_E x_{d,j}^{t,s} + (Ts_L - Ts_E) \frac{Q1_{j,d}^{t,s}}{Q_s}) \right. \\ \left. + \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in A_2} d_{i,j} (Tv_E x_{i,j}^{t,s} + (Tv_L - Tv_E) \frac{f_{i,j}^{t,s}}{Q_v}) \right] \quad (4.3)$$

Finalement, le coût de pénalité  $CP_s$  selon le scénario  $s$  est calculé en multipliant la demande non satisfaite par le coût unitaire de pénalité avec l'équation (4.4).

$$CP_s = c_p \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} q_{i,j}^{t,s} - Q2_{j,d,i}^{t,s} \quad (4.4)$$

#### 4.3.1.2 Évaluation de la durabilité environnementale

Comme mentionné auparavant, nous quantifions deux types d'émissions de  $CO_2$ , à savoir les émissions prévues provenant des activités de transport dans chaque scénario probable  $s$  ( $ET_s$ ) et celles causées par le fonctionnement des centres de distribution ouverts ( $EF$ ). Pour calculer les émissions de  $CO_2$  attendues dans le scénario  $s$ , nous

utilisons la formule (4.5).

$$\begin{aligned}
 ET_s = ef & \left[ \sum_{t \in T} \sum_{d \in D, j \in J} d_{d,j} (T_{SE} x_{d,j}^{t,s} + (T_{SL} - T_{SE}) \frac{Q1_{j,d}^{t,s}}{Q_s}) \right. \\
 & \left. + \left[ \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in A_2} d_{i,j} (T_{VE} x_{i,j}^{t,s} + (T_{VL} - T_{VE}) \frac{f_{i,j}^{t,s}}{Q_v}) \right] \right] \quad (4.5)
 \end{aligned}$$

Pour estimer les émissions de  $CO_2$  générées par le fonctionnement des centres de distribution ( $EF$ ), nous appliquons la même approche utilisée dans (Aloui et al., 2021d; Mrabti et al., 2020) (Équation 4.6).

$$EF = e_c \sum_d y_d EC_d \quad (4.6)$$

#### 4.3.1.3 Évaluation de la durabilité sociale

Le risque d'accident causé par les activités de transport, tel que décrit dans le chapitre précédent, est utilisé dans cette partie pour évaluer l'impact social/sociétal. Le risque d'accident ( $A_s$ ) pour le scénario  $s$  est calculé en appliquant l'équation (4.7).

$$A_s = \frac{A_{ref}}{d_{ref}} \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in A_1 \cup A_2} d_{i,j} x_{d,j}^{t,s} \quad (4.7)$$

#### 4.3.2 Évaluation de la résilience

Dans le but d'évaluer la résilience des chaînes logistiques, nous appliquons, dans cette étude, une métrique de résilience largement utilisée dans la littérature (Cardoso et al., 2015; Zahiri et al., 2017). Cette métrique cherche à aborder le niveau de service du client (%CSL) en calculant le ratio entre les quantités livrées aux détaillants et la demande totale prévue, comme indiqué dans l'équation (4.8)

$$\%CSL = 100 \frac{\sum_{j \in J} \sum_{d \in D} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} Q2_{j,d,i}^{t,s}}{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} q_{i,j}^{t,s}} \quad (4.8)$$

#### 4.3.3 Modélisation des perturbations épidémiques

Dans cette sous-section, nous présentons un modèle simple pour illustrer la manière dont les perturbations épidémiques en cascade avec effets de propagation peuvent se produire, endommager les installations et se propager aux installations voisines. Ces perturbations sont principalement caractérisées par leur intensité (faible fréquence/fort



impact), leur temps de récupération et leur propagation rapide dans le réseau (Gholami-Zanjani et al., 2021b). La Figure 4.2 illustre la représentation schématique des effets de propagation dans un réseau logistique à deux échelons et à périodes multiples.

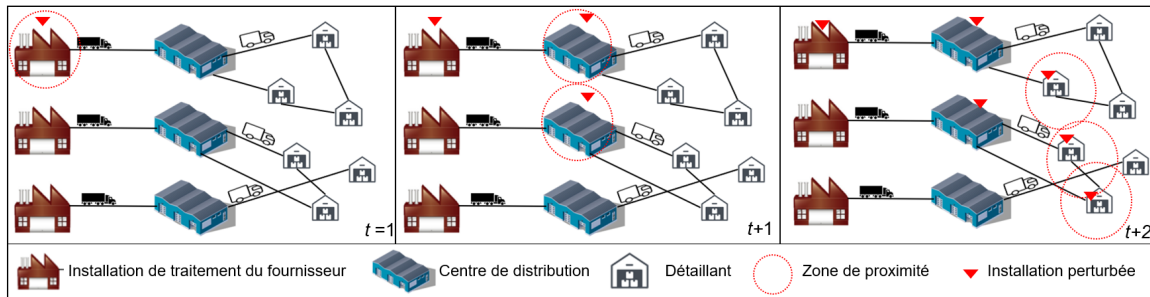


FIGURE 4.2 – Représentation des perturbations épidémiques et de leurs effets de propagation dans le réseau considéré.

Comme le montre la Figure 4.2, lorsqu'une perturbation épidémique arrive à l'instant  $t$ , une installation primaire est touchée, et les autres plateformes directement ou indirectement connectées à cette installation primaire sont exposées au risque de propagation. De plus, en fonction des corrélations et des interactions entre les installations, la propagation de la perturbation peut s'étendre aux périodes suivantes ( $t+1$ ,  $t+2$ , ...), qui deviennent elles-mêmes des nœuds infectés, et ainsi de suite, entraînant la naissance d'effets de propagation. À cette fin, une matrice de corrélation est utilisée pour les probabilités de propagation, où les valeurs sont principalement basées sur la proximité géographique et les relations de flux.

L'approche de modélisation est basée sur une approche probabiliste révélant comment les perturbations épidémiques en cascade avec effets de propagation peuvent survenir de manière imprévisible sur l'horizon de planification. Le modèle de perturbation comprend essentiellement deux étapes. La première consiste à simuler les caractéristiques de la perturbation, à savoir le temps d'arrivée de la perturbation. En revanche, la seconde étape vise à simuler les temps de réponse et à tester l'effet de propagation sur les installations, en termes de pertes de capacité et de stocks.

Comme discuté dans la littérature, les perturbations épidémiques sont décrites par deux facteurs corrélés, à savoir l'intensité de l'impact et le temps de récupération (Gholami-Zanjani et al., 2021c; Ivanov et al., 2016; Klibi and Martel, 2012a). En effet, lorsqu'une perturbation se produit dans une zone ou dans une installation spécifique, la capacité de débit (*throughput*) et le niveau des stocks tombent à zéro puisque l'installation concernée sera fermée et les inventaires seront éliminés. Ensuite, ils seront entièrement récupérés après un temps de récupération. Cet impact peut être alors défini par une fonction de récupération discrète, comme exposé dans la Figure 4.3.

Pour simuler le temps d'arrivée et de récupération ainsi que la propagation de la perturbation, une procédure de simulation de Monte Carlo est utilisée dans la présente

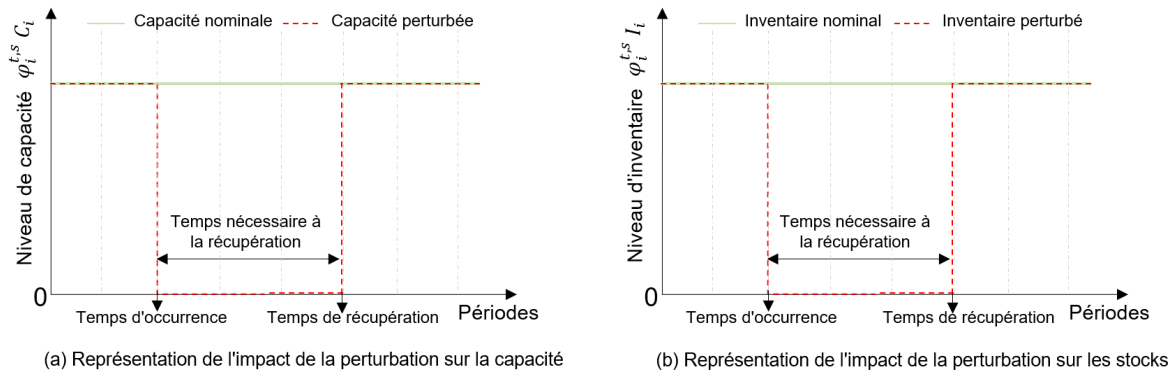


FIGURE 4.3 – Impact de la perturbation sur les capacités et les niveaux de stock.

contribution. L'objectif de cette procédure est de générer de manière stochastique le paramètre de perte  $\varphi_i^{t,s}$  correspondant à la perte de la capacité nominale et du niveau de stock, qui est généralement compris entre 0 et 1. Ce paramètre stochastique est utilisé dans la suite pour formuler le modèle mathématique.

#### 4.3.4 Programmation stochastique à deux étapes

Dans cette section, nous développons un modèle de programmation linéaire mixte en nombre entiers à deux étapes (Two-Stage Mixed-Integer Linear Program 2S-MILP) avec une demande stochastique et des perturbations épidémiques aléatoires.

Dans le 2S-MILP, les paramètres stochastiques sont considérés comme des variables aléatoires avec une distribution de probabilité appropriée et sont représentés sous forme d'un ensemble de scénarios. De plus, comme nous avons évoqué ci-dessus, les décisions concernant notre problème doivent être prises en deux étapes. Dans la première étape, le nombre de centres de distribution, l'emplacement optimal des installations et l'affectation des fournisseurs et des détaillants doivent être prises sans tenir compte des scénarios de perturbation. Ces décisions sont fixées pour toute la période de planification. En revanche, les décisions relatives au niveau des stocks, aux itinéraires et aux quantités approvisionnées (les variables opérationnelles et tactiques comprennent un indice  $s \in S$  qui désigne la réalisation particulière du scénario) sont déterminées dans la deuxième étape en fonction de l'allocation de l'emplacement des installations et de l'incertitude réalisée dans chaque scénario. La fonction objectif à optimiser est obtenue à partir des valeurs objectives de la première étape et des valeurs espérées des différents scénarios dans la deuxième étape.

Dans cette partie du travail, nous nous basons sur l'optimisation des coûts et nous évaluons a posteriori les autres indicateurs de performances. Le problème abordé dans ce chapitre peut être formulé comme suit :

$$E(CT) = \min \sum_d \sum_t y_d FO_d + \sum_{s \in S} p_s Q(X, s) \quad (4.9)$$

où  $X$  désigne le vecteur de toutes les variables de conception utilisées dans la deuxième étape,  $p_s$  représente la probabilité d'occurrence du scénario  $s$  et  $Q(X, s)$  désigne la valeur objectif du problème de la deuxième étape dans le scénario  $s \in S$  (Équation 4.10).

$$Q(X, s) = CI_s + CT_s + CP_s \quad (4.10)$$

Sous les contraintes :

$$z_{i,d} \leq y_d \quad \forall d \in D, \forall i \in I \cup J \quad (4.11)$$

$$\sum_{j \in J} z_{j,d} = 1 \quad \forall d \in D \quad (4.12)$$

$$\sum_{d \in D} z_{i,d} \leq 1 \quad \forall i \in I \cup J \quad (4.13)$$

$$I_{j,d}^{0,s} = 0 \quad \forall j \in J, \forall d \in D, \forall s \in S \quad (4.14)$$

$$I_{j,d}^{t,s} = (1 - \varphi_d^{t,s})(Q1_{j,d}^{t,s} + I_{j,d}^{t-1,s}) - \sum_{i \in I} Q2_{j,d}^{t,s} \quad \forall d \in D, t \in T, j \in J, s \in S \quad (4.15)$$

$$I_{j,d}^{t,s} \leq (1 - \varphi_d^{t,s}) Cap_d y_d \quad \forall d \in D, t \in T, j \in J, s \in S \quad (4.16)$$

$$\sum_{j \in J} Q1_{j,d}^{t,s} \leq (1 - \varphi_d^{t,s}) Cap_d y_d - \sum_{j \in J} I_{j,d}^{t-1,s} \quad \forall t \in T, d \in D, s \in S \quad (4.17)$$

$$Q1_{j,d}^{t,s} \leq (1 - \varphi_j^{t,s}) Cap_j x_{d,j}^{t,s} \quad \forall d \in D, j \in J, t \in T, s \in S \quad (4.18)$$

$$\sum_{i \in J \cup I} z_{i,d} q_{i,j}^{t,s} \leq (1 - \varphi_d^{t,s}) Cap_d y_d \quad \forall d \in D, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (4.19)$$

$$Q2_{j,d,i}^{t,s} \leq (1 - \varphi_d^{t,s}) Cap_d z_{i,d} \quad \forall t \in T, i \in I, j \in J, d \in D, s \in S \quad (4.20)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{d \in D} Q2_{j,d,i}^{t,s} \leq (1 - \varphi_i^{t,s}) \sum_{j \in J} q_{i,j}^{t,s} \quad \forall j \in J, i \in I, d \in D, t \in T, s \in S \quad (4.21)$$

$$Q1_{j,d}^{t,s} \leq Q_s x_{d,j}^{t,s} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (4.22)$$

$$x_{d,j}^{t,s} \leq z_{j,d} \quad \forall t \in T, j \in J, s \in S, d \in D \quad (4.23)$$

$$x_{d,j}^{t,s} = x_{j,d}^{t,s} \quad \forall t \in T, j \in J, s \in S, d \in D \quad (4.24)$$

$$\sum_{i \in I \cup D} x_{i,j}^{t,s} \leq 1 \quad \forall t \in T, \forall i \in I, \forall s \in S \quad (4.25)$$

$$\sum_{i \in I} x_{d,i}^{t,s} = \sum_{i \in I} x_{i,d}^{t,s} \quad \forall t \in T, \forall d \in D, \forall s \in S \quad (4.26)$$

$$\sum_{i \in I \cup D} x_{j,i}^{t,s} = \sum_{i \in I \cup D} x_{i,j}^{t,s} \quad \forall t \in T, \forall d \in D, \forall s \in S \quad (4.27)$$

$$x_{d,i}^{t,s} \leq z_{i,d} \quad \forall t \in T, \forall i \in I, \forall d \in D, \forall s \in S \quad (4.28)$$

$$x_{i,d}^{t,s} \leq z_{i,d} \quad \forall t \in T, \forall i \in I, \forall d \in D, \forall s \in S \quad (4.29)$$

$$x_{i,i'}^{t,s} + z_{i,d} + z_{i',d'} \leq 2 \quad \forall t \in T, i, i' \in D, d, d' \in D, s \in S \quad (4.30)$$

$$\sum_{j \in I \cup D} f_{j,i}^{t,s} - \sum_{j \in I \cup D} f_{i,j}^{t,s} = \sum_{d \in D} \sum_{j \in J} Q2_{j,d,i}^{t,s} \quad \forall t \in T, i \in I, \forall s \in S \quad (4.31)$$

$$f_{i,j}^{t,s} \leq Q_v x_{i,j}^{t,s} \quad \forall t \in T, \forall i, j \in I \cup D, \forall s \in S \quad (4.32)$$

$$\sum_{i \in I} f_{i,d}^{t,s} \leq 0 \quad \forall t \in T, \forall i, j \in J \cup D, \forall s \in S \quad (4.33)$$

$$z_{i,d}, y_d \in \{0, 1\} \quad \forall d \in D, \forall i \in I \cup J \quad (4.34)$$

$$x_{i,j}^{t,s} \in \{0, 1\} \quad \forall t \in T, \forall (i, j) \in A1 \cup A2, \forall s \in S \quad (4.35)$$

$$Q1_{j,d}^{t,s}, Q2_{j,d,i}^{t,s}, I_{j,d}^{t,s} \geq 0 \quad \forall t \in T, i \in I, j \in J, d \in D, s \in S \quad (4.36)$$

$$f_{i,j}^{t,s} \geq 0 \quad \forall t \in T, \forall (i, j) \in A2, \forall s \in S \quad (4.37)$$

La fonction objectif  $E(CT)$  (4.9) minimise le coût total attendu du réseau, y compris les coûts de la première phase (les coûts stratégiques liés à l'utilisation/ouverture des centres de distribution) et les coûts prévus de la deuxième étape liés aux niveaux de stock, au transport et à la demande non satisfaite. Les contraintes (4.11), (4.12) et (4.13) concernent les décisions de la première étape, c'est-à-dire les décisions d'affectation. Les contraintes (4.11) garantissent que les détaillants et les fournisseurs ne peuvent être affectés qu'à un seul centre de distribution ouvert sur l'horizon de planification. Les contraintes (4.12) assurent que chaque fournisseur doit être affecté à un centre de distribution. Les contraintes (4.13) garantissent que les détaillants ne doivent pas être affectés à plusieurs centres de distribution à la fois. Les contraintes (4.14), (4.15), (4.16) et (4.17) définissent les niveaux de stock dans les centres de distribution lors de la deuxième étape. Plus précisément, les contraintes (4.14) définissent le niveau de stock initial de chaque produit dans chaque scénario  $s \in S$ . Les contraintes (4.15) déterminent les niveaux d'inventaire dans les centres de distribution à chaque période  $t$  selon le scénario  $s \in S$ . Les contraintes (4.16) permettent de s'assurer que le niveau d'inventaire dans chaque centre de distribution ne peut pas dépasser la capacité disponible de stockage dans chaque scénario  $s \in S$ . Les contraintes (4.17) expriment que la quantité de marchandises à livrer au centre de distribution  $d \in D$  ne dépassera jamais sa capacité maximale pour chaque période de planification dans chaque scénario  $s \in S$ .

Les contraintes (4.18) garantissent que la quantité envoyée par un fournisseur ne doit pas dépasser la capacité maximale de débit de son installation à la période  $t$  sous le scénario  $s \in S$ . Les contraintes (4.19) assurent que les détaillants et les fournisseurs sont affectés aux centres de distribution et que les capacités de ces derniers sont satisfaites dans toutes les périodes de planification et dans tous les scénarios possibles. Les contraintes (4.20) veillent à ce que les quantités de marchandises distribuées par les centres de distribution ne dépassent pas leurs capacités maximales. Les contraintes (4.21) garantissent que les quantités transportées vers les détaillants ne doivent pas dépasser leurs demandes prévues dans chaque scénario  $s \in S$ . Les contraintes (4.22) stipulent que la quantité chargée sur un camion ne doit pas excéder sa capacité sur l'arc  $(d,j)$  pour le scénario  $s$ . Les contraintes (4.23) imposent que l'arc  $(d,j)$  soit traversé si seulement le fournisseur  $j$  est affecté au centre de distribution  $d$ . Les contraintes (4.24) permettent de conserver le nombre égal d'arcs entrants et sortants dans le premier échelon. Les contraintes (4.25)-(4.33) garantissent un processus de livraison raisonnable dans le second échelon pour chaque scénario  $s$ . Les contraintes (4.25) assurent que chaque détaillant est visité au maximum une fois dans chaque période de planification et pour chaque scénario possible. Les contraintes (4.26) et (4.27) garantissent un nombre égal d'arcs entrants et sortants dans le deuxième échelon pour le scénario  $s$ . Les contraintes (4.28), (4.29) et (4.30) éliminent les itinéraires non autorisés qui ne commencent et ne finissent pas par le même centre de distribution. Les contraintes (4.31) garantissent la conservation du flux pour le processus de collecte dans chaque scénario  $s$ . Les contraintes (4.32) veillent à ce que les capacités des véhicules ne soient pas violées. Les contraintes (4.33) imposent que les quantités retournées aux centres de distribution soient nulles. Enfin, les contraintes (4.34)-(4.37) précisent la nature de chaque variable de décision utilisée dans ce modèle.

### 4.3.5 Formulation des stratégies de résilience

Dans la littérature, les stratégies de résilience sont classées en deux types : les stratégies proactives et les stratégies réactives. La première catégorie de stratégies, comme le partage des ressources et la fortification des installations, sont mises en œuvre avant l'apparition des perturbations. Toutefois, les stratégies réactives, telles que l'augmentation des capacités et les fournisseurs de secours, sont appliquées après les perturbations (Negri et al., 2021).

Dans cette étude, nous formulons deux stratégies de résilience, à savoir l'augmentation des capacités et la collaboration logistique en tant que stratégie de résilience proactive, et nous les ajoutons au modèle perturbé afin d'atténuer les effets de la perturbation sur la performance durable du réseau logistique.

### 4.3.5.1 Augmentation des capacités

La première stratégie de résilience introduite dans le modèle de base est la stratégie d'augmentation des capacités des installations logistiques. En effet, ces derniers ont la possibilité d'augmenter temporairement leurs capacités afin de faire face aux perturbations grâce à une réserve de capacité disponible. Pour cela, les variables  $capF_j^{t,s}$ ,  $capC_d^{t,s}$  et  $capR_i^{t,s}$  sont définies pour déterminer le volume de la capacité étendue dans chaque période pour les fournisseurs, les centres de distribution et les détaillants, respectivement. En conséquence, nous modifions les contraintes (4.16)-(4.21) du modèle de base par les contraintes suivantes (4.38)-(4.43).

$$I_{j,d}^{t,s} \leq (1 - \varphi_d^{t,s}) cap_d y_d + capC_d^{t,s} \quad \forall d \in D, t \in T, j \in J, s \in S \quad (4.38)$$

$$\sum_{j \in J} Q1_{j,d}^{t,s} \leq (1 - \varphi_d^{t,s}) cap_d y_d - \sum_{j \in J} I_{j,d}^{t-1,s} + capC_d^{t,s} \quad \forall t \in T, d \in D, s \in S \quad (4.39)$$

$$Q1_{j,d}^{t,s} \leq (1 - \varphi_j^{t,s}) cap_j x_{d,j}^{t,s} + capF_j^{t,s} \quad \forall d \in D, j \in J, t \in T, s \in S \quad (4.40)$$

$$\sum_{i \in J \cup I} z_{i,d} q_{i,j}^{t,s} \leq (1 - \varphi_d^{t,s}) cap_d y_d + capC_d^{t,s} \quad \forall d \in D, t \in T, s \in S \quad (4.41)$$

$$Q2_{j,d,i}^{t,s} \leq (1 - \varphi_d^{t,s}) cap_d z_{i,d} + capC_d^{t,s} \quad \forall t \in T, i \in I, j \in J, d \in D, s \in S \quad (4.42)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{d \in D} Q2_{j,d,i}^{t,s} \leq (1 - \varphi_i^{t,s}) \sum_{j \in J} q_{i,j}^{t,s} + capR_i^{t,s} \quad \forall j \in J, i \in I, d \in D, t \in T, s \in S \quad (4.43)$$

Cette stratégie entraîne des coûts supplémentaires liés à la réservation de l'emplacement spécifique de ce tampon dans les installations et aux coûts opérationnels associés à cette augmentation de capacité. Par conséquent, nous définissons  $CS_j^{t,s}$ ,  $CS_d^{t,s}$  et  $CS_i^{t,s}$  comme étant les coûts unitaires d'expansion des capacités exprimés par l'équation (4.44) dans la fonction objectif.

$$\sum_{j \in J} \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S}} capF_j^{t,s} CS_j^{t,s} + \sum_{d \in D} \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S}} capC_d^{t,s} CS_d^{t,s} + \sum_{i \in I} \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S}} capR_i^{t,s} CS_i^{t,s} \quad (4.44)$$

Par ailleurs, l'augmentation temporaire des capacités entraîne des émissions supplémentaires dues aux activités des installations. On définit donc  $ECE$  comme les émissions unitaires liées à l'expansion des capacités selon l'équation (4.45) dans l'estimation des émissions de  $CO_2$ .

$$\sum_{j \in J} \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S}} capF_j^{t,s} ECEe_c + \sum_{d \in D} \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S}} capC_d^{t,s} ECEe_c + \sum_{i \in I} \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S}} capR_i^{t,s} ECEe_c \quad (4.45)$$

### 4.3.5.2 Collaboration logistique

Comme nous l'avons déjà évoqué dans les chapitres précédents, l'intégration de la stratégie de collaboration logistique permet de réaliser des économies importantes sur le plan économique, environnemental et social (Aloui et al., 2021c). De plus, dans le cadre de la gestion partagée des ressources et des moyens, la collaboration entre les acteurs est devenue plus prometteuse en partageant les informations relatives à l'évolution et à la diffusion des perturbations existantes.

Afin d'intégrer la stratégie collaborative entre les fournisseurs dans la planification en cas de perturbations, nous supprimons les contraintes d'affectation d'unicité (4.12) et nous définissons une nouvelle variable de décision ( $f_{i,j}^{t,s}$ ,  $(i, j) \in A1$ ) pour modéliser la collecte des produits dans le premier échelon. Les contraintes suivantes (4.46)-(4.53) sont ajoutées dans le modèle perturbé pour formuler cette stratégie :

$$\sum_{i \in J \cup D} x_{i,j}^{t,s} \leq 1 \quad \forall t \in T, \forall j \in J, \forall s \in S \quad (4.46)$$

$$\sum_{j \in J} x_{d,j}^{t,s} = \sum_{j \in J} x_{j,d}^{t,s} \quad \forall t \in T, \forall d \in D, \forall s \in S \quad (4.47)$$

$$\sum_{i \in J \cup D} x_{i,j}^{t,s} = \sum_{i \in J \cup D} x_{j,i}^{t,s} \quad \forall t \in T, \forall j \in J, \forall s \in S \quad (4.48)$$

$$x_{j,d}^{t,s} \leq z_{j,d} \quad \forall t \in T, \forall j \in J, \forall d \in D, \forall s \in S \quad (4.49)$$

$$x_{j,j'}^{t,s} + z_{j,d} + z_{j',d'} \leq 2 \quad \forall t \in T, \forall j, j' \in D, \forall d, d' \in D, \forall s \in S \quad (4.50)$$

$$\sum_{i \in J \cup D} f_{j,i}^{t,s} - \sum_{i \in J \cup D} f_{i,j}^{t,s} = \sum_{d \in D} Q1_{j,d}^{t,s} \quad \forall t \in T, \forall j \in J, \forall s \in S \quad (4.51)$$

$$f_{j,i}^{t,s} \leq Q_s x_{i,j}^{t,s} \quad \forall t \in T, \forall i, j \in J \cup D, \forall s \in S \quad (4.52)$$

$$\sum_{j \in J} f_{d,j}^{t,s} \leq 0 \quad \forall t \in T, \forall i, j \in J \cup D, \forall s \in S \quad (4.53)$$

## 4.4 Approche de résolution

Nous présentons dans cette section l'approche utilisée pour résoudre le modèle proposé et les différentes configurations de conception introduites dans le cadre de cette étude.

### 4.4.1 Génération de scénarios par la simulation Monte Carlo

Pour tenir compte des différentes caractéristiques des perturbations mentionnées précédemment, nous appliquons une approche de modélisation probabiliste pour estimer l'occurrence de ces perturbations, leur impact sur les installations ainsi que leur

propagation dans le temps et l'espace sur le réseau logistique. Cette approche est basée sur le cadre de modélisation des risques introduit par [Klibi and Martel \(2012a\)](#) et [Gholami-Zanjani et al. \(2021c\)](#). L'approche est basée principalement sur la simulation Monte Carlo qui permet de générer des scénarios futurs plausibles à partir des informations statistiques sur des paramètres incertains. La procédure de simulation de Monte Carlo utilisée est décrite par l'Algorithme 3. Dans cette procédure de génération,  $u$  désigne un nombre aléatoire et  $F^{-1}(u)$  représente l'inverse de la variable normale standardisée.

Comme décrit dans l'Algorithme 3, la procédure de génération des scénarios est composée de sept étapes principales. Dans la première étape, le temps d'arrivée de la perturbation pour chaque zone est généré aléatoirement selon une distribution exponentielle. Ensuite, une liste chronologique temporelle des temps d'occurrence des perturbations pour chaque zone est formée. Dans la deuxième étape, un test de vérification pour chaque nœud situé dans la zone perturbée est effectué pour montrer si le nœud est perturbé ou non. Ensuite, une liste chronologique des temps d'occurrence des perturbations est construite pour chaque nœud du réseau. Dans la troisième étape, un test de propagation des perturbations est réalisé en utilisant une matrice de corrélation basée sur le flux de matière et la distance entre les nœuds. Ensuite, la liste chronologique des temps de perturbation pour chaque nœud est mise à jour. Dans la quatrième étape, l'intensité de la perturbation est générée aléatoirement pour chaque temps de perturbation. Cinquièmement, l'intensité estimée dans l'étape 4 est utilisée pour déterminer le temps de récupération nécessaire à chaque installation pour revenir à un fonctionnement normal. La relation linéaire entre ces deux paramètres a été étudiée dans ([Klibi and Martel, 2012b](#)). Dans la sixième étape, l'impact de la perturbation est calculé comme un paramètre de perte en fonction des étapes précédentes. Finalement, les demandes sont générées de manière indépendante sur les périodes de planification et pour chaque scénario selon une distribution normale.

#### 4.4.2 Approximation Moyenne par Échantillonnage

Les techniques Monte Carlo sont des méthodes stochastiques basées sur l'utilisation de nombres aléatoires. Dans cette étude, la technique d'Approximation Moyenne par Échantillonnage (AME) basée sur la technique de simulation Monte Carlo est appliquée afin de construire un problème moyen d'échantillon plus petit au lieu de résoudre le problème avec tous les scénarios possibles ([Kungwalsong et al., 2021](#)). Cette technique est largement utilisée dans la littérature depuis quelques années pour faire des approximations quasi-optimales des problèmes stochastiques ([Gholami-Zanjani et al., 2021b](#)). L'idée de la méthode AME est d'estimer les espérances mathématiques par les moyennes des scénarios équiprobables. Par conséquent, notre modèle de base peut être



---

**Algorithme 3 : GÉNÉRATION DE SCÉNARIOS FUTURS PLAUSIBLES**

---

**Input :** Ensemble des nœuds, des zones, des paramètres et matrice de distance

**Output :** Paramètres de perte  $\varphi_i^{t,s}$  et la matrice des demandes

```

1 for  $s = 1$  to  $S$  do
2   Étape 1 : Génération du temps d'arrivée des perturbations  $\Gamma$ 
3   for  $z \in Z$  do
4      $\Gamma \leftarrow 0$ 
5     while  $\Gamma \leq T$  do
6       Générer  $u$  entre  $(0,1)$ 
7       Estimer le temps d'arrivée de la perturbation  $\Gamma = \Gamma + F_z^{-1}(u)$ 
8       Ajouter le temps  $\Gamma$  à la liste chronologique de la zone  $z$   $\gamma_z$ 
9   Étape 2 : Test de vérification
10  for  $n \in N$  and  $t \in \gamma_z$  do
11    Générer un nombre aléatoire  $u$  entre  $(0,1)$ 
12    if  $u \leq tol_n$  then
13      Ajouter  $t$  à  $\gamma_n$ 
14  Étape 3 : Test de propagation des perturbations
15  for  $n \in N$  and  $n' \in N/\{n\}$  and  $t \in \gamma_n$  do
16    Générer un nombre aléatoire  $u$  entre  $(0,1)$ 
17    if  $u \leq corr_{n,n'}$  then
18      Ajouter  $t' = t + Latencytime_{n,n'}$  à la liste chronologique  $\gamma_{n'}$ 
19  Étape 4 : Estimation de l'intensité de la perturbation
20  for  $t \in \gamma_n$  do
21    Générer  $u$  entre  $(0,1)$ 
22    Estimer l'intensité de la perturbation  $\delta_n = F_n^{-1}(u)$ 
23  Étape 5 : Estimation du temps de récupération
24  for  $n \in N$  and  $t \in \gamma_n$  do
25    Générer  $u$  entre  $(0,1)$ 
26    Estimer le temps de récupération  $\theta_n = q \delta_n + F_n^{-1}(u)$ 
27  Étape 6 : Paramètre de perte  $\varphi_i^{t,s}$ 
28  for  $n \in N$  and  $t \in T$  do
29    if  $\gamma_n \leq t \leq \theta_n + \gamma_n$  then
30       $\varphi_i^{t,s} \leftarrow 1$ 
31    else
32       $\varphi_i^{t,s} \leftarrow 0$ 
33  Étape 7 : Génération des demandes
34  for  $n \in N$  and  $t \in T$  do
35    Générer la demande des détaillants  $\sim \mathcal{N}(\mu = 1200, \sigma = 100)$ 
36 return Paramètres de pertes et matrice des demandes

```

---

approché comme suit :

$$E(CT) = \min \sum_d \sum_t y_d F O_d + \frac{1}{N} \sum_{s \in S^N} Q(X, s) \quad (4.54)$$

Sous réserve des contraintes 4.11 à 4.37

Sur la base de la technique d'approximation et d'échantillonnage, le problème stochastique peut être donc approché à l'aide d'un problème déterministe équivalent. En effet, en générant  $M$  (nombre de réplifications) échantillons indépendants des paramètres incertains, chacun de taille  $N$  et en résolvant les problèmes correspondants, on obtient les fonctions objectifs correspondants  $CT(X, S_{N,1})$ ,  $CT(X, S_{N,2})$ , ...,  $CT(X, S_{N,M})$ . Ainsi, les espérances mathématiques du coût total peuvent être approximées par leurs moyennes d'échantillons comme suit :  $\overline{CT} = \frac{1}{M} \sum_m^M CT(X, S_{N,m})$ .

## 4.5 Résultats numériques

Dans le but de tester le modèle proposé et les différentes variantes qui intègrent les stratégies de résilience présentées dans la section précédente, nous testons les modèles sur deux problèmes d'instance. Toutes les expériences réalisées, en appliquant la méthode AME, ont été résolues à l'aide du solveur CPLEX 12.9.0 sur un PC avec un processeur Intel Core i5-10210U@ 1.6 GHz et 16 Go de RAM sous Windows 10 Home 64-bit.

Dans cette section, nous décrivons d'abord les données utilisées. Ensuite, nous présentons et discutons les résultats obtenus.

### 4.5.1 Description et données

Deux exemples de réseaux logistiques ont été étudiés dans la présente contribution, avec un nombre différent de fournisseurs, de centres de distribution et de détaillants, comme le montre le Tableau 4.3. L'horizon de planification considéré pour chaque problème est de 12 périodes. Chaque période de planification représente un mois. Un ensemble de 50 scénarios est généré avec la procédure Monte Carlo. Ensuite, ces scénarios sont classés en 5 groupes de réplification pour exécuter l'approche AME ( $M=5$ ). Notons que chaque réplification comporte 10 scénarios plausibles.

Les autres paramètres d'entrée utilisés dans les expériences numériques sont extraits de la littérature et sont énumérés dans le Tableau 4.4.

TABLEAU 4.3 – Taille des problèmes testés.

Instance \ Nombre	Fournisseurs	Centres de distribution	Détaillants	Périodes	Réplifications	Scénarios
I1	2	2	5	12	5	10
I2	3	3	9	12	5	10

TABLEAU 4.4 – Valeurs des paramètres d’entrée utilisés dans les expériences numériques ainsi que les sources de données pertinentes.

Paramètres	Valeurs/Estimation	Source
$Cap_j$	20.000 Kg	Hypothèse
$Cap_d$	20.000 Kg	Hypothèse
$FO_d$	6000 €	Wu et al. (2021a)
$EC_d$	10,000 Kwh	ADEME (2010)
$Q_s$	20,000 Kg	Soysal et al. (2018b)
$Q_v$	10,000 Kg	Soysal et al. (2018b)
$F_s$	300 €	Soysal et al. (2018b)
$F_v$	200 €	Soysal et al. (2018b)
$T_{sE}$	0.15 L/Km	Hickman et al. (1999)
$T_{sL}$	0.31 L/Km	Hickman et al. (1999)
$T_{vE}$	0.13 L/Km	Hickman et al. (1999)
$T_{vL}$	0.15 L/Km	Hickman et al. (1999)
$c_I$	0.01 €/Kg	Stellingwerf et al. (2018)
$c_p$	1.5 €/Kg	Hypothèse
$c_f$	1.5 €/L	Aloui et al. (2021c)
$e_F$	2.66 Kg	Tassou et al. (2009)
$e_c$	0.087 Kg	ADEME (2010)
$A_c$	2768 accidents par an	Mrabti et al. (2020, 2021)

## 4.5.2 Résultats et discussion

Pour évaluer les performances des stratégies introduites précédemment dans la conception de réseaux logistiques durables et résilients, nous rapportons et discutons dans cette sous-section les résultats obtenus de cinq configurations de conception, à savoir le modèle non perturbé (Non-Disrupted Model NDM), le modèle perturbé (Disrupted Model DM), le modèle perturbé avec la stratégie d’expansion des capacités (Disrupted Model with the Capacity Expansion DMCE), le modèle perturbé avec une stratégie de collaboration logistique (Disrupted Model with a Collaboration Logistics DMCL) et le modèle perturbé intégrant à la fois la stratégie d’augmentation des capacités et la collaboration logistique (Disrupted Model with both Capacity Expansion and Logistics Collaboration strategy DMCECL). Les différentes configurations sont évaluées en fonction de cinq indicateurs clés de performance. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 4.5.

TABLEAU 4.5 – Comparaison des configurations de conception selon cinq indicateurs de performance.

Instance	Configuration	Coût prévu (€)	Émissions prévues (Kg CO <sub>2</sub> )	Risques d'accident prévus (%)	# moyen de CDs ouverts	Niveau de service (%)
I1	NDM	21,067.019	3491.360	21.050	2	100.00
	DM	47,765.679	3300.762	18.211	2	73.38
	DMCE	29,517.612	4100.046	25.724	2	99.66
	DMCL	38,742.400	2207.619	15.368	1	73.96
	DMCECL	19,113.490	2797.541	20.576	1	99.87
I2	NDM	31,858.988	6663.545	50.831	3	100.00
	DM	73,897.477	6626.066	51.055	3	77.53
	DMCE	46,672.017	8115.822	54.675	3	98.75
	DMCL	58,248.953	3526.752	30.153	1	77.48
	DMCECL	30,891.362	3902.640	35.679	1	99.54

#### 4.5.2.1 Analyse de la performance économique et de la résilience

La première analyse vise à évaluer l'interaction entre les aspects économiques et la métrique de résilience de chaque configuration logistique. La Figure 4.4 montre les résultats obtenus pour les cinq configurations examinées en termes des coûts et du niveau de service.

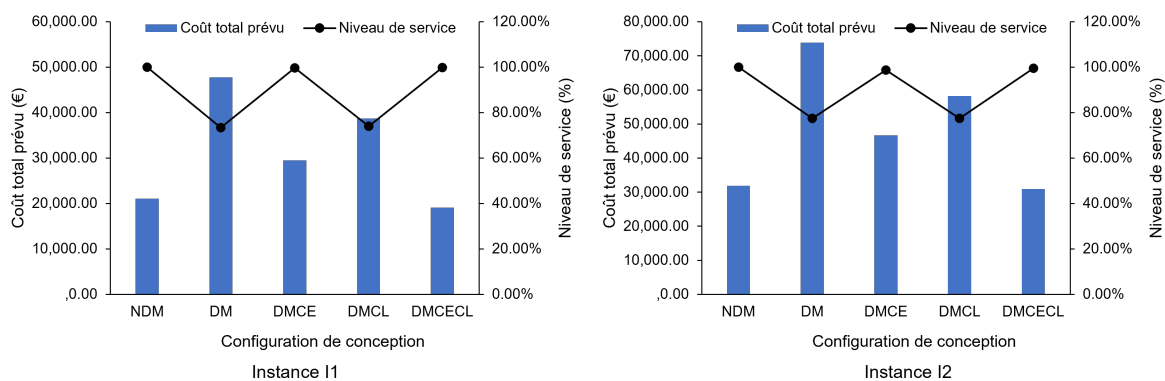


FIGURE 4.4 – Coût total et niveau de service prévus pour chaque configuration dans les instances testées.

Comme le montrent la Figure 4.4 et le Tableau 4.5, les différentes configurations envisagées ont fourni des coûts et des niveaux de service différents. En effet, la configuration NDM entraîne un niveau de service plus élevé que les autres configurations, notamment les configurations DM et DMCL. Évidemment, puisque les perturbations n'ont pas été prises en compte dans le modèle NDM, la configuration NDM présente des coûts logistiques moins élevés, par rapport aux configurations DM, DMCE et DMCL. Toutefois, en incorporant les perturbations épidémiques et l'incertitude de la demande dans les modèles de conception, la configuration DM, comme un modèle de conception auto-résilient, se caractérise par des coûts très élevés et des niveaux de service très

bas. Ce résultat peut s'expliquer par l'impact considérable de ces perturbations sur les capacités des installations et les niveaux de stock qui peuvent entraîner des coûts de pénalité plus élevés en raison des demandes non satisfaites.

Par ailleurs, il est clair que le modèle DMCE, en tant que modèle de conception avec une stratégie de résilience réactive, offre un niveau de service plus élevé que les configurations DM et DMCL. Étant donné que l'augmentation des capacités entraîne des coûts supplémentaires, la conception DMCE engendre des coûts plus élevés que la configuration NDM. En outre, comme l'expansion des capacités améliore la satisfaction des clients, les coûts de pénalité et le coût total prévus sont moins élevés que ceux de la configuration DM. De plus, comme le montre le Tableau 4.5, la configuration DMCL avec une stratégie de collaboration peut réduire le nombre de centres de distribution ouverts, ce qui minimise les coûts fixes des installations. De ce fait, la collaboration logistique peut améliorer le niveau de résilience et réduire les coûts totaux en partageant les installations non perturbées du réseau.

Enfin, on peut noter que la configuration DMCECL surpasse les autres configurations de conception sous perturbation en termes du coût et du niveau de résilience. La configuration DMCECL intégrant à la fois deux stratégies de résilience offre des résultats presque similaires à ceux fournis par la configuration non perturbée NDM.

#### 4.5.2.2 Analyse de la performance environnementale et de la résilience

La Figure 4.5 illustre les résultats de l'évaluation a posteriori des émissions et des niveaux de service pour les différents modèles de conception.

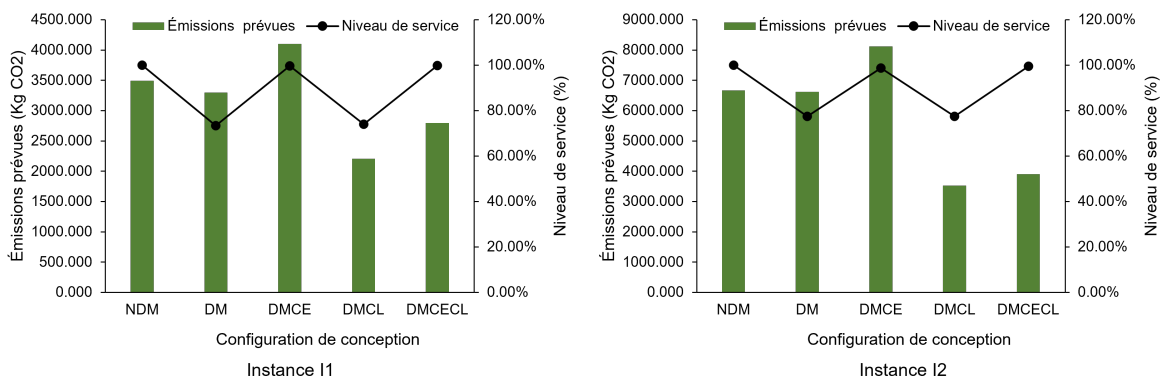


FIGURE 4.5 – Comparaison des émissions de  $CO_2$  et du niveau de service des différentes configurations.

Les résultats montrent que la configuration DMCE augmente considérablement les émissions de  $CO_2$  par rapport aux autres modèles de conception, en raison de l'augmentation temporaire des capacités qui permet d'atténuer les niveaux de perte de service. De plus, comme on peut le voir sur la Figure 4.5, la configuration DM génère

des quantités d'émissions de  $CO_2$  légèrement inférieures à celles du modèle NDM non perturbé, du fait que l'intégration de perturbations dans le modèle peut réduire le taux de satisfaction et, par conséquent, minimiser le nombre de voyages pour transporter les produits.

Par ailleurs, il est clair que la stratégie de collaboration dans le modèle perturbé entraîne une réduction importante des émissions liées au transport et au fonctionnement des installations en augmentant légèrement le taux de service obtenu par le modèle perturbé auto-résilient. De plus, l'intégration des stratégies de l'expansion des capacités et de la collaboration logistique peut apporter un bon compromis entre la résilience et les niveaux d'émissions dans les réseaux logistiques perturbés.

### 4.5.2.3 Analyse de la performance sociale et de la résilience

Le taux d'accident prévu et les niveaux de service obtenus dans chaque configuration sont comparés dans la Figure 4.6.

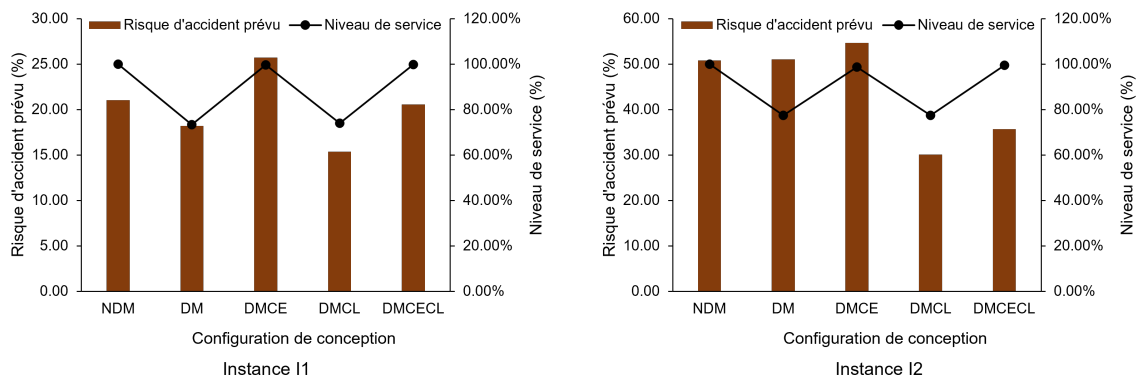


FIGURE 4.6 – Comparaison du risque d'accident et du niveau de service des différents modèles

Les résultats montrent que la configuration DMCE fournit un risque d'accident plus significatif par rapport aux autres configurations, en raison de l'augmentation du nombre de trajets à vide et à charge visant à améliorer le taux de satisfaction des détaillants. De plus, on peut observer que, lorsque les perturbations ne sont pas intégrées, les risques d'accidents sont plus élevés que ceux obtenus par les configurations DMCL et DMCECL. Cependant, du point de vue de la résilience, nous pouvons conclure que la configuration DMCECL a fourni presque le même niveau de service que la configuration sans perturbation.

Finalement, on peut conclure, à partir des exemples illustrés, que l'intégration des stratégies d'augmentation de la capacité et de la collaboration logistique contribue à atténuer les effets des perturbations et à améliorer la durabilité des opérations logistiques.

## 4.6 Conclusion

La résilience et la durabilité des réseaux logistiques sont devenues primordiales pour créer un environnement commercial compétitif. Ce chapitre propose un modèle stochastique exhaustif pour la conception des réseaux logistiques à deux échelons en cas de perturbations épidémiques et d'incertitude de la demande. Pour atténuer le risque de perturbations et améliorer la durabilité des réseaux logistiques, deux stratégies de conception ont été intégrées dans le modèle mathématique. Ensuite, une technique d'échantillonnage Monte Carlo (AME) est utilisée pour réaliser une approximation quasi-optimale du modèle stochastique basé sur des scénarios. Ces derniers sont générés à l'aide de la simulation Monte Carlo. L'intégration des stratégies introduites a permis d'obtenir différents modèles de conception. Ces modèles sont ensuite testés avec des scénarios plausibles et sous deux problèmes d'instance.

Les résultats ont montré que les différents modèles de conception ont des comportements distincts et que la mise en œuvre de deux stratégies combinées peut améliorer considérablement les performances du réseau. Plus précisément, l'intégration de la collaboration logistique et de l'augmentation des capacités peut réduire de manière significative les coûts logistiques, les émissions de  $CO_2$  et le risque d'accident lié au transport tout en offrant un très haut niveau de résilience.

# Conclusion générale et perspectives

**D**ANS l'ère moderne, l'intégration des décisions, les préoccupations du développement durable, les incertitudes et les perturbations épidémiques constituent des défis majeurs dominants de la gestion logistique. Ces défis rendent les réseaux logistiques de plus en plus complexes et vulnérables. Afin d'améliorer les performances des chaînes logistiques et d'atténuer efficacement les risques liés aux incertitudes et aux perturbations, les responsables logistiques doivent établir des stratégies et des schémas logistiques plus efficaces et plus souples. Dans cette thèse, nous nous sommes concentrés sur la planification intégrée des réseaux logistiques durables et résilients en évaluant ces deux stratégies logistiques.

Les travaux de recherche réalisés dans le cadre de cette thèse ont apporté des informations et des contributions précieuses à la littérature existante. Dans un premier temps, nous avons réalisé une revue systématique de la littérature afin de mieux analyser les approches existantes dans la planification collaborative des réseaux logistiques. Cette contribution a apporté un aperçu général et détaillé des travaux publiés entre 2010 et 2020 afin de guider les praticiens et les chercheurs dans ce domaine. Sur la base des analyses qualitatives et quantitatives, nous avons identifié les tendances et les lacunes qui méritent une attention particulière dans les futures travaux pour améliorer les performances des réseaux logistiques. Les résultats ont montré que l'intégration des trois dimensions de la durabilité dans la planification du transport est peu étudiée et, en particulier, la dimension sociale. De plus, l'analyse a prouvé que la plupart des travaux se sont concentrés sur l'optimisation du transport au niveau opérationnel, avec peu de travaux sur le problème de conception et de pilotage intégré des réseaux logistiques. En outre, il a été démontré que la plupart des travaux se concentrent sur le développement de modèles d'optimisation déterministe et ne prennent pas en compte des incertitudes.

Dans le deuxième chapitre, nous avons modélisé le problème de planification intégrée des réseaux logistiques en tenant compte des émissions de  $CO_2$ . La collaboration horizontale a été considérée pour améliorer les performances logistiques. Nous avons développé un modèle d'optimisation à deux objectifs intégrant les décisions de localisation-allocation, de routage et d'inventaire. Ce modèle a été adapté et résolu à l'aide du solveur d'optimisation CPLEX. Des tests numériques et des comparaisons des scénarios ont été effectués. Les résultats ont montré que la collaboration entre les fournisseurs peut entraîner des économies de coûts et d'émissions allant jusqu'à 66,52%



et 57,86%, respectivement.

Dans le troisième chapitre, le problème d'inventaire, de localisation et de routage collaboratif à deux échelons sous des considérations de durabilité a été étudié. Un modèle de programmation linéaire mixte en nombres entiers (PLMNE) multi-objectifs qui minimise les coûts logistiques, les émissions de  $CO_2$  et le risque d'accident du transport a été proposé pour résoudre de façon optimale le problème étudié. De plus, une approche heuristique a été développée pour résoudre les problèmes de grande taille. Pour évaluer les performances de l'heuristique proposée, une comparaison des résultats obtenus avec ceux fournis par le PLMNE et d'autres algorithmes d'optimisation a été effectuée. Les résultats expérimentaux ont montré que l'heuristique développée est performante pour trouver des bonnes solutions dans un temps de calcul raisonnable. Par ailleurs, une étude de cas dans le secteur agroalimentaire français a été présentée pour évaluer l'application pratique de notre approche. Les résultats obtenus ont démontré que notre approche permet de réaliser des économies de près de 20% des coûts logistiques, d'environ 16% des émissions résultantes et de près de 8% du risque total d'accident. Nous avons également mené une analyse de sensibilité sur les paramètres d'entrée. Cette étude a fourni des conclusions intéressantes pour le gestionnaire des chaînes logistiques.

Dans le quatrième chapitre, nous avons étudié le problème de conception des réseaux logistiques durables et résilients en cas de perturbation épidémique et d'incertitude de la demande. Un modèle de programmation stochastique en nombres entiers mixtes à deux étapes a été proposé pour intégrer les décisions clés de localisation-allocation, d'inventaire et de routage des véhicules. De plus, les perturbations épidémiques et l'incertitude de la demande sont intégrées à travers des scénarios plausibles à l'aide d'une simulation Monte Carlo. L'augmentation des capacités et la collaboration ont été intégrées dans le modèle mathématique afin d'améliorer les performances des réseaux. Nous avons réalisé des exemples numériques afin de valider l'approche proposée, d'évaluer les performances des différents modèles de conception et de fournir des informations managériales. Les résultats obtenus ont montré que l'intégration de deux stratégies peut améliorer efficacement la résilience et la durabilité des réseaux logistiques.

Malgré les résultats prometteurs de cette thèse, des pistes d'améliorations peuvent être considérées dans la continuité de ce travail.

Tout d'abord, les mesures de performances considérées peuvent être améliorées et les objectifs des partenaires peuvent être considérés dans l'optimisation des réseaux logistiques. De plus, les entreprises qui collaborent préfèrent connaître leurs propres gains plutôt que les gains globaux. Il serait intéressant de développer des méthodes afin de déterminer les gains de chaque partenaire dans le réseau.

Ensuite, l'approche proposée peut être étendue pour incorporer des approches multi-objectifs (NSGA-II, NSGA-III, MOPSO, etc.) afin de trouver des frontières efficaces de Pareto. En outre, d'autres approches d'apprentissage automatique peuvent être intégrées pour améliorer encore la qualité des solutions et la performance des approches d'optimisation.

Enfin, les modèles stochastiques formulés sont plus difficiles à résoudre avec des échantillons plus grands et un plus grand nombre de périodes, il serait donc intéressant d'élaborer des méthodes de décomposition ou des approches heuristiques.

# Bibliographie

- Abbad, H. and Salaun, V. (2019). Quelles contributions de la proximité à la réussite d'un projet de mutualisation logistique? le cas du gic chargeurs pointe de bretagne. *Logistique & Management*, 27(2) :108–118.
- Abbassi, A. (2018). *Contribution à l'étude du problème de transport multimodal dans le cas robuste et multi-objectif*. PhD thesis, Normandie Université; Université Sidi Mohamed ben Abdellah (Fès, Maroc . . . .
- Abdullahi, H., Reyes-Rubiano, L., Ouelhadj, D., Faulin, J., and Juan, A. A. (2021). Modelling and multi-criteria analysis of the sustainability dimensions for the green vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 292(1) :143–154.
- Ackermann, H., Ewe, H., Kopfer, H., and Küfer, K.-H. (2011). Combinatorial auctions in freight logistics. In *International conference on computational logistics*, pages 1–17. Springer.
- ADEME (2005). Le transport de marchandises : quels impacts? quelles actions? *Dossier de presse*, 7, ADEME, Paris.
- ADEME (2010). Calcul des facteurs d'émissions et sources bibliographiques utilisées, méthode bilan carbone. agence de l'environnement mission interministérielle et de la maîtrise de l'énergie, france.
- Adenso-Díaz, B., Lozano, S., Garcia-Carbajal, S., and Smith-Miles, K. (2014a). Assessing partnership savings in horizontal cooperation by planning linked deliveries. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 66 :268–279.
- Adenso-Díaz, B., Lozano, S., and Moreno, P. (2014b). Analysis of the synergies of merging multi-company transportation needs. *Transportmetrica A : Transport Science*, 10(6) :533–547.
- Akyol, D. E. and De Koster, R. B. (2018). Determining time windows in urban freight transport : A city cooperative approach. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 118 :34–50.
- Al Chami, Z. (2018). *Planification en Distribution Urbaine : Optimisation des tournées dans un contexte collaboratif*. PhD thesis, Bourgogne Franche-Comté.
- Aldrighetti, R., Battini, D., Ivanov, D., and Zennaro, I. (2021). Costs of resilience and disruptions in supply chain network design models : a review and future research directions. *International Journal of Production Economics*, 235 :108103.
- Allaoui, H., Guo, Y., and Sarkis, J. (2019). Decision support for collaboration planning in sustainable supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 229 :761–774.

- Aloui, A., Derrouiche, R., Hamani, N., and Delahoche, L. (2020). Collaboration horizontale durable des reseaux de transport de marchandises : etat de l'art et perspectives. In *13ème Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation (MOSIM'20)*.
- Aloui, A. and Hadj-Hamou, K. (2021). A heuristic approach for a scheduling problem in additive manufacturing under technological constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 154 :107115.
- Aloui, A., Hamani, N., and Delahoche, L. (2021a). Couplage des heuristiques et l'apprentissage pour la résolution d'un modèle ilrp collaboratif et durable. In *ROADEF 2021*.
- Aloui, A., Hamani, N., and Delahoche, L. (2021b). Designing a resilient and sustainable logistics network under epidemic disruptions and demand uncertainty. *Sustainability*, 13(24) :14053.
- Aloui, A., Hamani, N., and Delahoche, L. (2021c). An integrated optimization approach using a collaborative strategy for sustainable cities freight transportation : A case study. *Sustainable Cities and Society*, 75 :103331.
- Aloui, A., Hamani, N., Derrouiche, R., and Delahoche, L. (2021d). Assessing the benefits of horizontal collaboration using an integrated planning model for two-echelon energy efficiency-oriented logistics networks design. *International Journal of Systems Science : Operations & Logistics*, In Press :1–22.
- Aloui, A., Hamani, N., Derrouiche, R., and Delahoche, L. (2021e). Systematic literature review on collaborative sustainable transportation : overview, analysis and perspectives. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 9 :100291.
- Aloui, A., Mrabti, N., Hamani, N., and Delahoche, L. (2021f). Towards a collaborative and integrated optimization approach in sustainable freight transportation. *IFAC-PapersOnLine*, 54(1) :671–676.
- Ankersmit, S., Rezaei, J., and Tavasszy, L. (2014). The potential of horizontal collaboration in airport ground freight services. *Journal of Air Transport Management*, 40 :169–181.
- Asl-Najafi, J., Zahiri, B., Bozorgi-Amiri, A., and Taheri-Moghaddam, A. (2015). A dynamic closed-loop location-inventory problem under disruption risk. *Computers & Industrial Engineering*, 90 :414–428.
- Audy, J.-F., D'Amours, S., and Rönnqvist, M. (2012). An empirical study on coalition formation and cost/savings allocation. *International Journal of Production Economics*, 136(1) :13–27.
- Audy, J.-F., D'Amours, S., and Rousseau, L.-M. (2011). Cost allocation in the establishment of a collaborative transportation agreement—an application in the furniture industry. *Journal of the Operational Research Society*, 62(6) :960–970.
- Bailey, E., Unnikrishnan, A., and Lin, D.-Y. (2011). Models for minimizing backhaul costs through freight collaboration. *Transportation research record*, 2224(1) :51–60.
- Ballot, E. and Fontane, F. (2010). Reducing transportation co2 emissions through pooling of supply networks : perspectives from a case study in french retail chains. *Production Planning & Control*, 21(6) :640–650.
- Baumann, E. (2011). *Modèles d'évaluation des performances économique, environnementale et sociale dans les chaînes logistiques*. PhD thesis.

- Bektaş, T., Demir, E., and Laporte, G. (2016). Green vehicle routing. In *Green transportation logistics*, pages 243–265. Springer.
- Bektaş, T., Ehmke, J. F., Psaraftis, H. N., and Puchinger, J. (2019). The role of operational research in green freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 274(3) :807–823.
- Ben Jouda, S., Krichen, S., and Klibi, W. (2017). Coalition-formation problem for sourcing contract design in supply networks. *European Journal of Operational Research*, 257(2) :539–558.
- Berger, S. and 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.
- Biuki, M., Kazemi, A., and Alinezhad, A. (2020). An integrated location-routing-inventory model for sustainable design of a perishable products supply chain network. *Journal of Cleaner Production*, page 120842.
- Björnfot, A. and Torjussen, L. (2012). Extent and effect of horizontal supply chain collaboration among construction sme.
- Buijs, P., Alvarez, J. A. L., Veenstra, M., and Roodbergen, K. J. (2016). Improved collaborative transport planning at dutch logistics service provider fritom. *Interfaces*, 46(2) :119–132.
- Buijs, P. et al. (2014). Joint operational decision-making in collaborative transportation networks : the role of it. *Supply Chain Management : An International Journal*.
- Burgos, D. and Ivanov, D. (2021). Food retail supply chain resilience and the covid-19 pandemic : A digital twin-based impact analysis and improvement directions. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 152 :102412.
- Butt, A. S. (2021). Strategies to mitigate the impact of covid-19 on supply chain disruptions : a multiple case analysis of buyers and distributors. *The international journal of logistics management*.
- Cardoso, S. R., Barbosa-Póvoa, A. P., Relvas, S., and Novais, A. Q. (2015). Resilience metrics in the assessment of complex supply-chains performance operating under demand uncertainty. *Omega*, 56 :53–73.
- Chabot, T., Bouchard, F., Legault-Michaud, A., Renaud, J., and Coelho, L. C. (2018). Service level, cost and environmental optimization of collaborative transportation. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 110 :1–14.
- Chai, Y., Chanut, O., Michon, V., and Rocques, T. (2013). La mutualisation logistique pour des supply chains durables.
- Chen, H. (2016). Combinatorial clock-proxy exchange for carrier collaboration in less than truck load transportation. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 91 :152–172.
- Chen, L., Zhao, X., Tang, O., Price, L., Zhang, S., and Zhu, W. (2017). Supply chain collaboration for sustainability : A literature review and future research agenda. *International Journal of Production Economics*, 194 :73–87.

- Cheng, C., Yang, P., Qi, M., and Rousseau, L.-M. (2017). Modeling a green inventory routing problem with a heterogeneous fleet. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 97 :97–112.
- Chrouta, J., Farhani, F., and Zaafouri, A. (2021). A modified multi swarm particle swarm optimization algorithm using an adaptive factor selection strategy. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, page 01423312211029509.
- Cleophas, C., Cottrill, C., Ehmke, J. F., and Tierney, K. (2019). Collaborative urban transportation : Recent advances in theory and practice. *European Journal of Operational Research*, 273(3) :801–816.
- Comi, A. and Savchenko, L. (2021). Last-mile delivering : Analysis of environment-friendly transport. *Sustainable Cities and Society*, page 103213.
- Crujssen, F., Borm, P., Fleuren, H., and Hamers, H. (2010). Supplier-initiated outsourcing : A methodology to exploit synergy in transportation. *European Journal of Operational Research*, 207(2) :763–774.
- Cui, Y. (2020). *Models and methods for decentralized decision in logistics networks*. PhD thesis, Ecole Centrale de Lille.
- Dahl, S. and Derigs, U. (2011). Cooperative planning in express carrier networks—an empirical study on the effectiveness of a real-time decision support system. *Decision Support Systems*, 51(3) :620–626.
- Dai, B. and Chen, H. (2012). Profit allocation mechanisms for carrier collaboration in pickup and delivery service. *Computers & Industrial Engineering*, 62(2) :633–643.
- Daskin, M. S., Coullard, C. R., and Shen, Z.-J. M. (2002). An inventory-location model : Formulation, solution algorithm and computational results. *Annals of operations research*, 110(1-4) :83–106.
- de Oliveira, U. R., Espindola, L. S., da Silva, I. R., da Silva, I. N., and Rocha, H. M. (2018). A systematic literature review on green supply chain management : Research implications and future perspectives. *Journal of cleaner production*, 187 :537–561.
- Defryn, C. and Sörensen, K. (2017). A fast two-level variable neighborhood search for the clustered vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 83 :78–94.
- Defryn, C. and Sörensen, K. (2018). Multi-objective optimisation models for the travelling salesman problem with horizontal cooperation. *European Journal of Operational Research*, 267(3) :891–903.
- Defryn, C., Sörensen, K., and Dullaert, W. (2019). Integrating partner objectives in horizontal logistics optimisation models. *Omega*, 82 :1–12.
- Delfani, F., Kazemi, A., SeyedHosseini, S. M., and Niaki, S. T. A. (2020). A novel robust possibilistic programming approach for the hazardous waste location-routing problem considering the risks of transportation and population. *International Journal of Systems Science : Operations & Logistics*, pages 1–13.
- Demir, E., Bektaş, T., and Laporte, G. (2014). A review of recent research on green road freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 237(3) :775–793.

- Dey, B. K., Bhuniya, S., and Sarkar, B. (2021). Involvement of controllable lead time and variable demand for a smart manufacturing system under a supply chain management. *Expert Systems with Applications*, 184 :115464.
- Diabat, A., Richard, J.-P., and Codrington, C. W. (2013). A lagrangian relaxation approach to simultaneous strategic and tactical planning in supply chain design. *Annals of Operations Research*, 203(1) :55–80.
- Dolgui, A., Ivanov, D., and Sokolov, B. (2020). Reconfigurable supply chain : The x-network. *International Journal of Production Research*, 58(13) :4138–4163.
- Durach, C. F., Kembro, J., and Wieland, A. (2017). A new paradigm for systematic literature reviews in supply chain management. *Journal of Supply Chain Management*, 53(4) :67–85.
- Farahani, M., Shavandi, H., and Rahmani, D. (2017). A location-inventory model considering a strategy to mitigate disruption risk in supply chain by substitutable products. *Computers & Industrial Engineering*, 108 :213–224.
- Farias, K., Hadj-Hamou, K., and Yugma, C. (2020). Model and exact solution for a two-echelon inventory routing problem. *International Journal of Production Research*, pages 1–24.
- Fattahi, M., Govindan, K., and Keyvanshokoo, E. (2017). Responsive and resilient supply chain network design under operational and disruption risks with delivery lead-time sensitive customers. *Transportation research part E : Logistics and transportation review*, 101 :176–200.
- Fattahi, M., Govindan, K., and Maihami, R. (2020). Stochastic optimization of disruption-driven supply chain network design with a new resilience metric. *International Journal of Production Economics*, 230 :107755.
- Fernández, E., Fontana, D., and Speranza, M. G. (2016). On the collaboration uncapacitated arc routing problem. *Computers & Operations Research*, 67 :120–131.
- Fernández, E., Roca-Riu, M., and Speranza, M. G. (2018). The shared customer collaboration vehicle routing problem. *European journal of operational research*, 265(3) :1078–1093.
- Fernández, E. and Sgalambro, A. (2020). On carriers collaboration in hub location problems. *European Journal of Operational Research*, 283(2) :476–490.
- Frisk, M., Göthe-Lundgren, M., Jörnsten, K., and Rönnqvist, M. (2010). Cost allocation in collaborative forest transportation. *European Journal of Operational Research*, 205(2) :448–458.
- Gansterer, M. and Hartl, R. F. (2018). Collaborative vehicle routing : a survey. *European Journal of Operational Research*, 268(1) :1–12.
- Garcia, D. J. and You, F. (2015). Supply chain design and optimization : Challenges and opportunities. *Computers & Chemical Engineering*, 81 :153–170.
- Gholami-Zanjani, S. M., Jabalameli, M. S., Klibi, W., and Pishvae, M. S. (2021a). A robust location-inventory model for food supply chains operating under disruptions with ripple effects. *International Journal of Production Research*, 59(1) :301–324.

- Gholami-Zanjani, S. M., Jabalameli, M. S., and Pishvae, M. S. (2021b). A resilient-green model for multi-echelon meat supply chain planning. *Computers & Industrial Engineering*, 152 :107018.
- Gholami-Zanjani, S. M., Klibi, W., Jabalameli, M. S., and Pishvae, M. S. (2021c). The design of resilient food supply chain networks prone to epidemic disruptions. *International Journal of Production Economics*, 233 :108001.
- Goksal, F. P., Karaoglan, I., and Altiparmak, F. (2013). A hybrid discrete particle swarm optimization for vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Computers & Industrial Engineering*, 65(1) :39–53.
- Gonzalez-Feliu, J. (2011). Costs and benefits of logistics pooling for urban freight distribution : scenario simulation and assessment for strategic decision support. In *Seminario CREI*.
- Gonzalez-Feliu, J. and Malh  n  , N. (2014). Logistics pooling for city supply. In *Supply Chain Forum : An International Journal*, volume 15, pages 2–4. Taylor & Francis.
- Gonzalez-Feliu, J., Semet, F., and Routhier, J.-L. (2014). *Sustainable urban logistics : Concepts, methods and information systems*. Springer.
- Goodarzian, F., Wamba, S. F., Mathiyazhagan, K., and Taghipour, A. (2021). A new bi-objective green medicine supply chain network design under fuzzy environment : Hybrid metaheuristic algorithms. *Computers & Industrial Engineering*, 160 :107535.
- Govindan, K., Jafarian, A., Khodaverdi, R., and Devika, K. (2014). Two-echelon multiple-vehicle location–routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food. *International Journal of Production Economics*, 152 :9–28.
- Guajardo, M. (2018). Environmental benefits of collaboration and allocation of emissions in road freight transportation. In *Sustainable freight transport*, pages 79–98. Springer.
- Guajardo, M. and Rönnqvist, M. (2016). A review on cost allocation methods in collaborative transportation. *International transactions in operational research*, 23(3) :371–392.
- Guajardo, M., Rönnqvist, M., Flisberg, P., and Frisk, M. (2018). Collaborative transportation with overlapping coalitions. *European Journal of Operational Research*, 271(1) :238–249.
- Guerrero, W. J., Prodhon, C., Velasco, N., and Amaya, C. A. (2013). Hybrid heuristic for the inventory location-routing problem with deterministic demand. *International Journal of Production Economics*, 146(1) :359–370.
- Habibi, M. K., Allaoui, H., and Goncalves, G. (2018). Collaborative hub location problem under cost uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 124 :393–410.
- Hacardiaux, T. and Tancrez, J.-S. (2019). Assessing the environmental benefits of horizontal cooperation using a location-inventory model. *Central European Journal of Operations Research*, pages 1–25.
- Hacardiaux, T. and Tancrez, J.-S. (2020). Assessing the environmental benefits of horizontal cooperation using a location-inventory model. *Central European Journal of Operations Research*, 28(4) :1363–1387.



- Haghjoo, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., Shahmoradi-Moghadam, H., and Rahimi, Y. (2020). Reliable blood supply chain network design with facility disruption : A real-world application. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 90 :103493.
- Hasani, A., Mokhtari, H., and Fattahi, M. (2021). A multi-objective optimization approach for green and resilient supply chain network design : a real-life case study. *Journal of Cleaner Production*, 278 :123199.
- Hernández, S. and Peeta, S. (2011). Centralized time-dependent multiple-carrier collaboration problem for less-than-truckload carriers. *Transportation research record*, 2263(1) :26–34.
- Hernández, S. and Peeta, S. (2014). A carrier collaboration problem for less-than-truckload carriers : characteristics and carrier collaboration model. *Transportmetrica A : Transport Science*, 10(4) :327–349.
- Hernández, S., Peeta, S., and Kalafatas, G. (2011). A less-than-truckload carrier collaboration planning problem under dynamic capacities. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 47(6) :933–946.
- Hernández, S., Unnikrishnan, A., and Awale, S. S. (2012). Centralized carrier collaboration multihub location problem for less-than-truckload industry : Hybrid hub-and-spoke network. *Transportation research record*, 2269(1) :20–28.
- Hiassat, A., Diabat, A., and Rahwan, I. (2017). A genetic algorithm approach for location-inventory-routing problem with perishable products. *Journal of manufacturing systems*, 42 :93–103.
- Hickman, J., Hassel, D., Joumard, R., Samaras, Z., and Sorenson, S. (1999). Methodology for calculating transport emissions and energy consumption, deliverable 22 for the project meet. *Transport Research Laboratory, European Comisión/DG VII, England*.
- Holland, J. H. et al. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems : an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT press.
- Hosseini, S., Morshedlou, N., Ivanov, D., Sarder, M., Barker, K., and Al Khaled, A. (2019). Resilient supplier selection and optimal order allocation under disruption risks. *International Journal of Production Economics*, 213 :124–137.
- Ivanov, D. (2020). ‘a blessing in disguise’ or ‘as if it wasn’t hard enough already’ : reciprocal and aggravate vulnerabilities in the supply chain. *International Journal of Production Research*, 58(11) :3252–3262.
- Ivanov, D. and Dolgui, A. (2020). Viability of intertwined supply networks : extending the supply chain resilience angles towards survivability. a position paper motivated by covid-19 outbreak. *International Journal of Production Research*, 58(10) :2904–2915.
- Ivanov, D. and Dolgui, A. (2021). A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of industry 4.0. *Production Planning & Control*, 32(9) :775–788.
- Ivanov, D., Dolgui, A., and Sokolov, B. (2019a). The impact of digital technology and industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics. *International Journal of Production Research*, 57(3) :829–846.

- Ivanov, D., Dolgui, A., and Sokolov, B. (2019b). Ripple effect in the supply chain : Definitions, frameworks and future research perspectives. In *Handbook of ripple effects in the supply chain*, pages 1–33. Springer.
- Ivanov, D., Pavlov, A., Dolgui, A., Pavlov, D., and Sokolov, B. (2016). Disruption-driven supply chain (re)-planning and performance impact assessment with consideration of pro-active and recovery policies. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 90 :7–24.
- Javid, A. A. and Azad, N. (2010). Incorporating location, routing and inventory decisions in supply chain network design. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 46(5) :582–597.
- Jouida, S. B., Krichen, S., and Klibi, W. (2017). Coalition-formation problem for sourcing contract design in supply networks. *European Journal of Operational Research*, 257(2) :539–558.
- Karakostas, P., Sifaleras, A., and Georgiadis, M. C. (2020). Adaptive variable neighborhood search solution methods for the fleet size and mix pollution location-inventory-routing problem. *Expert Systems with Applications*, page 113444.
- Karam, A., Reinau, K. H., and Østergaard, C. R. (2021). Horizontal collaboration in the freight transport sector : barrier and decision-making frameworks. *European Transport Research Review*, 13(1) :1–22.
- Kazemi, N., Abdul-Rashid, S. H., Ghazilla, R. A. R., Shekarian, E., and Zaroni, S. (2018). Economic order quantity models for items with imperfect quality and emission considerations. *International Journal of Systems Science : Operations & Logistics*, 5(2) :99–115.
- Kermanshah, A., Baroud, H., and Abkowitz, M. (2020). Cyber-physical technologies in freight operations and sustainability : A case study of smart gps technology in trucking. *Sustainable Cities and Society*, 55 :102017.
- Kiba-Janiak, M., Thompson, R., and Cheba, K. (2021). An assessment tool of the formulation and implementation a sustainable integrated passenger and freight transport strategies. an example of selected european and australian cities. *Sustainable Cities and Society*, 71 :102966.
- Klibi, W. and Martel, A. (2012a). Modeling approaches for the design of resilient supply networks under disruptions. *International Journal of Production Economics*, 135(2) :882–898.
- Klibi, W. and Martel, A. (2012b). Scenario-based supply chain network risk modeling. *European Journal of Operational Research*, 223(3) :644–658.
- Knörr, W. and Reuter, C. (2008). Ecotransit : Ecological transport information tool environmental, methodology and data. *Update*.
- Kungwalsong, K., Cheng, C.-Y., Yuangyai, C., and Janjarassuk, U. (2021). Two-stage stochastic program for supply chain network design under facility disruptions. *Sustainability*, 13(5) :2596.
- Kuyzu, G. (2017). Lane covering with partner bounds in collaborative truckload transportation procurement. *Computers & Operations Research*, 77 :32–43.

- Lafkihi, M., Pan, S., and Ballot, E. (2019). Freight transportation service procurement : A literature review and future research opportunities in omnichannel e-commerce. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 125 :348–365.
- Leitner, R., Meizer, F., Prochazka, M., and Sihm, W. (2011). Structural concepts for horizontal cooperation to increase efficiency in logistics. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 4(3) :332–337.
- Li, J., Cai, X., and Zeng, Y. (2016). Cost allocation for less-than-truckload collaboration among perishable product retailers. *OR spectrum*, 38(1) :81–117.
- Lin, C., Choy, K. L., Ho, G. T., and Ng, T. W. (2014). A genetic algorithm-based optimization model for supporting green transportation operations. *Expert Systems with Applications*, 41(7) :3284–3296.
- Liu, R., Jiang, Z., Fung, R. Y., Chen, F., and Liu, X. (2010a). Two-phase heuristic algorithms for full truckloads multi-depot capacitated vehicle routing problem in carrier collaboration. *Computers & operations research*, 37(5) :950–959.
- Liu, R., Jiang, Z., Liu, X., and Chen, F. (2010b). Task selection and routing problems in collaborative truckload transportation. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 46(6) :1071–1085.
- Lozano, S., Moreno, P., Adenso-Díaz, B., and Algaba, E. (2013). Cooperative game theory approach to allocating benefits of horizontal cooperation. *European Journal of Operational Research*, 229(2) :444–452.
- Ma, T.-Y., Morana, J., Gonzalez-Feliu, J., and Salanova Grau, J.-M. (2013). Design and scenario assessment for collaborative logistics and freight transport systems. *Design and Scenario Assessment for Collaborative Logistics and Freight Transport Systems*, pages 207–240.
- Mahmoudi, R., Shetab-Boushehri, S.-N., Hejazi, S. R., and Emrouznejad, A. (2019). Determining the relative importance of sustainability evaluation criteria of urban transportation network. *Sustainable Cities and Society*, 47 :101493.
- Makhloufi, R., Cattaruzza, D., Meunier, F., Absi, N., and Feillet, D. (2015). Simulation of mutualized urban logistics systems with real-time management. *Transportation Research Procedia*, 6 :365–376.
- Mari, S. I., Lee, Y. H., and Memon, M. S. (2014). Sustainable and resilient supply chain network design under disruption risks. *Sustainability*, 6(10) :6666–6686.
- Martin, M. and Tanguy, C. (2019). La mutualisation des activités logistiques : une application à la filière vitivinicole bourguignonne. *Logistique & Management*, 27(2) :72–87.
- Mashud, A. H. M., Wee, H.-M., Huang, C.-V., and Wu, J.-Z. (2020). Optimal replenishment policy for deteriorating products in a newsboy problem with multiple just-in-time deliveries. *Mathematics*, 8(11) :1981.
- Mehrjerdi, Y. Z. and Shafiee, M. (2021). A resilient and sustainable closed-loop supply chain using multiple sourcing and information sharing strategies. *Journal of Cleaner Production*, 289 :125141.
- Meng, Y., Liang, J., Cao, F., and He, Y. (2018). A new distance with derivative information for functional k-means clustering algorithm. *Information Sciences*, 463 :166–185.

- Mohammed, A. (2020). Towards ‘gresilient’ supply chain management : A quantitative study. *Resources, Conservation and Recycling*, 155 :104641.
- Mohammed, M. A., Abd Ghani, M. K., Hamed, R. I., Mostafa, S. A., Ibrahim, D. A., Jameel, H. K., and Alallah, A. H. (2017). Solving vehicle routing problem by using improved k-nearest neighbor algorithm for best solution. *Journal of Computational Science*, 21 :232–240.
- Molenbruch, Y., Braekers, K., and Caris, A. (2017). Benefits of horizontal cooperation in dial-a-ride services. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 107 :97–119.
- Montoya-Torres, J. R., Muñoz-Villamizar, A., and Vega-Mejía, C. A. (2016). On the impact of collaborative strategies for goods delivery in city logistics. *Production Planning & Control*, 27(6) :443–455.
- Moutaoukil, A., Derrouiche, R., and Neubert, G. (2013a). Modeling a pooling logistics strategy for agri-food smes. In *14th IFIP WG 5.5 work. conf. virtual enterp. PRO-VE*.
- Moutaoukil, A., Derrouiche, R., and Neubert, G. (2013b). Modélisation d’une stratégie de mutualisation logistique en intégrant les objectifs de développement durable pour des pme agroalimentaires. In *13e Congrès International de Génie Industriel (CIGI’13)*.
- Moutaoukil, A., Neubert, G., and Derrouiche, R. (2015). Urban freight distribution : The impact of delivery time on sustainability. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3) :2368–2373.
- Mrabti, N., Hamani, N., and Delahoche, L. (2020). The pooling of sustainable freight transport. *Journal of the Operational Research Society*, pages 1–16.
- Mrabti, N., Hamani, N., and Delahoche, L. (2021). A sustainable collaborative approach to the distribution network design problem with co2 emissions allocation. *Int. J. Shipp. Transp. Logist.*
- Muñoz-Villamizar, A., Quintero-Araújo, C. L., Montoya-Torres, J. R., and Faulin, J. (2019a). Short- and mid-term evaluation of the use of electric vehicles in urban freight transport collaborative networks : a case study. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 22(3) :229–252.
- Munoz-Villamizar, A., Santos, J., Montoya-Torres, J. R., and Velazquez-Martinez, J. C. (2020). Measuring environmental performance of urban freight transport systems : A case study. *Sustainable Cities and Society*, 52 :101844.
- Muñoz-Villamizar, A., Solano-Charris, E. L., Santos, J., and Montoya-Torres, J. R. (2019b). Measuring environmental impact of collaborative urban transport networks : A case study. In *International Conference on Computational Logistics*, pages 53–66. Springer.
- Muñoz-Villamizar, A., Velázquez-Martínez, J. C., Mejía-Argueta, C., and Gámez-Pérez, K. (2021). The impact of shipment consolidation strategies for green home delivery : a case study in a mexican retail company. *International Journal of Production Research*, pages 1–18.
- Muñoz-Villamizar, A., Quintero-Araújo, C. L., Montoya-Torres, J. R., and Faulin, J. (2019). Short- and mid-term evaluation of the use of electric vehicles in urban freight transport collaborative networks : a case study. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 22(3) :229–252.

- Nadarajah, S. and Bookbinder, J. H. (2013). Less-than-truckload carrier collaboration problem : modeling framework and solution approach. *Journal of heuristics*, 19(6) :917–942.
- Namdar, J., Torabi, S. A., Sahebjamnia, N., and Nilkanth Pradhan, N. (2021). Business continuity-inspired resilient supply chain network design. *International Journal of Production Research*, 59(5) :1331–1367.
- Nataraj, S., Ferone, D., Quintero-Araujo, C., Juan, A., and Festa, P. (2019). Consolidation centers in city logistics : A cooperative approach based on the location routing problem. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 10(3) :393–404.
- Negri, M., Cagno, E., Colicchia, C., and Sarkis, J. (2021). Integrating sustainability and resilience in the supply chain : A systematic literature review and a research agenda. *Business Strategy and the Environment*, 30(7) :2858–2886.
- Ouhader, H. and El Kyal, M. (2017). Combining facility location and routing decisions in sustainable urban freight distribution under horizontal collaboration : how can shippers be benefited? *Mathematical Problems in Engineering*, 2017.
- Ouhader, H. et al. (2020). Assessing the economic and environmental benefits of horizontal cooperation in delivery : Performance and scenario analysis. *Uncertain Supply Chain Management*, 8(2) :303–320.
- Özener, O. Ö., Ergun, Ö., and Savelsbergh, M. (2011). Lane-exchange mechanisms for truckload carrier collaboration. *Transportation Science*, 45(1) :1–17.
- Özener, O. Ö., Ergun, Ö., and Savelsbergh, M. (2013). Allocating cost of service to customers in inventory routing. *Operations Research*, 61(1) :112–125.
- Palšaitis, R. and Petraška, A. (2012). Heavyweight and oversized cargo transportation risk management. *Transport and Telecommunication Journal*, 13(1) :51–56.
- Pan, S. (2010). *Contribution à la définition et à l'évaluation de la mutualisation de chaînes logistiques pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> du transport : application au cas de la grande distribution*. PhD thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Pan, S., Ballot, E., and Fontane, F. (2013). The reduction of greenhouse gas emissions from freight transport by pooling supply chains. *International journal of production economics*, 143(1) :86–94.
- Pan, S., Ballot, E., Fontane, F., and Hakimi, D. (2014). Environmental and economic issues arising from the pooling of smes' supply chains : case study of the food industry in western france. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 26(1) :92–118.
- Pan, S., Trentesaux, D., Ballot, E., and Huang, G. Q. (2019). Horizontal collaborative transport : survey of solutions and practical implementation issues. *International Journal of Production Research*, 57(15-16) :5340–5361.
- Pérez-Bernabeu, E., Juan, A. A., Faulin, J., and Barrios, B. B. (2015). Horizontal cooperation in road transportation : a case illustrating savings in distances and greenhouse gas emissions. *International Transactions in Operational Research*, 22(3) :585–606.

- Qaiser, F. H., Ahmed, K., Sykora, M., Choudhary, A., and Simpson, M. (2017). Decision support systems for sustainable logistics : a review and bibliometric analysis. *Industrial Management & Data Systems*.
- Qin, X., Liu, X., and Tang, L. (2013). A two-stage stochastic mixed-integer program for the capacitated logistics fortification planning under accidental disruptions. *Computers & Industrial Engineering*, 65(4) :614–623.
- Quintero-Araujo, C. L., Gruler, A., and Juan, A. A. (2016). Quantifying potential benefits of horizontal cooperation in urban transportation under uncertainty : A simheuristic approach. In *Conference of the Spanish Association for Artificial Intelligence*, pages 280–289. Springer.
- Quintero-Araujo, C. L., Gruler, A., Juan, A. A., and Faulin, J. (2019). Using horizontal cooperation concepts in integrated routing and facility-location decisions. *International Transactions in Operational Research*, 26(2) :551–576.
- Rabbani, M., Farrokhi-Asl, H., and Asgarian, B. (2017). Solving a bi-objective location routing problem by a nsga-ii combined with clustering approach : application in waste collection problem. *Journal of Industrial Engineering International*, 13(1) :13–27.
- Rabbani, M., Foroozesh, N., Mousavi, S. M., and Farrokhi-Asl, H. (2019). Sustainable supplier selection by a new decision model based on interval-valued fuzzy sets and possibilistic statistical reference point systems under uncertainty. *International Journal of Systems Science : Operations & Logistics*, 6(2) :162–178.
- Rafie-Majd, Z., Pasandideh, S. H. R., and Naderi, B. (2018). Modelling and solving the integrated inventory-location-routing problem in a multi-period and multi-perishable product supply chain with uncertainty : Lagrangian relaxation algorithm. *Computers & chemical engineering*, 109 :9–22.
- Ruel, S. (2019). Freins à la mutualisation horizontale : enseignements d’une étude de cas dans le secteur agroalimentaire. *Logistique & Management*, 27(2) :119–131.
- Russo, S. M., Voegl, J., and Hirsch, P. (2021). A multi-method approach to design urban logistics hubs for cooperative use. *Sustainable Cities and Society*, 69 :102847.
- Saif-Eddine, A. S., El-Beheiry, M. M., and El-Kharbotly, A. K. (2019). An improved genetic algorithm for optimizing total supply chain cost in inventory location routing problem. *Ain Shams Engineering Journal*, 10(1) :63–76.
- Sanchez, M., Pradenas, L., Deschamps, J.-C., and Parada, V. (2016). Reducing the carbon footprint in a vehicle routing problem by pooling resources from different companies. *NETNOMICS : Economic Research and Electronic Networking*, 17(1) :29–45.
- Saragih, N. I., Bahagia, N., Syabri, I., et al. (2019). A heuristic method for location-inventory-routing problem in a three-echelon supply chain system. *Computers & Industrial Engineering*, 127 :875–886.
- Sayyadi, R. and Awasthi, A. (2018). A simulation-based optimisation approach for identifying key determinants for sustainable transportation planning. *International Journal of Systems Science : Operations & Logistics*, 5(2) :161–174.
- Scheibe, K. P. and Blackhurst, J. (2018). Supply chain disruption propagation : a systemic risk and normal accident theory perspective. *International Journal of Production Research*, 56(1-2) :43–59.

- Sever, D., Zhao, L., Dellaert, N., Demir, E., Van Woensel, T., and De Kok, T. (2018). The dynamic shortest path problem with time-dependent stochastic disruptions. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 92 :42–57.
- Sharma, A., Adhikary, A., and Borah, S. B. (2020). Covid-19’s impact on supply chain decisions : Strategic insights from nasdaq 100 firms using twitter data. *Journal of Business Research*, 117 :443–449.
- Soysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Haijema, R., and van der Vorst, J. G. (2018a). Modeling a green inventory routing problem for perishable products with horizontal collaboration. *Computers Operations Research*, 89 :168–182.
- Soysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Haijema, R., and van der Vorst, J. G. (2018b). Modeling a green inventory routing problem for perishable products with horizontal collaboration. *Computers & Operations Research*, 89 :168–182.
- Sprenger, R. and Mönch, L. (2014). A decision support system for cooperative transportation planning : Design, implementation, and performance assessment. *Expert Systems with Applications*, 41(11) :5125–5138.
- Stellingwerf, H., Kanellopoulos, A., Cruijssen, F., and Bloemhof, J. (2019). Fair gain allocation in eco-efficient vendor-managed inventory cooperation. *Journal of cleaner production*, 231 :746–755.
- Stellingwerf, H. M., Laporte, G., Cruijssen, F. C., Kanellopoulos, A., and Bloemhof, J. M. (2018). Quantifying the environmental and economic benefits of cooperation : A case study in temperature-controlled food logistics. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 65 :178–193.
- Strulak-Wójcikiewicz, R. and Wagner, N. (2021). Exploring opportunities of using the sharing economy in sustainable urban freight transport. *Sustainable Cities and Society*, 68 :102778.
- Tang, X., Lehuédé, F., and Péton, O. (2015). Location of distribution centers in a multi-period collaborative distribution network.
- Tang, X., Lehuédé, F., and Péton, O. (2016). Location of distribution centers in a multi-period collaborative distribution network. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 52 :293–300.
- Tassou, S., De-Lille, G., and Ge, Y. (2009). Food transport refrigeration—approaches to reduce energy consumption and environmental impacts of road transport. *Applied Thermal Engineering*, 29(8-9) :1467–1477.
- Tolooie, A., Maity, M., and Sinha, A. K. (2020). A two-stage stochastic mixed-integer program for reliable supply chain network design under uncertain disruptions and demand. *Computers & Industrial Engineering*, 148 :106722.
- Tordecilla, R. D., Juan, A. A., Montoya-Torres, J. R., Quintero-Araujo, C. L., and Panadero, J. (2021). Simulation-optimization methods for designing and assessing resilient supply chain networks under uncertainty scenarios : A review. *Simulation modelling practice and theory*, 106 :102166.
- Ubeda, S., Arcelus, F. J., and Faulin, J. (2011). Green logistics at eroski : A case study. *International Journal of Production Economics*, 131(1) :44–51.

- Vanovermeire, C. and Sörensen, K. (2014). Measuring and rewarding flexibility in collaborative distribution, including two-partner coalitions. *European Journal of Operational Research*, 239(1) :157–165.
- Vargas, A., Fuster, C., and Corne, D. (2020). Towards sustainable collaborative logistics using specialist planning algorithms and a gain-sharing business model : A uk case study. *Sustainability*, 12(16) :6627.
- Vaziri, S., Etebari, F., and Vahdani, B. (2019). Development and optimization of a horizontal carrier collaboration vehicle routing model with multi-commodity request allocation. *Journal of Cleaner Production*, 224 :492–505.
- Verdonck, L., Beullens, P., Caris, A., Ramaekers, K., and Janssens, G. K. (2016). Analysis of collaborative savings and cost allocation techniques for the cooperative carrier facility location problem. *Journal of the Operational Research Society*, 67(6) :853–871.
- Verdonck, L., Caris, A., Ramaekers, K., and Janssens, G. K. (2013). Collaborative logistics from the perspective of road transportation companies. *Transport Reviews*, 33(6) :700–719.
- Wang, X. and Kopfer, H. (2014). Collaborative transportation planning of less-than-truckload freight. *OR spectrum*, 36(2) :357–380.
- Wang, X. and Kopfer, H. (2015). Rolling horizon planning for a dynamic collaborative routing problem with full-truckload pickup and delivery requests. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 27(4) :509–533.
- Wang, X., Kopfer, H., and Gendreau, M. (2014). Operational transportation planning of freight forwarding companies in horizontal coalitions. *European Journal of Operational Research*, 237(3) :1133–1141.
- Wang, Y., Li, Q., Guan, X., Xu, M., Liu, Y., and Wang, H. (2021). Two-echelon collaborative multi-depot multi-period vehicle routing problem. *Expert Systems with Applications*, 167 :114201.
- Wang, Y., Ma, X., Li, Z., Liu, Y., Xu, M., and Wang, Y. (2017a). Profit distribution in collaborative multiple centers vehicle routing problem. *Journal of cleaner production*, 144 :203–219.
- Wang, Y., Ma, X., Liu, M., Gong, K., Liu, Y., Xu, M., and Wang, Y. (2017b). Cooperation and profit allocation in two-echelon logistics joint distribution network optimization. *Applied Soft Computing*, 56 :143–157.
- Wang, Y., Peng, S., Xu, C., Assogba, K., Wang, H., Xu, M., and Wang, Y. (2018a). Two-echelon logistics delivery and pickup network optimization based on integrated cooperation and transportation fleet sharing. *Expert Systems with Applications*, 113 :44–65.
- Wang, Y., Peng, S., Zhou, X., Mahmoudi, M., and Zhen, L. (2020a). Green logistics location-routing problem with eco-packages. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 143 :102118.
- Wang, Y., Zhang, J., Assogba, K., Liu, Y., Xu, M., and Wang, Y. (2018b). Collaboration and transportation resource sharing in multiple centers vehicle routing optimization with delivery and pickup. *Knowledge-Based Systems*, 160 :296–310.



- Wang, Y., Zhang, S., Assogba, K., Fan, J., Xu, M., and Wang, Y. (2018c). Economic and environmental evaluations in the two-echelon collaborative multiple centers vehicle routing optimization. *Journal of Cleaner Production*, 197 :443–461.
- Wang, Y., Zhang, S., Guan, X., Peng, S., Wang, H., Liu, Y., and Xu, M. (2020b). Collaborative multi-depot logistics network design with time window assignment. *Expert Systems with Applications*, 140 :112910.
- Weng, K. and Xu, Z.-h. (2014). Flow merging and hub route optimization in collaborative transportation. *Journal of Applied Mathematics*, 2014.
- Wick, C., Klumpp, M., and Kandel, C. (2011). Shapley value simulation for allocating ghg emission savings due to logistics pooling within ecr cooperations. In *Proceedings of the European Simulation and Modelling Conference*, pages 240–244.
- Wu, W., Zhou, W., Lin, Y., Xie, Y., and Jin, W. (2021a). A hybrid metaheuristic algorithm for location inventory routing problem with time windows and fuel consumption. *Expert Systems with Applications*, 166 :114034.
- Wu, W., Zhou, W., Lin, Y., Xie, Y., and Jin, W. (2021b). A hybrid metaheuristic algorithm for location inventory routing problem with time windows and fuel consumption. *Expert Systems with Applications*, 166 :114034.
- Xu, X., Pan, S., and Ballot, E. (2012). Allocation of transportation cost & co2 emission in pooled supply chains using cooperative game theory. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(6) :547–553.
- Yavari, M., Enjavi, H., and Geraeli, M. (2020). Demand management to cope with routes disruptions in location-inventory-routing problem for perishable products. *Research in Transportation Business & Management*, page 100552.
- Yavari, M. and Geraeli, M. (2019). Heuristic method for robust optimization model for green closed-loop supply chain network design of perishable goods. *Journal of Cleaner Production*, 226 :282–305.
- Yavari, M. and Zaker, H. (2019). An integrated two-layer network model for designing a resilient green-closed loop supply chain of perishable products under disruption. *Journal of Cleaner Production*, 230 :198–218.
- Yilmaz, O. and Savaseneril, S. (2012). Collaboration among small shippers in a transportation market. *European journal of operational research*, 218(2) :408–415.
- Zahiri, B., Suresh, N. C., and de Jong, J. (2020). Resilient hazardous-materials network design under uncertainty and perishability. *Computers & Industrial Engineering*, 143 :106401.
- Zahiri, B., Zhuang, J., and Mohammadi, M. (2017). Toward an integrated sustainable-resilient supply chain : A pharmaceutical case study. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 103 :109–142.
- Zhalechian, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B., and Mohammadi, M. (2016). Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 89 :182–214.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- Zhang, Y., Qi, M., Miao, L., and Liu, E. (2014). Hybrid metaheuristic solutions to inventory location routing problem. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 70 :305–323.

# Résumé

Dans cette thèse, nous étudions le problème de gestion intégrée des réseaux logistiques dans une perspective à la fois durable et résiliente. Dans un premier temps, nous réalisons une analyse systématique de la littérature existante sur la logistique collaborative. Dans un deuxième temps, un modèle intégré, combinant les décisions de localisation, d'inventaire et de routage avec des objectifs économiques et environnementaux, est proposé. Celui-ci est appliqué pour quantifier les avantages économiques et environnementaux de la collaboration logistique dans la planification intégrée des décisions. Dans un troisième temps, en raison de la NP-difficulté du problème étudié, une approche heuristique est proposée pour concevoir des réseaux logistiques collaboratifs et durables à deux échelons en minimisant le coût total, les émissions de  $CO_2$  et le risque d'accident lié au transport. Cette approche combine un algorithme modifié de Clustering  $K$ -means et un algorithme génétique. En guise de validation, des comparaisons avec la méthode exacte et d'autres approches sont fournies. Une étude de cas est également menée pour évaluer l'application de l'approche proposée dans le monde réel. En outre, nous effectuons une analyse de sensibilité sur les paramètres d'entrée afin de fournir des informations managériales. Enfin, un modèle stochastique en deux étapes est développé pour modéliser le problème de conception intégrée en tenant compte de l'incertitude de la demande et des perturbations épidémiques. Des modèles alternatifs de conception, comprenant la stratégie de collaboration logistique et d'augmentation des capacités, sont introduits et les programmes stochastiques correspondants sont résolus à l'aide de la méthode d'approximation de la moyenne de l'échantillon. Des expérimentations sont menées et une évaluation des différents modèles, en termes des coûts, des émissions, du risque d'accident et du niveau de service attendus, est réalisée pour choisir la configuration appropriée du point de vue de la durabilité et de la résilience.

**Mots clés** : Durabilité ; Résilience ; Réseaux logistiques ; Programmation linéaire mixte en nombres entiers ; Heuristique ; Programmation stochastique ; Incertitude ; Perturbation.

# Abstract

In this thesis, we study the integrated management problem of logistics networks in a sustainable and resilient perspective. Firstly, we conduct a systematic literature review of existing literature on collaborative logistics. Secondly, an integrated model combining location, inventory and routing decisions with economic and environmental objectives is proposed. This model is applied to quantify the economic and environmental benefits of logistics collaboration in integrated decision planning. Thirdly, due to the NP-hard of the studied problem, a heuristic approach is proposed to design two-echelon collaborative and sustainable logistics networks by minimizing the total cost, the  $CO_2$  emissions and the accident risk of transportation. This approach combines a modified Clustering  $K$ -means algorithm and a genetic algorithm. Comparisons with the exact method and other approaches are provided to validate this approach. Additionally, a case study is conducted to evaluate the applicability of the proposed approach in the real world. Moreover, a sensitivity analysis on the input parameters is performed to provide managerial insights. Finally, a two-stage stochastic model is developed to model the integrated design problem under demand uncertainty and epidemic disruptions. Alternative design models, including the logistics collaboration and capacity augmentation strategy, are introduced and the corresponding stochastic programs are solved using the sample average approximation method. Experimentations are conducted and an evaluation of the different designs, in terms of expected costs, emissions, accident risk and level of service, is performed to select the appropriate configuration from a sustainability and resilience perspective.

**Keywords** : Sustainability ; Resilience ; Logistic networks ; Mixed integer linear programming ; Heuristics ; Stochastic programming ; Uncertainty ; Disruption.