



**HAL**  
open science

# Contribution à l'optimisation de la distribution collaborative avec partage de gains sous critères de durabilité

Nassim Mrabti

► **To cite this version:**

Nassim Mrabti. Contribution à l'optimisation de la distribution collaborative avec partage de gains sous critères de durabilité. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université de Picardie Jules Verne, 2021. Français. NNT : 2021AMIE0072 . tel-03945238

**HAL Id: tel-03945238**

**<https://theses.hal.science/tel-03945238>**

Submitted on 18 Jan 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.



# Thèse de Doctorat

*Mention Informatique sans spécialité*

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

de l'Université de Picardie Jules Verne

par

**Nassim MRABTI**

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

***Contribution à l'optimisation de la distribution collaborative  
avec partage de gains sous critères de durabilité***

Soutenue le 19 Novembre 2021, après avis des rapporteurs, devant le jury d'examen :

Mme Feng CHU	Professeur	Université d'Evry	Présidente
Mme Marie-Ange MANIER	MCF-HDR	Université de Technologie de Belfort- Montbéliard	Rapporteur
M. Lhassane IDOUMGHAR	Professeur	Université de Haute Alsace	Rapporteur
M. Hamid ALLAOUI	Professeur	Université d'Artois	Examineur
M. Laurent DELAHOUCHE	MCF-HDR	Université de Picardie Jules Verne	Directeur de thèse
Mme Nadia HAMANI	MCF	Université de Picardie Jules Verne	Encadrante de thèse



# Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse Monsieur Laurent DELAHOUCHE, Maître de Conférences - HDR à l'Université de Picardie Jules Verne, pour sa disponibilité, son soutien constant ainsi que la liberté intellectuelle et la confiance qu'il m'a accordé pour mener ce travail de recherche.

Mes plus respectueux remerciements s'adressent à mon encadrante Madame Nadia HAMANI, Maître de Conférences à l'Université de Picardie Jules Verne, qui m'a accompagné tout au long de cette thèse et qui a partagé avec moi ses brillantes intuitions. Je tiens également à la remercier pour sa gentillesse, sa disponibilité permanente et pour les nombreux encouragements qu'elle m'a prodigués.

J'adresse tous mes sincères remerciements à Madame Marie-Ange MANIER, Maître de Conférences - HDR à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, ainsi qu'à Monsieur Lhassane IDOUMGHAR, Professeur à l'Université de Haute Alsace, de l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être rapporteurs de cette thèse.

J'exprime ma gratitude à Madame Feng CHU, Professeur à l'Université d'Evry et à Monsieur Hamid ALLAOUI, Professeur à l'Université d'Artois, qui ont bien voulu être examinateurs.

# Sommaire

<b>Remerciements</b> .....	ii
<b>Sommaire</b> .....	iii
<b>Liste des tableaux</b> .....	ix
<b>Liste des figures</b> .....	xii
<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Partie 1</b> .....	7
<b>Chapitre 1 : Contexte et problématique</b> .....	8
1. Introduction .....	8
2. Concepts et définitions .....	8
3. La chaîne logistique .....	9
3.1. Définition de la chaîne logistique .....	9
3.2. Types de chaînes logistiques .....	10
3.3. Réseau de chaînes logistiques .....	12
4. Gestion de la chaîne logistique (Supply Chain Management) .....	13
4.1. Définition de la Supply Chain Management .....	13
4.2. Défis et problèmes rencontrés dans la SCM .....	15
5. La distribution de marchandises et le développement durable .....	17
5.1. Le développement durable .....	18
5.1.1. Catégorisation selon le Triple-P .....	19
5.1.2. Catégorisation selon les dimensions de la durabilité .....	20
5.1.3. Indicateurs utilisés pour évaluer la durabilité .....	21
5.1.4. Interaction entre les trois dimensions de durabilité .....	23
5.2. Efficacité du transport en terme de durabilité .....	23

6. Pourquoi chercher une nouvelle organisation logistique ? .....	25
7. La logistique collaborative .....	26
7.1. Définition de la collaboration .....	26
7.2. Les différentes formes de collaboration .....	27
7.2.1. La collaboration verticale .....	27
7.2.2. La collaboration horizontale .....	29
8. Les pratiques utilisées dans le cadre de la collaboration horizontale .....	30
8.1. Mutualisation au niveau du transport .....	31
8.2. Mutualisation du transport et d'entreposage.....	32
8.2.1. Réseau de distribution mutualisé sans tournées de véhicules.....	32
8.2.2. Hub-and-spoke.....	33
8.2.3. Multi-pick et mutualisation des hubs.....	34
8.2.4. Mutualisation des hubs et Multi-drop.....	34
8.2.5. Multi-pick, multi-drop et mutualisation d'entrepôt.....	35
9. Obstacles de la mise en œuvre de la mutualisation .....	35
10. Conclusion.....	36
<b>Chapitre 2 : État de l'art</b> .....	<b>37</b>
1. Introduction .....	37
2. Etat de l'art sur la collaboration horizontale .....	37
2.1. Niveau stratégique .....	38
2.1.1. Conception des réseaux de distribution collaboratifs .....	38
2.1.2. Sélection des partenaires.....	44
2.2. Niveau de décision tactique .....	46
2.2.1. Partage des économies de la collaboration .....	46
2.2.2. Décisions relatives au stockage .....	51
2.3. Niveau opérationnel.....	51
2.3.1. Planification du transport collaboratif .....	51
2.3.2. Mécanisme d'échange des demandes .....	55
2.4. Etudes empiriques.....	56
2.5. Les revues de littérature.....	62
2.6. Analyse de la littérature .....	62
3. Projets industriels de collaboration horizontale .....	65
4. Etat de l'art sur le problème de conception des réseaux de distribution .....	69

5. Conclusion.....	75
<b>Chapitre 3. Formulation des indicateurs de durabilité .....</b>	<b>76</b>
1. Introduction .....	76
2. Choix des indicateurs .....	76
3. Formulation des indicateurs.....	78
3.1. Formulation des indicateurs économiques.....	78
3.1.1. Formulation du coût de transport.....	79
3.1.2. Formulation du coût de stockage .....	80
3.1.3. Formulation du coût de pénalité .....	81
3.1.4. Formulation du coût d'ouverture d'un entrepôt.....	82
3.1.5. Formulation des coûts de manutention .....	82
3.1.6. Formulation du taux de remplissage des véhicules.....	83
3.2. Formulation des indicateurs environnementaux .....	84
3.2.1. Emissions de CO <sub>2</sub> générées par les véhicules.....	84
3.2.1.1. Emissions de CO <sub>2</sub> dues au transport.....	84
3.2.1.2. Emissions de CO <sub>2</sub> générées par l'amortissement des véhicules.....	89
3.2.2. Les émissions dues aux bâtiments logistiques .....	93
3.2.2.1. Les émissions de CO <sub>2</sub> dues à la construction des entrepôts.....	94
3.2.2.2. Les émissions dues au fonctionnement des entrepôts.....	95
3.3. Formulation des indicateurs sociaux/sociétaux .....	95
3.3.1. Formulation du niveau de bruit (les émissions sonores).....	95
3.3.1.1. Niveau de bruit dans les rues en « U ».....	96
3.3.1.2. Niveau de bruit dans les rues en tissu ouvert.....	99
3.3.2. Estimation du risque accident .....	101
3.3.3. Taux d'embauche.....	104
4. Conclusion.....	106
<b>Partie 2.....</b>	<b>107</b>
<b>Chapitre 4. Conception d'un réseau de distribution collaboratif et durable à deux échelons.....</b>	<b>108</b>
1. Introduction .....	108
2. Formulation du problème .....	108
2.1. Fonction objectif économique .....	111

2.2. Fonction objectif environnemental .....	112
2.3. Les contraintes prises en compte .....	113
3. Etude de cas .....	115
3.1. Résolution mono-objectif .....	118
3.2. Analyse de sensibilité .....	120
3.2.1. Optimisation multi-objectif.....	120
3.2.2. Réduction des frais de pénalité par la méthode d'agrégation complète.....	123
3.2.3. Impact de la variation des périodes autorisées pour le retard de livraison sur la performance de la mutualisation .....	125
3.2.4. Impact de la taille de la collaboration .....	128
3.2.5. Impact du nombre d'entrepôts ouverts sur les coûts et les émissions de CO <sub>2</sub> .....	131
4. Conclusion .....	132
<b>Chapitre 5. Partage de gains par récompense de flexibilité et de durabilité .....</b>	<b>134</b>
1. Introduction .....	134
2. Typologie des méthodes d'allocation .....	134
2.1. Les méthodes classiques .....	134
2.2. Les méthodes basées sur la théorie des jeux coopératifs.....	135
3. Les propriétés des méthodes d'allocation de gains .....	136
4. Facteurs d'amélioration des résultats de la collaboration horizontale.....	139
4.1. Importance de la flexibilité.....	140
4.2. Importance de la durabilité .....	141
5. Proposition d'une approche de partage de gains avec prise en compte de la durabilité et de la flexibilité .....	142
5.1. Détermination du Taux de Durabilité et de Flexibilité (TDF).....	142
5.2. Les approches d'allocation .....	146
5.2.1. Approche d'allocation basée sur les méthodes classiques.....	146
5.2.2. Approche d'allocation basée sur la théorie des jeux coopératifs.....	147
6. Etude de cas .....	148
7. Analyse de sensibilité .....	151
8. Conclusion.....	153
<b>Partie 3.....</b>	<b>154</b>

<b>Chapitre 6. Conception d'un réseau de distribution collaboratif et durable multi-échelons.....</b>	<b>155</b>
1. Introduction .....	155
2. Positionnement par rapport à la littérature .....	155
3. Formulation du problème .....	156
3.1. Description du réseau de distribution étudié .....	156
3.2. Indicateurs de durabilité .....	157
3.2.1. Indicateurs économiques.....	157
3.2.2. Indicateurs environnementaux .....	159
3.2.3. Indicateurs sociaux/sociétaux .....	159
3.3. Modèles mathématiques .....	160
3.3.1. Fonction multi-objectif .....	161
3.3.2. Premier scénario collaboratif .....	161
3.3.3. Deuxième scénario collaboratif .....	165
4. Etude de cas .....	165
4.1. Optimisation mono-objectif.....	167
4.2. Résolution multi-objectif.....	174
4.3. Analyse de sensibilité .....	177
4.3.1. Impact de la flexibilité des délais de livraison sur la performance de la collaboration.....	177
4.3.2. Impact du nombre des centres de distribution ouverts sur la performance de la collaboration .....	178
4.3.3. Impact du nombre de véhicules disponibles sur la durabilité.....	179
4.3.4. Impact du nombre de partenaires et de détaillants sur la performance de la collaboration.....	180
5. Conclusion.....	182
<b>Chapitre 7. Optimisation des réseaux de distribution collaboratifs par les méta-heuristiques.....</b>	<b>183</b>
1. Introduction .....	183
2. Revue de la littérature.....	183
2.1. L'optimisation mono-objectif.....	183
2.2. L'optimisation multi-objectif.....	184

3. Approches méta-heuristiques .....	185
3.1. L'algorithme génétique.....	185
3.2. Le recuit simulé .....	189
3.3. Le NSGA-II.....	190
4. Résultats numériques.....	191
4.1. Codage et choix des paramètres .....	193
4.1.1. Le codage .....	193
4.1.2. Le choix des paramètres des algorithmes .....	194
4.2. Résolution mono-objectif .....	195
4.2.1. Comparaison entre les scénarios .....	195
4.2.2. Comparaison entre les algorithmes .....	197
4.3. Résolution multi-objectif.....	202
5. Conclusion.....	205
<b>Conclusion et perspectives.....</b>	<b>206</b>
<b>Annexe.....</b>	<b>209</b>
<b>Références.....</b>	<b>212</b>
<b>Références Web .....</b>	<b>232</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>233</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>233</b>

# Liste des tableaux

Tableau 1. Définitions de la chaîne logistique .....	10
Tableau 2. Définitions de la Supply Chain Management.....	14
Tableau 3. Défis et problèmes rencontrés dans la SCM .....	16
Tableau 4. Classification des indicateurs de durabilité selon le projet PROPOLIS (Lautso et al., 2003).....	22
Tableau 5. Indicateurs de durabilité (Simongáti, 2010).....	22
Tableau 6. Récapitulatif des études traitant le problème de conception des réseaux de distribution .....	44
Tableau 7. Récapitulatif des études traitant le problème de sélection des partenaires.....	46
Tableau 8. Récapitulatif des études traitant le problème de partage des gains de la collaboration .....	50
Tableau 9. Récapitulatif des approches utilisées pour l'allocation des avantages de la collaboration.....	50
Tableau 10. Récapitulatif des études traitant le problème de partage des entrepôts .....	51
Tableau 11. Récapitulatif des études traitant le problème de la planification du transport .....	55
Tableau 12. Récapitulatif des études traitant le problème d'échange des demandes.....	56
Tableau 13. Récapitulatif des études empiriques dans le cadre de la collaboration horizontale .....	61
Tableau 14. Récapitulatif des projets industriels en collaboration horizontale.....	68
Tableau 15. Liste des abréviations .....	72
Tableau 16. Tableau récapitulatif de l'analyse de la littérature du DNDP .....	74
Tableau 17. Liste des indicateurs pris en compte.....	78
Tableau 18. Paramètres utilisés pour modéliser le coût de transport .....	79
Tableau 19. Paramètres utilisés pour modéliser le coût de stockage .....	81

Tableau 20. Paramètres utilisés pour modéliser le coût de pénalité.....	81
Tableau 21. Paramètres utilisés pour modéliser le coût d'ouverture .....	82
Tableau 22. Paramètres utilisés pour modéliser le coût de manutention .....	83
Tableau 23. Paramètres utilisés pour modéliser les émissions de CO <sub>2</sub> .....	86
Tableau 24. Valeurs de la constante et les coefficients pour le taux d'émission d'un véhicule qui circule à vide .....	86
Tableau 25. Valeurs de la constante et des coefficients du facteur de correction de charge pour les PTAC (tonnes) ∈ [3.5 ; 40].....	86
Tableau 26. Facteur de correction et taux d'émission des différentes catégories de PTAC pour une vitesse moyenne égale à 80 km/h .....	88
Tableau 27. Constitution des véhicules et émissions de CO <sub>2</sub> par tonnes de chaque matériau (ADEME, 2010).....	89
Tableau 28. Facteurs d'émission de la fabrication des véhicules en fonction de leur classe de PTAC (OEET, 2012).....	90
Tableau 29. Durée de vie moyenne des véhicules en km en fonction de la classe de PTAC (ADEME, 2010).....	91
Tableau 30. Comparaison entre les émissions de fabrication calculées et celles issues des statistiques .....	92
Tableau 31. Paramètres utilisés pour modéliser les émissions de CO <sub>2</sub> dues aux entrepôts .....	93
Tableau 32. Emissions dues à la construction des entrepôts.....	94
Tableau 33. Paramètres utilisés pour la formulation du niveau de bruit.....	96
Tableau 34. Valeurs de coefficient d'équivalence en fonction des différents pourcentages de rampe.....	98
Tableau 35. Valeurs de l'équivalence acoustique (E) en fonction du type de voie et du degré de rampe.....	100
Tableau 36. Données statistiques des accidents routiers générés par un véhicule PL .....	104
Tableau 37. Les paramètres utilisés .....	110
Tableau 38. Distances entre les fournisseurs, les entrepôts et les centres de distribution .....	116
Tableau 39. Nombre de palettes transportées pour les principaux types de véhicules .....	117
Tableau 40. Nombre de périodes autorisées pour le retard de livraison .....	117
Tableau 41. Les capacités et les surfaces des différents entrepôts.....	117
Tableau 42. Autres données utilisées .....	118
Tableau 43. Résultats des trois scénarios Sc1, Sc2 et Sc3 .....	119

Tableau 44. Instances traitées en variant le nombre de périodes autorisées pour le retard de livraison.....	125
Tableau 45. Résultats des différentes instances .....	130
Tableau 46. Classification des approches selon les propriétés.....	139
Tableau 47. Méthode de décomposition .....	144
Tableau 48. Exemple de détermination des coefficients de pondération .....	145
Tableau 49. Les avantages et les limites des approches utilisées.....	150
Tableau 50. Indicateurs de durabilité évalués .....	157
Tableau 51. Paramètres utilisés pour la formulation des indicateurs économiques.....	158
Tableau 52. Paramètres utilisés pour la formulation des indicateurs environnementaux .....	159
Tableau 53. Variables de décision utilisées et indicateurs évalués .....	161
Tableau 54. Localisation des différents nœuds .....	166
Tableau 55. Nombre de semaines autorisées pour le retard de livraison .....	166
Tableau 56. Nombre d'employés nécessaires pour manipuler 100 palettes en fonction des types et des emplacements des hubs.....	167
Tableau 57. Autres données .....	167
Tableau 58. Résultats de l'optimisation mono-objectif exacte .....	168
Tableau 59. Capacités des hubs dans les trois scénarios.....	171
Tableau 60. Les meilleures solutions multi-objectifs sélectionnées .....	177
Tableau 61. Nombre de périodes accordées pour une livraison tardive de chaque produit... ..	178
Tableau 62. Localisation des nœuds du réseau de distribution .....	192
Tableau 63. Instances analysées.....	193
Tableau 64. Niveaux possibles pour les paramètres des algorithmes proposés.....	194
Tableau 65. Paramétrage de l'algorithme génétique et du recuit simulé .....	195
Tableau 66. Coûts, émissions de CO <sub>2</sub> et taux d'embauche et gap par rapport aux résultats obtenus par CPLEX.....	198
Tableau 67. Comparaison des solutions sélectionnées par la méthode $\epsilon$ -Contrainte et le NSGA-II (I2) .....	204
Tableau 68. Comparaison des solutions sélectionnées de NSGA-II par rapport aux solutions de AG (I15) .....	205

# Liste des figures

Figure 1. Organisation de la thèse .....	6
Figure 2. Les différents flux de la chaîne logistique .....	9
Figure 3. Missions de la logistique.....	9
Figure 4. Chaîne logistique directe .....	11
Figure 5. Chaîne logistique étendue .....	11
Figure 6. Chaîne logistique ultime .....	12
Figure 7. Exemple de structure d'un réseau de chaînes logistiques (Lambert & Cooper, 2000) .....	13
Figure 8. Equivalence entre le développement durable et le Triple -P .....	19
Figure 9. Les types d'émissions de GES dégagées par le transport.....	24
Figure 10. Consommation énergétique par secteur en 2019 (Rapport sur l'état de l'environnement, 2021) .....	24
Figure 11. Répartition des émissions de CO <sub>2</sub> par secteur (Rapport sur l'état de l'environnement, 2021).....	25
Figure 12. Répartition des émissions de CO <sub>2</sub> par mode de transport.....	25
Figure 13. Résumé des typologies de collaboration.....	30
Figure 14. Le multi-pick.....	31
Figure 15. Le multi-drop .....	31
Figure 16. N-fournisseurs/M-clients .....	32
Figure 17. Réseau de distribution mutualisé à deux échelons.....	32
Figure 18. Réseau de distribution mutualisé à trois échelons .....	33
Figure 19. Réseau collaboratif en hub-and-spoke .....	34
Figure 20. Multi-pick et mutualisation des hubs.....	34
Figure 21. Mutualisation des hubs et Multi-drop.....	35

Figure 22. Multi-pick, multi-drop et mutualisation d'entrepôt (2 échelons) .....	35
Figure 23. Multi-pick, multi-drop et mutualisation d'entrepôt (3 échelons) .....	35
Figure 24. Problèmes étudiés dans le cadre de la collaboration horizontale.....	37
Figure 25. Réseau de distribution avant et après collaboration.....	38
Figure 26. Répartition des études selon les problèmes traités et les niveaux de décision .....	63
Figure 27. Evolution des études selon les années de publications .....	63
Figure 28. Répartition des études traitant la conception des réseaux de distribution selon les aspects de la durabilité .....	64
Figure 29. Répartition des études selon la répartition des coûts et émissions de CO <sub>2</sub> .....	64
Figure 30. Répartition des études portant sur le problème de la planification du transport selon les dimensions de la durabilité .....	65
Figure 31. Modélisation de l'économie d'échelle par les facteurs de réduction .....	72
Figure 32. Réseau de distribution mutualisé O-H-D.....	76
Figure 33. Cartographie d'un entrepôt mutualisé (Makaci et al., 2017).....	77
Figure 34. Taux d'émissions E <sub>o</sub> en fonction de la vitesse de circulation pour les PTAC (tonnes) ∈ [3.5 ; 40].....	87
Figure 35. Taux d'émissions E <sub>q</sub> en fonction de la vitesse de circulation pour les PTAC (tonnes) ∈ [3.5 ; 40].....	87
Figure 36. Emissions de fabrication du véhicule en fonction de son poids à vide.....	91
Figure 37. Durée de vie (km) en fonction des PTAC.....	92
Figure 38. Rue en "U" .....	97
Figure 39. Exemple d'une rue en "U" .....	99
Figure 40. Récepteur qui perçoit le niveau sonore à un angle de 180° .....	100
Figure 41. Exemple des voies en tissu ouvert .....	101
Figure 42. Le réseau de distribution étudié .....	111
Figure 43. Composition de la fonction objectif économique .....	111
Figure 44. Composition de la fonction objectif environnemental.....	112
Figure 45. Ensemble de nœuds sélectionnés .....	115
Figure 46. Réseau de distribution des deux scénarios Sc2 et Sc3.....	118
Figure 47. Frontière Pareto dans le cas général .....	121
Figure 48. Frontière Pareto entre les coûts logistiques (€) et les émissions de CO <sub>2</sub> (g).....	122
Figure 49. Le risque d'accident et le niveau de bruit correspondant aux solutions frontière Pareto.....	123

Figure 50. Variation du coût de pénalité et des marges au niveau des coûts et des émissions de CO <sub>2</sub> en fonction de $\alpha$ .....	124
Figure 51. Variation des marges au niveau du risque accident et du bruit en fonction de $\alpha$ .	124
Figure 52. Coûts logistiques et émissions de CO <sub>2</sub> en fonction du nombre de périodes autorisées pour le retard de livraison.....	126
Figure 53. Risque accident et niveau de bruit en fonction du nombre de périodes autorisées pour le retard de livraison.....	127
Figure 54. Nombre de véhicules/déplacements utilisés pour satisfaire les demandes en fonction des différentes instances.....	127
Figure 55. Temps de résolution (en minutes).....	128
Figure 56. Variation des taux de réduction dans les quatre scénarios.....	129
Figure 57. Emissions de CO <sub>2</sub> et coût de transport par rapport au nombre d'entrepôts mutualisés (Pan, 2010) .....	131
Figure 58. Emissions de CO <sub>2</sub> dues aux véhicules et coût du transport en fonction du nombre des entrepôts ouverts .....	131
Figure 59. Emissions de CO <sub>2</sub> et coût logistique en fonction du nombre d'entrepôts ouverts	132
Figure 60. Impact de la flexibilité sur les résultats de la collaboration horizontale.....	141
Figure 61. Indicateurs pris en compte lors du partage des coûts et des émissions de CO <sub>2</sub> ....	142
Figure 62. Détermination des coefficients de pondération .....	144
Figure 63. Résultats du partage des coûts .....	149
Figure 64. Résultats du partage des émissions de CO <sub>2</sub> .....	149
Figure 65. Résultats de l'allocation des coûts en considérant seulement la durabilité ( $a_D=1$ ; $a_F=0$ ).....	151
Figure 66. Résultats de l'allocation des coûts en considérant seulement la flexibilité ( $a_D=0$ ; $a_F=1$ ).....	151
Figure 67. Résultats de l'allocation des émissions de CO <sub>2</sub> en considérant seulement la durabilité ( $a_D=1$ ; $a_F=0$ ).....	152
Figure 68. Résultats de l'allocation des émissions de CO <sub>2</sub> en considérant seulement la flexibilité ( $a_D=0$ ; $a_F=1$ ).....	152
Figure 69. Variation des coûts et des émissions de CO <sub>2</sub> en fonction de la flexibilité du partenaire F2.....	153
Figure 70. Constitution du réseau de distribution étudié .....	157
Figure 71. Configuration du premier scénario collaboratif.....	161

Figure 72. Configuration du deuxième scénario collaboratif.....	165
Figure 73. Réseau de distribution étudié.....	166
Figure 74. Taux d'amélioration au niveau des coûts, des émissions et du taux d'embauche	169
Figure 75. Nombre total de véhicules utilisés .....	170
Figure 76. Nombre de véhicules utilisés dans les scénarios collaboratifs .....	170
Figure 77. Configuration des réseaux de distribution obtenus (Sc0 et Sc1) .....	172
Figure 78. Configuration des réseaux de distribution obtenus (Sc0 et Sc2) .....	173
Figure 79. Compromis entre les coûts, les émissions de CO <sub>2</sub> et le taux d'embauche (Sc1)..	175
Figure 80. Compromis entre les coûts, les émissions de CO <sub>2</sub> et le taux d'embauche (Sc2) .	175
Figure 81. Compromis entre les coûts et le taux d'embauche (Sc1).....	176
Figure 82. Compromis entre les coûts et le taux d'embauche (Sc2).....	176
Figure 83. Impact de la flexibilité du nombre de périodes sur les coûts et les émissions de CO <sub>2</sub> (Sc2). .....	178
Figure 84. Variation des coûts et des émissions de CO <sub>2</sub> en fonction du nombre de centres de distribution ouverts.....	179
Figure 85. Variation des coûts et des émissions de CO <sub>2</sub> en fonction du nombre de véhicules disponibles.....	180
Figure 86. Variation du taux d'embauche en fonction du nombre des véhicules disponibles	180
Figure 87. Gains obtenus en variant le nombre de partenaires .....	181
Figure 88. Gains obtenus en variant le nombre de détaillants .....	181
Figure 89. Organigramme et pseudo-code de l'algorithme génétique .....	186
Figure 90. Les différentes techniques de croisement .....	188
Figure 91. Les différentes techniques de mutation .....	188
Figure 92. Organigramme et pseudo-code de l'algorithme du recuit simulé.....	190
Figure 93. Principe de l'algorithme NSGA-II.....	191
Figure 94. Les différents nœuds choisis pour l'analyse des performances des algorithmes..	192
Figure 95. Le codage proposé .....	194
Figure 96. Variation des coûts en fonction de la taille de populations (Instance I2).....	195
Figure 97. Les coûts des scénarios collaboratifs Sc1_eco et Sc2_eco par rapport au scénario non-collaboratif Sc0_eco.....	196
Figure 98. Les émissions de CO <sub>2</sub> des scénarios collaboratifs Sc1_env et Sc2_env par rapport au scénario non-collaboratif Sc0_env .....	196

Figure 99. Taux d'embauche des scénarios collaboratifs Sc1_soc et Sc2_soc par rapport au scénario non-collaboratif Sc0_soc .....	197
Figure 100. Temps de résolution (Exacte, AG et SA) .....	197
Figure 101. Coûts obtenus pour les différentes instances (Sc1_eco et Sc2_eco) .....	199
Figure 102. Emissions de CO <sub>2</sub> obtenues pour les différentes instances (Sc1_env et Sc2_env) .....	199
Figure 103. Taux d'embauche obtenus pour les différentes instances (Sc1_soc et Sc2_soc) .....	200
Figure 104. Niveau de bruit (Sc1_eco et Sc2_eco) .....	200
Figure 105. Distance et taux de réduction du risque accident par rapport à 10 <sup>6</sup> km (Sc1_eco et Sc2_eco) .....	201
Figure 106. Distance et taux de réduction du risque accident par rapport à 10 <sup>6</sup> km (Sc1_env et Sc2_env) .....	201
Figure 107. Distance et taux de réduction du risque accident par rapport à 10 <sup>6</sup> km (Sc1_soc et Sc2_soc) .....	201
Figure 108. Réseau de distribution obtenu par l'AG (Sc2_eco) .....	202
Figure 109. 3D-front de Pareto (Sc1 : instance I2) .....	203
Figure 110. 3D-front de Pareto (Sc2 : instance I2) .....	203
Figure 111. 3D-front de Pareto (Sc1 : instance I15) .....	204
Figure 112. 3D-front de Pareto (Sc2 : Instance I15) .....	204

# Introduction générale

La fonction de distribution de marchandises est une fonction importante pour toute entreprise, et il est de plus en plus reconnu qu'elle joue un rôle stratégique dans l'obtention d'un avantage concurrentiel. Outre les coûts, les préoccupations environnementales, la sensibilisation des clients et la pression juridique ont suscité un grand intérêt pour la conception des réseaux de distribution durables. En effet, il est désormais nécessaire de comprendre comment la performance d'une organisation en matière de durabilité s'équilibre avec les propriétés concurrentielles. Par ailleurs, le COVID-19 a eu de graves conséquences économiques dans le monde entier, ce qui a entraîné des changements drastiques dans la façon dont les entreprises agissent et les consommateurs se comportent. Certaines entreprises, fragiles financièrement, ont subi un impact significatif à cause de plusieurs restrictions sanitaires liées au COVID-19, notamment sur la distribution de marchandises. Il est difficile pour ces entreprises de faire face seules à ces défis, d'où l'importance de la collaboration horizontale. Dans ce sens, dans ce manuscrit, nous montrerons que la conception des réseaux de distribution mutualisés est une solution performante pour trouver un bon compromis entre les objectifs économiques, environnementaux et sociaux/sociétaux.

## Questions de recherche

Parmi les nombreuses questions liées à la distribution durable des marchandises, nous sommes convaincus que l'optimisation des réseaux de distribution avec des critères de durabilité mérite davantage d'attention. Certains auteurs mentionnent en effet le manque des travaux de recherche traitant le problème de conception des réseaux de distribution dans un contexte collaboratif (Ouhader et El Kyal, 2020 ; Pan et al., 2019 ; Aloui et al., 2021b). Nous avons donc pour objectif de contribuer à la recherche des nouveaux modèles pour la conception des réseaux de distribution collaboratifs en tenant compte des questions de recherche ci-dessous.

<p><u>Question de recherche 1</u> : Comment définir et évaluer l'efficacité de la distribution de marchandises en terme de durabilité ?</p>
---

Définir les notions liées à la logistique et à la distribution de marchandises ainsi qu'au développement durable est un prérequis dans notre recherche. Contrairement à la performance traditionnelle de la distribution de marchandises qui est évaluée sur la base des critères économiques tels que le coût, le niveau de service et le délai, la durabilité dans ce manuscrit exige une vision plus large de la performance de la distribution de marchandises. En effet, l'impact de la distribution de marchandises sur la durabilité et les indicateurs d'évaluation sont représentés, dans notre recherche, selon les trois piliers : économique, environnemental et social/sociétal.

**Question de recherche 2** : Quels sont les défis rencontrés par les entreprises ? Quelles solutions peut-on envisager pour dépasser ces défis ?

Plusieurs facteurs ont poussé les entreprises à chercher des nouvelles solutions pour pallier les difficultés actuelles (la mondialisation, la crise économique, la crise sanitaire, la flambée des prix, les problématiques liées à la durabilité, notamment le réchauffement climatique et les émissions de CO<sub>2</sub>, la concurrence, etc.). Dans la littérature, la collaboration horizontale a démontré qu'elle représente une solution innovante capable de remédier aux défis de nos jours. Cela peut être réalisé en concevant des réseaux de distribution mutualisés.

**Question de recherche 3** : Quelles sont les différents niveaux de décision abordés dans le cadre de la collaboration horizontale ? Existe-t-il des projets industriels rencontrant de vifs succès grâce à la collaboration ? Quelles sont les facteurs de réussite et d'échec d'une telle collaboration ?

La troisième question de recherche abordée dans cette thèse concerne une revue de littérature exhaustive sur la collaboration horizontale, en général, et sur la conception des réseaux de distribution, en particulier. Un état de l'art sur les projets industriels réalisés dans le cadre de la mutualisation est également effectué. Cette question aborde également les facteurs de réussite et d'échec de la collaboration horizontale : la coordination, le partage d'information, la sélection des partenaires, la confiance, la compatibilité des produits, le partage de gains de la collaboration, etc.

**Question de recherche 4** : Quels sont les indicateurs de durabilité qu'on peut utiliser pour concevoir un réseau de distribution collaboratif durable ?

La formulation des indicateurs de durabilité est une phase indispensable avant de commencer la modélisation mathématique des problèmes d'optimisation. La sélection et la formulation de ces indicateurs sont basées sur la littérature et les rapports statistiques (Hickman et al., 1999 ; ADEME, 2010 ; Pan, 2010 ; OEET, 2012 ; Palšaitis et Petraška, 2012 ; Morana et Gonzalez-Feliu, 2014 ; ONISR, 2016 ; etc.).

**Question de recherche 5** : Comment peut-on optimiser la conception d'un réseau de distribution à deux et à trois échelons tout en assurant la durabilité ?

Les indicateurs formulés seront utilisés pour concevoir des réseaux de distribution collaboratifs en satisfaisant la durabilité économique, environnementale et sociale/sociétale. Une optimisation mono-objectif et multi-objectif est effectuée pour trouver des solutions optimales offrant un meilleur compromis entre les différents objectifs.

**Question de recherche 6** : Comment peut-on remédier au problème de partage de gains de la collaboration d'une façon juste et équitable ?

Selon la littérature, le problème de partage de gains est l'un des facteurs qui peuvent bloquer la réussite et la continuité de la collaboration. Par conséquent, il sera le deuxième problème traité dans notre recherche en proposant deux approches impliquant les indicateurs de durabilité évalués. Ces approches permettent de récompenser les collaborateurs sur leur participation à la durabilité et de les encourager à assouplir leurs conditions de livraison.

## Nos contributions

Nos contributions dans cette thèse sont multiples. Notre première contribution consiste à faire un état de l'art exhaustif sur les différents problèmes traités dans le cadre de la collaboration horizontale ainsi qu'un état de l'art sur les projets industriels et le problème de conception des réseaux de distribution. Notre deuxième contribution consiste à formuler mathématiquement une liste d'indicateurs appartenant aux trois principales dimensions de la durabilité, à savoir économique, environnementale et sociale/sociétale.

Notre troisième contribution consiste à développer des modèles mathématiques pour concevoir des réseaux de distribution collaboratifs en prenant en compte la durabilité. Le niveau économique est évalué principalement à travers les coûts logistiques engendrés par le transport, le stockage, la pénalité due au retard de livraison, l'installation des hubs et la manutention. Le niveau environnemental est évalué par les émissions de CO<sub>2</sub>. Contrairement à la plupart des études, ces émissions sont constituées de celles générées par les véhicules (leur utilisation et leur amortissement) et les hubs (leur fonctionnement et leur construction). Le niveau social est évalué par le risque accident, le niveau de bruit et le taux d'embauche lors de la conception du réseau de distribution.

Notre quatrième contribution est liée aux modèles mathématiques développés. En effet, la résolution mono-objectif du problème de conception de réseau de distribution est effectuée en utilisant le solveur CPLEX pour les petites instances et à l'aide de deux algorithmes méta-heuristiques (algorithme génétique et recuit simulé). L'optimisation multi-objectif est effectuée par la méthode  $\epsilon$ -contrainte pour les petites instances et par le NSGA-II pour les instances de grande taille. La cinquième contribution consiste à proposer deux approches d'allocation de gains de la collaboration en utilisant les indicateurs de durabilité développés. Ces approches consistent à allouer équitablement les gains en récompensant les partenaires flexibles au niveau des conditions de livraison.

La performance de la collaboration est évaluée par une étude de cas d'un réseau de distribution national. Les résultats ont montré que la collaboration horizontale permet d'obtenir des résultats notables en termes de durabilité par rapport aux scénarios non-collaboratifs. L'analyse de sensibilité réalisée a permis de proposer plusieurs décisions managériales pour améliorer davantage la durabilité des réseaux de distribution et assurer la réussite et la continuité de la collaboration horizontale.

## Structure de la thèse

Ce manuscrit est structuré en trois parties, chacune est scindée en plusieurs chapitres :

- **Partie 1**

La partie 1 est scindée en trois chapitres. Le premier chapitre est consacré au contexte et à la problématique, tandis que le deuxième chapitre présente un état de l'art exhaustif sur la collaboration horizontale, les projets industriels et le problème de conception de réseaux de distribution. Le troisième chapitre est dédié à la formulation des indicateurs de durabilité en se basant sur la littérature et les rapports statistiques.

### Chapitre 1 : Contexte et problématique

Ce chapitre est destiné aux définitions des concepts liés à la distribution de marchandises, aux problèmes et défis rencontrés par les entreprises. Il présente également le développement

durable en tant que concept de base de notre recherche. Une présentation détaillée est effectuée pour expliquer les principaux aspects de la durabilité et les indicateurs utilisés pour évaluer la performance de la distribution de marchandises. L'efficacité du transport par rapport au développement durable est ensuite présentée. Nous présenterons ainsi la collaboration horizontale en tant qu'une solution performante pour surmonter les difficultés telles que la concurrence, les exigences des clients, la durabilité, les crises économiques et sanitaires, etc.

## **Chapitre 2 : État de l'art**

Le deuxième chapitre est consacré à l'état de l'art. Tout d'abord, nous présentons une revue de la littérature sur la collaboration horizontale en classifiant les études en trois niveaux de décision (stratégique, tactique et opérationnelle). Ainsi, nous aboutissons à la conclusion que la plupart des articles publiés dans le cadre de la collaboration horizontale traitent le niveau de décision opérationnelle pour planifier le transport collaboratif. Nous concluons également que les principaux indicateurs évalués sont ceux de l'aspect économique et plus particulièrement le coût du transport. Ensuite, nous citons plusieurs projets industriels réels qui ont rencontré de vifs succès dans le cadre de la collaboration horizontale. Finalement, nous faisons une revue de littérature spécifique sur la conception des réseaux de distribution.

## **Chapitre 3 : Formulation des indicateurs de durabilité**

Notre recherche se concentre sur la conception des réseaux de distribution collaboratifs en tenant compte de la durabilité. Ainsi, sélectionner et formuler les indicateurs de performance de durabilité est une condition préalable pour concevoir un réseau de distribution durable. Dans ce chapitre, nous présentons plusieurs indicateurs appartenant aux trois niveaux de durabilité. Au niveau économique, nous formulons les coûts engendrés par le transport, le stockage, la pénalité due au retard de livraison, la manutention et l'installation des hubs. Au niveau environnemental, nous formulons les émissions de CO<sub>2</sub> dues aux véhicules (par leur utilisation et leur amortissement) et aux hubs (par leur fonctionnement et leur construction). Au niveau social/sociétal, nous formulons le risque d'accident, le niveau de bruit et le taux d'embauche.

### **• Partie 2**

La deuxième partie de ce manuscrit est dédiée à la conception d'un réseau de distribution à deux échelons et au problème de partage des gains en tenant compte de la durabilité.

## **Chapitre 4 : Conception d'un réseau de distribution collaboratif et durable à deux échelons**

Dans ce chapitre, nous proposons un modèle mathématique pour concevoir un réseau de distribution à deux échelons. Dans un premier temps, nous avons effectué l'optimisation mono-objectif pour trouver les solutions optimales au niveau des coûts logistiques et au niveau des émissions de CO<sub>2</sub>. Dans un deuxième temps, nous avons utilisé la méthode  $\epsilon$ -contrainte pour effectuer l'optimisation multi-objectif et trouver un compromis entre les objectifs. Le niveau social/sociétal, dans ce chapitre, est évalué par le risque accident et le niveau de bruit. Une étude de cas d'un réseau de distribution national est traitée pour évaluer la performance de la mutualisation par rapport au scénario non-collaboratif. Plusieurs conclusions managériales sont proposées par le biais d'une analyse de sensibilité exhaustive pour améliorer davantage la performance de la collaboration.

### **Chapitre 5 : Partage de gains par récompense de flexibilité et de durabilité**

Etant donné que le partage des coûts est l'un des facteurs principaux qui peuvent bloquer la réussite et la continuité de la collaboration, nous proposons dans ce chapitre deux approches durables pour partager d'une façon juste et équitable les coûts et les émissions de CO<sub>2</sub>. La première approche est basée sur les méthodes classiques, tandis que la deuxième approche est basée sur la théorie des jeux coopératifs. L'idée est de proposer des approches prenant en considération les indicateurs de durabilité évalués dans le chapitre 4 pour partager les coûts et les émissions de CO<sub>2</sub>. Cela peut encourager les partenaires à assouplir leurs conditions de livraison et à participer au mieux à la durabilité de la distribution.

#### **• Partie 3**

Cette troisième partie de ce manuscrit comporte deux chapitres : le chapitre 6 a pour objectif d'étendre le modèle mathématique proposé dans le chapitre 4, tandis que le chapitre 7 vise à développer des méta-heuristiques pour remédier au problème de temps de résolution.

### **Chapitre 6 : Conception d'un réseau de distribution collaboratif et durable multi-échelons**

Dans ce chapitre, nous étendons le modèle mathématique proposé dans le chapitre 4 en traitant un réseau de distribution collaboratif à trois échelons. Contrairement au chapitre 4, la livraison des marchandises est effectuée par le biais d'une flotte hétérogène de véhicules et les capacités des hubs sont des variables de décision. Nous évaluons ainsi la performance de deux scénarios collaboratifs par rapport à la non-collaboration en s'appuyant sur les indicateurs de durabilité. La résolution des modèles mathématiques est effectuée d'une façon exacte par le solveur CPLEX.

### **Chapitre 7 : Optimisation des réseaux de distribution collaboratifs par les méta-heuristiques**

Dans le chapitre 6, nous avons constaté que plus la taille du problème augmente, plus le temps de résolution augmente. Ainsi, ce dernier chapitre a pour but de remédier à cette limite en utilisant les algorithmes méta-heuristiques. Après une analyse des études abordant le problème de conception des réseaux de distribution par les méta-heuristiques, nous proposons trois algorithmes pour trouver des solutions approchées avec des temps de résolution réduits. L'optimisation mono-objectif est réalisée par le biais de l'algorithme génétique et le recuit simulé, tandis que l'optimisation multi-objectif est effectuée par l'algorithme NSGA-II. Les performances de ces algorithmes sont analysées par le biais de plusieurs expériences numériques basées sur un réseau de distribution national.

### **Conclusion et perspectives**

Les conclusions mettent en évidence les principaux résultats de cette thèse. En outre, plusieurs perspectives de recherche sont discutées.

La Figure 1 montre l'articulation des différents chapitres.

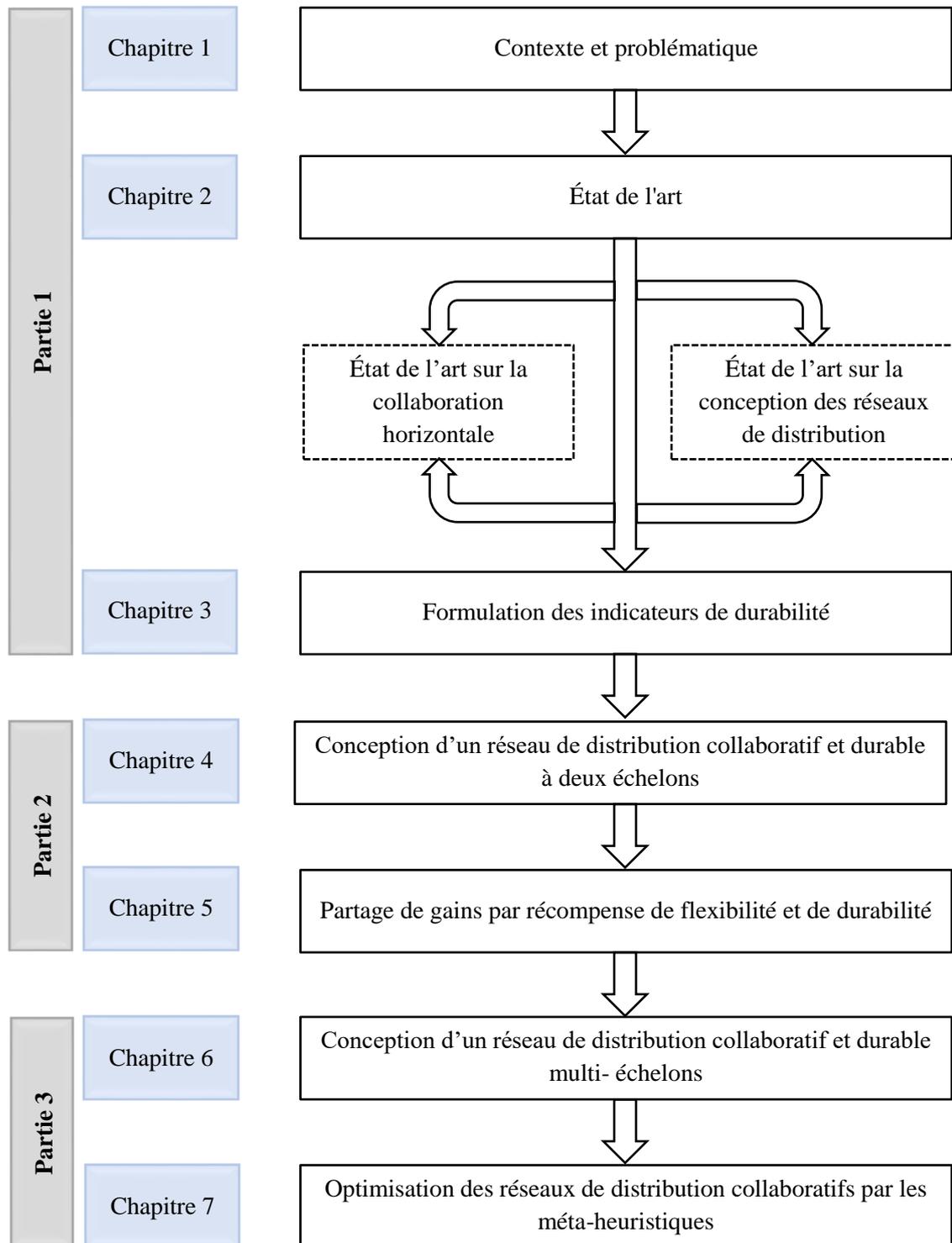


Figure 1. Organisation de la thèse

# Partie 1

Cette première partie comporte trois chapitres :

- Chapitre 1 : Contexte et problématique
- Chapitre 2 : État de l'art
- Chapitre 3 : Formulation des indicateurs de durabilité

# Chapitre 1 : Contexte et problématique

## 1. Introduction

Ces dernières années, la recherche scientifique s'est davantage orientée vers le développement durable et la recherche de solutions pour limiter les pratiques non durables et les effets néfastes de la distribution de marchandises. La collaboration horizontale fait partie des stratégies les plus efficaces pour pallier ces problèmes, notamment ceux liés au transport. Dans ce contexte, ce chapitre vise dans un premier temps à introduire quelques concepts et définitions de base. Ensuite, nous présentons les défis du transport de marchandises en soulignant l'importance de la durabilité et en citant les principaux indicateurs utilisés pour évaluer la durabilité de la distribution de marchandises. Finalement, nous abordons la nécessité de la collaboration, en particulier la collaboration horizontale et présentons quelques pratiques utilisées.

## 2. Concepts et définitions

Dans la définition officielle de la norme AFNOR (norme X 50-600), la logistique est une fonction « *dont la finalité est la satisfaction des besoins exprimés ou latents, aux meilleures conditions économiques pour l'entreprise et pour un niveau de service déterminé. Les besoins sont de nature interne (approvisionnement de biens et de services pour assurer le fonctionnement de l'entreprise) ou externe (satisfaction des clients). La logistique fait appel à plusieurs métiers et savoirs-faire qui concourent à la gestion et à la maîtrise des flux physiques et informationnels ainsi que des moyens* » (PIPAME et CNAM, 2009).

La logistique est un processus de planification et d'exécution du transport et de stockage efficace des marchandises du point d'origine au point de consommation. Son objectif principal est de répondre aux besoins des clients en temps voulu et de manière rentable. Comme le montre la Figure 2, la logistique peut être décrite comme un ensemble de techniques et de moyens permettant de réaliser une gestion optimale des flux physiques, des flux financiers et des flux d'information. En d'autres termes, selon (Lyonnet et al., 2019), la logistique est un ensemble d'activités opérationnelles, à savoir : transporter, manutentionner, emballer et stocker. Ces activités contribuent à la création de valeur, dont les missions peuvent être exprimées très simplement ; il s'agit de veiller à ce que le bon produit soit au bon endroit, au bon moment, en bonne quantité, de bonne qualité et au moindre coût (cf. Figure 3).

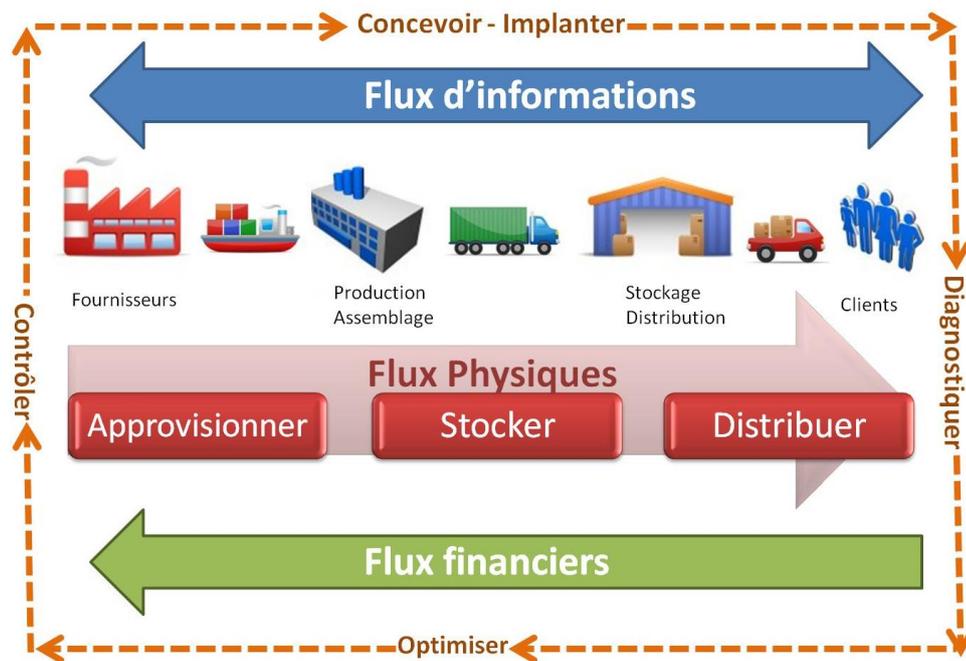


Figure 2. Les différents flux de la chaîne logistique



Figure 3. Missions de la logistique

La logistique est désormais de plus en plus considérée comme stratégique et transversale dans l'entreprise. Alors que de nombreuses petites entreprises se concentrent sur la conception et la production de leurs produits et services pour mieux répondre aux besoins des clients, si ces produits ne peuvent pas atteindre les clients, l'entreprise est vouée à l'échec. La logistique possède également un impact sur d'autres aspects dans l'entreprise. En effet, plus les marchandises peuvent être transportées et stockées de manière efficace jusqu'à leur utilisation, plus l'entreprise peut être rentable. La coordination des ressources pour permettre la livraison et l'utilisation des matériaux en temps voulu peut faire ou défaire une entreprise. Du côté des clients, si les produits ne peuvent être fabriqués et expédiés en temps voulu, leur satisfaction peut décliner, ce qui possède également un impact négatif sur la rentabilité et la viabilité à long terme d'une entreprise.

### 3. La chaîne logistique

#### 3.1. Définition de la chaîne logistique

La deuxième question qui se pose dans ce chapitre porte sur la signification du terme « chaîne logistique » (en anglais SC : *Supply Chain*). Nous exposons, dans ce paragraphe, quelques définitions afin de clarifier la signification de ce terme et les concepts qu'il englobe.

La définition de la chaîne logistique semble être commune à tous les auteurs (Oliver et Webber, 1982 ; Christopher, 1992 ; Lee et Billington, 1993 ; Cooper et Ellram, 1993 ; La Londe et Masters, 1994 ; Lambert et al., 1998 ; Mentzer et al., 2001).

Le Tableau 1 présente quelques définitions extraites de la littérature.

Référence	Définition
Oliver et Webber (1982)	La SC fait référence à la collaboration systématique entre les personnes, les processus et les informations d'organisations similaires pour créer des valeurs tangibles (c'est-à-dire produits) ou immatérielles (c'est-à-dire services) et les fournir aux clients.
Chrisotpher (1992)	La SC est un réseau d'organisation qui sont impliquées, par le biais de liens en amont et en aval, dans les différents processus et activités qui produisent de la valeur sous forme de produits et de services au consommateur final. En d'autres termes, une chaîne logistique se compose de plusieurs entreprises, tant en amont (c'est-à-dire l'approvisionnement) qu'en aval (c'est-à-dire la distribution).
Lee et Billington (1993)	La SC est un réseau d'installations qui assure les fonctions d'approvisionnement en matières premières, de transformation de ces matières premières en composants puis en produits finis, et de distribution des produits finis vers le client.
La Londe et Masters (1994)	La SC est un ensemble d'entreprises qui transmettent des matériaux. Normalement, plusieurs entreprises indépendantes sont impliquées dans la fabrication d'un produit et sa mise à disposition à l'utilisateur final dans une chaîne logistique : les producteurs de matières premières et de composants, les assembleurs de produits, les grossistes et les détaillants sont tous membres d'une chaîne logistique.
Ganeshan et Harrison (1995)	La SC est un réseau de sites qui accomplit la fonction d'approvisionnement en matières premières, de transformation de celles-ci en produits semi-finis et finis, et de distribution des produits finis au client.
Rota et al. (1998)	La SC d'un produit fini est définie comme l'ensemble des entreprises impliquées dans la fabrication, la distribution et les processus de vente du produit, du premier fournisseur au client final.
Lambert et al. (1998)	La SC est l'alignement d'entreprises qui mettent des produits ou des services sur le marché.
Mentzer et al. (2001)	La SC est définie comme un ensemble de trois entreprises ou plus directement liées par un ou plusieurs flux amont et aval de produits, de services, de finances et d'informations.

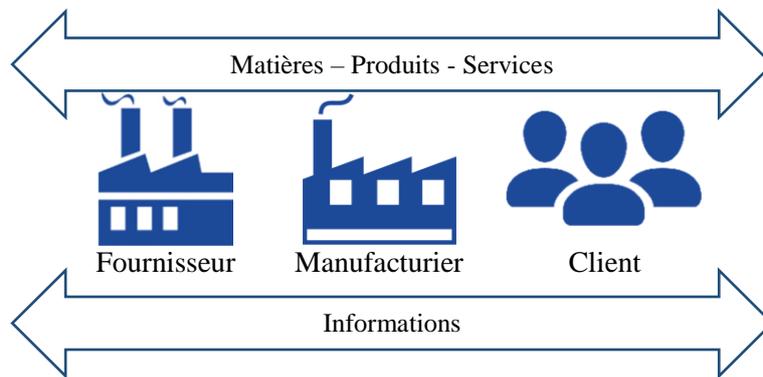
**Tableau 1.** Définitions de la chaîne logistique

### 3.2. Types de chaînes logistiques

Toute organisation qui participe à l'acheminement des flux depuis leur point de départ jusqu'à leur destination finale dans les meilleures conditions, est appelée maillon ou acteur de la chaîne logistique. Dans n'importe quelle structure de la chaîne logistique, les organisations assument des rôles spécifiques : fournisseurs, producteurs, prestataires, détaillants ou client final (Hugos, 2006).

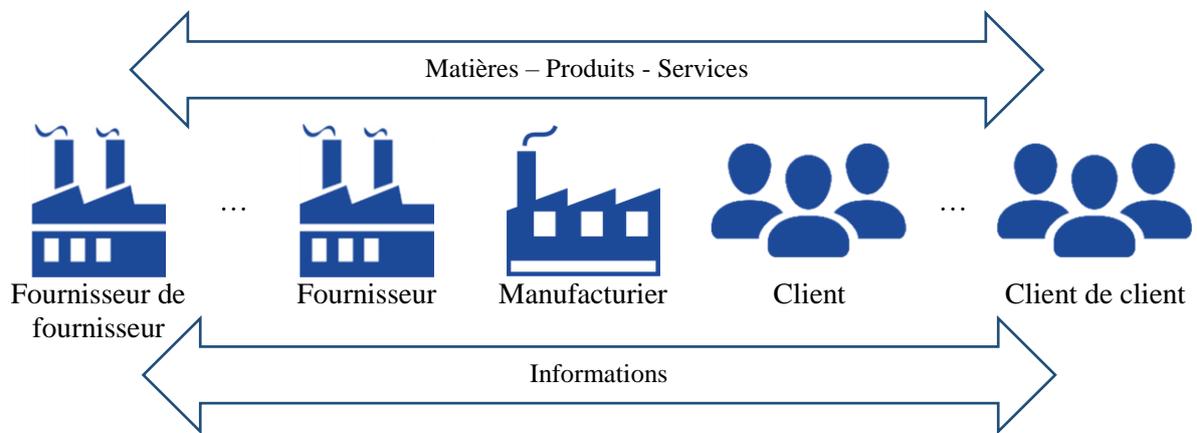
Selon (Mentzer et al., 2001), il existe trois degrés de complexité de la chaîne logistique : directe, étendue et ultime.

La chaîne logistique directe se constitue de l'entreprise productrice, de son fournisseur direct et de son client final (cf. Figure 4).



**Figure 4.** Chaîne logistique directe

La chaîne logistique étendue comprend les fournisseurs du fournisseur final en amont et les clients du client final en aval (cf. Figure 5).



**Figure 5.** Chaîne logistique étendue

La chaîne logistique ultime comprend toutes les organisations qui sont impliquées dans tous les flux de produits, de services, de finances et d'informations depuis les fournisseurs finaux jusqu'aux clients finaux (cf. Figure 6).

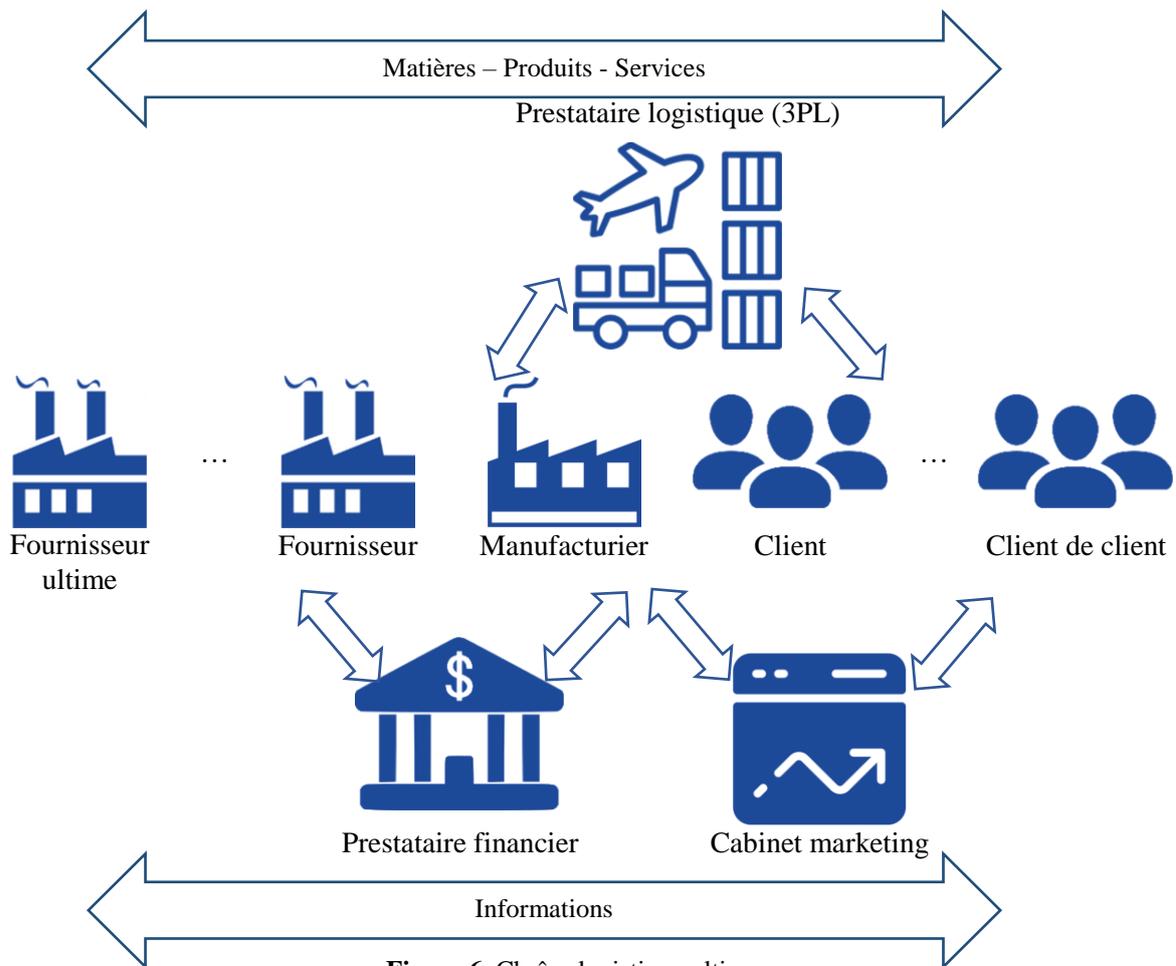


Figure 6. Chaîne logistique ultime

### 3.3. Réseau de chaînes logistiques

En raison de la complexité du système logistique de l'entreprise, la logistique d'aujourd'hui ne peut être réduite à la simple notion de « chaîne », mais doit de plus en plus être considérée comme un "réseau", ou *Logistics Network* et *Supply Networks* dans sa terminologie anglo-saxonne (Burgess et al., 2006 ; Pan, 2010).

Comme le montre la Figure 7, le réseau des chaînes logistiques prend en compte les chaînes logistiques de tous les fournisseurs et consommateurs et de la manière dont ils s'interconnectent.

Plusieurs chercheurs ont souligné l'importance de considérer l'ensemble du réseau logistique plutôt que la chaîne logistique. Selon (Lambert & Cooper, 2000), le réseau permet d'avoir une vision globale et mieux comprendre les flux de marchandises. En effet, la considération du réseau logistique permet aux entreprises d'analyser le mouvement global des flux du début jusqu'à la fin, permettant aux acteurs de voir l'intérêt de créer des partenaires et l'intérêt de travailler ensemble pour satisfaire le client final. Dans cette optique, la notion du réseau logistique représente un concept important pour la collaboration, en particulier pour la mutualisation, comme nous le montrerons dans ce manuscrit, puisque cette dernière repose essentiellement sur une relation collaborative entre les chaînes logistiques.

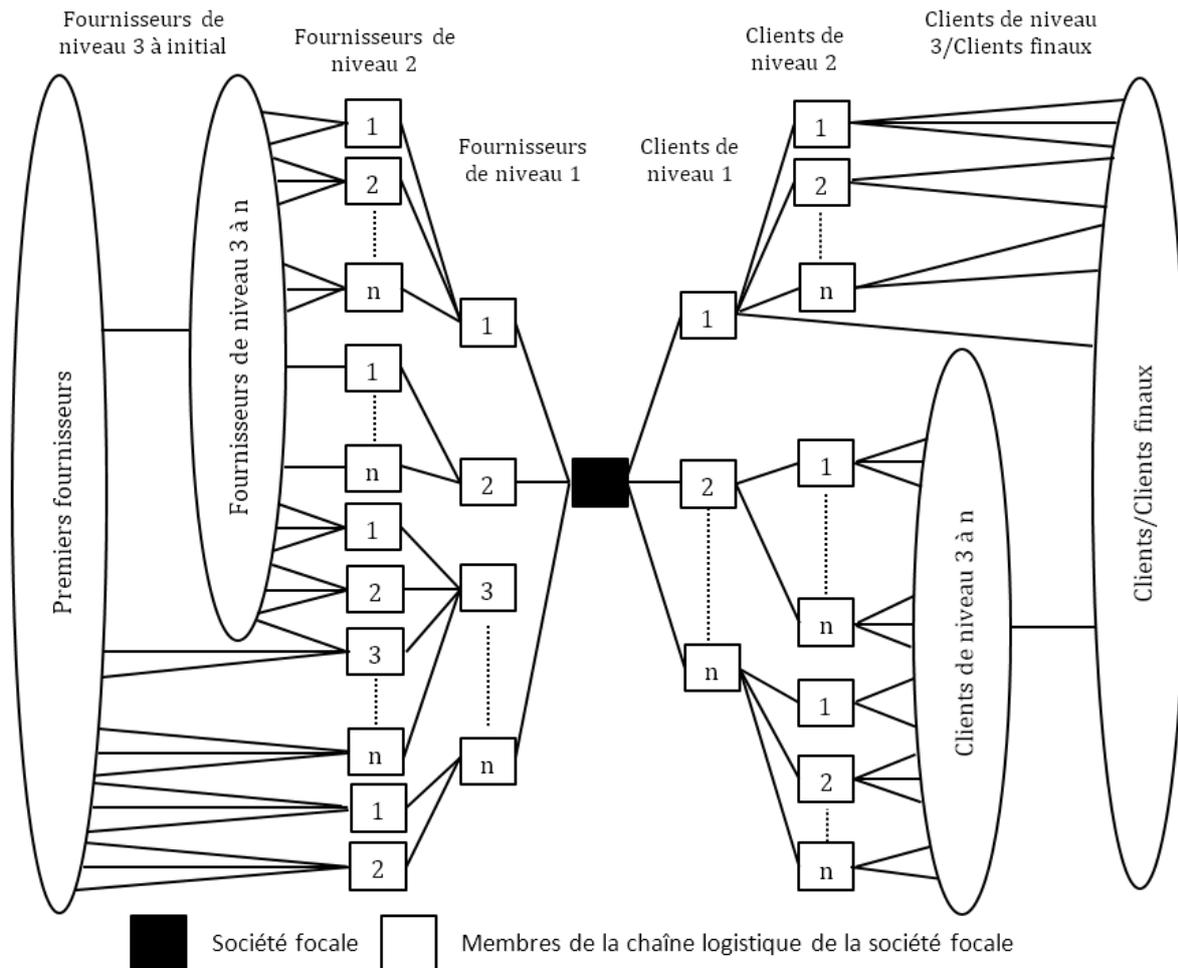


Figure 7. Exemple de structure d'un réseau de chaînes logistiques (Lambert & Cooper, 2000)

## 4. Gestion de la chaîne logistique (*Supply Chain Management*)

### 4.1. Définition de la *Supply Chain Management*

La philosophie de la « *Supply Chain Management* » a fait l'objet d'une attention particulière dans les travaux de recherche ainsi que dans l'industrie (Christopher, 1998 ; Lambert et Cooper, 2000). La SCM (*Supply Chain Management*) était initialement liée à la gestion des stocks au sein de la chaîne logistique (Habib, 2010). Ce concept a ensuite été élargi pour inclure la gestion de toutes les fonctions au sein de la SC.

Plusieurs définitions ont été données dans la littérature (cf. Tableau 2).

Référence	Définition
Oliver et Webber (1982)	La SCM est le processus de planification, de mise en œuvre et de contrôle des opérations de la chaîne logistique afin de répondre aux exigences des clients aussi efficacement que possible.
Riley et Jones (1985)	La SCM concerne les flux totaux des matériaux, depuis les fournisseurs jusqu'aux utilisateurs finaux. Elle met en évidence l'intégration totale de toutes les parties prenantes dans la chaîne logistique.
Tan et al. (1998)	La SCM englobe la gestion des matériaux et de l'approvisionnement, depuis la fourniture des matières premières de base jusqu'au produit final (et éventuellement le recyclage et la réutilisation). La gestion de la

	chaîne logistique se concentre sur la manière dont les entreprises utilisent les processus, la technologie et les capacités de leurs fournisseurs pour améliorer leur avantage concurrentiel.
Lummus et Vokurka (1999)	La SCM coordonne et intègre toutes les activités dans un processus transparent. Elle relie tous les acteurs de la chaîne, y compris les parties au sein d'une organisation et les partenaires externes, tels que les fournisseurs, les transporteurs, les entreprises tierces et les fournisseurs de systèmes d'information.
Mentzer et al. (2001)	La SCM est définie comme la coordination systémique et stratégique des fonctions commerciales traditionnelles et des tactiques entre ces fonctions commerciales au sein d'une organisation particulière et entre les entreprises au sein de la chaîne logistique, afin d'améliorer la performance à long terme de l'organisation individuelle et de la chaîne logistique dans son ensemble.
Bowersox et al. (2002)	La SCM consiste à faire collaborer des entreprises pour tirer parti de leur positionnement stratégique et améliorer leur efficacité opérationnelle.
Chopra et Meindl (2007)	La SCM implique la gestion des flux de la chaîne logistique afin de minimiser le coût total.
Chandra et Grabis (2007)	La SCM est un ensemble cohérent de techniques permettant de planifier et d'exécuter tous les processus de gestion de la chaîne logistique, de mettre en œuvre une stratégie d'une chaîne logistique choisie et de garantir la satisfaction de la demande des clients.
Krajewski et al. (2007)	La SCM consiste à développer une stratégie pour organiser, contrôler et motiver les ressources impliquées dans le flux des services et des matériaux au sein de la chaîne logistique.
Bozarth et al. (2009)	La SCM est la gestion efficace des activités et des relations de la chaîne logistique afin de rentabiliser la satisfaction client et d'obtenir un avantage concurrentiel durable.
Simchi-Levi et al. (2011)	La SCM est un ensemble d'approches utilisées pour intégrer efficacement les fournisseurs, les fabricants, les entrepôts et les magasins afin que les marchandises soient produites et distribuées en bonne quantité, au bon endroit et au bon moment, pour minimiser les coûts à l'échelle du système tout en respectant les exigences du niveau de service.
Wisner et al. (2012)	La SCM est l'intégration des principaux processus commerciaux des partenaires, depuis l'extraction initiale des matières premières jusqu'au client final, en passant par toutes les activités intermédiaires de traitement, de transport et de stockage, jusqu'à la vente finale du produit au client final.
Sodhi et Tang (2012)	La SCM est la gestion des flux de matières, d'informations et de finances à travers la chaîne logistique. Elle implique la coordination et la collaboration des processus et des activités entre différentes fonctions telles que le marketing, les ventes, la production, la conception des produits, l'approvisionnement, la logistique, les finances et les technologies de l'information au sein de la chaîne logistique.

**Tableau 2.** Définitions de la Supply Chain Management

Après une analyse de ces définitions, il est possible de conclure que la SCM englobe la planification et la gestion de toutes les activités liées à l'approvisionnement et à la gestion logistique. Il est important de noter qu'elle comprend également la coordination et la

collaboration entre les partenaires, qui peuvent être des fournisseurs, des intermédiaires, des prestataires de services tiers et des clients.

#### 4.2. Défis et problèmes rencontrés dans la SCM

La SCM implique la résolution de plusieurs problèmes managériaux et techniques (Cooper et al., 1997 ; Mentzer et al., 2001 ; Jasti et Kodali, 2015). Ces problèmes mettent en évidence plusieurs questions communes qui doivent être traitées pour qu'une chaîne logistique fonctionne de manière efficace et efficiente.

Le Tableau 3 représente les principaux défis et problèmes rencontrés dans la SCM.

	<b>Défis/Problème</b>	<b>Référence</b>
<b>Défis de la supply chain</b>	Engagement des clients	(Carter et Rogers 2008 ; Danese et Romano 2013)
	<b>Configuration du réseau de distribution</b>	(Ballou 2001 ; Mangiaracina et al. 2015)
	Gestion des stocks et réactivité	(Childerhouse et al., 2002 ; Sheffi 1985)
	Contrats d'approvisionnement	(Cachon 2002 ; Fisher et al., 1997 ; De Matta et Miller 2015)
	<b>Stratégies de distribution</b>	(Frohlich et Westbrook 2001 ; Cagliano et al., 2008)
	Intégration de la chaîne logistique et partenariat stratégique	(Bramham et McCarthy 2004 ; Aviv, 2001 ; Ng et Vechapikul 2002 ; Caridi et al. 2005 ; Flidner 2003 ; Akkermans et al. 2003)
	Stratégies d'externalisation et d'approvisionnement	Chen et al. (2004)
	Technologies de l'information et systèmes d'aide à la décision	(Fiala, 2005 ; Lau et Lee 2000 ; Kobayashi et al. 2003 ; Verwijmeren, 2004 ; Themistocleous et al. 2004 ; Delen et Benjamin 2003)
	Les défis du partage de l'information dans la chaîne logistique	(Beamon, 1998; Fiala 2005 ; Simchi-Levi et al. 2011)
<b>Problèmes généraux</b>	<b>Compétitivité</b>	Stadtler (2008)
	<b>Service clientèle</b>	Chandra et Grabis (2007)
	<b>Coordination</b>	Chandra et Grabis (2007)
	<b>Collaboration</b>	Kliger et al. (2015)
	<b>Protection de l'environnement</b>	Chandra et Grabis (2007)
	Flexibilité et agilité	
	Mondialisation	
	Intégration	
	Personnalisation de masse et report	
	Externalisation	
<b>Problèmes spécifiques</b>	<b>Partage des risques/avantages</b>	
	Robustesse	
	<b>Durabilité et responsabilité sociale</b>	
	Planification et prévision de la demande	
	Finance	
	<b>Gestion des stocks et logistique</b>	
	Planification de la production et fabrication	
	Marketing et ventes	
	<b>Conception du réseau</b>	
	Conception du processus	
Conception du produit et nomenclature		
Management des personnels		

## Sélection des fournisseurs et achats

**Tableau 3.** Défis et problèmes rencontrés dans la SCM

Dans ce qui suit, nous présentons les principaux défis et problèmes, notés en gras, qui sont pertinents dans ce travail de recherche, notamment ceux liés à la collaboration, à la conception des réseaux de distribution et à la durabilité, etc.

- **Les défis**

- **Configuration du réseau de distribution** : ce défi porte sur la sélection des emplacements et des capacités des entrepôts, la détermination du niveau de production de chaque produit dans chaque usine, ainsi que la détermination des flux du transport entre les usines et les entrepôts de manière à minimiser les coûts de production, de transport et d'inventaire. Cette problématique est liée au partage d'informations : (a) inter-entreprises entre les fonctions de marketing, de planification de la production, de planification des stocks, de réception et d'entreposage, et (b) intra-entreprises entre le fabricant, les fournisseurs, les distributeurs/détaillants et les transporteurs. Il s'agit d'un problème d'optimisation complexe traitant les flux du réseau et l'utilisation des ressources (Ballou, 2001 ; Mangiaracina et al., 2015).

- **Stratégies de distribution** : ce problème concerne les décisions relatives au mouvement des marchandises dans la chaîne logistique. Ces stratégies comprennent les expéditions directes, le cross-docking et la consolidation. L'objectif principal étant de minimiser essentiellement les coûts d'entreposage et de transport. Pour proposer des stratégies efficaces de distribution, il est indispensable de prendre en considération les informations partagées entre les fabricants, les fournisseurs, les distributeurs et les détaillants de la chaîne logistique. Ces problèmes impliquent généralement l'utilisation des techniques de programmation linéaire et non linéaire dans des environnements déterministes et stochastiques (Frohlich et Westbrook, 2001 ; Cagliano et al., 2008).

- **Les problèmes généraux**

- **Compétitivité** : pour rester compétitive, l'entreprise doit être plus performante que les autres entreprises concurrentes dans au moins certains aspects tels que les prix, la qualité ou la réactivité de livraison (Chandra & Grabis, 2007).

- **Service clientèle** : le problème du niveau de service caractérise la capacité des entreprises à répondre aux exigences des clients. La complexité de ce problème est liée aux exigences des clients en termes de coût, de qualité et de réactivité.

- **Coordination** : la coordination des décisions prises par chaque acteur de la chaîne logistique s'effectue en tenant compte de l'impact de ces décisions sur les performances des autres acteurs de la chaîne logistique (Chandra & Grabis, 2007). Nous montrerons dans ce travail de recherche que le niveau de coordination entre les partenaires affecte la performance de la collaboration (cf. Chapitre 2).

- **Collaboration** : selon (Kliger et al., 2015), la collaboration représente les activités conjointes réalisées par les acteurs de la chaîne logistique pour atteindre des objectifs communs. Nous précisons dans le reste des paragraphes de ce chapitre que cette forme de collaboration est appelée collaboration verticale qui consiste principalement à partager les informations entre les

partenaires d'une même chaîne logistique tels que : les fabricants, les fournisseurs, les clients, etc.

- Protection de l'environnement : les chaînes logistiques, en tant que systèmes, agissent et interagissent avec leur environnement, y compris leur impact sur la nature et la consommation des ressources naturelles. De plus en plus, les décisions relatives à la gestion de la chaîne logistique sont prises en tenant compte de ces préoccupations. Dans notre recherche, nous mettrons en évidence le rôle de la mutualisation pour réduire les impacts néfastes de la distribution de marchandises sur l'environnement, notamment à travers la réduction des émissions de GES (Gaz à Effet de Serre).
- Partage des risques/gains : ce problème a un impact direct sur les acteurs de la chaîne logistique. En effet, la résolution du problème de partage des risques et des gains est essentielle pour instaurer la confiance et renforcer l'engagement des acteurs de la chaîne logistique. Le partage des gains de la collaboration est parmi les problèmes qui seront étudiés dans cette thèse, car ce problème peut entraîner des conflits entre les partenaires, notamment ceux qui sont des concurrents.
- Durabilité et responsabilité sociale : la durabilité est désormais une nécessité à prendre en considération. Selon (Chandra & Grabis, 2007), les chaînes logistiques sont conçues et exploitées en tenant compte des questions sociales, culturelles et environnementales.

#### • Les problèmes spécifiques

- Gestion des stocks et logistique : ce problème porte sur la livraison des produits et le service à la clientèle, y compris la planification de la distribution de marchandises, la gestion des stocks, les activités d'entreposage et de transport. Dans ce manuscrit, nous démontrerons que la mutualisation est l'une des solutions efficaces pour améliorer la gestion des stocks et le niveau de service.
- Conception du réseau : ce problème s'intéresse à la conception des réseaux logistiques répondant aux exigences et aux contraintes définies. Il implique la détermination de l'emplacement et du rôle des unités de la chaîne logistique, la répartition des produits, la planification stratégique et l'établissement des liens de transport et d'échange d'informations. Dans ce rapport de recherche, nous nous concentrerons principalement sur le problème de la conception des réseaux de distribution collaboratifs.

Les défis et les problèmes énumérés ci-dessus amènent les entreprises à trouver des solutions efficaces, telles que la collaboration avec d'autres entreprises qui partagent la même vision. Ces problèmes se focalisent sur la distribution de marchandises et la prise en considération de la durabilité. À cette fin, nous analyserons dans ce qui suit la situation de la distribution de marchandises et son impact sur la durabilité, y compris les trois aspects économique, environnemental et social/sociétal.

## 5. La distribution de marchandises et le développement durable

Les activités de distribution de marchandises impliquent diverses fonctions telles que le service à la clientèle, le transport et l'expédition de marchandises, l'entreposage et la manutention, etc. Afin d'évaluer la performance de la distribution de marchandises, une définition et une présentation des indicateurs de durabilité sont nécessaires. De ce fait, dans ce paragraphe, nous présentons la définition et les différents aspects du développement durable

ainsi que les indicateurs associés et les interactions entre les différents aspects. Dans un deuxième temps, nous analysons la performance de la distribution de marchandises en terme de durabilité.

### 5.1. Le développement durable

Le développement durable est désormais l'un des défis les plus importants de notre époque. Il a été décrit pour la première fois par la commission mondiale de l'environnement et du développement (*World Commission on Environment and Development*) (WCED, 1987) dans le rapport *Brundtland* comme étant "un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins". Selon (Simongáti, 2010), la définition la plus connue et la plus complète du développement durable est celle proposée par le centre canadien pour le transport durable en 1997 (Sustainable Transportation, 2002), adoptée et développée par la conférence européenne des ministères des transports. Selon ces références de base, « *un système de transport durable est celui qui permet de répondre aux besoins fondamentaux des individus et des sociétés en toute sécurité et d'une manière compatible avec la santé des personnes et des écosystèmes, et avec l'équité au sein des générations et entre elles ; qui est abordable, fonctionne efficacement, offre un choix de modes de transport et soutient une économie dynamique ; qui limite les émissions et les déchets dans la capacité de la planète à les absorber, qui minimise la consommation de ressources non renouvelables, qui limite la consommation de ressources renouvelables au niveau du rendement durable, qui réutilise et recycle ses composants, et qui minimise l'utilisation des terres et la production de bruit* ». Cette définition détaillée montre clairement l'objectif de la durabilité et identifie avec précision les intérêts individuels et sociaux, etc.

Selon (UK Round Table on Sustainable Development, 1996), l'objectif d'une stratégie de transport durable est de répondre, dans la mesure du possible, à la manière dont la société entend fournir les moyens pour répondre aux besoins économiques, environnementaux et sociaux de manière efficace et équitable, tout en minimisant les impacts négatifs évitables ou inutiles et leurs coûts associés, sur des échelles spatiales et temporelles pertinentes. Moldan et al. (2012) ont donné une autre définition en précisant qu'il existe trois aspects majeurs. Selon ces auteurs, le développement durable doit d'abord satisfaire les besoins humains fondamentaux, ensuite, ce développement doit être en harmonie avec la nature, et enfin, le développement durable est un concept centré sur l'humain avec l'équité intergénérationnelle en son centre.

À partir de ces définitions, il apparaît que les êtres humains sont au centre de toute discussion sur le développement durable, et qu'ils sont responsables de la création d'un environnement sain et d'une vie productive en harmonie avec la nature. Soubbotina (2004) a défini le développement durable en tant qu'un équilibre réussi entre les objectifs économiques et les aspects sociaux et environnementaux, parfois également appelé le TBL (*Triple Bottom Line*) ou en français le triple résultat net de la durabilité (*People, Profit, Planet*). Plusieurs études de recherche classent les impacts du transport de marchandises sur la durabilité en fonction de ce *Triple-P* comme (Anderson et al., 2005 ; Browne et al., 2007 ; Quak, 2008). Selon (Lindholm, 2013), le sujet de la durabilité est souvent abordé dans la littérature en termes de *Triple-P* avec les trois dimensions, à savoir économique, environnementale et sociale. Ces trois dimensions doivent être considérées de manière égale pour atteindre la durabilité. D'après (Verma & Raghubanshi, 2018), dans la plupart des cas, le développement durable a traditionnellement été identifié avec ses trois principales dimensions.

Les deux méthodologies les plus couramment pratiquées dans la littérature pour effectuer la catégorisation thématique et sous-thématique des indicateurs sont le *Triple-P* et les différentes dimensions de la durabilité.

La Figure 8 représente l'équivalence entre les deux types de classification.

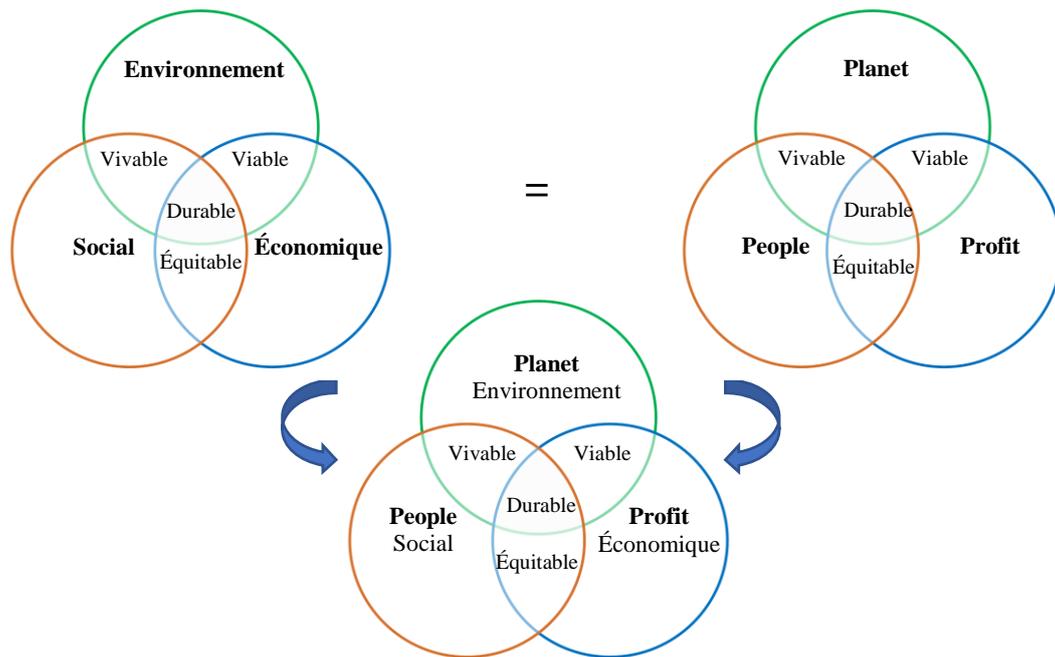


Figure 8. Equivalence entre le développement durable et le Triple -P

### 5.1.1. Catégorisation selon le Triple-P

Le *Triple-P* est largement connu dans la pratique de la durabilité. Quak (2008) a cité l'impact du transport de marchandises sur la durabilité selon la classification *Triple-P* :

- **Impacts sur la planète** : émissions polluantes, utilisation de ressources naturelles non renouvelables, déchets et perte des zones vertes.
- **Impacts sur les personnes** : conséquences physiques des émissions de polluants sur la santé publique, blessures et décès résultant accidents de la circulation, augmentation des nuisances, réduction de la qualité de l'air et dommages aux bâtiments et infrastructures.
- **Impacts sur le profit** : inefficacité et gaspillage des ressources, diminution de la fiabilité des trajets et de la ponctualité des livraisons, entraînant potentiellement une baisse du service aux clients et des marchés perdus, une diminution du développement économique et une congestion et une diminution de l'accessibilité dans la ville.

Richardson (2005) a identifié quelques indicateurs du transport durable : la sécurité, la congestion, la consommation de carburant, les émissions des véhicules et l'accessibilité.

Pour parvenir à un transport de marchandises durable, il y a des facteurs clés à prendre en compte. Par conséquent, Allen et Brown (2010) ont identifié certaines solutions pour surmonter ces problèmes, à savoir :

- L'utilisation des véhicules de livraison qui possèdent le moindre impact possible sur la société et l'environnement,
- La collaboration des planificateurs, des transporteurs et des autres entreprises pour atteindre les objectifs,
- etc.

### 5.1.2. Catégorisation selon les dimensions de la durabilité

Plusieurs auteurs tels que (Van Binsbergen et Visser, 2001 ; OECD, 2003 ; Anderson et al., 2005 ; Schoemaker et al., 2006 ; Browne et al., 2007 ; Quak, 2008) ont classé les impacts néfastes du transport comme suit :

- **Impacts économiques**

- Augmentation de la congestion du trafic, ce qui entraîne :
  - Une perte de temps et d'inefficacité pour la personne ou l'entreprise effectuant le transport,
  - Une livraison peu fiable pour le destinataire,
- Utilisation des ressources,
- Coût de la réglementation gouvernementale et de la planification du transport de marchandises.

- **Impacts environnementaux**

- Emissions de polluants contribuant au changement climatique mondial (par exemple, le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)),
- Emissions de polluants locaux (par exemple, le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NOx), notamment la matière particulaires (PM) et les composés organiques volatils (COV)),
- Utilisation de ressources non renouvelables :
  - Combustibles fossiles,
  - Agrégats,
  - Terrain,
  - Terre.
- Déchets tels que les pneus, l'huile et les autres matériaux,
- Perte d'habitat faunique et menace associée aux espèces sauvages.

- **Impacts sociaux**

- Impacts sur la santé :
  - Pollution atmosphérique locale,
  - Accidents de la circulation,
  - Nuisances sonores.
- Contribution à la congestion du trafic,
- Endommagement des bâtiments et des infrastructures :
  - Vibration,
  - Accidents de la circulation,
  - Endommagement de la chaussée en raison du poids des véhicules utilitaires.
- Autres problèmes de la qualité de vie :
  - Perte de sites entièrement nouveaux et d'espaces ouverts dans les zones urbaines,
  - Intrusion visuelle,
  - Obstacle physique,
  - Vibration.

En général, la plupart des études mentionnent plus ou moins les mêmes impacts négatifs du transport de marchandises. Elles diffèrent parfois dans la catégorie à laquelle elles attribuent ces impacts.

### 5.1.3. Indicateurs utilisés pour évaluer la durabilité

Dans ce paragraphe, nous énumérons les principaux indicateurs de durabilité liés à la logistique de distribution.

Dans le cadre d'un projet de recherche financé par l'Union Européenne appelé PROPOLIS (*Planning and Research of Policies for Land Use and Transport for Increasing Urban Sustainability*), Lautso et al. (2003) ont présenté une liste d'indicateurs pour évaluer les impacts sur la durabilité de différentes politiques d'utilisation des terres et de transport dans sept agglomérations européennes.

La classification de ces indicateurs est résumée dans le Tableau 4.

Aspect	Thème	Indicateur
Economique	Bénéfice total net du transport	Coûts d'investissement dans le transport Bénéfices des utilisateurs de transport Bénéfices pour les transporteurs Bénéfices dus aux transports Coûts externes d'accident de transport Coûts des émissions externes du transport Coûts des gaz Coûts de transport liés au bruit externe
Environnemental	Changement climatique mondial	Gaz à effet de serre provenant des transports
	Pollution de l'air	Gaz acidifiants du transport Composés organiques volatils provenant du transport
	Consommation de ressources naturelles	Consommation de produits pétroliers, transport Couverture terrestre Besoins de nouvelles constructions
	Qualité environnementale	Qualité de l'environnement Fragmentation de l'espace ouvert Qualité de l'espace ouvert
Social	Santé	Exposition aux particules dues au transport dans le milieu de vie Exposition au NO <sub>2</sub> provenant du transport dans le milieu de vie Exposition au bruit de la circulation Décès de la route Blessures dues à la circulation
	Equité	Justice de la répartition des avantages économiques Justice de l'exposition aux émissions de PM ( <i>Particulate Matter</i> ) Justice de l'exposition au NO <sub>2</sub> Justice de l'exposition au bruit Ségrégation
	Opportunités	Norme de logement Vitalité du centre-ville Vitalité de la région environnante Gain de productivité lié à l'utilisation des terres
	Accessibilité et trafic	Temps total passé dans le trafic

Niveau de service des transports publics et des modes lents  
 Accessibilité au centre-ville  
 Accessibilité aux services  
 Accessibilité à l'espace ouvert

**Tableau 4.** Classification des indicateurs de durabilité selon le projet PROPOLIS (Lautso et al., 2003)

Dans la plupart des cas, les études de recherche se sont concentrées sur l'amélioration du niveau économique. Selon (Simongáti, 2010), les décideurs choisissent généralement des alternatives optimales en se basant seulement sur des critères liés à l'efficacité économique. Ainsi, Simongáti (2010) a développé dans son étude un modèle pour comparer diverses alternatives en matière de durabilité. Il a ainsi présenté un ensemble d'indicateurs en se basant sur 42 indicateurs sectoriels conformes aux exigences (cf. Tableau 5).

Composant	Thème	Indicateur
Economique	Coûts	Coût total Sans coûts d'infrastructure Coûts d'infrastructure Coûts de chargement-déchargement
	Fiabilité des cargos	Relations existantes Précision Capacités de suivi et de traçage
	Obstacles	Un impact négatif de la météo sur l'itinéraire Un impact négatif de la météo sur le processus de chargement-déchargement Charge de trafic, congestion
	Sécurité du fret	Risque d'endommagement de la cargaison
Environnemental	Utilisation des ressources naturelles	Utilisation d'énergie fossile pendant le transport Utilisation d'énergie fossile pendant le chargement-déchargement Taux d'utilisation des ressources renouvelables
	Efficacité énergétique	Efficacité énergétique des transports
	Technologie	Niveau de technologie impliquée lors de la construction du véhicule
	Émissions dans l'air	Émissions totales de CO <sub>2</sub> Émissions totales de Nox Émissions totales de PM Émissions totales de SO <sub>2</sub>
Social	Effet positif sur la société	Revenus de l'état
	Effet négatif sur la société	Risque d'accident Congestion Émissions sonores

**Tableau 5.** Indicateurs de durabilité (Simongáti, 2010)

#### 5.1.4. Interaction entre les trois dimensions de durabilité

Pour atteindre tous les objectifs de la durabilité, il est nécessaire de comprendre comment ils interagissent les uns avec les autres. Dans ce paragraphe, nous citons quelques interactions clés identifiées dans la littérature (Valentin & Spangenberg, 2000) :

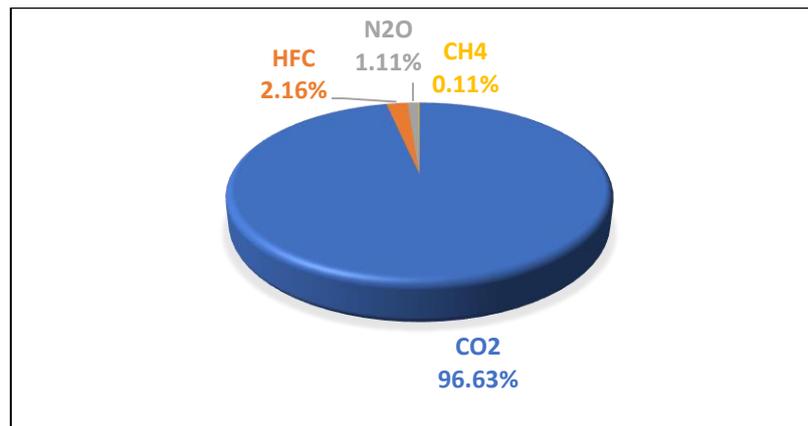
- **Interaction environnementale-sociale** : l'impact de la dimension environnementale sur celle sociale est lié à l'impact de la distribution de marchandises sur les habitants. Comme nous le montrerons dans le prochain paragraphe, le transport de marchandises est un secteur à forte intensité énergétique, car il est un grand consommateur de ressources naturelles épuisables comme les combustibles. Cela provoque de grandes quantités d'émissions de GES, ce qui entraîne plusieurs enjeux néfastes comme la réduction des espaces verts, la pollution de l'air et donc des problèmes de santé. Ces enjeux montrent qu'il s'agit d'une forte corrélation entre les deux aspects. En d'autres termes, une amélioration du niveau environnemental permet d'avoir une meilleure condition de vie pour l'être humain.
- **Interaction économique-sociale** : l'aspect social peut être amélioré grâce à l'aspect économique en créant de nouveaux emplois et en améliorant le statut des habitants. Cependant, l'amélioration de l'aspect économique, notamment le transport de marchandises, peut présenter des risques sur la santé des êtres humains (effets secondaires des émissions de GES, accident, bruit, etc.). Par conséquent, un bon compromis doit être trouvé entre ces deux aspects. D'autre part, l'interaction entre les deux aspects peut être traduite par l'équité économique entre les partenaires. En effet, les profits ou les coûts doivent être partagés d'une façon raisonnable et équitable entre les acteurs.
- **Interaction économique-environnementale** : l'activité du transport nécessite une énorme consommation de ressources naturelles qui améliore le niveau économique en créant de la richesse. Cependant, il est nécessaire de contrôler cette consommation afin de réduire les émissions de GES. La relation entre ces deux aspects consiste à améliorer le niveau économique en minimisant le plus possible les effets néfastes sur l'environnement.

#### 5.2. Efficacité du transport en terme de durabilité

Le transport peut être défini comme « le lien physique reliant les points fixes d'une chaîne logistique » (Coyle et al., 2003) et constitue donc un processus intégral clé pour contribuer à l'objectif global d'une gestion réussie de la chaîne logistique : la planification et le contrôle du flux de matières (Ellram, 1991). Gurav (2004) a souligné que le transport devient une fonction commerciale plus stratégique pour deux raisons : (1) les coûts de transport représentent un pourcentage plus important du coût des marchandises vendues et (2) il existe une forte corrélation entre le niveau de service à la clientèle et la performance du transport.

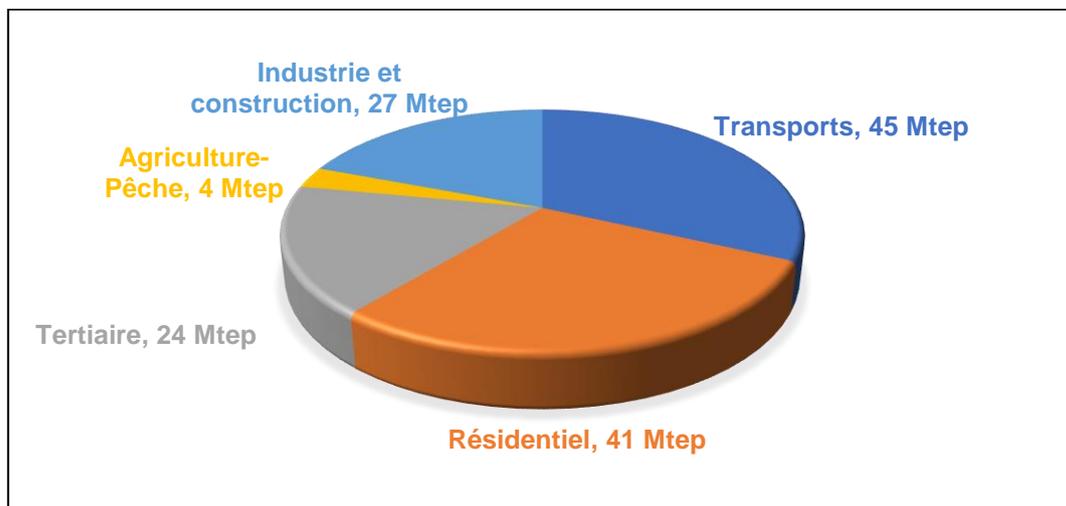
Le transport de marchandises terrestre, à ce jour, se fait principalement par la route. Plus de 89% du fret (tonne-km) a été transporté par le mode routier en 2018 (INSEE, 2020). Un système de transport de marchandises économe en énergie et fiable est d'une importance capitale pour répondre aux demandes croissantes de l'industrie. Le transport de marchandises joue un rôle central dans le développement de l'économie régionale, façonnant les villes intelligentes, créant des emplois et des revenus substantiels (Pathak et al., 2021). Dans l'Union européenne, plus de sept millions d'emplois sont liés au transport de marchandises par route, aux activités d'entreposage et de soutien, ainsi qu'aux activités postales et de messagerie (European Commission, 2013), ce qui représente 3% de tous les emplois en Europe (Eurostat, 2015).

Malgré son importance, le transport de marchandises possède des effets néfastes sur la durabilité. En effet, il est l'un des principaux contributeurs à la pollution de l'air et aux émissions de gaz à effet de serre, qui compte parmi les effets environnementaux les plus graves (Figliozi, 2011). Le secteur du transport dans l'UE (Union Européenne) est responsable d'environ 30% de la consommation totale d'énergie et de 27% des émissions totales de GES (Marmioli et al., 2020). Les 97% de ce gaz émis par le transport est constitué de CO<sub>2</sub> qui est directement lié à la combustion de carburant et qui est le principal responsable du réchauffement climatique. Les 3%, qui restent, se constituent de HFC (Hydrofluorocarbures), N<sub>2</sub>O (Protoxyde d'azote) et CH<sub>4</sub> (Méthane) (cf. Figure 9).



**Figure 9.** Les types d'émissions de GES dégagées par le transport

La Figure 10 représente la répartition de la consommation finale d'énergie par secteur en 2019 en France. Ces statistiques montrent clairement que pour limiter les dépenses énergétiques et réduire l'impact néfaste sur l'environnement, il sera nécessaire de se concentrer principalement sur le transport.



**Figure 10.** Consommation énergétique par secteur en 2019 ([Rapport sur l'état de l'environnement, 2021](#))

Le transport est un secteur à forte consommation d'énergie, puisqu'il consomme la plus grande quantité d'énergie égale à 45 Mtep en 2019. Par conséquent, il constitue l'activité qui contribue le plus aux émissions de CO<sub>2</sub> avec une quantité égale à 135.9 millions de tonnes équivalent CO<sub>2</sub> (cf. Figure 11).

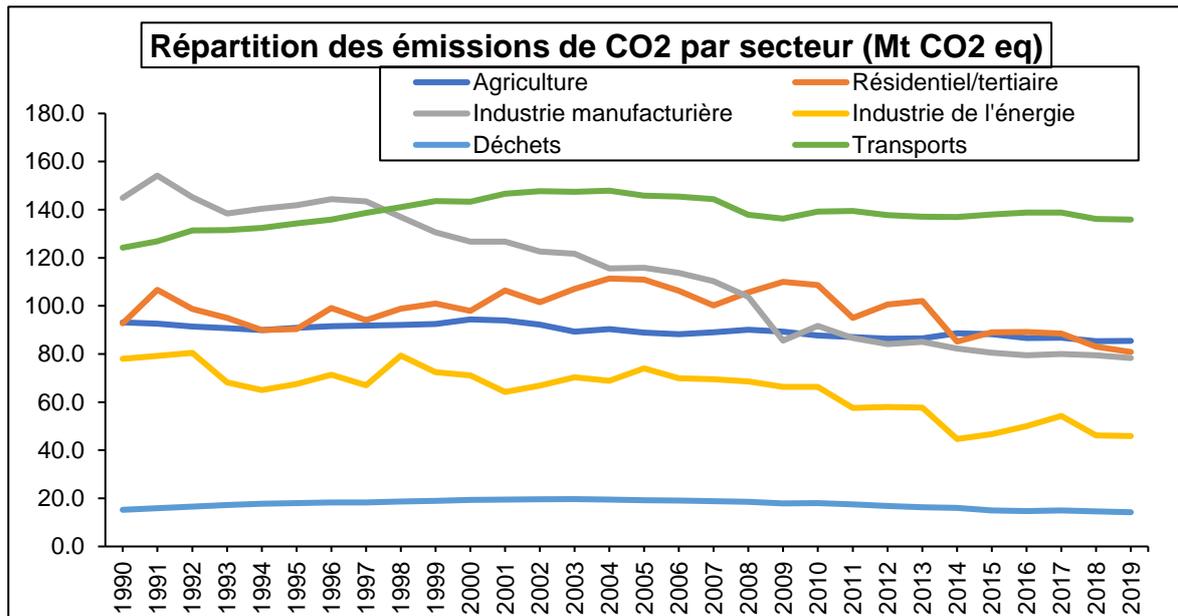


Figure 11. Répartition des émissions de CO<sub>2</sub> par secteur ([Rapport sur l'état de l'environnement, 2021](#))

On constate également que durant les vingt dernières années, le transport est le secteur le plus émetteur de CO<sub>2</sub> en France. Une grande partie de ces émissions est attribuable au trafic routier, qui est le mode dominant du transport de marchandises, et qui représente la plus grande part des émissions liées au fret. Selon ([INSEE, 2021](#)), le mode de transport routier contribue à la quasi-totalité : presque 94% des émissions du secteur de transport (cf. Figure 12). En 2017, le transport routier de marchandises a généré 25.5 millions de tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub>.

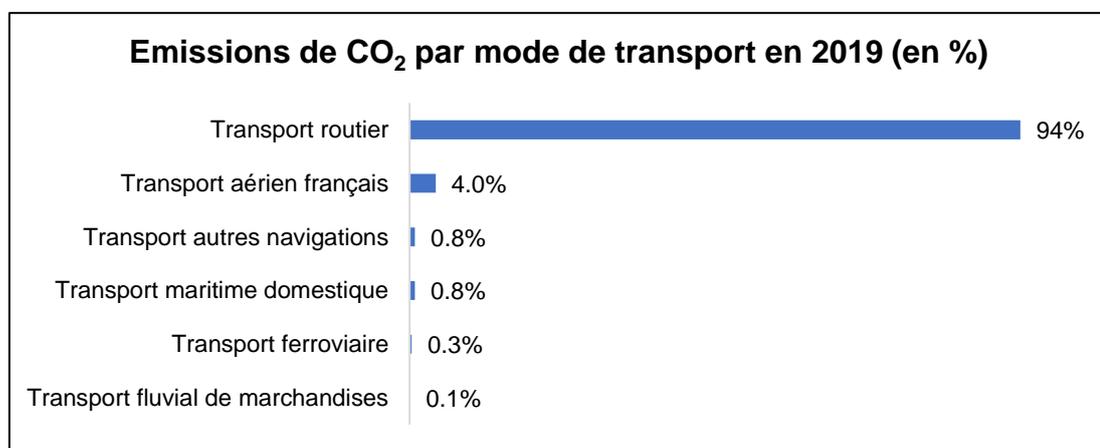


Figure 12. Répartition des émissions de CO<sub>2</sub> par mode de transport

## 6. Pourquoi chercher une nouvelle organisation logistique ?

Plusieurs raisons ont poussé les entreprises à chercher une nouvelle organisation de leur chaîne logistique. La mondialisation a rendu les clients de plus en plus exigeants en termes de niveau de service, de réactivité et de flexibilité. La crise économique qui a frappé le marché depuis fin 2008 incite également les entreprises à optimiser au maximum leurs coûts et à repenser leur organisation afin d'atteindre ces objectifs. À cela s'ajoute la flambée des prix de

<sup>1</sup>Mtep : Mégatonne équivalent pétrole : une unité de mesure de l'énergie qui correspond à un million de tonnes d'équivalent pétrole soit 41.868 PJ (10 Pcal).

matières premières, ainsi que leur raréfaction. D'autre part, les consommateurs deviennent de plus en plus sensibles aux problématiques de réchauffement climatique, et donc au principe de développement durable que nous venons d'expliquer dans le paragraphe précédent. En outre, l'évolution des réglementations, que ce soit au niveau économique, avec la LME (Loi de Modernisation de l'Économie) ou concernant la protection de l'environnement (Lois Grenelle I et II), oblige également les entreprises à évoluer. Par ailleurs, la concurrence pousse les entreprises à rechercher de nouveaux modèles d'organisation logistique et à se recentrer sur leur cœur de métier et donc à externaliser les activités. De plus, dans un contexte de prise de conscience croissante des priorités concurrentielles, il est devenu prudent de comprendre comment la performance d'une organisation en matière de durabilité s'équilibre avec les priorités concurrentielles.

Récemment, l'épidémie de COVID-19 a eu de graves conséquences économiques dans le monde entier, et il semble qu'aucun pays n'ait été épargné. Cette situation n'affecte pas seulement l'économie mais également l'ensemble de la société, ce qui a entraîné des changements dans la façon dont les entreprises agissent et les consommateurs se comportent. Dans une enquête faite par [Bartik et al. \(2020\)](#), il a été mis en évidence à la fois la fragilité financière de nombreuses petites entreprises et l'impact significatif de l'épidémie de COVID-19 sur ces entreprises dans les semaines suivant le début des perturbations liées à cette épidémie. Selon [\(Loske, 2020\)](#), les gouvernements du monde entier ont imposé plusieurs restrictions temporaires qui ont eu un impact significatif sur l'économie mondiale et par conséquent sur le transport de marchandises. Les épidémies telles que le COVID-19 sont des facteurs de risque de perturbation pour les chaînes logistiques caractérisées par un impact très fort et immédiat sur la structure de conception du réseau de la chaîne logistique [\(Ivanov, 2020\)](#). Par conséquent, les perturbations de la chaîne logistique causées par la pandémie pourraient avoir un impact sur la compétitivité, la croissance économique et la création d'emplois.

Les entreprises sont impactées par toutes ces évolutions et il est plus difficile pour elles d'assurer seules leur développement dans ce contexte. Pour se différencier des autres entreprises, elles doivent maîtriser au maximum leurs chaînes logistiques pour livrer les produits dans les meilleures conditions de coût, délai et qualité en assurant la durabilité. Il est possible pour certaines entreprises de participer à des collaborations pour faire face aux difficultés citées précédemment. La collaboration a déjà démontré sa performance dans la littérature « *La collaboration, qui facilite l'innovation, le partage des ressources et l'accès aux économies d'échelle, est une stratégie de plus en plus préconisée* » [\(Eisenhardt et Martin, 2000 ; Fawcett et McCarter 2008\)](#).

Dans le paragraphe suivant, nous parlerons de la logistique collaborative et des différentes typologies utilisées.

## **7. La logistique collaborative**

### **7.1. Définition de la collaboration**

Comme nous l'avons expliqué précédemment, la distribution des marchandises contribue à la pollution et au gaspillage des ressources. Cela explique la nécessité de développer d'autres stratégies pour créer de nouveaux systèmes logistiques plus efficaces. Par conséquent, la collaboration s'avère être une alternative intéressante pour les entreprises afin d'améliorer leurs performances économiques et environnementales. La logistique collaborative est l'une des pratiques adoptées pour développer le transport durable et apporter une meilleure efficacité et une réduction des coûts à la chaîne logistique [\(Ouhader & El Kyal, 2020\)](#). La logistique

collaborative peut être définie comme « *un ensemble d'interactions entre deux ou plusieurs acteurs jouant un rôle au sein de la chaîne logistique dans le but d'atteindre un ou plusieurs objectifs communs et d'en partager les bénéfices* » (Destouches & Gaide, 2011).

La définition de la logistique collaborative est difficile à cerner car elle diffère d'un cas à l'autre. Selon (Cao & Zhang, 2011), la collaboration dans la chaîne logistique fait référence à la capacité de deux ou plusieurs entreprises autonomes à travailler efficacement ensemble, à planifier et à exécuter les opérations de la chaîne logistique afin d'atteindre des objectifs communs. En outre, Moutaoukil et al. (2012) ont ajouté que la logistique collaborative consiste principalement à rassembler les efforts pour atteindre un objectif mutuel. Ainsi, les entreprises indépendantes collaborent pour réduire leurs coûts d'exploitation et augmenter leurs revenus. D'autre part, Moharana et al. (2012) ont précisé que la collaboration est un processus interactif commun qui se traduit par des décisions et des activités communes, et leur mise en œuvre conjointe peut être considérée comme un travail d'équipe. Juvien (2011) a défini la collaboration comme « *deux acteurs (ou plus) qui cherchent à optimiser conjointement la logistique du circuit de distribution dans lequel ils sont liés* ». Selon (Palmer et al., 2018), la collaboration est différente du simple partage de transport, ou de l'utilisation d'un prestataire de services logistiques (en anglais LSP : *Logistics Service Provider*), car elle nécessite un niveau important de communication entre les partenaires pour créer de la valeur avec un transport plus efficace, par l'orchestration et le séquençage du fret. En général, la collaboration peut être appliquée au niveau de la conception (Gonzalez-Feliu et al., 2013), de la planification et l'exécution du travail (Tornberg & Odhage, 2018), de décisions (Perboli et al., 2016), de recherche et développement (Bustinza et al., 2019) et de gestion des risques (Chen et al., 2013), etc. Elle permet de réduire les coûts de transport et de stockage et assurer des gains économiques importants. La collaboration permet ainsi aux entreprises d'être agiles et résilientes (Camarinha-Matos, 2014).

En résumé, nous adoptons dans ce travail de recherche la définition suivante de la collaboration : « *La collaboration est une activité conjointe réalisée entre au moins deux partenaires possédant la même vision dans le but d'améliorer leurs performances logistiques par le biais du partage des informations et/ou des moyens et des ressources et/ou de risque* ».

## 7.2. Les différentes formes de collaboration

La logistique collaborative est devenue un concept important ces dernières années pour de nombreuses entreprises en vue d'améliorer l'efficacité des chaînes logistiques et c'est plus une nécessité qu'une option (Danloup et al., 2013). Il existe deux principaux types de collaboration, à savoir la collaboration verticale et la collaboration horizontale (Ouhader et El Kyal, 2020 ; Pan et al., 2019 ; Aloui et al., 2021a).

### 7.2.1. La collaboration verticale

La collaboration verticale se déroule entre des partenaires opérant à différents niveaux du réseau logistique, où les avantages de la collaboration incluent la réduction des coûts d'approvisionnement en raison de l'effet de la synchronisation par le partage d'information (Moutaoukil et al., 2012 ; Pan et al., 2014 ; Vanovermeire et al., 2014).

Fernández et al. (2016) ont affirmé que la collaboration verticale est proposée lorsque les expéditeurs et les clients collaborent pour atteindre leurs objectifs. Ce concept est utilisé pour développer des relations à long terme, ainsi que la loyauté et l'engagement. Le partage d'informations et de la technologie dans la relation verticale est un facteur crucial pour l'efficacité de la chaîne logistique. La collaboration verticale se concentre principalement sur

l'échange d'informations entre les entités et implique les membres de la même chaîne de valeur. La collaboration logistique se déroule aujourd'hui essentiellement au niveau vertical (Moutaoukil et al., 2012 ; Pan et al., 2019). Selon (Crujssens et al., 2007), la gestion de la chaîne logistique est le terme qui décrit généralement la collaboration verticale. Elle a été définie en tant qu'une collaboration qui se produit entre des partenaires qui opèrent à différents niveaux du réseau logistique (Ouhader & El Kyal, 2017). La collaboration verticale est réalisée entre des acteurs qui sont complémentaires entre eux et qui sont intégrés ensemble dans un fonctionnement synchronisé et coordonné (Barratt, 2004). Becker (2003) a défini la collaboration verticale comme le processus de gestion commune consistant à partager des connaissances et des ressources complémentaires afin d'exploiter efficacement les synergies pour une meilleure planification, un meilleur déploiement et un meilleur contrôle.

Parmi les premières principales pratiques identifiées dans la littérature, on peut citer : ECR (*Efficient Consumer Response*), VMI (*Vendor Managed Inventory*) et CPFR (*Collaborative Planning Forecasting Replenishment*) (Moutaoukil et al., 2012). Selon (Roy et al., 2006), ces approches ont été développées principalement dans les secteurs de l'épicerie, du textile et de la santé.

- ***Efficient Consumer Response*** : est une stratégie visant à accroître le niveau de service aux consommateurs par une coopération étroite entre les détaillants, les grossistes et les fabricants (Lohtia et al., 2004). En visant à améliorer l'efficacité de l'ensemble d'une chaîne logistique au-delà du mur des détaillants, des grossistes et des fabricants, ils peuvent par conséquent réaliser des bénéfices plus importants que lorsque chacun d'entre eux poursuit ses propres objectifs commerciaux. Les entreprises qui composent la chaîne logistique peuvent réduire la perte d'opportunité, le niveau des stocks et le coût total, ainsi qu'accroître la rentabilité monétaire en partageant l'objectif de « satisfaction du client ».
- ***Vendor Managed Inventory*** : cette stratégie est considérée comme l'évolution logique de l'ECR (Roy et al., 2006). Dans cette technique collaborative, le fournisseur est conjointement responsable du réapprovisionnement de l'entrepôt sur la base des prévisions de vente. Cela implique l'utilisation d'actions collaboratives (Waller & Johnson, 1999). Cette stratégie est principalement utilisée pour gérer les fluctuations de la demande résultant de l'effet <sup>2</sup>*Bullwhip*, amenant le système à éviter de conserver des stocks excessifs qui se traduisent par une réduction du coût global de la chaîne logistique (Taleizadeh et al., 2020). Les principaux avantages de VMI pour les fournisseurs sont des niveaux plus élevés d'accessibilité aux informations d'inventaire et un contact plus direct avec les clients. De même, la VMI a des avantages pour les acheteurs, tels que le partage du risque avec les niveaux supérieurs de la chaîne logistique et la réduction de leurs coûts de détention des stocks (Weraikat et al., 2019).
- ***Collaborative Planning Forecasting Replenishment*** : cette stratégie est une extension du VMI. Selon (Fliedner, 2003), c'est un concept de pilotage collaboratif qui propose d'élaborer consensuellement et avec l'ensemble des parties prenantes des différentes entreprises ou organisations concernées, les plans de distribution, les prévisions de ventes pour assurer un rendement optimal. Elle est basée sur l'amélioration de la *supply chain* grâce à une collaboration accrue entre les acteurs dont certains objectifs sont pourtant contradictoires (clients et fournisseurs) avec en particulier le partage des informations relatives aux prévisions de ventes et à la planification.

### 7.2.2. La collaboration horizontale

En logistique, la collaboration horizontale opère entre des partenaires de même niveau (entre fournisseurs, entre fabricants, entre distributeurs, etc.) (Ouhader et El Kyal, 2020 ; Pan et al., 2019 ; Aloui et al., 2021b). Selon (Vanovermeire et al., 2014), la collaboration horizontale peut être définie comme le regroupement d'entreprises de transport qui opèrent au même niveau de la chaîne logistique et qui ont des besoins de transport similaires ou complémentaires. Il s'agit également d'une collaboration entre un groupe d'acteurs issus de différentes chaînes logistiques, agissant aux mêmes niveaux et dans les mêmes conditions (Gonzalez-Feliu et al., 2013). Selon (McKinnon & Edwards, 2010), la collaboration horizontale permet de surmonter les obstacles financiers et commerciaux et profite à la société en réduisant le nombre de véhicules et, par conséquent, les émissions de CO<sub>2</sub> et la congestion. L'introduction de ce principe a pour objectif de mettre en commun des schémas et des réseaux logistiques dédiés, autrement dit, de faire de la mutualisation logistique (Pan, 2010). Une telle organisation permettra de décloisonner par les flux des relations nouées verticalement entre les cocontractants (Filser et al., 2001). En outre, la collaboration horizontale en logistique fait référence à la manière dont deux ou plusieurs acteurs peuvent coopérer pour atteindre un objectif commun, qui est généralement lié à la minimisation des coûts globaux de distribution (Juan et al., 2014).

Selon (Moutaoukil et al., 2012), les principales pratiques de collaboration horizontale sont : la mise en place des centres de consolidation collaborative (CCC : *Collaborative Consolidation Centers*), la GMA (Gestion Mutualisée des Approvisionnements) (en anglais PPM : *Pooled Procurement Management*) et la gestion collaborative du transport (en anglais CTM : *Collaborative Transportation Management*). Cette dernière pratique est commune à la collaboration verticale et horizontale, car elle implique une collaboration en matière de transport qui est essentielle pour les deux types de collaboration.

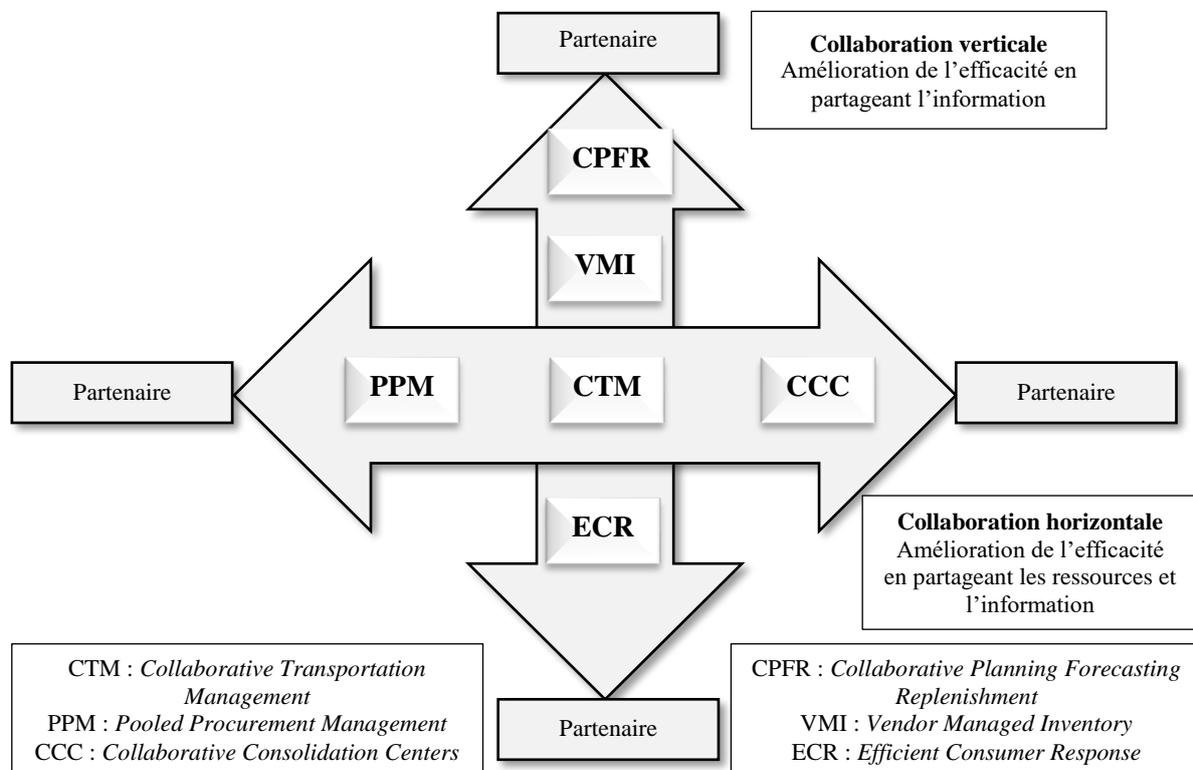
- ***Collaborative Consolidation Centers*** : la mise en place des centres de consolidation et de collaboration est un facteur clé de développement car ils favorisent le regroupement des marchandises, ce qui garantit des bénéfices d'économies d'échelle en matière de transport. La mise en place d'un CCC facilite la distribution mutualisée en permettant à plusieurs fournisseurs d'être regroupés sur un même site pour consolider leurs commandes (Nataraj et al., 2019). Les centres de consolidation permettent non seulement de réduire les coûts mais aussi les émissions de GES (Ülkü, 2011).
- ***Pooled Procurement Management*** : cette stratégie correspond à la passation des commandes conjointement d'une partie ou de la totalité d'un processus par l'une de ces entités ou par un tiers. Le succès de l'approvisionnement dépend des capacités techniques, des ressources financières, des systèmes d'information et d'une gestion efficace.
- ***Collaborative Transportation Management*** : elle constitue des formes spécifiques d'infrastructures logistiques comme les CDMs (Centres de Distribution Mutualisés) qui sont généralement soutenus par les pouvoirs publics. Lorsque ces CDMs se situent dans une zone urbaine, on les appelle des CDMUs (Centres de Distribution Mutualisés Urbains). Généralement, ces centres sont installés dans la ville ou dans les périphéries de la ville pour assurer la distribution et améliorer le TMV (Transport de Marchandises en Ville).

Les cas de la collaboration verticale se concentrent principalement sur l'échange d'informations entre les acteurs appartenant à la même chaîne logistique. En revanche, la plupart des cas de la collaboration horizontale se concentrent sur la mutualisation des ressources

et/ou des structures dans le but d'accroître les flux, ce qui implique des entreprises qui peuvent fournir des biens ou des services complémentaires, qu'elles soient concurrentes ou non (Barratt, 2004).

Selon (Pan, 2010), la collaboration logistique opère aujourd'hui essentiellement au niveau vertical. Cependant, les résultats insuffisants de la distribution de marchandises, comme indiqué dans les paragraphes précédents, signifient qu'il est difficile de surmonter les défis actuels par une collaboration traditionnellement verticale d'où l'importance de la collaboration horizontale. Selon (Pomponi et al., 2013), la collaboration horizontale est considérée comme l'une des solutions innovantes pour relever efficacement les défis logistiques croissants, tant du point de vue environnemental qu'économique. Par conséquent, dans cette thèse nous nous intéressons à la collaboration horizontale, appelée également mutualisation logistique, en supposant que les partenaires appliquent déjà une collaboration verticale avec les acteurs de la même chaîne logistique.

La Figure 13 résume cette classification.



**Figure 13.** Résumé des typologies de collaboration

La massification des flux est l'un des principaux objectifs de la mutualisation. Dans le paragraphe suivant, nous présentons quelques pratiques utilisées pour atteindre cet objectif.

## 8. Les pratiques utilisées dans le cadre de la collaboration horizontale

La massification des flux consiste à regrouper les marchandises afin d'améliorer le taux de remplissage des véhicules dans le but de réduire les coûts de distribution et d'améliorer les performances écologiques. Généralement, les diverses options de mutualisation reposent sur trois types : la mutualisation des transports, la mutualisation des entrepôts et la mutualisation des informations.

En supposant que les partenaires de la mutualisation partagent leurs informations, nous présentons dans cette section les principales pratiques permettant de mutualiser le transport et/ou l'entreposage.

### 8.1. Mutualisation au niveau du transport

Selon (Pan, 2010), la mutualisation au niveau du transport est principalement basée sur les tournées de véhicules. Les itinéraires peuvent être divisés en différents cas :

- N-fournisseurs/Mono-client : cette stratégie est également appelée multi-pick où les fournisseurs livrent leurs marchandises en tournées de véhicules vers une seule destination (cf. Figure 14).
- Mono-fournisseur/N-clients : cette forme de consolidation est appelée multi-drop où un seul fournisseur livre les produits vers plusieurs clients en tournées de véhicules (cf. Figure 15).
- N-fournisseurs/M-clients : avec cette stratégie de mutualisation, les fournisseurs d'une même région collaborent pour livrer leurs marchandises regroupées dans un seul camion en tournées des véhicules (cf. Figure 16).

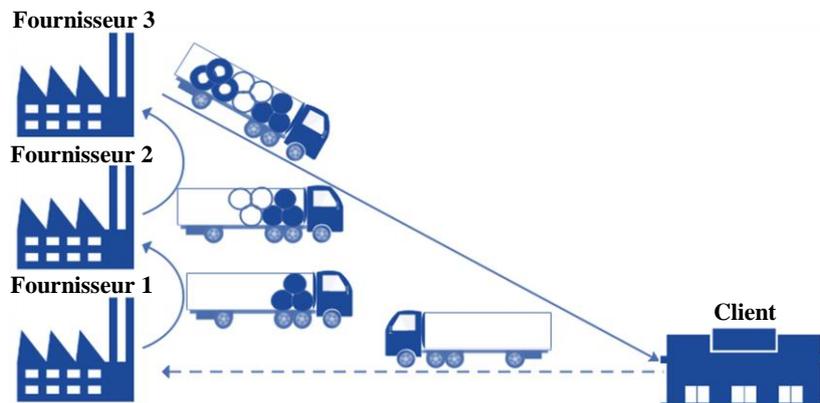


Figure 14. Le multi-pick

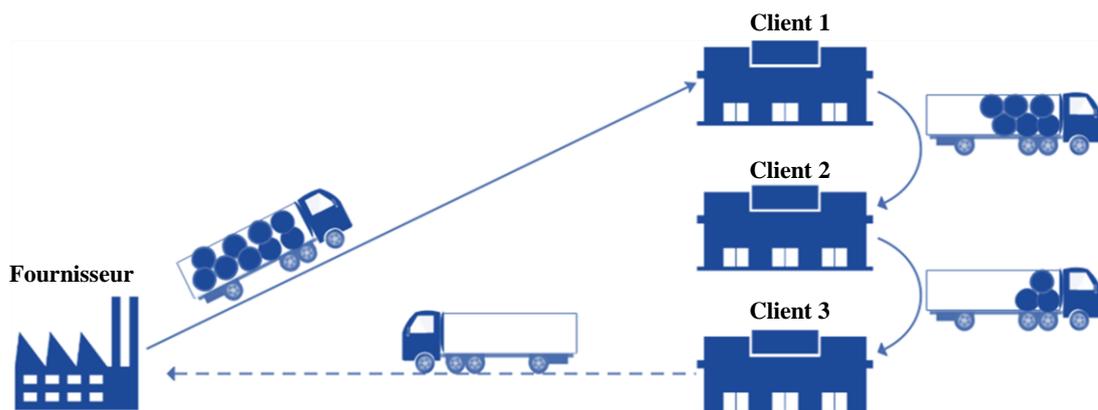


Figure 15. Le multi-drop

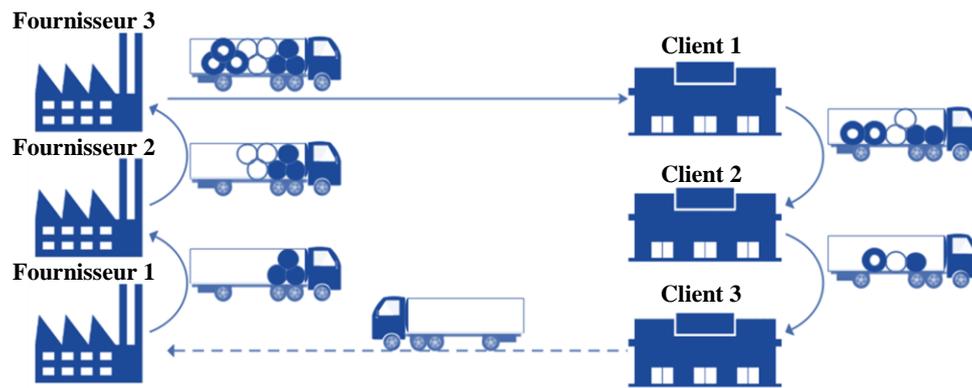


Figure 16. N-fournisseurs/M-clients

Selon (Pan, 2010), la mutualisation au niveau du transport permet d'obtenir des résultats notables lorsque les clients sont proches géographiquement et si les demandes sont à de petits volumes. Cette stratégie permet d'améliorer le taux de remplissage des véhicules et de réduire les trajets à vide. Cependant, elle nécessite un partage d'information performant pour organiser et planifier d'une manière optimale le transport (Ergun et al., 2007).

## 8.2. Mutualisation du transport et d'entreposage

### 8.2.1. Réseau de distribution mutualisé sans tournées de véhicules

La collaboration au niveau des réseaux logistiques implique des entreprises du même type, comme par exemple dans le cas des petits opérateurs de transport, des réseaux de groupes de vente pour les détaillants ou des associations grossistes (Gonzalez-Feliu et al., 2013). Grâce à cette stratégie, les fournisseurs sont en mesure de répondre aux exigences des détaillants en matière de réduction des stocks, qui nécessitent des livraisons plus fréquentes en plusieurs petites quantités, sans mettre davantage de véhicules sur les routes.

En collaborant avec d'autres fournisseurs, il est possible de constituer des camions complets et de maintenir, voire de réduire les coûts de transport. Cette stratégie peut se faire à au moins deux échelons (cf. Figure 17). La massification des flux est assurée par l'entrepôt partagé où les marchandises provenant de plusieurs fournisseurs seront regroupées et stockées.

L'objectif principal des modèles mathématiques abordant ce problème est de localiser un certain nombre d'entrepôts et d'affecter les différents nœuds à ceux-ci.

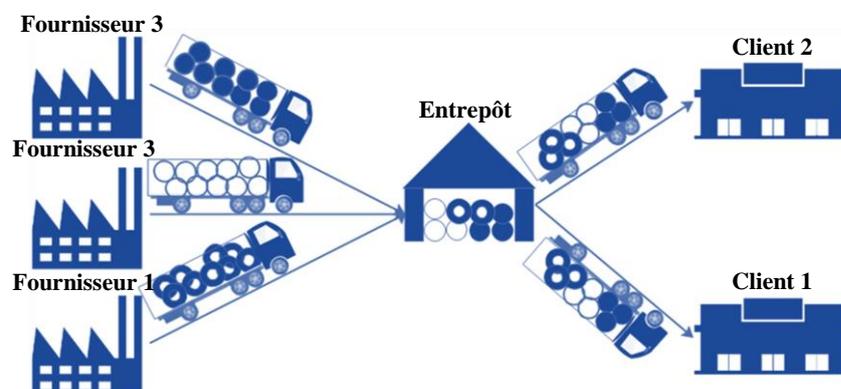


Figure 17. Réseau de distribution mutualisé à deux échelons

Le réseau mutualisé dans le cas de trois échelons (amont-intermédiaire-aval) est illustré par la Figure 18.

Le premier échelon est situé entre les fournisseurs collaborants et le(s) hub(s) amont(s). Le deuxième échelon est situé entre le(s) hub(s) amont(s) et le(s) hub(s) aval(s), tandis que le troisième échelon est situé entre le(s) hub(s) aval(s) et les clients ou les détaillants.

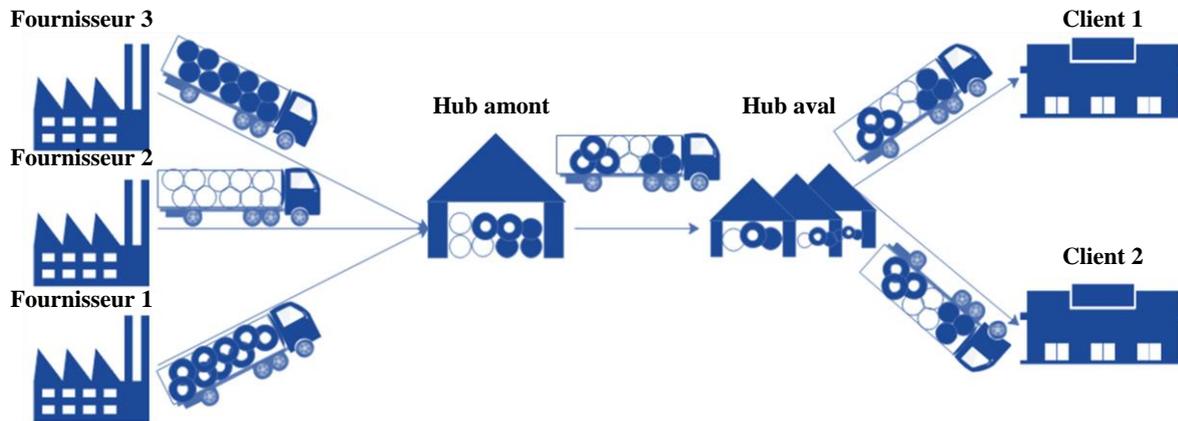


Figure 18. Réseau de distribution mutualisé à trois échelons

Cette stratégie de mutualisation a été appliquée dans plusieurs études (Ballot et al., 2010 ; Pan et al., 2013 ; Pan et al., 2014 ; Grothedde et al., 2005 ; Cheong et al. 2007 ; Verdonck et al., 2016). Selon (Grothedde et al., 2005), avec cette forme de collaboration, la réalisation de l'économie d'échelle est garantie, notamment entre les entrepôts et les centres de distribution. Selon (Cheong et al. 2007), l'objectif dans ce genre de problème est de sélectionner et de localiser un nombre optimal de hubs entre les fournisseurs et les clients afin de minimiser les coûts globaux de stockage et de transport, ainsi que les coûts d'exploitation des hubs. Selon les mêmes auteurs, lorsqu'il s'agit des longues distances, il est nécessaire d'introduire des hubs pour améliorer la performance du réseau de distribution.

Ballot et al. (2010) ont démontré que ce type de réseau peut conduire à une réduction significative en termes d'émissions de CO<sub>2</sub> dues au transport de marchandises. De cette manière les flux en amont et en aval seront consolidés. Les intérêts et les contraintes de toutes les parties prenantes doivent être pris en considération lors de la conception d'un réseau de distribution mutualisé (Pan et al., 2019).

### 8.2.2. Hub-and-spoke

Le hub-and-spoke, représenté par la Figure 19, est un terme emprunté à la mécanique et signifie en français moyeu (hub) et rayon (spoke). Le hub est le point vers lequel convergent les différentes lignes, assimilées à des rayons.

Le réseau en hub-and-spoke privilégie un trafic en étoile autour d'un nœud. Son objectif principal est qu'il permet de faire des économies d'échelle. La technique du *hub-and-spoke* a d'abord été adoptée par le transport aérien.

C'est la compagnie de fret express FedEx qui l'a d'abord expérimentée pour les colis distribués aux Etats-Unis en utilisant le hub de Memphis. Le système s'est largement diffusé dans les années 1980. Il a été adopté par le transport maritime dans les années 1990. Le trafic de fret se déplace le long des rayons connectés à un hub central. Le transport centralisé des

marchandises permet d'avoir un mouvement continu des charges, une réduction des distances parcourues, ce qui entre autres, permet de réduire les coûts et les émissions de GES. En général, les réseaux en étoile sont utilisés pour desservir un grand nombre de destinations avec une fréquence élevée (Pels, 2020). Ce type de réseau est étudié dans (Fernández & Sgalambro, 2020).

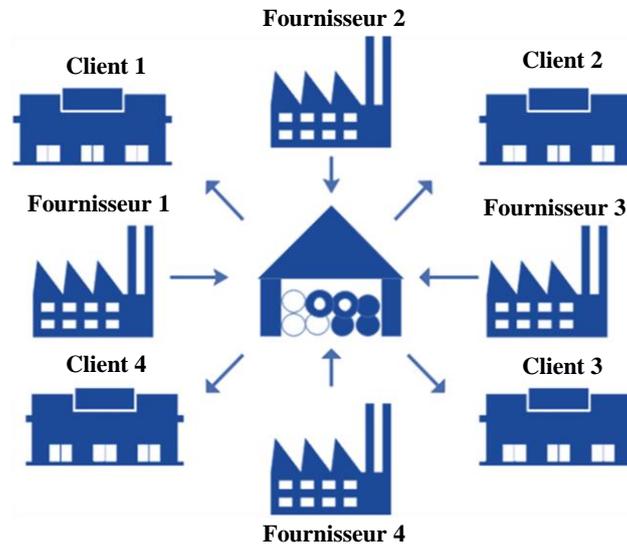


Figure 19. Réseau collaboratif en hub-and-spoke

### 8.2.3. Multi-pick et mutualisation des hubs

Dans ce type de réseau (cf. Figure 20), les collaborateurs partagent des hubs tels que les entrepôts pour réaliser la massification des flux. Dans le cas d'un réseau de distribution à trois niveaux, la massification des flux est réalisée dans les hubs amont (par exemple les entrepôts) et aval (par exemple les centres de distribution).

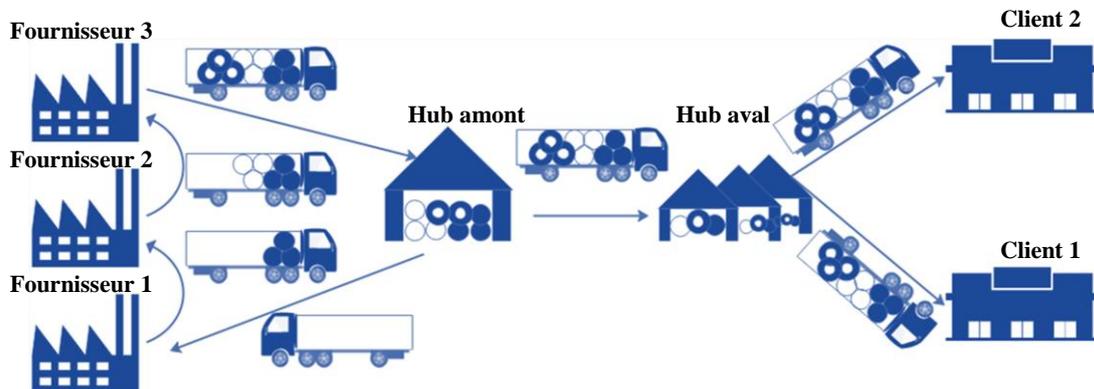


Figure 20. Multi-pick et mutualisation des hubs

### 8.2.4. Mutualisation des hubs et Multi-drop

Cette stratégie de mutualisation est similaire à la précédente, hormis le fait que les tournées de véhicules sont réalisées dans la partie aval du réseau de distribution (cf. Figure 21).

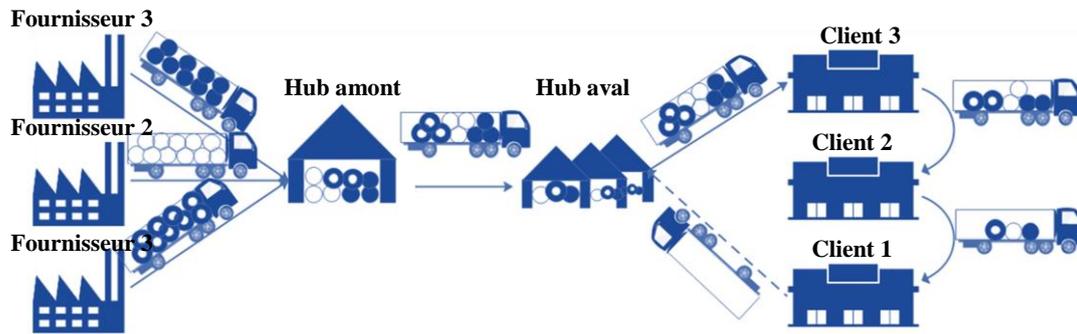


Figure 21. Mutualisation des hubs et Multi-drop

### 8.2.5. Multi-pick, multi-drop et mutualisation d'entrepôt

Ce type de réseau est la combinaison des deux réseaux de distribution précédents. Typiquement, la conception de ce type de réseau traite l'interdépendance entre les décisions relatives à la localisation des hubs et au routage des véhicules. Ainsi, le réseau de distribution peut être conçu en deux échelons (cf. Figure 22) ou plus (cf. Figure 23).

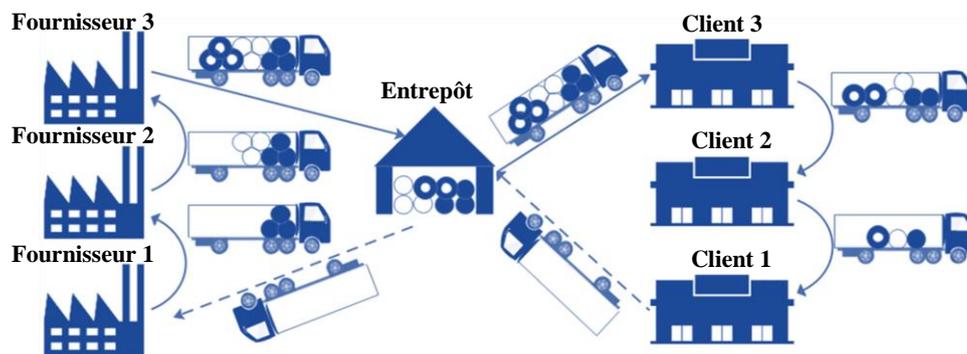


Figure 22. Multi-pick, multi-drop et mutualisation d'entrepôt (2 échelons)

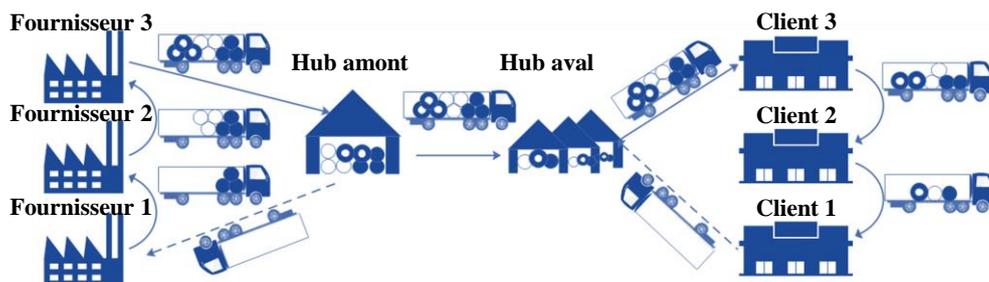


Figure 23. Multi-pick, multi-drop et mutualisation d'entrepôt (3 échelons)

D'autres configurations peuvent être développées en se basant sur les stratégies citées au-dessus. La base de chaque réseau de distribution proposé est que les collaborateurs partagent le transport et/ou les zones de stockage ainsi que les informations.

## 9. Obstacles de la mise en œuvre de la mutualisation

La mutualisation logistique est une collaboration horizontale reposant sur le partage des moyens et des ressources ainsi que les informations et elle vise à améliorer la performance de tous les partenaires en termes de durabilité. La mutualisation représente trois principaux enjeux

pour les divers acteurs de la chaîne logistique. Tout d'abord, l'amélioration des services aux clients, qui sont le plus souvent les enseignes de la grande distribution. L'autre élément clé est la réduction des coûts par la massification des flux et des achats logistiques et enfin la réduction de l'impact écologique est également un enjeu important.

Malgré son efficacité, la mise en œuvre de la mutualisation est souvent perçue par les acteurs impliqués dans la démarche comme un véritable parcours à obstacles. En effet, avant de pouvoir la mettre en œuvre, il faut satisfaire plusieurs conditions, telles que :

- La sélection des partenaires : aucune collaboration ne peut être réalisée sans passer par le processus de sélection des partenaires. Celui-ci prend en considération plusieurs critères (taille du partenaire, état financier, nombre de clients en commun, réputation, etc.).
- La compatibilité des produits : cette condition est indispensable pour avoir la possibilité de regrouper les produits dans les mêmes véhicules et dans les mêmes entrepôts sous les mêmes conditions de stockage (température, humidité, etc.).
- Objectifs communs : les partenaires participants à la mutualisation doivent avoir les mêmes objectifs et les mêmes visions.
- Clients communs : la collaboration avec des partenaires qui possèdent des clients communs assure la massification des flux par le regroupement des marchandises allant vers la même destination.
- Le partage d'information : la mutualisation signifie la collaboration avec des partenaires qui peuvent être en concurrence ce qui rend le partage d'information un facteur sensible pour tous les partenaires. Il est possible de dépasser ce problème en confiant la coordination et le pilotage de la mutualisation à un organisateur neutre comme les prestataires logistiques. Par ailleurs, un minimum de confiance est nécessaire pour améliorer davantage la performance de la collaboration.
- Un système équitable de partage des gains : ce facteur est l'un des principaux facteurs qui peuvent bloquer la réussite et la continuité de la mutualisation. Par conséquent, avant même de participer à une telle collaboration, il est indispensable de trouver une approche équitable du partage des gains.

## 10. Conclusion

Ce chapitre a pour but de montrer la nécessité d'appliquer la collaboration horizontale pour faire face aux difficultés d'aujourd'hui, à savoir : la concurrence, les défis en termes de durabilité, l'augmentation des exigences des clients, et les crises économiques, etc. Ainsi, nous avons montré qu'il est difficile de remédier à ces défis par les solutions logistiques traditionnelles. En ce sens, la collaboration horizontale en mutualisant le transport, le stockage et les informations, semble être la meilleure solution. Nous avons présenté par la suite plusieurs stratégies permettant de mutualiser le transport et les entrepôts. Parmi ces principales stratégies, la conception du réseau mutualisé en utilisant des hubs semble être la meilleure solution. Par conséquent, dans ce travail de recherche, nous nous intéressons à ce problème classé parmi les problèmes appartenant au niveau stratégique et affectant l'avenir des entreprises. En outre, nous avons cité quelques facteurs qui peuvent bloquer la mise en œuvre et la continuité de la collaboration, à savoir la sélection des partenaires, le partage d'information et le partage des gains, etc. En plus du problème de conception des réseaux de distribution mutualisés, nous traitons dans ce rapport de recherche le problème de partage de gains. Dans le chapitre suivant, nous présenterons une revue de littérature exhaustive sur la collaboration horizontale et le problème de conception des réseaux de distribution.

# Chapitre 2 : État de l'art

## 1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de recenser les études traitant la collaboration horizontale et de comprendre les enjeux de sa mise en place. Ainsi, nous présentons un état de l'art exhaustif sur la collaboration horizontale et sur les projets industriels utilisant la collaboration horizontale. Nous présentons également un état de l'art spécifique du problème de conception des réseaux de distribution. Après une analyse détaillée, nous montrons que la collaboration horizontale a présenté une solution performante pour améliorer les différentes dimensions de la durabilité. Nous montrons également que la majorité des études se sont concentrées sur le niveau de décision opérationnelle en évaluant les indicateurs économiques, notamment le coût de transport.

## 2. Etat de l'art sur la collaboration horizontale

Contrairement à la collaboration verticale, la collaboration horizontale n'a pas fait l'objet d'une attention suffisante dans la littérature scientifique (Leitner et al., 2011 ; Moutaoukil et al., 2013 ; Amer et Eltawil, 2015 ; Soysal et al., 2018 ; De Vos et Raa, 2016 ; Pan et al., 2019 ; Ouhader et El Kyal, 2020).

Les travaux cités dans ce chapitre sont sélectionnés après une analyse d'environ 120 articles publiés dans les bases de données *ScienceDirect*, *Google Scholar*, *Wiley Online Library*, *Taylor & Francis*, *Emerald* et *Springer*, etc. Pour le choix des articles étudiés, le filtrage est fait en fonction des mots clés et des titres. Ainsi, les articles sont structurés autour de la distribution collaborative, le transport collaboratif, la collaboration horizontale, la mutualisation, la logistique collaborative, etc.

Comme le montre la Figure 24, les problèmes traités par la collaboration horizontale peuvent être classés selon les trois niveaux de décision : stratégique, tactique et opérationnelle (Amer & Eltawil, 2015).

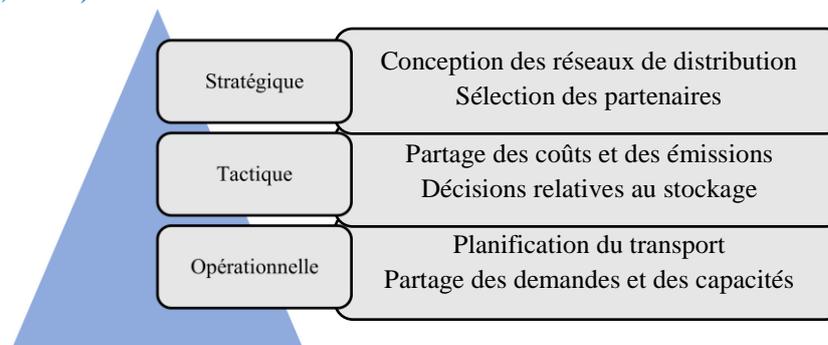


Figure 24. Problèmes étudiés dans le cadre de la collaboration horizontale

## 2.1. Niveau stratégique

Le niveau stratégique concerne l'orientation générale de l'entreprise et implique des décisions à long terme qui affectent son avenir, telles que le problème de conception des réseaux de distribution collaboratifs et le problème de sélection des partenaires.

### 2.1.1. Conception des réseaux de distribution collaboratifs

La conception des réseaux de distribution collaboratifs vise à réorganiser ou à concevoir un réseau commun en partageant les moyens et les ressources entre les partenaires. L'objectif principal d'un réseau collaboratif est de consolider les flux logistiques de différentes chaînes logistiques (Pan et al., 2019). En matière de modélisation mathématique, le problème de conception des réseaux de distribution collaboratifs est similaire au problème classique de réseaux de distribution (Campbell et al., 2005) et il a rarement été étudié dans la littérature.

Selon (Groothedde et al., 2005), le problème de conception d'un réseau de distribution mutualisé consiste à : (1) trouver les emplacements optimaux des installations des hubs (entrepôts et centres de distribution), (2) attribuer les nœuds aux hubs, (3) déterminer les liens entre les hubs ; et (4) acheminer les flux à travers le réseau.

La Figure 25 montre la différence entre un réseau de distribution collaboratif et non-collaboratif. Avant collaboration, chaque origine (exemple : fournisseur) est indépendante de l'autre en transport et en entrepôt. En effet, chacun utilise son propre entrepôt pour desservir ses clients. Après collaboration, les partenaires partagent un entrepôt mutualisé pour massifier les flux et regrouper les marchandises à livrer dans les mêmes véhicules.

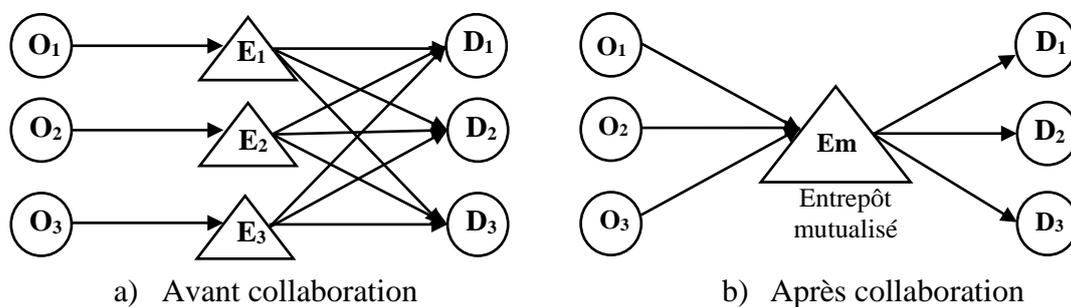


Figure 25. Réseau de distribution avant et après collaboration

Cheong et al. (2007) ont abordé le problème de conception d'un réseau de distribution en proposant un modèle mathématique en PLNE (Programmation Linéaire en Nombre Entiers) (en anglais ILP : *Integer Linear Programming*). Le modèle consiste à minimiser les coûts logistiques générés par le stockage, le transport et l'exploitation des entrepôts. En raison de la longue distance à parcourir, l'objectif de cette étude a été de trouver les meilleures localisations et le nombre optimal des hubs mutualisés entre les fournisseurs et les clients. Le réseau de distribution étudié se constitue de trois échelons (fournisseurs-hubs amonts-hubs aval-clients). L'étude vise aussi à déterminer la bonne fréquence d'expédition en faisant une planification multi-périodique du transport. La résolution du problème est réalisée par le solveur *Lingo* pour les problèmes de petite taille et à travers la relaxation lagrangienne combinée avec l'heuristique pour les problèmes de grande taille. Cependant, les auteurs dans cette étude ont pris en considération uniquement les indicateurs économiques. D'autre part, ils n'ont pas considéré les coûts engendrés par le retard de livraison.

Ballot et Fontane (2010) ont étudié le même problème en proposant un modèle mathématique en MILP (*Mixed Integer Linear Programming*) qui a pour objectif de minimiser les émissions de CO<sub>2</sub> engendrées par le transport. Les résultats ont montré que la collaboration horizontale peut améliorer davantage la performance de la collaboration verticale. La principale conclusion de ce travail est que la collaboration horizontale a permis d'atteindre une économie potentielle d'au moins 25% des émissions de CO<sub>2</sub> par rapport au scénario non-collaboratif où chaque partenaire est indépendant de l'autre en transport et en entrepôt. Les résultats ont montré également qu'il est toujours intéressant de mutualiser les réseaux de distribution tant qu'il existe suffisamment de flux à regrouper et que les partenaires soient suffisamment proches les uns des autres. Une autre conclusion très importante est que, dans le cadre de la collaboration entre des partenaires à faible et à fort volume, ceux qui envoient de faibles volumes pourraient bénéficier d'une amélioration importante par rapport aux autres fournisseurs. Ceci est désavantageux pour ces derniers qui envoient des forts volumes puisqu'ils ont déjà tendance à exploiter des véhicules entièrement chargés. Les auteurs n'ont pas pris en considération que l'aspect environnemental. De plus, la livraison est réalisée par une flotte homogène de véhicules.

Par ailleurs, Pan et al. (2013) ont abordé le problème de conception d'un réseau de distribution mutualisé en proposant un modèle en MILP. L'objectif est de minimiser les émissions de CO<sub>2</sub> dues au transport de marchandises dans un réseau de distribution à trois échelons qui comporte des fournisseurs collaborant pour livrer leurs produits vers des détaillants par l'intermédiaire des hubs en amont et en aval. Les auteurs ont exploré l'effet de la mutualisation en livrant les marchandises par deux modes de transport : routier et ferroviaire. Les résultats ont montré que la mutualisation représente une solution significative sur le plan environnemental. En effet, il est possible de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de 14% et 52% en utilisant respectivement le transport routier et la combinaison des deux modes. Dans cette étude, les auteurs ont supposé que la livraison est réalisée par une flotte homogène de véhicules entièrement chargés.

Pan et al. (2014) ont présenté une extension de l'étude précédente en minimisant les coûts de transport en plus des émissions de CO<sub>2</sub> dans un réseau de distribution à deux échelons. Les coûts de stockage sont évalués après résolution du modèle mathématique à cause de la non-linéarité de sa formulation. Les principaux résultats ont montré que la mutualisation entraîne dans tous les cas une réduction significative des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub> engendrés par le transport d'environ 14% à 52% par rapport au réseau de distribution traditionnel. Les auteurs ont pu montrer que plus le nombre de hubs mutualisés augmente, plus les coûts et les émissions de CO<sub>2</sub> diminuent. Dans cette étude, les auteurs n'ont pas pris en considération les coûts et les émissions de CO<sub>2</sub> engendrés par les hubs, ce qui ne permet pas toujours de confirmer cette dernière conclusion. En revanche, les scénarios contenant des tournées de véhicules en amont et en aval du réseau de distribution ne permettent pas de minimiser directement les émissions de CO<sub>2</sub>. En effet, dans ces scénarios, la fonction objectif consiste à résoudre le problème des tournées de véhicules en minimisant uniquement les distances parcourues et non pas les coûts et les émissions de CO<sub>2</sub>. D'autre part, les capacités des hubs ne sont pas prises en considération et la livraison est réalisée à travers une flotte homogène de véhicules.

Verdonck et al. (2016) ont abordé le problème de la localisation des installations dans un contexte collaboratif. Le réseau de distribution considéré est à deux échelons et comporte des dépôts, des centres de distribution et des clients. Le problème est modélisé en MILP et consiste à ouvrir un sous-ensemble des centres de distribution associés aux partenaires collaborant et à déterminer les affectations optimales entre les différents nœuds. Cet objectif a été atteint en minimisant les coûts causés par le transport et les opérations dans les centres de distribution. Dans le but d'analyser les avantages de la collaboration, les auteurs se sont basés sur un plan

expérimental issu d'une étude de cas britannique. Les résultats ont montré que le partage des centres de distribution et la consolidation des flux permettent non seulement de réduire les coûts logistiques de 3.5% à environ 22%, mais aussi de réduire le nombre total de kilomètres parcourus. Cependant, les auteurs n'ont pas évalué l'impact de la collaboration sur les autres aspects de durabilité, à savoir l'aspect environnemental et l'aspect social. D'autre part, la livraison est effectuée uniquement par une flotte homogène de véhicules.

Tang et al. (2019) ont traité le problème de conception d'un réseau de distribution mutualisé à deux échelons sur un horizon multi-périodique. Le réseau est composé de fournisseurs qui collaborent pour livrer un ensemble de clients en utilisant des centres de distribution régionaux. Les auteurs ont proposé un modèle mathématique en MILP pour minimiser les coûts induits par le transport des marchandises et la manutention des centres de distribution régionaux. L'objectif est de localiser certains centres de distribution, de définir les itinéraires de distribution et d'établir des plans de chargement optimisés. Les auteurs ont montré que puisqu'il n'y a pas de coût fixe associé à la sélection des installations, plus le nombre d'installations augmente, plus le coût diminue, cette conclusion est conforme à celle de (Pan et al., 2014). Dans cette étude, les capacités des centres de distribution ne sont pas considérées et la livraison est réalisée avec une flotte homogène de véhicules. D'autre part, les auteurs n'ont pas pris en considération les autres types de coûts (ouverture, pénalité, etc.) et les deux autres aspects de durabilité, notamment l'aspect environnemental qui est désormais une nécessité.

Habibi et al. (2018) se sont référés à la formulation donnée par Ebery et al. (2000) pour traiter le problème de la conception des réseaux de distribution mutualisés. Le problème est formulé en MILP et a pour objectif de réduire les coûts générés par le transport et l'installation des hubs. Les auteurs ont pris en considération l'incertitude au niveau des coûts supplémentaires inclus dans le coût d'installation des hubs mutualisés. Habibi et al. (2018) ont comparé les performances de quatre scénarios : pas de collaboration (1), collaboration centralisée (2), collaboration centralisée avec coût supplémentaire incertain (3) et collaboration optimisée avec coût supplémentaire incertain (4). Les résultats ont montré que le deuxième et le quatrième scénarios sont les meilleurs en termes des coûts. Toutefois, si l'incertitude du coût supplémentaire est considérée, le quatrième scénario devient le meilleur. Les auteurs se sont limités à la dimension économique. D'autre part, la livraison est réalisée par une flotte homogène de véhicules.

Nataraj et al. (2019) ont mis l'accent sur le problème de routage et de localisation (en anglais : LRP *Location Routing Problem*) dans un contexte collaboratif pour combiner entre les décisions de localisation des centres de distribution urbaine et les tournées de véhicules. Les auteurs ont traité quatre scénarios. Le premier scénario est non-collaboratif où chaque entreprise gère ses problèmes de routage de véhicules indépendamment des autres. Le deuxième est un scénario de faible coopération où les entreprises ne partagent que les dépôts de stockage et non le transport. Le troisième est un scénario semi-coopératif, basé sur des décisions centralisées de planification d'itinéraires. Le dernier est un scénario hautement collaboratif où les décisions concernant l'emplacement des installations et le routage des véhicules, sont prises par consensus entre tous les partenaires. La résolution de ces scénarios est réalisée par les heuristiques. Les indicateurs évalués par les auteurs sont les coûts de routage des véhicules et de mise en place des centres de distribution urbaine ainsi que les émissions de CO<sub>2</sub> dues au transport. Les résultats ont montré que les scénarios collaboratifs permettent d'obtenir des résultats bien meilleurs que le scénario non-collaboratif. Ces résultats dépendent fortement du degré de la collaboration. Selon les auteurs, il est clair que plus ce degré est élevé, plus les bénéfices sont importants. La distribution des marchandises est effectuée par une flotte homogène de véhicules et les auteurs n'ont pas pris en considération d'autres contraintes telles

que les délais de livraison, le stockage, les émissions générées par les centres de distribution urbaine et la congestion, etc.

Hacardiaux et al. (2020) ont proposé un modèle mathématique de programmation quadratique conique en nombre entiers mixtes (en anglais MICQP : *Mixed Integer Conic Quadratic Programming*) pour étudier le LIP (*Location Inventory Problem*). Le modèle vise à déterminer le nombre et les emplacements des centres mutualisés de distribution, à attribuer les nœuds et à déterminer la taille des expéditions et les niveaux de stock. Ces objectifs ont été atteints en réduisant les coûts générés par le transport, le stockage, le passage des commandes et l'installation des centres de distribution ainsi qu'en réduisant les émissions de CO<sub>2</sub> dues au transport. Le modèle a également permis d'attribuer directement les coûts et les émissions de CO<sub>2</sub> aux partenaires spécifiques. Dans le but de trouver un bon compromis entre les deux dimensions, économique et environnementale, les auteurs ont utilisé deux approches pour résoudre le modèle multi-objectif. La première approche, appelé articulation niveau de la coalition, consiste à faire l'agrégation des objectifs des différents partenaires. La seconde approche, appelée méthode de la somme pondérée, consiste à attribuer un poids variable qui favorise un objectif par rapport à un autre. Dans cette étude, la livraison est réalisée par une flotte homogène de véhicules. En plus, les émissions engendrées par la construction et le fonctionnement des centres de distribution ne sont pas prises en considération.

Dans le cadre du projet SCALE (*Step Change Agri-food Logistics Ecosystems*) (Project SCALE, 2012), Allaoui et al. (2019) ont proposé un modèle mathématique en MILP pour étudier un réseau de distribution agro-alimentaire afin de vérifier la performance de la collaboration horizontale. Les auteurs ont également proposé un outil d'aide à la décision pour aider les décideurs à choisir les meilleures solutions qui offrent un bon compromis entre les indicateurs économiques, environnementaux et sociaux. Dans cette étude, les auteurs n'ont pas pris en considération les émissions dégagées par les entrepôts mutualisés.

Fernández et Sgalambro (2020) ont étudié le LRP en proposant des modèles mathématiques en MILP pour minimiser les coûts de distribution du fret. Les auteurs ont comparé les performances des trois stratégies collaboratives avec celles des stratégies traditionnelles non-collaboratives. Les résultats ont montré que des économies allant jusqu'à 50% peuvent être réalisées lorsque le nombre de transporteurs augmente ou que le nombre des hubs ouverts diminue. Les analyses théoriques effectuées par les auteurs ont montré que des économies importantes peuvent être réalisées par rapport aux stratégies traditionnelles non-collaboratives. Dans cette étude, les auteurs n'ont pas pris en considération les capacités des hubs et des véhicules, et ils se sont limités à l'évaluation des coûts de distribution, bien qu'il soit important de considérer d'autres aspects de durabilité pour ce type de problème.

Dans le même contexte, Ouhader et El kyal (2020) ont étudié le 2E-LRP (*Two-Echelon Location Routing Problem*) dans un cadre collaboratif en minimisant les coûts et les émissions de CO<sub>2</sub> engendrés par le transport des marchandises. Ce problème combine les deux décisions de localisation des installations et de routage des véhicules. Les auteurs ont utilisé la méthode  $\epsilon$ -contrainte pour résoudre le problème en combinant les deux objectifs : économique et environnemental. Cette approche consiste à minimiser un des deux objectifs en mettant les autres objectifs sous forme de contraintes à respecter. La planification du transport est mono-périodique et la flotte de véhicules utilisés est homogène.

Leitner et al. (2011) ont abordé le problème de conception d'un réseau mutualisé de distribution en identifiant les partenaires compatibles. Les auteurs ont eu recours à la simulation puisque cette dernière a déjà montré de manière satisfaisante sa capacité à illustrer et à évaluer les systèmes avec un comportement dynamique. À cette fin, deux études de cas du secteur

automobile situées en Roumanie et en Espagne ont été traitées. Les résultats de la première étude de cas ont montré que la collaboration horizontale permet de réduire les coûts et les émissions de CO<sub>2</sub> de 15% et 40%, respectivement. Dans la deuxième étude de cas, les résultats obtenus ont montré que la collaboration entraîne une réduction du nombre de déplacements de 14%, une réduction de la consommation du carburant, une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de 17% et une augmentation du taux de remplissage. La principale limite de cette étude est que les auteurs n'ont pas évalué l'impact de la collaboration sur l'aspect social.

Par ailleurs, [Groothedde et al. \(2005\)](#) ont utilisé une heuristique pour concevoir un réseau de distribution collaboratif. Les objectifs de l'étude sont de déterminer le nombre optimal des hubs, leurs emplacements et la meilleure fréquence d'expédition. En d'autres termes, l'objectif est de trouver la meilleure combinaison des plateformes. Ces objectifs sont atteints en minimisant les coûts de transport intermodal, de manutention, de traitement des commandes et de stockage. Les résultats ont montré que la collaboration conduit à des résultats remarquables. Néanmoins, les auteurs n'ont pas pris en considération l'impact de la collaboration sur d'autres aspects de la durabilité, y compris l'environnement à travers l'évaluation des émissions de CO<sub>2</sub>.

Dans une optique similaire, [Tuzkaya et Önüt \(2009\)](#) ont abordé le problème de conception d'un réseau mutualisé de distribution à deux échelons qui comporte plusieurs fournisseurs, livrant plusieurs produits vers les fabricants par le biais d'un entrepôt partagé. Le modèle proposé est en PL (Programmation Linéaire) où la fonction objectif permet de réduire les coûts logistiques engendrés par le transport, le chargement et le déchargement des marchandises, le stockage et la pénalité due au retard de livraison. Cependant, cette étude n'évalue que les coûts logistiques en négligeant les dimensions environnementale et sociale.

[Quintero-Araujo et al. \(2017\)](#) ont abordé le problème intégré de routage et de localisation des installations (en anglais : l'IRFLP *Integrated Routing and Facility Location Problem*) dans le cadre d'une collaboration horizontale. Les auteurs ont traité trois scénarios, à savoir : un scénario non coopératif dans lequel toutes les décisions sont prises individuellement (1) ; un scénario semi-coopératif dans lequel les décisions de planification des itinéraires sont prises conjointement (2) ; et un scénario entièrement coopératif dans lequel les décisions de planification des itinéraires et de localisation des installations sont prises conjointement (3). Les auteurs ont eu recours à l'algorithme BR-VNS (*Biased Randomised Variable Neighbourhood Search*) pour optimiser les coûts de transport et d'ouverture des entrepôts ainsi que les émissions de CO<sub>2</sub> liées au transport. Les résultats rapportés suggèrent que des économies importantes (compte tenu des coûts d'ouverture des dépôts, d'acheminement et d'utilisation des véhicules) peuvent être réalisées en appliquant la collaboration horizontale, notamment dans le cas où la collaboration entre les partenaires est totale.

[Wang et al. \(2014a\)](#) ont abordé le problème de localisation des hubs nécessaires à la collaboration centralisée des transporteurs. Le problème est modélisé en PLNE dont la fonction objectif est de minimiser les coûts engendrés par le transport et l'ouverture des hubs.

[Aloui et al. \(2021a\)](#) ont étudié le problème ILRP (*Inventory Location Routing Problem*) en développant un modèle mathématique en MILP pour réduire les coûts engendrés par le transport, la manutention, le stockage et l'ouverture des entrepôts ainsi que les émissions de CO<sub>2</sub> générées par le transport et les opérations d'entreposage.

Le Tableau 6 est un récapitulatif des études citées, classées selon les aspects de la durabilité pris en compte.

Référence	Approche	Economique Coûts de :	Environnemental Emissions de CO <sub>2</sub> dues au/à la :	Social
Groothedde et al. (2005)	Heuristique	Transport Stockage Passage des commandes Manutention		
Cheong et al. (2007)	PLNE	Transport Stockage Exploitation des entrepôts		
Tuzkaya et Önüt (2009)	PL	Transport Manutention Stockage Retard de livraison		
Ballot et Fontane (2010)	MILP		Transport	
Leitner et al. (2011)	Simulation	Transport	Transport	
Pan et al. (2013)	MILP		Transport	
Moutaoukil et al. (2013)	Simulation	Transport Manutention	Transport	Risque accident
Pan et al. (2014)	MILP	Transport Stockage (post- évaluation)	Transport	
Wang et al. (2014a)	PLNE	Transport Ouverture des hubs		
Verdonck et al. (2016)	MILP	Transport Exploitation des entrepôts		
Ouhader et El Kyal (2017)	MILP	Transport	Transport	Opportunités d'emplois
Habibi et al. (2018)	MILP	Transport Ouverture des hubs		
Tang et al. (2019)	MILP	Transport Manutention		
Nataraj et al. (2019)	Heuristique	Transport Ouverture des hubs	Transport	
Allaoui et al. (2019)	MILP et méta- heuristique	Coût logistique	Transport Consommation de l'eau et d'énergie	Opportunités d'emplois Risque d'accident
Hacardiaux et al. (2020)	MICQP	Transport Stockage Ouverture des hubs Passage des commandes	Transport	
Fernández et Sgalambro (2020)	MILP	Transport		
Ouhader et El kyal (2020)	MILP	Transport	Transport	
Aloui et al. (2021a)	MILP	Transport Stockage Manutention	Transport Fonctionnement des entrepôts	

**Tableau 6.** Récapitulatif des études traitant le problème de conception des réseaux de distribution

### 2.1.2. Sélection des partenaires

Le problème de sélection des partenaires est la base de réussite ou de l'échec de la collaboration horizontale (Crujssen et al., 2007a). En effet, la collaboration horizontale se produit lorsque deux ou plusieurs entreprises concurrentes coopèrent pour partager leurs moyens et ressources. Il est très important de noter que la sélection des partenaires et la gestion de la phase de négociation sont généralement reconnues comme étant les plus critiques (Pomponi et al., 2013). La collaboration consiste donc à identifier et à exploiter des situations gagnant-gagnant, ce qui présente une opportunité pour chaque partenaire d'en tirer des bénéfices (Naesens et al., 2009). Par conséquent, deux ou plusieurs entreprises prêtes à travailler ensemble doivent vérifier si elles sont stratégiquement adaptées à la collaboration ou non. L'objectif principal de ce problème est de sélectionner les partenaires appropriés pour la collaboration en se basant sur plusieurs critères. Selon (Chen & Goh, 2019), les études portant sur l'évaluation et la sélection des partenaires sont peu nombreuses.

Généralement, la sélection des partenaires est basée sur des critères d'évaluation quantitatifs et qualitatifs. Par conséquent, elle peut être décrite comme un problème de prise de décision multicritères MCDM (*Multi-Criteria Decision Making*), qui implique les critères de décision, le décideur et la méthode de décision.

Dans le cadre d'un réseau collaboratif de distribution, Ding et Liang (2005) ont utilisé l'approche FMCDM (*Fuzzy Multiple Criteria Decision-Making*) pour déterminer le partenaire le plus approprié. Les auteurs ont pris en considération plusieurs attributs tels que les capacités complémentaires et les installations. En outre, Büyüközkan et al. (2008) ont combiné les deux approches FAHP (*Fuzzy Analytic Hierarchy Process*) et TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) pour évaluer les partenaires de la collaboration en intégrant des données incertaines et imprécises dans le processus d'évaluation. Les auteurs ont utilisé deux groupes de critères. Le premier se concentre sur les aspects stratégiques des partenaires tels que les objectifs, la taille, la stabilité financière, la culture, les antécédents de réussite et la capacité à développer une relation durable. Le second utilise des critères d'évaluation qui mesurent les aspects importants de l'activité du partenaire dans quatre principaux sous-groupes, à savoir son expertise technique, sa performance, sa qualité et son expérience dans la gestion.

En outre, Bahinipati et al. (2009) ont fourni un modèle quantitatif pour évaluer le degré de la collaboration horizontale et tester la compatibilité entre les partenaires. L'approche AHP-FLM (*Analytic Hierarchy Process-Fuzzy Logic Model*) a été utilisée pour vérifier la compatibilité stratégique des partenaires, notamment les caractéristiques du secteur, les avantages compétitifs ainsi que les paramètres internes et externes de chaque partenaire. Selon (Feng et al., 2010), le succès de la collaboration dépend fortement de la sélection des partenaires. Ces auteurs ont utilisé l'approche FMADM (*Fuzzy Multiple Attribute Decision Making*) pour sélectionner les partenaires appropriés en fonction des critères fournis par des experts. Ces critères sont de deux types : individuels et collaboratifs. Le premier correspond à la capacité technologique, la santé financière, la connaissance et l'expérience en matière de gestion ainsi que la capacité à accéder aux nouveaux marchés. Les critères collaboratifs correspondent à la complémentarité des ressources, au chevauchement des bases de connaissances, à la correspondance des objectifs et à la compatibilité culturelle. L'approche est

appliquée pour sélectionner deux entreprises parmi sept pour qu'elles collaborent avec l'entreprise Baosight, qui est classée parmi les cinq premières entreprises de logiciels en Chine.

Chen et al. (2010) ont développé un mécanisme de sélection des partenaires en utilisant l'AHP et en considérant les critères de compatibilité organisationnelle, de capacité technologique, de ressources pour la R&D et de conditions financières. Par ailleurs, Creemers et al. (2017) ont proposé un outil permettant d'identifier les partenaires potentiels pour une collaboration dans le domaine du transport maritime. La sélection est effectuée à l'aide de l'algorithme BBaRT (*Bundling, Back-hauling, and Round-trip Tool*) et basée sur la compatibilité géographique des partenaires. Dans le même contexte, Ben Jouida et al. (2017) ont évalué la rentabilité attendue de chaque partenaire afin de pouvoir sélectionner ceux qui doivent participer à la collaboration. Le problème est résolu en utilisant la théorie des jeux coopératifs par le biais d'un algorithme de reconstitution coopérative (en anglais CRA : *Cooperative Replenishment Algorithm*).

Selon (Chen & Goh, 2019), ignorer le facteur coopératif peut conduire à une plus grande probabilité d'échec, même si les partenaires ont un bon historique de performance. À cette fin, ces auteurs ont abordé le problème de sélection des partenaires en utilisant la théorie du double facteur : individuel et collaboratif. Le premier facteur fait référence à la détermination du potentiel de création d'un avantage concurrentiel par la collaboration. Le second facteur fait référence à la possibilité et à la stabilité d'une coopération réussie. Les auteurs ont utilisé deux approches multicritères, à savoir le TFSS (*Triangular Fuzzy Soft Set*) et le TODIM (l'acronyme en Portugais pour « *Interactive Multi-criteria Decision Making* »).

Le Tableau 7 présente un récapitulatif des études traitant le problème de sélection des partenaires.

Références	Approches	Type de critères	Critères
Ding et Liang (2005)	FMCDM	Critères individuels	Capacités complémentaires Similitudes de correspondance Santé financière Installations physiques Disponibilité des équipement adéquats Actifs incorporels Accès à la connaissance du marché
Büyüközkan et al. (2008)	FAHP	Critères sur l'aspect stratégique	Objectifs de chaque partenaire Taille du partenaire Stabilité financière Culture de chaque partenaire Antécédent de réussite Capacité à développer une relation durable
		Critères d'évaluation	Expertise technique Performance Qualité des partenaires Expérience de gestion
Bahinipati et al. (2009)	AHP-FLM	Caractéristiques de l'industrie	Structure de l'industrie Stabilité financière Réputation globale
		Avantages compétitives	Orientation du produit Avantage concurrentiel général
		Paramètres internes	Paramètres opérationnels Paramètres tactiques Paramètres stratégiques
		Paramètres externes	Caractéristiques du produit Orientation de l'industrie
Feng et al. (2010)	FMADM	Critères individuels	Capacité technologique

			Santé financière
			Connaissances et expériences en gestion
			Capacité à accéder aux nouveaux marchés
		Critères collaboratifs	Complémentarité des ressources
			Chevauchement des bases de connaissances
			Correspondance des objectifs
			Compatibilité culturelle
Chen et al. (2010)	AHP	Compatibilité organisationnelle	Compatibilité des stratégies d'entreprise
			Symétrie d'échelle et de portée
			Culture de gestion et d'organisation
		Capacité technologiques	Confiance et engagement mutuels
			Capacité de la technologie de fabrication
			Développement et amélioration des produits
			Capacité d'innovation et d'invention
			Etendu possible de l'application des compétences
		Ressources pour la R&D	Intensité de l'investissement en R&D
			Etendu des ressources complémentaires
			Nombre de personnels en R&D
			Qualité du personnel en R&D
		Conditions financières	Retour sur investissement des cinq dernières années
			Rentabilité future
			Potentiel de croissance
Ben Jouida et al. (2017)	CRA	Conditions financières	Rentabilité attendue de chaque partenaire
Creemers et al. (2017)	BBaRT	Critères individuels	Compatibilité géographique et volume des marchandises livrées
Chen et Goh (2019)	TFSS et TODIM	Critères individuels	Opérations et santé financière
			Connaissances et expérience managériale
			Distance géographique
			Capacité technologique
		Critères collaboratifs	Compatibilité de culture
			Confiance et engagement
			Volonté de partage d'information
			Avantages complémentaires

**Tableau 7.** Récapitulatif des études traitant le problème de sélection des partenaires

La sélection des partenaires appropriés revêt une importance particulière dans la mise en œuvre de la collaboration horizontale. Après cette analyse, nous pouvons constater que les critères et les sous-critères utilisés sont principalement basés sur des critères individuels (capacité technologique, santé financière, expérience managériale, capacité à accéder à un nouveau marché, caractéristique du produit, etc.) et des critères collaboratifs (correspondance des objectifs, compatibilité culturelle, ressources techniques, etc.). Cependant, ces études négligent les critères qui concernent la participation des partenaires à la durabilité, notamment à travers leurs impacts sur l'environnement et leurs images de marque auprès des clients.

## 2.2. Niveau de décision tactique

Le niveau tactique concerne les décisions à moyen terme qui jouent un rôle important pour assurer le succès des décisions prises au niveau stratégique ou opérationnel. Généralement, le niveau tactique comprend deux problèmes principaux : le partage des avantages de la collaboration horizontale et les décisions relatives aux stocks.

### 2.2.1. Partage des économies de la collaboration

Plus de 70% des collaborations échouent (Zineldin & Bredenlöv, 2003) en raison de plusieurs facteurs et obstacles qui relèvent généralement de quatre domaines : les partenaires,

la détermination et la répartition des gains, la négociation, la coordination et les technologies de l'information et de la communication (Crujssen et al., 2007a).

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons particulièrement au problème de répartition des avantages de la collaboration horizontale en termes de coûts et d'émissions de CO<sub>2</sub>. En effet, il existe plusieurs points à négocier entre les partenaires avant la mise en place de la mutualisation. Parmi ces points, il s'agit de savoir comment le coût total ou les économies seront répartis entre les participants. D'autre part, avant de commencer une telle collaboration, il faut disposer d'une estimation des gains et donc d'une approche de répartition équitable. Dans ce paragraphe, nous présentons une analyse exhaustive de la littérature portant sur le problème du partage des économies obtenues grâce à la collaboration horizontale.

La littérature comprend deux types d'approches, à savoir les approches classiques et celles basées sur la théorie des jeux coopératifs.

Dans le cadre de la planification du transport collaboratif, Frisk et al. (2010) ont utilisé plusieurs méthodes d'allocation, à savoir la méthode Volume, la valeur de Shapley, le Nucleolus, la CGM (*Cost Gap Method*) et l'ACAM (*Avoided Cost Allocation Method*). L'objectif est de répartir les coûts de transport générés par la collaboration de huit sociétés forestières situées dans le sud de la Suède.

Selon Frisk et al. (2010), il serait avantageux d'avoir une allocation initiale où les gains relatifs sont similaires autant que possible pour tous les partenaires. Pour cette raison, les auteurs ont proposé une nouvelle approche appelée EPM (*Equal Profit Method*). Dans un deuxième temps, les auteurs ont démontré que l'ECM (*Equal Cost Method*) et l'ACAM satisfont les deux propriétés Pareto-efficacité et symétrie. Tandis que la méthode CGM vérifie la rationalité individuelle et la propriété fictive en plus. Frisk et al. (2010) et Vanovermeire et Sörensen (2014) ont démontré la non-stabilité de la méthode Volume étant donné qu'un partenaire peut réduire son coût en changeant de sous-coalition. L'allocation par la méthode EPM n'est pas toujours unique. Ainsi, Dahlberg et al. (2017) ont présenté une autre approche qui garantit une solution unique, c'est la méthode LEPM (*Lexicographic Equal Profit Method*). En outre, Defryn et al. (2014) ont utilisé plusieurs approches pour répartir les coûts de transport. Parmi ces approches, nous retrouvons la méthode Volume, la valeur de Shapley, le Nucleolus, l'ACAM et l'EPM.

Par ailleurs, Massol et Tchong-Ming (2010) ont étudié le problème d'allocation des coûts de transport en utilisant la valeur de Shapley et le Nucleolus. Étant donné que la pensée verte devient également un facteur de réussite critique, Wick et al. (2011) ont eu recours à la valeur de Shapley pour allouer les émissions de CO<sub>2</sub> dans le cadre de la mutualisation. Les auteurs ont utilisé la simulation assistée par ordinateur et la recherche opérationnelle pour remédier à la complexité de la valeur de Shapley.

Dans le cadre d'un système de transport collaboratif, Algaba et al. (2019) ont proposé deux approches théoriques basées sur la théorie des jeux coopératifs appelées ES (*Egalitarian Solution*) et CCPS (*Coloured Cost Proportional Solution*). Les auteurs ont démontré que les deux approches sont stables. Par ailleurs, Leenders et al. (2017) ont utilisé deux types d'approches pour allouer les émissions de CO<sub>2</sub> générées par le transport. La première est une méthode classique qui combine entre le volume et la distance parcourue pour satisfaire les clients. La deuxième est une méthode basée sur la théorie des jeux coopératifs, il s'agit de la méthode  $\tau$ -Value. Il est facile d'introduire plusieurs critères dans cette dernière approche. Par conséquent, les auteurs y ont introduit la quantité commandée par chaque client, la distance

origine-destination, la distance relative par rapport aux entrepôts ainsi que la distance relative par rapport aux autres clients.

Dans le cadre de la conception d'un réseau mutualisé de distribution, [Habibi et al. \(2018\)](#) ont utilisé trois approches pour allouer les coûts. Il s'agit de la valeur de Shapley, de Volume et de l'EA (*Egalitarian Allocation*) où les coûts sont divisés d'une façon équitable entre deux réseaux de distribution. Les auteurs ont appliqué ces approches pour répartir les coûts générés par l'installation des hubs et le transport de marchandises. Dans le même contexte, [Ouhader et El Kyal \(2020\)](#) ont utilisé la valeur de Shapley pour allouer les coûts et les émissions de CO<sub>2</sub> générés par le transport lors de la conception d'un réseau mutualisé de distribution. En outre, [Xu et al. \(2012\)](#) ont utilisé la valeur de Shapley pour partager les coûts et les taxes sur les émissions de CO<sub>2</sub> générés par le transport de marchandises. Récemment, [Hacardiaux et al. \(2020\)](#) ont introduit la rationalité individuelle des entreprises dans un modèle mathématique non linéaire pour tenir compte des préférences des entreprises. L'objectif est de permettre à chaque partenaire de spécifier sa préférence concernant la réduction des coûts par rapport à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Les auteurs ont utilisé l'approche Volume et l'approche SDA (*Separate Deliveries Weighted*) pour partager respectivement les coûts de localisation et de transport.

Concernant la distribution collaborative des marchandises, [Lozano et al. \(2013\)](#) ont abordé le problème d'allocation des coûts du transport en se basant sur la théorie des jeux coopératifs dans le but de trouver un système équitable entre les partenaires. Les auteurs ont utilisé quatre approches pour allouer les coûts d'expédition des marchandises, à savoir la valeur de Shapley, la  $\tau$ -Value, la Core-centre et la Minmax core. Sur la base d'une comparaison selon l'écart moyen absolu entre les parts des coûts attribués aux différents partenaires, les auteurs ont pu montrer que les deux approches  $\tau$ -Value et la valeur de Shapley donnent des solutions trop proches. De plus, [Audy et al. \(2011\)](#) ont traité le problème de répartition des coûts de transport entre les partenaires d'une collaboration en utilisant l'EPM et l'ACAM. Les résultats obtenus ont montré que la collaboration horizontale répond aux exigences des entreprises immobilières et qu'elle est acceptable par tous les partenaires. Dans un deuxième temps, les auteurs ont proposé une extension de l'approche EPM afin de garantir que le coût alloué à un partenaire soit toujours inférieur à son coût individuel avant la mutualisation. Il s'agit d'introduire un pourcentage minimum d'économie supérieur à zéro. Selon les auteurs, la détermination de ce pourcentage est complexe et repose sur une négociation entre les partenaires.

Par ailleurs, [Dai et Chen \(2012a\)](#) ont utilisé l'approche PA (*Payload Allocation*) pour répartir les coûts générés par la collecte et la livraison dans le cadre d'une collaboration centralisée entre des transporteurs. De même, [Ramaekers et al. \(2017\)](#) ont utilisé la même approche dans le cadre d'une collaboration dans les réseaux de distribution multimodaux. Les coûts alloués sont générés par le transport et le stockage dans les plateformes logistiques. En outre, [Özener et Ergun. \(2008\)](#) ont utilisé la valeur de Shapley et le Nucleolus pour répartir les coûts de la mutualisation entre les expéditeurs. [Vanovermeire et Sörensen. \(2014\)](#) ont utilisé plusieurs approches pour allouer les coûts du transport entre les partenaires, à savoir l'approche Volume, la valeur de Shapley, l'ECM, le Nucleolus ainsi que l'approche ABC (*Activity Based Costing*). Cette dernière consiste à répartir les coûts en fonction du type d'activité. L'objectif principal de cette étude est de récompenser les partenaires les plus flexibles au niveau des délais de livraison.

Dans le cadre des problème des tournées collaboratives de véhicules, [Krajewska et al. \(2008\)](#) ont utilisé la valeur de Shapley pour partager les coûts entre les transporteurs de marchandises.

[Liu et al. \(2010\)](#) ont discuté quelques concepts de répartition des bénéfices tels que l'approche classique PA ainsi que deux autres approches basées sur la théorie des jeux coopératifs, à savoir la valeur de Shapley et le Nucleolus. Dans un deuxième temps, les auteurs ont proposé une nouvelle approche dénommée WRSA (*Weighted Relative Savings Allocation*) qui est basée sur le concept de la théorie des jeux coopératifs. Cette dernière consiste à minimiser la différence maximale entre l'épargne relative pondérée des participants. Par ailleurs, [Kellner et Otto \(2012\)](#) ont utilisé plusieurs approches pour allouer les émissions de CO<sub>2</sub>, à savoir : l'approche EA, l'approche PA, SPA (*Allocation based on tours Stops and Payload*), DDA (*Direct Distance weighted Allocation*), CenA (*Centrality weighted Allocation*), ToKmA (*Tons-Km weighted Allocation*), SDA ainsi que l'approche KTA (*Allocation basing on Tons-km*).

De plus, [Sanchez et al. \(2016\)](#) ont utilisé la valeur de Shapley pour répartir les émissions de CO<sub>2</sub> dues au transport de marchandises. En outre, [Engevall et al. \(1998\)](#) ont utilisé la valeur de Shapley, le Nucleolus et le  $\tau$ -Value pour allouer les coûts dans le cadre d'un problème du voyageur de commerce collaboratif. Dans un deuxième temps, les auteurs ont introduit un nouveau concept appelé *Demand Nucleolus*. Cette approche consiste à attribuer aux clients à forte demande un coût plus élevé. Les auteurs ont constaté que les trois premières approches donnent presque les mêmes répartitions de coûts.

Certains auteurs ont traité le problème de répartition des coûts en lien avec la mutualisation des entrepôts. [Wong et al. \(2007\)](#) ont eu recours à la valeur de Shapley pour traiter la répartition des coûts dans le cadre de la mutualisation des stocks de pièces détachées. Ces coûts sont générés par la détention du stock, le temps d'arrêt et le transport. En outre, [De Vos et Raa \(2018\)](#) ont utilisé la valeur de Shapley et le Nucleolus pour allouer les coûts entre les détaillants. Les auteurs ont constaté qu'il est préférable d'utiliser le Nucleolus pour garantir la stabilité ainsi que les approches d'allocation proportionnelles qui sont faciles à appliquer mais qui ne sont pas stables. De surcroît, [Defryn et al. \(2019\)](#) ont utilisé l'approche Volume pour partager les coûts entre les partenaires dans le cadre du problème des tournées collaboratives de véhicules. Les auteurs ont introduit la propriété de rationalité individuelle dans le modèle mathématique pour remédier à la non-stabilité de l'approche utilisée.

Les deux Tableaux 8 et 9 résument les études traitant le problème de répartition des avantages de la collaboration et les approches utilisées.

Problème	Référence	Partage des coûts	Partage des émissions de CO <sub>2</sub>
Planification du transport collaboratif	<a href="#">Frisk et al. (2010)</a>	✓	
	<a href="#">Dahlberg et al. (2017)</a>	✓	
	<a href="#">Defryn et al. (2014)</a>	✓	
	<a href="#">Massol et Tchung-Ming (2010)</a>	✓	
	<a href="#">Wick et al. (2011)</a>		✓
	<a href="#">Algaba et al. (2019)</a>	✓	
	<a href="#">Leenders et al. (2017)</a>		✓
Conception d'un réseau de distribution mutualisé	<a href="#">Habibi et al. (2018)</a>	✓	
	<a href="#">Ouhader et El kyal (2020)</a>	✓	✓
	<a href="#">Xu et al. (2012)</a>	✓	✓
	<a href="#">Hacardiaux et al. (2020)</a>	✓	✓
	<a href="#">Lozano et al. (2013)</a>	✓	

Distribution collaborative des marchandises	Audy et al. (2011)	✓	
	Dai et Chen (2012a)	✓	
	Vanovermeire et Sørensen. (2014)	✓	
	Ramaekers et al. (2017)	✓	
	Özener et Ergun. (2008)	✓	
Problème des tournées de véhicules collaboratifs	Krajewska et al. (2008)	✓	
	Liu et al. (2010)	✓	
	Sanchez et al. (2016)		✓
	Defryn et al. (2019)	✓	
Voyageur de commerce collaboratif	Engevall et al. (1998)	✓	
Mutualisation des entrepôts	Wong et al. (2007)	✓	
	De Vos et Raa (2018)	✓	

**Tableau 8.** Récapitulatif des études traitant le problème de partage des gains de la collaboration

Type	Approche	Référence	
Approches classiques	ABC	Vanovermeire et Sørensen. (2014)	
	EA	Habibi et al. (2018); Kellner et Otto (2012)	
	PA	Dai et Chen (2012a); Ramaekers et al. (2017) ; Liu et al. (2010) ; (Kellner & Otto, 2012)	
	Volume	Vanovermeire et Sørensen. (2014) ; Defryn et al. (2014) ; Habibi et al. (2018) ; Defryn et al. (2019) ; Hacardiaux et al. (2020)	
	CenA ; ToKmA	Kellner et Otto (2012)	
	KTA ; DDA	Kellner et Otto (2012)	
	SDA	Kellner et Otto (2012) ; Hacardiaux et al. (2020)	
	Approches basées sur la théorie des jeux coopératifs	ACAM	Audy et al. (2011) ; Frisk et al. (2010) ; Defryn et al. (2014) ; Kellner et Otto (2012)
		CCPS	Algaba et al. (2019)
		Core-centre	Lozano et al. (2013)
Demand		Engevall et al. (1998)	
Nucleolus			
ECM		Vanovermeire et Sørensen. (2014) ; Frisk et al. (2010)	
EPM		Audy et al. (2011) ; Frisk et al. (2010)	
ES		Algaba et al. (2019)	
LEPM		Dahlberg et al. (2017)	
Minmax core		Lozano et al. (2013)	
Nucleolus		Özener et Ergun. (2008); Vanovermeire et Sørensen. (2014); Massol et Tchong-Ming (2010) ; Liu et al. (2010) ; Engevall et al. (1998) ; De Vos et Raa (2018) ; Kellner et Otto (2012)	
	Shapley value	Lozano et al. (2013) ; Özener et Ergun. (2008) ; Vanovermeire et Sørensen. (2014) ; Massol et Tchong-Ming (2010) ; Habibi et al. (2018) ; Ouhader et El kyal (2020); Krajewska et al. (2008) ; Liu et al. (2010) ; Engevall et al. (1998) ; Wong et al. (2007) ; De Vos et Raa (2018) ; Frisk et al. (2010) ; Sanchez et al. (2016) ; Kellner et Otto (2012)	
	WRSA	Liu et al. (2010) ; Kellner et Otto (2012)	
$\tau$ -Value	Lozano et al. (2013) ; Frisk et al. (2010) ; Engevall et al. (1998) ; Leenders et al. (2017) ; Kellner et Otto (2012)		

**Tableau 9.** Récapitulatif des approches utilisées pour l'allocation des avantages de la collaboration

## 2.2.2. Décisions relatives au stockage

Selon (Amer & Eltawil, 2015), les entreprises commencent la phase de planification avec une prévision pour l'année à venir. Afin de réduire les erreurs de prévision qui accompagnent les demandes incertaines, Özen et al. (2012) ont utilisé la théorie des jeux coopératifs en abordant la collaboration au niveau du stockage. Les auteurs se sont concentrés sur la coopération entre les détaillants, où ils coordonnent leurs commandes et la réaffectation des commandes, en tenant compte des prévisions actualisées. En outre, Stellingwerf et al. (2018) ont étudié le problème IRP (*Inventory Routing Problem*) avec contrôle de la température des produits. Les auteurs ont utilisé la programmation linéaire pour montrer que la collaboration au niveau des décisions relatives à l'inventaire permet d'apporter des avantages économiques et environnementaux par la réduction des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub>. Le même problème est abordé par Soysal et al. (2018) dans le cadre des produits périssables. Les auteurs ont développé une formulation en programmation linéaire pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> dues au transport et les coûts engendrés par le stockage, le routage des véhicules et la pénalité des produits gaspillés.

Le Tableau 10 est un récapitulatif des études citées.

Références	Approches	Economique Coût de :	Environnemental Emissions de CO <sub>2</sub> dues au :
Özen et al. (2012)	Théorie des jeux coopératifs	Transport Stockage	
Stellingwerf et al. (2018)	PL	Transport Stockage	Transport
Soysal et al. (2018)	PL	Routage des véhicules Pénalité des produits gaspillés Stockage	Transport

Tableau 10. Récapitulatif des études traitant le problème de partage des entrepôts

## 2.3. Niveau opérationnel

Le niveau opérationnel concerne des décisions à court terme et aborde principalement le problème de planification du transport collaboratif et le mécanisme d'échange des demandes.

### 2.3.1. Planification du transport collaboratif

Dans un réseau du transport donné, l'optimisation du transport collaboratif consiste à établir des plans optimaux de transport. Les deux principaux objectifs de ce problème sont : l'amélioration du taux de remplissage des véhicules, notamment pour le transport en LTL (*Less-than TruckLoad*) et la réduction des trajets à vide. Selon (Pan et al., 2019), deux approches de modélisation sont souvent utilisées pour la planification du transport collaboratif, à savoir le problème du routage collaboratif des véhicules (en anglais CVRP, *Collaborative Vehicle Routing Problem*) et le problème de couverture des voies collaboratives (en anglais CLCP, *Collaborative Lane Covering Problem*).

Commençant par le premier type, Krajewska et al. (2008) ont étudié le PDPTW (*Pickup and Delivery Problem with Time Windows*) dans le cadre d'une collaboration horizontale en proposant une approche heuristique basée sur la recherche locale. Les résultats ont montré que la collaboration entre deux transporteurs conduit à une réduction de 10% du nombre de véhicules et à une réduction de 12.46% du coût de routage.

En outre, [Agarwal et Ergun \(2010\)](#) ont étudié un réseau de distribution maritime à grande échelle en étudiant le problème d'ordonnancement et de routage des navires. Ils ont proposé un modèle mathématique en MILP pour déterminer l'ensemble des itinéraires à suivre et les quantités de marchandises à livrer en maximisant le profit de la collaboration. Par ailleurs, [Hernández et al. \(2011\)](#) ont traité le problème de la planification du transport collaboratif entre des transporteurs LTL. Les résultats ont montré que la collaboration est une stratégie viable pour réduire les effets des retards et le coût du transport.

De plus, [Dai et Chen \(2012b\)](#) ont traité le problème du transport collaboratif dans le cadre du CTPLTL (*Collaborative Transportation Planning problem in Less than TruckLoad*). Ce problème a été modélisé en MILP visant à minimiser les coûts induits par le transport. [Wang et al. \(2014b\)](#) ont étendu le routage conventionnel à une planification opérationnelle intégrée du transport en introduisant des ressources externes, y compris des véhicules de sous-traitants et de partenaires de collaboration horizontale. Le problème est modélisé en PLNE visant à minimiser les coûts totaux composés de : coûts fixes des véhicules, coûts de routage et frais de sous-traitance. Les auteurs ont montré que la bonne gestion des relations externes avec les partenaires peut améliorer davantage les résultats de la collaboration.

Par ailleurs, [Montoya-Torres et al. \(2016\)](#) ont proposé un cadre conceptuel pour l'évaluation 'ex-ante' de la mise en œuvre des stratégies collaboratives dans les zones urbaines. Ce cadre utilise des opérations quantitatives et des méthodes de gestion. Les résultats ont montré que le problème de tournées collaboratives de véhicules permet d'améliorer le temps de livraison et de réduire la distance parcourue et par conséquent les coûts et les émissions de CO<sub>2</sub>. Outre ses performances en matière de durabilité, la mutualisation a montré qu'elle peut également améliorer le niveau de service.

[Chabot et al. \(2018\)](#) ont étudié le CVRP en proposant un modèle mathématique en PLNE. Quatre scénarios collaboratifs ont été analysés qui diffèrent par leurs objectifs, à savoir : (1) la minimisation des coûts de transport pour les expéditeurs, (2) la réduction des coûts des transporteurs, (3) la réduction des coûts environnementaux et (4) la combinaison des trois scénarios. Les résultats ont montré que la collaboration permet de réduire considérablement les coûts. Selon [Adenso-Díaz et al., \(2014\)](#), le retour à vide peut être évité si une entreprise peut tirer profit de la collaboration avec un partenaire pour répondre à ses besoins complémentaires en matière de transport. À cette fin, ces auteurs ont proposé un modèle mathématique en QIP (*Quadratic Integer Programming*) pour traiter le problème de planification et de coordination du transport collaboratif. L'objectif est de réduire les coûts de collaboration dans le cadre d'un système de transit par une méta-heuristique appelé GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*).

[Pérez-Bernabeu et al. \(2014\)](#) ont étudié le problème de routage de véhicules multi-dépôts MDVRP (*Multi-Depot Vehicles Routing Problem*) dans un cadre collaboratif. Les auteurs ont proposé un algorithme heuristique pour tester la performance de la collaboration par rapport à la non-collaboration en évaluant les coûts et les émissions de CO<sub>2</sub> engendrés par le transport de marchandises. Selon les résultats expérimentaux, la collaboration horizontale a pu contribuer à une réduction notable des coûts, tant en termes de distance parcourue que d'émissions de gaz à effet de serre.

En outre, [Fernández et al. \(2016\)](#) ont étudié le CVRP pour optimiser le schéma de collaboration entre les transporteurs. Deux modèles mathématiques en MILP ont été proposés. L'objectif est de maximiser le profit total de la collaboration en respectant une limite inférieure du profit individuel afin de s'assurer que tous les transporteurs bénéficient de la collaboration. Les auteurs ont montré que cette solution peut produire une forte augmentation du profit. De

plus, [Hernández et Peeta \(2011\)](#) ont traité le problème de collaboration centralisée entre plusieurs transporteurs LTL qui cherchent à déterminer une stratégie de routage d'un réseau collaboratif dépendant du temps pour une entité centrale telle qu'un 3PL. Le problème est modélisé en PLNE dont l'objectif est de minimiser les coûts induits par le transport, la manutention et le service du 3PL. Dans le même contexte, [Fernández et al. \(2018\)](#) ont abordé le problème du routage des véhicules ou plusieurs transporteurs collaborent pour desservir leurs clients. L'objectif est de réduire le coût opérationnel global généré par la collaboration. Les modèles mathématiques développés sont modélisés en MILP. Les économies obtenues grâce à la collaboration sont encourageantes et peuvent être améliorées davantage en fonction du nombre de partenaires.

Certains auteurs ont pris en considération les fenêtres temporelles et les délais des parcours lors de la planification du transport collaboratif. [Caballini et al. \(2016\)](#) ont étudié le même problème lors de la collaboration entre des transporteurs routiers répondant à leur demande de conteneurs vers et depuis un port maritime. L'objectif est de réduire les trajets à vide en maximisant le profit total tiré de la collaboration. Pour ce faire, les auteurs ont proposé un modèle mathématique en BLP (*Binary Linear Program*).

[Molenbruch et al. \(2017\)](#) ont étudié les effets opérationnels de la collaboration horizontale entre les fournisseurs d'accès à distance. Celle-ci est obtenue par le fait que la planification conjointe des itinéraires implique que les demandes des clients peuvent être échangées entre les fournisseurs afin de minimiser le coût global du routage. Le problème est modélisé en MBLP (*Mixed Binary Linear Programming*) qui a comme objectif de réduire le coût de transport, la distance parcourue et le salaire des chauffeurs.

Selon ([Pan et al., 2019](#)), certains autres chercheurs ont pris en considération le niveau de la disponibilité des informations pour la planification du transport (informations statiques, dynamiques ou en temps réel). [Dai et Chen \(2012b\)](#) ont proposé un modèle en MILP pour étudier le problème de planification du transport collaboratif avec des tâches de collecte et de livraison. Les deux objectifs principaux de cette étude sont de réduire les trajets à vide et d'améliorer le taux de remplissage des véhicules. Les auteurs ont comparé les performances de deux scénarios : collaboratif et non-collaboratif où chaque transporteur est indépendant de l'autre. En outre, [Wang et Kopfer \(2014\)](#) ont montré que le transport collaboratif permet de réaliser des économies potentielles, même en présence de limitations de capacité et de restrictions sur l'exposition des informations. Le problème traité est modélisé par la programmation linéaire, qui consiste à minimiser les coûts fixes de planification et le coût de transport.

[Hernández et Peeta \(2014\)](#) ont traité le problème de la collaboration entre les transporteurs, plus particulièrement, un transporteur LTL cherche à collaborer avec d'autres transporteurs. Les auteurs ont également étudié l'impact du degré de collaboration sur les résultats, celui-ci est représenté par le taux d'escompte collaboratif sur le transporteur d'intérêt. Le problème est formulé sous forme binaire (0-1) et les résultats ont montré qu'un degré de collaboration plus élevé peut réduire davantage les coûts de transport.

Par ailleurs, [Wang et Kopfer \(2015\)](#) ont montré que la collaboration en termes de transport peut aider les transitaires de petite et moyenne taille à profiter des économies d'échelle et à réduire les coûts encourus pour répondre aux demandes des clients. Afin de résoudre ce problème de routage dynamique, les auteurs ont proposé deux approches de planification utilisant la programmation linéaire. La principale conclusion tirée de cette étude est que les transporteurs peuvent améliorer davantage leurs plans de transport s'ils peuvent obtenir des informations sur la demande à l'avance.

Dans le même contexte, [Zhang et al. \(2017\)](#) ont étudié le problème de la planification collaborative du transport pour maximiser le profit total sans réduire le profit individuel des partenaires. Les auteurs ont proposé un algorithme stochastique *plant-pollinator* pour résoudre le problème. Les résultats ont montré que plus le degré de la collaboration est élevé, plus le bénéfice des transporteurs est important. Les résultats ont également montré qu'il est essentiel pour les petits et moyens transporteurs de se joindre à la collaboration afin de survivre à la concurrence, en particulier avec la hausse des prix du carburant.

D'autres études ont évalué les émissions de CO<sub>2</sub> lors de la planification du transport collaboratif. [Muñoz-Villamizar et al. \(2017\)](#) ont évalué la mise en œuvre d'une flotte de véhicules électriques dans la distribution collaborative du fret urbain. L'objectif est de réduire les impacts environnementaux, notamment les émissions de CO<sub>2</sub> tout en maintenant un bon niveau de service. Le problème a été formulé en MILP et résolu par une heuristique pour trouver un bon compromis entre les coûts et les émissions de CO<sub>2</sub>.

Concernant le problème de couverture collaborative des voies CLCP, il vise à trouver un ensemble de plans de transport couvrant toutes les voies de manière à minimiser le coût total. Selon [Kuyzu, 2017](#), la principale différence entre le CVRP et le CLCP est que le premier se concentre sur l'optimisation des tournées, tandis que le second se concentre davantage sur l'optimisation des échanges de voies sans tenir compte des tournées de véhicules. De plus, [Kuyzu \(2017\)](#) a étudié le problème de couverture de voie collaboratif pour couvrir un ensemble d'arcs. Le problème est formulé en MILP qui vise à réduire les coûts du transport. Le même problème est traité par [\(Ergun et al., 2007a\)](#) et [\(Ergun et al., 2007b\)](#). Ces auteurs ont proposé des modèles en PLNE pour montrer que la collaboration est très efficace pour réduire le coût du transport.

Le Tableau 11 est un récapitulatif des études qui traitent le problème de la planification du transport.

	Références	Approches	Economique Coût de :	Environnemental Emissions de CO <sub>2</sub> dues au :
VRP	<a href="#">Krajewska et al. (2008)</a>	Recherche locale	Transport	
	<a href="#">Agarwal et Ergun (2010)</a>	MILP	Transport	
	<a href="#">Hernández et al. (2011)</a>	PLNE	Transport	
	<a href="#">Dai et Chen (2012b)</a>	MILP	Transport	
	<a href="#">Hernández et Peeta (2011)</a>	PLNE	Transport	
			Manutention	
			Service 3PL	
	<a href="#">Dai et Chen (2012b)</a>		Transport	
	<a href="#">Wang et al. (2014b)</a>	PLNE	Utilisation des véhicules	
			Transport	
			Sous-traitance	
	<a href="#">Adenso-Díaz et al. (2014)</a>	QIP	Transport	
	<a href="#">Wang et Kopfer (2014)</a>	PL	Transport	
			Planification	
	<a href="#">Hernández et Peeta (2014)</a>	Binaire (0-1)	Transport	
	<a href="#">Wang et Kopfer (2015)</a>	PL	Transport	
	<a href="#">Montoya-Torres et al. (2016)</a>	Modélisation mathématique	Transport	Transport
<a href="#">Fernández et al. (2016)</a>	MILP	Transport		
<a href="#">Caballini et al. (2016)</a>	BLP	Transport		
<a href="#">Molenbruch et al. (2017)</a>	MBLP	Transport		
		Salaire des chauffeurs		
<a href="#">Zhang et al. (2017)</a>	Algorithme stochastique	Transport		

	Muñoz-Villamizar et al. (2017)	MILP	Transport	Transport
	Chabot et al. (2018)	PLNE	Transport	Transport
	Fernández et al. (2018)	MILP	Transport	
	Pérez-Bernabeu et al. (2014)	Heuristique	Transport	Transport
CLCP	Kuyzu (2017)	MILP	Transport	
	Ergun et al. (2007a)	PLNE	Transport	
	Ergun et al. (2007b)	PLNE	Transport	

**Tableau 11.** Récapitulatif des études traitant le problème de la planification du transport

### 2.3.2. Mécanisme d'échange des demandes

Lorsque les entreprises forment une collaboration complète, elles opèrent de manière coordonnée et travaillent comme une seule entreprise. Ainsi, les transporteurs qui collaborent peuvent partager ou échanger des demandes, de sorte que le fret soit consolidé et expédié dans des véhicules communs. Selon (Pan et al., 2019), il est très important d'étudier cette question car elle pourrait être introduite dans les solutions de transport collaboratif. Généralement, il existe deux principaux mécanismes étudiés dans la littérature : le paiement latéral et les enchères.

Le mécanisme de paiement latéral désigne le transfert monétaire entre deux transporteurs lorsque des demandes (ou des capacités) sont échangées. Il est appelé également tarification de la collaboration (Zhou et al., 2011), et tarification de l'échange de capacité (Houghtalen et al., 2011). Selon (Pan et al., 2019), ce prix peut être considéré comme le prix fixé par un transporteur pour la capacité supplémentaire qu'il souhaite vendre. La décision cruciale est de fixer le bon prix avec un double objectif : l'efficacité pour encourager les transporteurs à échanger leurs demandes et l'efficacité pour parvenir à une solution d'échange optimale (Houghtalen et al., 2011). À cette fin, ces auteurs ont étudié le problème de l'échange des demandes entre les transporteurs en développant un mécanisme de programmation linéaire pour gérer les interactions de sorte que le comportement optimal de la collaboration soit atteint. Les résultats ont montré que le mécanisme proposé est robuste en ce qui concerne la variabilité de la collaboration et de la demande de fret, ce qui permet de trouver des solutions qui conservent une proportion élevée de bénéfices optimaux et d'obtenir une répartition stable des revenus entre les partenaires.

En outre, Özener et al. (2011) ont étudié le problème d'échange des demandes entre les transporteurs. L'objectif est de déterminer le bénéfice maximal qui peut être dérivé de la collaboration en proposant des modèles mathématiques en PLNE. Les auteurs ont également développé divers mécanismes d'échange qui diffèrent en termes d'exigences de partage d'information et d'options de paiement. Le même problème est étudié par (Agarwal & Ergun, 2008) en utilisant l'optimisation inverse.

Par ailleurs, Zhou et al. (2011) ont étudié le problème du partage de la demande pour améliorer les taux de remplissage. Les auteurs ont eu recours à la simulation pour trouver le plan collaboratif optimal d'expédition. Ils ont pris en considération la contrainte temporelle selon laquelle chaque expédition doit être livrée à sa destination avant une date limite spécifique.

Van Lier et al. (2016) ont utilisé les techniques de simulation à événements discrets pour évaluer un scénario dans lequel les flux de produits sortants sont consolidés. L'objectif étant d'augmenter le niveau de remplissage des camions en partageant les demandes entre trois entreprises coopérantes avec trois catégories de produits différents. Il peut s'avérer que

certaines demandes ne peuvent pas être intégrées efficacement lors de la planification du transport. Pour cette raison, la collaboration horizontale peut entraîner une réaffectation des demandes afin d'améliorer l'efficacité globale du réseau et le profit de chaque transporteur.

Le deuxième type, appelé mécanisme d'enchère, est également proposé pour échanger les demandes. Selon (Pan et al., 2019), ce mécanisme permet de sélectionner un gagnant pour chaque demande en fonction des prix soumis. Les études qui abordent ce problème visent à attribuer de nombreuses demandes de manière optimale en utilisant des modèles mathématiques linéaires comme (Xu & Huang, 2014 ; Berger & Bierwirth, 2010 ; Huang & Xu, 2013 ; Xu et al., 2016 ; Xu & Huang, 2013 ; Dai & Chen, 2011 ; Chen, 2016 ; Kuo & Miller-Hooks, 2012 ; Lai et al., 2017). Le principal inconvénient du mécanisme d'enchères est qu'il ne garantit pas toujours l'optimalité globale pour l'ensemble des transporteurs s'il ne repose pas sur une planification centralisée (Berger & Bierwirth, 2010).

Le Tableau 12 résume les études traitant le problème d'échange des demandes.

Problème	Référence	Approche
Echange des demandes avec paiement latéral	Agarwal et Ergun (2008)	Optimisation inverse
	Houghtalen et al. (2011)	PL
	Özener et al. (2011)	PLNE
	Zhou et al. (2011)	Simulation
Echange des demandes avec un mécanisme d'enchères	Van Lier et al. (2016)	Simulation
	Berger et Bierwirth (2010)	PL
	Dai et Chen (2011)	PL
	Kuo et Miller-Hooks (2012)	PL
	Huang et Xu (2013)	PL
	Xu et Huang (2013)	PL
	Xu et Huang (2014)	PL
	Xu et al. (2016)	PL
	Chen (2016)	PL
	Lai et al. (2017)	PL

**Tableau 12.** Récapitulatif des études traitant le problème d'échange des demandes

## 2.4. Etudes empiriques

La littérature scientifique contient des recherches empiriques basées sur l'expérimentation et l'observation dans le but de vérifier une hypothèse. Cette méthodologie de recherche comprend la formation d'une hypothèse à étudier, la collecte, l'analyse des données, et l'interprétation des résultats. Généralement, les chercheurs s'appuient sur des enquêtes et des questionnaires à grande échelle pour construire leurs observations.

Crujssen et al. (2007a) ont conclu que la sélection des partenaires est vitale pour le succès ou l'échec de la collaboration. Les auteurs ont également conclu que la recherche d'une partie fiable pour diriger la collaboration et la construction d'un mécanisme de répartition équitable des bénéfices sont les principaux obstacles à la réussite et à la continuité de la collaboration. Ces conclusions sont le résultat d'une enquête à grande échelle menée en Belgique dans le secteur des prestataires de services logistiques.

En outre, Sandberg (2007) a souligné le rôle de la direction dans la réussite de la collaboration. L'auteur s'est appuyé sur des questionnaires envoyés aux responsables de la logistique des entreprises manufacturières suédoises. Les principales conclusions tirées de ces questionnaires sont qu'il existe une relation claire entre l'intensité de la collaboration et les effets positifs qui en découlent et que la direction générale est un moteur important pour la réussite d'une telle collaboration horizontale.

Par ailleurs, [Mason et al. \(2007\)](#) ont réalisé une étude empirique en se basant sur des discussions avec des experts de l'industrie de la logistique des trois secteurs (acier, épicerie, construction) et des universitaires expérimentés dans le domaine de la logistique et de la gestion de la chaîne logistique au Royaume-Uni. Les résultats de l'analyse ont montré que la combinaison de la collaboration verticale (entre les acteurs de la même chaîne logistique) et la collaboration horizontale (entre les prestataires logistique) peut optimiser davantage l'efficacité du transport.

De plus, [Verstrepen et al. \(2009\)](#) ont identifié les motifs et les facteurs qui poussent les LSP (*Logistics Service Provider*) à initier une collaboration horizontale. Ils ont conclu que la collaboration horizontale peut aider à faire face à des conditions difficiles du marché telles que la forte fluctuation de la demande et de la concurrence, etc. Elle permet également de desservir de nouvelles régions géographiques, d'améliorer le niveau de service à la clientèle et d'utiliser efficacement les infrastructures et les actifs existants. Les auteurs ont proposé les principales étapes à suivre pour mettre en œuvre et gérer la collaboration horizontale, à savoir le positionnement stratégique en définissant les objectifs de la collaboration (1), la conception en identifiant les meilleurs partenaires, les stratégies du partage des gains et les visions, etc. (2), la mise en œuvre par la mise en place d'une charte de coopération et des systèmes d'information et de communication, etc. (3) et la modération par la bonne gestion et le meilleur contrôle, etc. (4).

Par ailleurs, [Klaas-Wissing et Albers \(2010\)](#) ont identifié les enjeux de gestion stratégique des réseaux de transport et ont révélé un cadre qui permet l'exploration systématique des réseaux LTL d'un point de vue institutionnel. Les résultats de l'analyse ont montré les effets contingents de la gouvernance sur les champs de décision stratégique des réseaux LTL. Selon ces auteurs, les collaborations souffrent d'incompatibilités potentielles des partenaires et de l'inefficacité de la prise de décision stratégique et la configuration du réseau.

[Wallenburg et Raue \(2011\)](#) ont proposé une étude empirique traitant les facteurs de succès et de l'échec de la collaboration entre des prestataires de services logistiques allemands. L'étude a permis d'analyser l'impact des conflits sur les résultats de la collaboration et le rôle des mécanismes de gouvernance dans la réussite d'une telle collaboration. En outre, [Hingley et al. \(2011\)](#) ont identifié les avantages et les obstacles de l'utilisation d'un 4PL (*Fourth Party Logistics*) comme responsable de la collaboration horizontale. Cette étude est basée sur des entretiens avec trois fournisseurs, trois prestataires de services logistiques et un détaillant en alimentation. La principale conclusion tirée de cette étude est que les grands LSP peuvent accepter de mettre en place une gestion 4PL, mais les coûts d'investissement requis sont décourageants.

[Schmoltzi et Wallenburg \(2012\)](#) ont réalisé une étude empirique qui porte sur l'ensemble des motivations, de la structure et des caractéristiques de performance de la collaboration horizontale entre des LSPs. Des méthodes statistiques uni-variables et multi-variables, y compris l'ANOVA (*Analysis of Variance*) et l'analyse par grappes, ont été appliquées à l'ensemble des données de 226 coopérations en Allemagne. La principale conclusion faite par ces auteurs est que les taux de réussite des collaborations peuvent varier énormément d'un secteur à l'autre et d'une industrie à une autre.

De plus, [Albers et Klaas-Wissing \(2012\)](#) ont analysé les modalités d'organisation des collaborations horizontales entre les prestataires de services logistiques allemands. L'analyse a identifié les principaux problèmes à résoudre pour assurer la continuité de la collaboration, à savoir la sélection des partenaires, l'attribution des avantages de la collaboration et la coordination entre les partenaires.

Selon (Buijs et Wortmann, 2014), les études empiriques ont principalement porté sur les deux niveaux de décisions stratégiques et tactiques, tel que la sélection des partenaires et le partage des bénéfices. À cet effet, ces auteurs ont mené une étude empirique concernant le niveau de décision opérationnelle. Leur étude vise à répondre à la manière de conceptualiser la planification opérationnelle et le contrôle des transporteurs et à définir les défis auxquels les transporteurs sont confrontés. Un autre point critique se résume au partage de l'information entre les partenaires. En effet, l'absence de ce partage pourrait entraver la collaboration horizontale Hingley et al. (2011). Par conséquent, l'étude de (Buijs et Wortmann, 2014) a également porté sur les technologies de l'information appliquées pour faciliter la planification opérationnelle et la communication entre les transporteurs.

En outre, Wang et al. (2015) ont étudié comment les TIC (Technologies de l'Information et de la Communication) peuvent contribuer à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dans le transport routier de marchandises et identifier les possibilités d'améliorations supplémentaires. Cette étude a été réalisée sur la base d'entretiens avec des détaillants en alimentation situés au Royaume-Uni, de démonstrations et d'observations. Les résultats ont montré que les solutions TIC ont un impact positif direct sur la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> qui peuvent être réduites davantage grâce au partage d'informations avec les concurrents.

En s'appuyant sur des entretiens avec des cadres supérieurs de détaillants, des fournisseurs et des prestataires de services logistiques, Rodrigues et al. (2015) ont réalisé une étude empirique concernant la collaboration horizontale des chaînes logistiques situées au Royaume-Uni. Les auteurs ont identifié plusieurs facteurs permettant de réussir la collaboration, à savoir les synergies et les catalyseurs tels que la législation, la confiance entre les partenaires, les fournisseurs, le 3PL et le partage équitable des avantages, etc.

En outre, Allen et al. (2017) ont étudié les défis confrontés à l'optimisation des calendriers de collecte en multi-drop et de livraison dans le cadre d'une collaboration horizontale entre les transporteurs. La conclusion générale de cette étude est que le partage des gains de la collaboration représente l'un des principaux défis qui nécessitent l'utilisation des approches avancées comme celles basées sur la théorie des jeux coopératifs. Les auteurs ont souligné le rôle d'un tiers de confiance, appelé FTC (*Freight Traffic Controller*), pour superviser, gérer la collaboration et répartir les activités entre les transporteurs.

Agrell et al. (2017) ont analysé la façon dont les structures de gouvernance trouvées dans l'industrie du camionnage affectent la coordination entre un transitaire et les transporteurs. Les auteurs ont montré que la coordination entre les transporteurs est importante pour l'efficacité de la collaboration. Ils ont également montré que les transitaires coopératifs subsistent car ils offrent des prix optimaux plus bas.

Certains chercheurs ont identifié un autre facteur très important pour réussir la collaboration, il s'agit de la confiance entre les partenaires. La confiance est extrêmement pertinente lorsque les partenaires sont des concurrents, ce qui est le cas de la collaboration horizontale Wilhelm (2011). L'absence de la confiance entre les partenaires pourrait compromettre les objectifs de la collaboration et bloquer sa réussite (Pomponi et al., 2013). Naesens et al. (2009) ont mis l'accent sur la concordance stratégique entre les partenaires avant de commencer une telle collaboration. De plus, Schulz et Blecken (2010) ont vérifié que les principaux obstacles à une approche coopérative sont la méfiance mutuelle et le manque de transparence.

Dahl et Derigs (2011) ont présenté une analyse empirique de l'efficacité d'un système d'aide à la décision dans un réseau de transport express. Les auteurs ont constaté que pour

réussir un système de transport collaboratif, il est nécessaire d'assurer le succès économique et la stabilité de la collaboration par l'équité lors de la répartition des bénéfices.

Récemment, [Badraoui et al. \(2020\)](#) ont présenté une étude empirique sur les facteurs qui influencent la performance de la collaboration horizontale, en particulier dans le secteur agro-alimentaire au Maroc. Les résultats ont montré que les réglementations strictes en matière de sécurité alimentaire et les exigences spécifiques aux produits limitent le choix des partenaires dont les produits nécessitent des conditions de manipulations similaires et présentent de faibles risques d'interaction. La saisonnalité de la demande et de la production alimentaire limite également le choix des partenaires potentiels à ceux qui proposent des produits à saisonnalité inverse, ce qui augmente l'utilisation des actifs. En ce qui concerne l'utilisation des actifs, les équipements techniques coûteux sont considérés comme un facteur augmentant la volonté des entreprises de collaborer en investissant mutuellement dans des ressources techniques ou en les partageant. Sur le plan relationnel, les résultats ont montré que la confiance est le principal élément qui affecte la réussite et la continuité de la collaboration.

Le Tableau 13 représente un récapitulatif des études empiriques présentées dans ce paragraphe.

Références	Outils	Secteur	Pays	Conclusion
Crujssen et al. (2007a)	Enquêtes	LSP	Belgique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Importance de la sélection des partenaires</li> <li>- Importance de la répartition équitable des bénéfices</li> <li>- Importance de trouver une partie fiable pour piloter la collaboration</li> </ul>
Sandberg (2007)	Enquêtes	Entreprises manufacturières	Suède	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La direction générale est un moteur important pour la réussite de la collaboration</li> </ul>
Mason et al. (2007)	Entretiens avec des experts et des universitaires expérimentés	LSP	Royaume-Uni	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La combinaison de la collaboration verticale et horizontale peut optimiser davantage l'efficacité du transport</li> </ul>
Verstrepen et al. (2009)	Collecte de données	LSP	Belgique et Pays-Bas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La collaboration fait face à la concurrence et à la fluctuation des demandes</li> <li>- La collaboration permet de desservir des nouvelles régions géographiques</li> <li>- La collaboration permet d'améliorer le niveau de service</li> <li>- La collaboration permet d'utiliser efficacement les ressources</li> <li>- La collaboration permet de réduire les coûts</li> <li>- Importance de la sélection des partenaires et du partage des gains</li> <li>- Importance des systèmes TIC pour une meilleure coordination</li> <li>- Importance de trouver une partie fiable pour piloter la collaboration</li> </ul>
Naesens et al. (2009)	Approches synthétiques	Général	Général	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Importance de la concordance stratégique entre les partenaires</li> <li>- Importance de la répartition équitable des bénéfices</li> <li>- Importance du partage de l'information</li> </ul>
Schulz et Blecken (2010)	Approches synthétiques	Général	Général	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Importance de la confiance entre les partenaires</li> </ul>
Klaas-Wissing et Albers (2010)	Entretiens	LSP	Allemagne	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Importance de la sélection des partenaires</li> <li>- Importance de la répartition des bénéfices</li> </ul>
Wilhelm (2011)	Entretiens	Industries automobiles japonaises et allemandes	Japon et Allemagne	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Importance de la confiance entre les partenaires</li> </ul>
Wallenburg et Raue (2011)	Enquêtes	LSP	Allemagne	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La gouvernance relationnelle réduit l'étendue du conflit</li> <li>- La gouvernance formelle augmente l'étendue du conflit</li> <li>- Les conflits diminuent la performance globale de la collaboration</li> </ul>
Hingley et al. (2011)	Entretiens	LSP	Royaume-Uni	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les grands LSP acceptent de mettre en place une gestion 4PL</li> <li>- La mise en place d'un 4PL engendre un coût élevé d'investissement</li> <li>- Les détaillants favorisent la mise en place de 4PL</li> </ul>
Dahl et Derigs (2011)	Analyse des résultats de simulation	Transporteurs	Général	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Importance de la répartition équitable des bénéfices</li> </ul>
Albers et Klaas-Wissing (2012)	Entretiens	LSP de petite et moyenne taille	Allemagne	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Importance de la sélection des partenaires</li> <li>- Importance des décisions stratégiques telle que la conception des réseaux</li> </ul>

Schmoltzi et Wallenburg (2012)	Entretiens avec des praticiens et des chercheurs en logistique	LSP	Allemagne	- La collaboration entre les LSP est plus stables que la collaboration entre les industries manufacturières
Pomponi et al. (2013) Buijs et Wortmann (2014)	Approches synthétiques Entretiens	Général Transporteurs	Général Royaume-Uni et Pays-Bas	- Importance de la confiance entre les partenaires - Importance de la sélection des partenaires - Importance de la répartition des bénéfices - Importance du partage de l'information
Wang et al. (2015) Rodrigues et al. (2015)	Entretiens Entretiens	Détaillants LSP	Royaume-Uni Royaume-Uni	- Importance des TIC dans la réduction des émissions de CO <sub>2</sub> - Plusieurs facteurs permettent de réussir la collaboration, à savoir les synergies et les catalyseurs tels que la législation, la confiance entre les partenaires, les fournisseurs, le 3PL et le partage équitable des avantages
Allen et al. (2017) Agrell et al. (2017)	Entretiens Exploratoire	Transporteurs Transporteurs	Royaume-Uni Suède	- Importance d'une tierce partie de confiance - Importance de la coordination - Importance de la confiance entre les partenaires
Badraoui et al. (2020)	Exploratoire	Entreprises agro-alimentaires	Maroc	- Compatibilité des produits - Sélection des partenaires - Les équipements techniques - Confiance entre les partenaires

**Tableau 13.** Récapitulatif des études empiriques dans le cadre de la collaboration horizontale

## 2.5. Les revues de littérature

Certaines études ont réalisé des revues de littérature sur la collaboration horizontale. [Crujssen et al. \(2007b\)](#) ont donné un aperçu sur des différents types de collaborations horizontales, c'est-à-dire les niveaux d'intégration entre les collaborateurs sans tenir compte de la planification du transport. [Nagarajan et Sošić \(2008\)](#) ont réalisé une revue de littérature sur la répartition des bénéfices par la théorie des jeux coopératifs.

Par ailleurs, [Verdonck et al. \(2013\)](#) se sont concentrés uniquement sur la planification opérationnelle des transporteurs routiers dans leur revue de littérature.

En outre, [Pomponi et al. \(2015\)](#) ont identifié les défis théoriques et pratiques de la collaboration horizontale. Selon ces auteurs, la confiance entre les partenaires est le principal facteur qui peut bloquer la réussite et la continuité de la collaboration.

L'étude de [Guajardo et Rönnqvist \(2016\)](#) a porté sur la répartition des coûts du transport collaboratif qui représente un facteur clé pour le succès de la collaboration. Selon ces auteurs, plusieurs mécanismes de partage sont utilisés dans la littérature. Ces mécanismes sont de deux types, à savoir des approches classiques et des approches basées sur la théorie des jeux coopératifs.

[Gansterer et Hartl \(2018\)](#) ont réalisé un état de l'art sur la planification du transport, notamment sur le CVRP. Les auteurs ont identifié les deux types de planification : centralisée et décentralisée. Le premier type est utilisé lorsque les partenaires acceptent de partager leurs informations complètes à un planificateur central. Le deuxième type est utilisé lorsque les partenaires ne sont pas disposés à donner des informations complètes à un planificateur central. [Gansterer et Hartl \(2018\)](#) ont également cité quelques travaux portant sur le problème de sélection des partenaires et de partage des coûts dans le cadre de la planification collaborative.

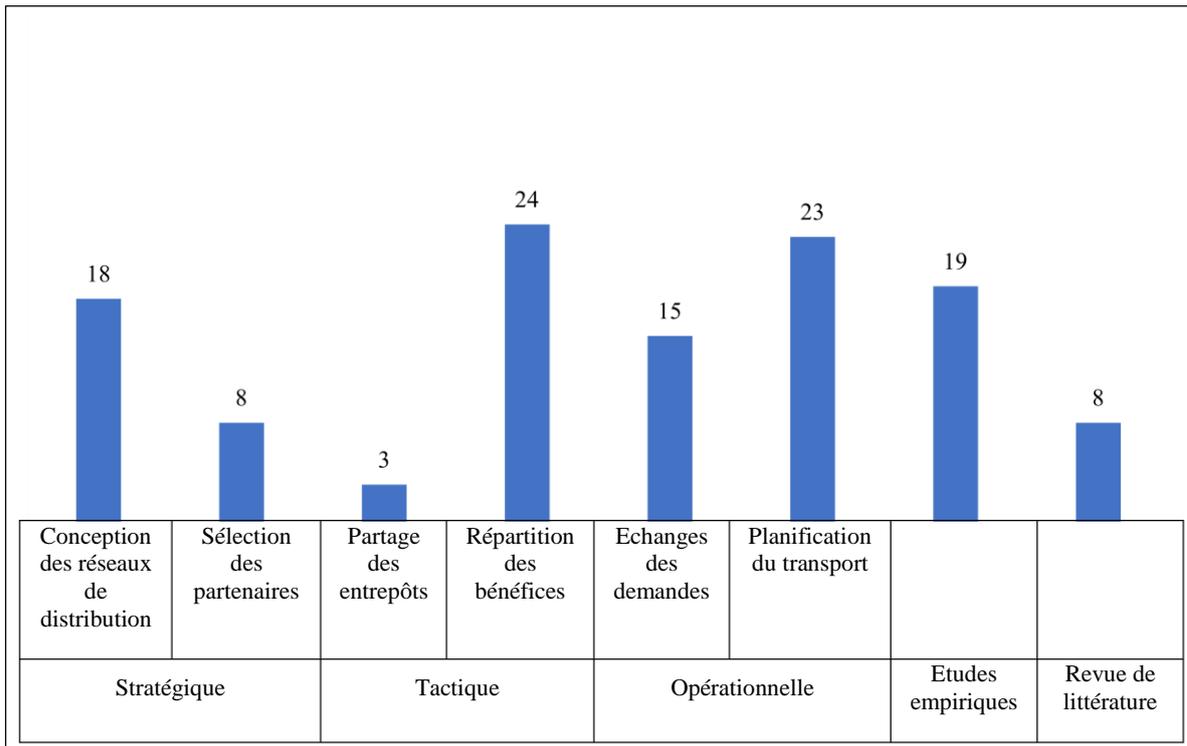
[Pan et al. \(2019\)](#) ont réalisé un état de l'art sur la collaboration horizontale. Selon ces auteurs, l'alliance des transporteurs et la collaboration des prestataires sont les plus fréquemment étudiées dans la littérature. En ce qui concerne les questions de mise en œuvre, la littérature s'est concentrée sur le développement de modèles de prise de décision, y compris la planification des transports, l'échange des voies et le partage des gains.

Par ailleurs, [Ferrell et al. \(2019\)](#) ont proposé une revue de littérature en matière de collaboration horizontale, en soulignant spécifiquement les efforts concentrés sur les domaines de la logistique à la demande, du regroupement de marchandises, du partage des installations, des études de cas et des analyses quantitatives. Dans le même contexte, [Aloui et al. \(2021b\)](#) ont réalisé une revue de littérature sur les études qui portent sur les trois niveaux de décision, à savoir stratégique, tactique et opérationnelle. Selon ces auteurs, la majorité des études se sont focalisées sur le niveau opérationnel, notamment le problème de planification du transport collaboratif.

## 2.6. Analyse de la littérature

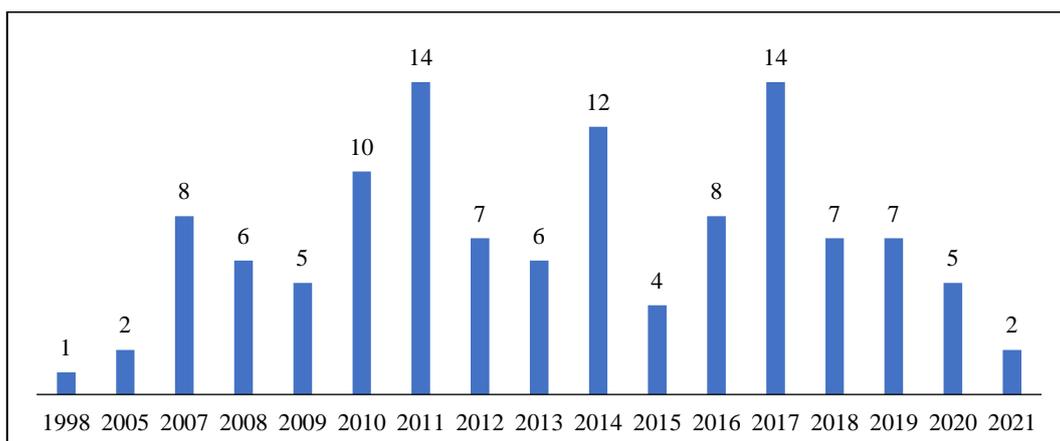
En résumé, les problèmes traités dans le cadre de la collaboration horizontale sont classés en trois niveaux de décision, à savoir stratégique, tactique et opérationnelle. Le premier niveau concerne les décisions à long terme et comprend principalement le problème de conception des réseaux de distribution et le problème de sélection des partenaires. Le deuxième niveau concerne les décisions à moyen terme par le partage des économies de la collaboration et les décisions relatives à l'inventaire. Le troisième niveau implique les décisions à court terme par la planification du transport et le partage de la demande et de la capacité.

Les Figures 26-30 présentent des analyses issues des études portant sur la collaboration horizontale.



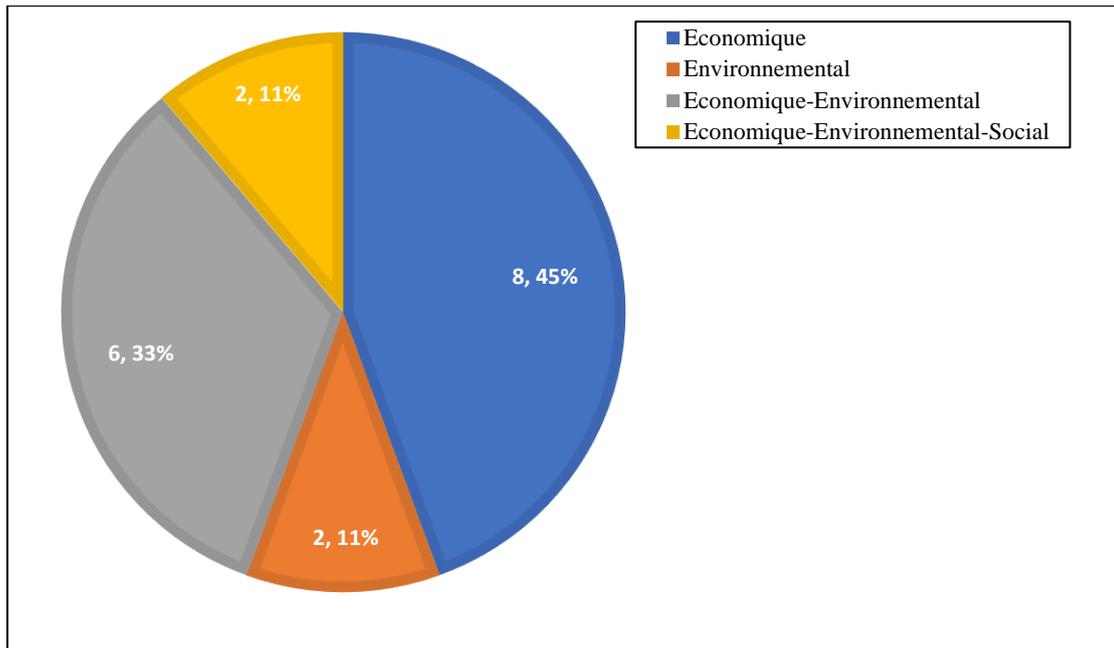
**Figure 26.** Répartition des études selon les problèmes traités et les niveaux de décision

La Figure 26 représente la répartition des études selon les trois niveaux de décision, les problèmes traités et le type d'article. Il est assez clair que la majorité des études s'intéressent au niveau opérationnel et plus précisément à la planification du transport collaboratif. Cette conclusion est conforme à celle de [Pan et al. \(2019\)](#) et [Aloui et al. \(2021b\)](#). D'autre part, notons que la littérature a donné également une grande attention au problème de répartition des coûts et des bénéfices de la collaboration.



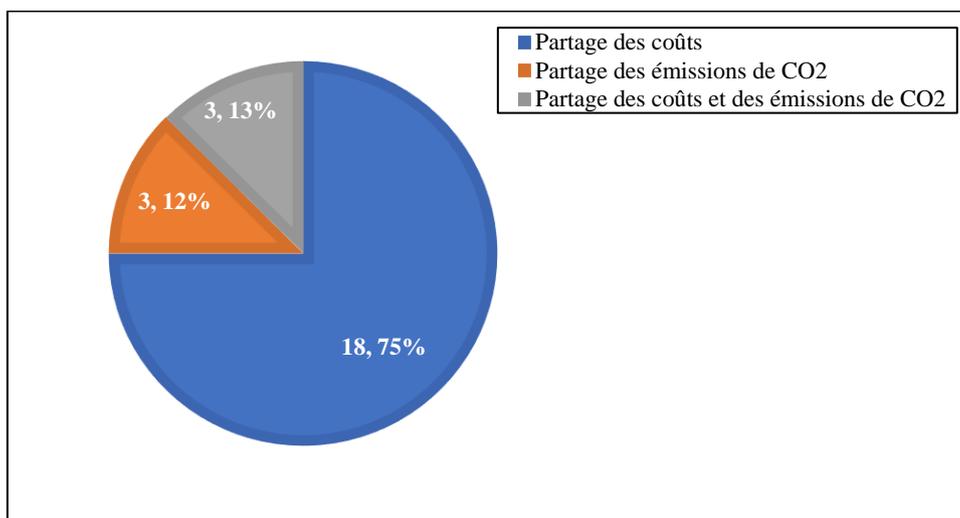
**Figure 27.** Evolution des études selon les années de publications

La Figure 27 montre la distribution des études abordant la collaboration horizontale en fonction des années de publication. Nous pouvons constater que, dans l'ensemble, la collaboration horizontale a fait l'objet d'une attention accrue dans la littérature.

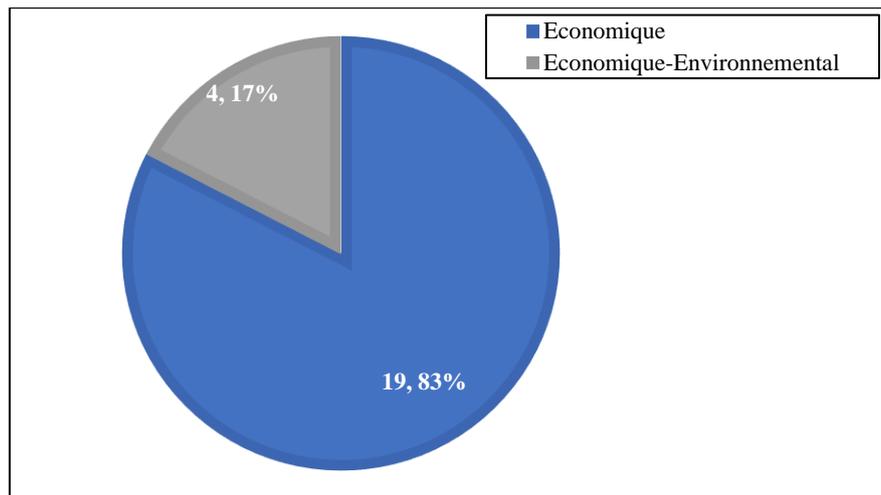


**Figure 28.** Répartition des études traitant la conception des réseaux de distribution selon les aspects de la durabilité

La Figure 28 représente la répartition des études portant sur la conception de réseaux de distribution collaboratifs en fonction des aspects de la durabilité. Nous pouvons aisément constater que la majorité des études ont évalué l'aspect économique en estimant ou en réduisant les coûts logistiques, notamment ceux générés par le transport de marchandises. Dans une moindre mesure, les études ont commencé à accorder plus d'attention à l'aspect environnemental en réduisant les émissions de CO<sub>2</sub> dues au transport. En ce qui concerne la répartition des bénéfices, il est clair que la plupart des études ont réparti les coûts et, dans une moindre mesure, les émissions de CO<sub>2</sub> et les deux ensembles (cf. Figure 29).



**Figure 29.** Répartition des études selon la répartition des coûts et émissions de CO<sub>2</sub>



**Figure 30.** Répartition des études portant sur le problème de la planification du transport selon les dimensions de la durabilité

Nous constatons également que les études portant sur le problème de la planification du transport collaboratif se sont concentrées sur l'évaluation des coûts logistiques, en particulier les coûts de transport (cf. Figure 30).

### 3. Projets industriels de collaboration horizontale

Il existe plusieurs projets industriels appliquant la collaboration horizontale ([Gonzalez-Feliu et al., 2014](#)). La plupart de ces projets visent à former un groupe de partenaires qui partagent des véhicules et des plateformes pour réduire leurs coûts logistiques, augmenter le taux de remplissage des véhicules, diminuer le niveau de stock et les émissions de GES ainsi que satisfaire les clients en respectant la qualité et les délais de livraison.

Le Tableau 14 représente une synthèse de quelques projets industriels réalisés par des entreprises de divers secteurs d'activité.

N°	Année	Industries	Secteur	Tiers	Type	Objectifs	Résultats
1	2004	Sara Lee  Cadbury	Produits alimentaires, café, Hygiène et parfumerie  Confiserie	FM Logistic IPS Europe	Entrepôt Transport	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réduire les coûts de livraison</li> <li>- Améliorer le taux de service</li> <li>- Réduire les stocks dans les entrepôts régionaux</li> <li>- Réduire les émissions de CO<sub>2</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Optimisation des camions</li> <li>- Augmentation du taux de service de 0.5 point</li> <li>- Diminution du stock de 19%</li> <li>- Amélioration de la gestion des prévisions et de pics</li> </ul>
2	2004	Bénédicta  Nutrimaine  Lustucru	Sauces froides  Poudres chocolatées  Pâtes alimentaires, couscous et semoule	FM Logistic	Entrepôt Transport	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Livrer plus fréquemment les clients notamment Carrefour</li> <li>- Optimiser le taux de remplissage des camions</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Augmentation de 12% de la fréquence de livraison</li> <li>- Diminution de couverture du stock de 10.5% et de maintien d'un taux de service de 99.6%</li> <li>- Livraisons plus fréquentes (1 à 2 par semaine contre 1 à 2 par mois avant mutualisation)</li> <li>- Optimisation du nombre de véhicules</li> <li>- Réduction des stocks de 10 à 25</li> <li>- Amélioration du taux de service</li> </ul>
3	2005	Henkel  Reckitt  Colgate	Détergents  Produit d'entretien  Hygiène	Kuehne et Nagel	Entrepôt Transport	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Carrefour demande à ses fournisseurs de réduire ses stocks de 10 jours</li> <li>- chercher une solution plus « gagnant-gagnant »</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Assurer des livraisons quotidiennes à Carrefour</li> <li>- Réduction des stocks de 14%</li> <li>- Augmentation du taux de remplissage de 75% à 100%</li> </ul>
4	2005	Nestlé Waters	FMCG - Eaux	Kuehne et Nagel			

		Yoplait			Entrepôt Transport	Réduire les coûts d'entreposage et de transport	– Réduction du coût de distribution qui s'élève à 13%, principalement en transport. Augmentation du niveau de service à 99.5%.
5	2007	Colgate Henkel GlaxoSmithKline Sara Lee	Cosmétique	FM Logistic	Entrepôt Transport	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Piloter et synchroniser le réapprovisionnement des plateformes distributeurs en fonction de la demande variable</li> <li>– Optimiser le chargement des camions</li> <li>– Améliorer la qualité du transport</li> <li>– Préserver l'environnement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Amélioration du niveau de service de 5 à 10 points</li> <li>– Réduction du niveau de stock</li> <li>– Amélioration du taux de remplissage</li> <li>– Réduction du nombre de véhicules circulant sur la route</li> <li>– Réduction des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub></li> </ul>
6	2008	Bridgestone Continental	Fabrication des pneus	Norbert Dentressangle	Entrepôt Transport	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Améliorer le service client</li> <li>– Optimiser les coûts logistiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.</li> <li>– Réduction du nombre de camions circulant</li> <li>– Amélioration du service aux clients, puisque la logistique est sécurisée et les retards de livraison sont limités.</li> </ul>
7	2009	AT France Lincet	Agroalimentaire	Non	Entrepôt Transport	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Réduire les coûts de transport</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Réduction des coûts de transport de 20%</li> <li>– Création d'une vingtaine d'emplois et mutualisation de la taxe professionnelle</li> </ul>
8	2009	Projet LUMD (groupe Presstalis)	Leader de la distribution de la presse	LET	Entrepôt Transport	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Trouver des solutions de maximisation des bénéfices du groupe Presstalis</li> <li>– Mise en place d'un tableau de bord qui présente les 3 dimensions de durabilité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Proposition des différents indicateurs de performance du développement durable (Economiques,</li> </ul>

							environnementaux et sociaux/sociétaux)
9	2009	Colgate Palmolive Johnson&Johnson	Hygiène	Geodis	Transport	– Réduire les coûts et les émissions de CO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Réduction de 30% à 50% du nombre de véhicules</li> <li>– Réduction des coûts de transport entre 10 et 30%</li> <li>– Réduction de la distance parcourue d'environ 46000 km</li> <li>– Réduction de la consommation du fuel d'environ 20000 litres</li> <li>– Réduction de la quantité d'émissions dégagées de 53 tonnes de CO<sub>2</sub></li> </ul>
10	2010	Rians Triballat Noyal	Agroalimentaire	Non	Entrepôt Transport	– Optimisation et réduction des coûts	– Réduction des coûts de 30% par rapport au cas non-collaboratif
11	2011	Mars United Biscuits Wrigley Saupiquet Triballat Noyal	Agroalimentaire	Norbert Dentressangle	Entrepôt Transport	– Trouver une solution compétitive pour passer d'une livraison tous les 12 jours à 2 à 3 fois par semaine	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Maîtrise des coûts de transport</li> <li>– Sécurisation et amélioration du service client</li> <li>– Augmentation de 0.5% du taux de service</li> <li>– Réduction entre 15% à 30% du stock client</li> </ul>

**Tableau 14.** Récapitulatif des projets industriels en collaboration horizontale

## 4. Etat de l'art sur le problème de conception des réseaux de distribution

Comme il existe peu des études traitant le problème de la conception des réseaux de distribution collaboratifs (Pan et al., 2019 ; Aloui et al., 2021), notamment ceux à trois échelons, nous présentons dans cette section une revue de littérature exhaustive sur ce problème dans le cadre des réseaux de distribution traditionnels. Ce choix est justifié par le fait qu'en terme de modélisation, le problème de conception des réseaux de distribution collaboratifs est très similaire à celui des réseaux de distribution traditionnels (Campbell et al., 2005 ; Pan et al., 2019). Le problème de conception du réseau de distribution (DNNDP : *Distribution Network Design Problem*) est connu sous le nom de " *Hub Location Problem*" (HLP) ou " *Hub Median Problem*" (HMP) (Habibi et al., 2018 ; Hu et al., 2018). Dans le cas où il s'agit d'une contrainte sur le nombre des hubs à ouvrir, le problème devient p-HLP. Ce problème est appliqué dans plusieurs domaines, à savoir le transport et les télécommunications (Sun et al., 2017).

L'objectif principal de p-HLP est de localiser un certain nombre de hubs parmi un ensemble de candidats et d'affecter les nœuds non-hubs aux hubs appropriés. Par conséquent, ce problème peut être considéré comme un problème de *Location-Allocation* ; ce type de problème est apparu pour la première fois dans (Cooper, 1963). Selon le type d'affectation des nœuds non hubs aux hubs, on peut distinguer deux types de stratégies d'affectation, à savoir MA (*Multiple Allocation*) et SA (*Single Allocation*). Le premier type est obtenu lorsque chaque nœud non hub est susceptible d'être affecté à plusieurs hubs. Le second type est obtenu lorsque chaque nœud non hub est affecté à un hub unique. Les problèmes peuvent également être classés en fonction de la prise en compte ou non des capacités des hubs. Ainsi, lorsque l'étude ne prend pas en compte les capacités, le problème est appelé US/MAp-HLP (*Uncapacitated Single/Multiple Allocation p-Hub Location Problem*) ; sinon, le problème est appelé CS/MAp-HLP (*Capacitated Single/Multiple Allocation p-Hub Location Problem*). Pour d'autres typologies de classification, nous proposons de se référer à (Farahani et al., 2013) et (Sun et al., 2017).

Par la suite, nous citons quelques études abordant le HLP classés selon le type d'allocation et la prise en compte des capacités des hubs.

Nous commençons par les études qui n'ont pas pris en considération les capacités des hubs. O'Kelly (O'Kelly, 1987, 1992) ont proposé deux modèles mathématiques en QIP (*Quadratic Integer Programming*) pour traiter le SAp-HLP. Dans la première étude, l'auteur a étudié le problème en minimisant uniquement les coûts de transport, tandis que dans la deuxième étude, il y a ajouté le coût de la mise en place des plates-formes. En plus de l'allocation unique, Campbell (Campbell, 1994, 1996) a abordé ce problème par la stratégie d'allocation multiple d'un nombre prédéfini de hubs par un modèle mathématique en PLNE qui vise à minimiser les coûts de transport entre les fournisseurs et les clients. Toutefois, le modèle de Campbell donne des solutions très fragmentées. Pour cette raison, Skorin-Kapov et al. (1996) ont proposé une formulation mathématique en MILP dont la relaxation fournit souvent des solutions entières. Ceci est obtenu en remplaçant les contraintes de l'interdiction de circulation des flux sur les arcs non ouverts du modèle de Campbell. La fonction objectif tend à minimiser le coût total de transport en considérant un facteur de réduction sur les liaisons inter-hub. Pour simplifier davantage le modèle, Ernst et Krishnamoorthy (1996) ont abordé le même problème en développant un modèle mathématique en QIP qui est linéarisé en deux sous-problèmes linéaires : un problème de localisation des hubs et un problème d'allocation unique.

Plus tard, Ernst et Krishnamoorthy (1998) ont présenté un modèle mathématique en MILP pour étudier le problème de la localisation avec la stratégie d'allocation multiple. Le modèle proposé par Ernst est retenu comme modèle de base pour la modélisation des réseaux de distribution mutualisés dans les études (Pan et al., 2013, 2014). En outre, Ebery (2001) a développé un MILP pour résoudre le problème de localisation de deux et trois hubs en allocation unique. Ensuite, l'auteur a présenté une deuxième formulation pour le même problème généralisé avec un nombre limité de hubs. La fonction objectif consiste à minimiser seulement le coût du transport. Yaman (2009) a étudié le même problème avec un nombre prédéfini de hubs en développant un nouveau modèle en MILP. Cela s'effectue en introduisant des restrictions de temps de livraison.

Contreras et al. (2011) ont développé un modèle mathématique en PLNE pour étudié le problème de conception d'un réseau de distribution en allocation multiple. Les auteurs ont eu recours à la décomposition de Benders pour résoudre le modèle. En outre, Alumur et al. (2012) ont proposé un MILP pour traiter le même problème en considérant les deux stratégies d'allocation, y compris l'incertitude des coûts d'installation et des demandes. Carlsson et Jia (2013) ont abordé la question de l'allocation multiple en développant un modèle non convexe. L'objectif étant de minimiser les coûts générés par le transport, l'installation et la manutention. Par ailleurs, An et al. (2015) ont développé un modèle mathématique en MINLP (*Mixed Integer Non-Linear Programming*) pour traiter les deux formes d'allocation. Les auteurs ont résolu le modèle en utilisant la relaxation lagrangienne et la méthode *branch-and-bound*.

Contrairement aux études citées ci-dessus, Gelareh et al. (2015) ont abordé le problème de conception d'un réseau de distribution multi-périodes par la stratégie d'allocation multiple en proposant un modèle en MILP. Dans cette étude, le modèle vise à minimiser les coûts générés par le transport, l'installation et la suppression des hubs. Selon ces auteurs, un modèle multi-périodes comprend des caractéristiques réalistes. Ghaffari-Nasab et al. (2016) ont étudié l'allocation unique en développant un MINLP linéarisé par une approche *step-by-step*. L'objectif de l'étude est de minimiser les coûts de transport, de stockage et d'installation. En outre, Zetina et al. (2017) ont abordé le HLP avec allocation multiple des nœuds non-hubs aux hubs en proposant un MINLP avec une incertitude sur la demande, les coûts de transport et les deux simultanément. Dans cette étude, l'objectif est de minimiser les coûts de transport et d'installation.

Sur la base de (Rostami & Buchheim, 2015), Meier (2017) a proposé une formulation en MILP pour étudier l'USAp-HLP en utilisant une flotte hétérogène des véhicules (USAp-HLPv). Selon ces auteurs, l'utilisation de plusieurs types de véhicules est le principal facteur de succès pour ce genre de problème. La fonction objectif du modèle consiste à réduire uniquement le coût de transport. Dukkanci et al. (2019) ont proposé un modèle mathématique non linéaire pour étudier le problème de conception d'un réseau de distribution en considérant la stratégie d'allocation unique. L'objectif est de minimiser les émissions de CO<sub>2</sub> engendrées par le transport de marchandises. Par ailleurs, Lüer-Villagra et al. (2019) ont étudié le même problème en proposant un modèle mathématique en MILP. Ensuite, les auteurs ont démontré que la fonction de coût représente correctement l'existence d'économies d'échelle entre les hubs.

D'autres études ont considéré la contrainte de capacité des hubs. Ebery et al. (2000) ont développé un modèle mathématique en MILP pour traiter le MAP-HLP. L'objectif est de minimiser les coûts de transport et d'installation des hubs. En outre, Elhedhli et Wu (2010) ont proposé également un modèle mathématique en MILP pour étudier la stratégie d'allocation unique en

minimisant les coûts de transport, de congestion et d'installation des hubs. De plus, [Correia et al. \(2010\)](#) ont proposé plusieurs modèles tirés de la littérature de conception des réseaux de distribution. Deuxièmement, les auteurs ont abordé le même problème en considérant une liste de choix des capacités des hubs et en supposant que la stratégie d'allocation est unique. La fonction objectif vise à minimiser les coûts générés par le transport et l'installation des hubs. Le même problème a été traité par [Contreras, et al. \(2011b\)](#) en proposant une formulation mathématique en PLNE pour minimiser le coût du transport. De plus, [Meng et Wang \(2011\)](#) ont proposé un modèle non convexe résolu à l'aide d'un algorithme génétique pour résoudre le modèle dans un réseau intermodal. L'objectif est de minimiser conjointement les différents coûts engendrés par le transport, la manutention et le stockage en tenant compte d'une contrainte du budget d'investissement. Dans le même contexte, [Almeida et al. \(2013\)](#) se sont basés sur l'étude ([Ebery et al., 2000](#)) pour proposer une formulation mathématique en PLNE qui vise à réduire les coûts de transport et d'installation des hubs.

En outre, [Serper et Alumur \(2016\)](#) ont proposé une formulation en ILP qui est résolu avec un algorithme de recherche à voisinage variable. Le problème vise à localiser un nombre prédéfini de hubs avec plusieurs choix de capacité et à déterminer la taille de la flotte des véhicules hétérogènes en minimisant les différents coûts engendrés par le transport de marchandises, la manutention, l'achat des véhicules et l'installation des hubs. Comme ([Gelareh et al., 2015](#)), [Alumur et al. \(2016\)](#) ont abordé le HLP multi périodes avec les deux stratégies d'allocation (unique et multiple) et en tenant compte des capacités des hubs. Les auteurs ont démontré la pertinence de considérer un modèle mathématique avec une planification multi-périodique du transport par rapport à celle statique. Le problème est modélisé par un MILP afin de réduire les coûts générés par le transport, l'installation des hubs et les opérations de stockage. En outre, [Esmaeilbeigi et al. \(2017\)](#) ont abordé le même problème en considérant la stratégie d'allocation unique par un modèle mathématique quadratique. L'objectif est de minimiser les coûts de transport et d'ouverture des entrepôts. Le problème consiste à concevoir un réseau de distribution multi-échelons, qui contient des entreprises, des entrepôts, des centres de distribution et des clients. Par ailleurs, [Hu et al. \(2018\)](#) ont traité le CMap-HLP en proposant un modèle non convexe. L'étude vise à déterminer le nombre de hubs à établir et leur localisation ainsi que le choix de leurs capacités, en tenant compte des contraintes durables telles que la congestion. La fonction objectif vise à minimiser les différents coûts logistiques engendrés par le transport de marchandises, la manutention, le stockage et l'installation des plateformes. Contrairement à la plupart des études, les auteurs n'ont pas utilisé le facteur de réduction au niveau des coûts de transport inter-hubs. L'approche proposée consiste à déterminer le nombre optimal des deux types de camions utilisés.

Après cette analyse, nous pouvons constater que la plupart des études abordant le HLP ont proposé des modèles mathématiques qui visent à réduire les coûts logistiques (transport, stockage, ouverture, etc.). Aucune étude citée ne prend en considération les trois aspects de la durabilité lors de la conception des réseaux de distribution. Les capacités des plateformes, dans la plupart des travaux, ne sont pas prises en compte ou sont considérées comme prédéfinies. De plus, dans la plupart des études, la livraison des marchandises est assurée par une flotte homogène des véhicules. D'autre part, les auteurs qui prennent en considération les capacités dans leurs études, utilisent une liste prédéfinie de hubs où leurs capacités sont sélectionnées par les modèles mathématiques.

La majorité des études abordant le DNDP ont supposé que l'économie d'échelle existe dans le transport de marchandises en raison de l'utilisation des hubs (par exemple, les entrepôts et les

centres de distribution) dont le rôle est la massification des flux. Cela est assuré par le regroupement des marchandises. Pour aborder la manière dont l'économie d'échelle doit être modélisée, certains chercheurs ont eu recours aux facteurs de réduction (Meier, 2017). En effet, la majorité des études citées comme (Campbell, 1996; Correia et al., 2010; Ebery et al., 2000; Ernst & Krishnamoorthy, 1998; Skorin-Kapov et al., 1996) utilisent un coût de transport réduit par des facteurs de réduction. Pour conserver le principe d'économie d'échelle après la consolidation, les auteurs supposent que le facteur de réduction inter-hub  $0 \leq \beta \leq 1$  est inférieur aux deux autres facteurs  $\alpha$  et  $\delta$  (cf. Figure 31 et Équation 1). Généralement, le nombre de facteurs désigne le nombre d'échelon dans le réseau de distribution.

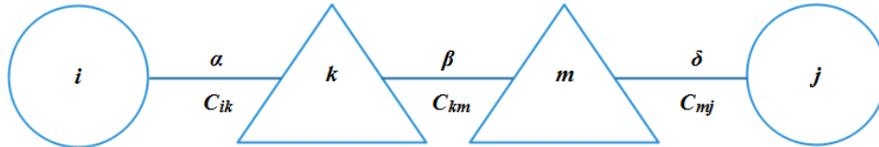


Figure 31. Modélisation de l'économie d'échelle par les facteurs de réduction

$$C_{ijkm} = \alpha \cdot C_{ik} + \beta \cdot C_{km} + \delta \cdot C_{mj} \quad (1)$$

Cependant, l'économie d'échelle est mal appliquée par cette méthode (Campbell, 2013 ; Kimms, 2006). Ces chercheurs ont suggéré d'utiliser une fonction de coût non concave linéaire pour modéliser correctement l'économie d'échelle et ils ont supposé que l'estimation de ce facteur est approximative et critique. Une autre approche a été utilisée par un certain nombre d'études (Gelareh et al., 2015 ; Meier, 2017 ; Rostami & Buchheim, 2015 ; Serper & Alumur, 2016 ; Hu et al. 2018) qui consistent à modéliser l'économie d'échelle en déterminant le nombre optimal d'une flotte hétérogène des véhicules. Cette approche utilise un coût unitaire du transport qui dépend du type de véhicules utilisés qui est intégré dans le modèle mathématique. Selon (Serper & Alumur, 2016), la principale raison d'utiliser une flotte hétérogène de véhicules est de réaliser des économies d'échelle et de réduire les coûts de transport en utilisant des véhicules de plus grande capacité.

Les deux tableaux 15 et 16 représentent respectivement la liste des abréviations et un récapitulatif des études citées ci-dessus.

Abréviation	Acronyme
DNDP	<i>Distribution Network Design Problem</i>
HLP	<i>Hub Location Problem</i>
pHLP	<i>p Hub Location Problem</i>
SA	<i>Single Allocation</i>
MA	<i>Multiple Allocation</i>
USAp-HLP	<i>Uncapacitated Single Allocation p Hub Location Problem</i>
US/MAp-HLP	<i>Uncapacitated (Single/Multiple) Allocation p Hub Location Problem</i>
UMAp-HLP	<i>Uncapacitated Multiple Allocation p Hub Location Problem</i>
UMAp-HLPv	<i>Uncapacitated Multiple Allocation p Hub Location Problem</i>
USAp-HLPv	<i>Uncapacitated Single Allocation p Hub Location Problem with vehicle sizes</i>
CMAp-HLP	<i>Capacitated Single Allocation p Hub Location Problem</i>
CSAp-HLP	<i>Capacitated Multiple Allocation p Hub Location Problem</i>
CSAp-HLPv	<i>Capacitated Single Allocation p Hub Location Problem with vehicle sizes</i>
CMAp-HLPv	<i>Capacitated Multiple Allocation p Hub Location Problem with vehicle sizes</i>

Tableau 15. Liste des abréviations

Après cette analyse de littérature, nous avons constaté que la plupart des études se sont concentrées sur le niveau de décision opérationnelle, plus particulièrement à la planification du transport. Par conséquent, dans ce travail de recherche, nous nous sommes intéressés aux deux autres niveaux de décisions (stratégique et tactique), respectivement, par le problème de conception des réseaux de distribution collaboratifs et le problème de partage des économies de la collaboration horizontale. Ces deux problèmes sont étudiés dans ce rapport de recherche en tenant compte des trois dimensions de la durabilité.

Références	Problèmes	Périodes			Niveaux		Véhicules		Capacités des hubs		Economique					Environnemental					Social			
		Unique	Multiple	Approches	2-échelons	3-échelons	Homogènes	Hétérogènes	Connues	Inconnues	Transport	Stockage	Installation	Manutention	Pénalité	Achat des véhicules	Congestion	Transport	Dépréciation des véhicules	Fonctionnement des hubs	Construction des hubs	Risque accident	Niveau de bruit	Taux d'embauche
O'Kelly (1987)	USAp-HLP	✓		QIP	✓	✓				✓														
O'Kelly, 1992)	USAp-HLP	✓		QIP	✓	✓				✓		✓												
Campbell (1994)	USAp-HLP	✓		PLNE	✓	✓				✓														
Campbell (1996)	U(S/M)Ap-HLP	✓		PLNE	✓	✓				✓														
Skorin-Kapov et al. (1996)	USAp-HLP	✓		MILP	✓	✓				✓														
Ernst et Krishnamoorthy, (1996)	USAp-HLP	✓		QIP and LP	✓	✓				✓														
Ernst et Krishnamoorthy (1998)	UMAp-HLP	✓		MILP	✓	✓																		
Ebery (2001)	USAp-HLP	✓		MILP		✓	✓			✓														
Yaman (2009)	USAp-HLP	✓		MILP	✓	✓				✓														
Contreras et al. (2011a)	UMAp-HLP	✓		PLNE	✓	✓				✓		✓												
Alumur et al. (2012)	U(S/M)Ap-HLP	✓		MILP	✓	✓				✓		✓												
Carlsson et Jia (2013)	UMAp-HLP	✓		Non-convex	✓	✓				✓		✓	✓											
An et al. (2015)	U(S/M)Ap-HLP	✓		MINLP		✓	✓			✓														
Gelareh et al. (2015)	UMAp-HLP		✓	MILP	✓	✓				✓		✓												
Rostami et Buchheim, (2015)	UMAp-HLPv	✓		QMIP	✓		✓																	
Ghaffari-Nasab et al. (2016)	USAp-HLP	✓		MINLP	✓	✓				✓	✓	✓												
Zetina et al. (2017)	UMAp-HLP	✓		MILP	✓	✓				✓		✓												
Meier (2017)	USAp-HLPv	✓		MILP	✓		✓			✓														
Dukkanci et al. (2019)	USAp-HLP	✓		MINLP	✓	✓																		
Lüer-Villagra et al. (2019)	USAp-HLP	✓		MILP	✓	✓				✓														
Ebery et al. (2000)	CMAp-HLP	✓		MILP		✓	✓		✓	✓		✓												
Elhedhli et Wu (2010)	CSAp-HLP	✓		MINLP	✓	✓			✓	✓		✓					✓							
Correia et al. (2010)	CSAp-HLP	✓		MILP	✓	✓			✓	✓		✓												
Contreras et al. (2011b)	CSAp-HLP	✓		PLNE	✓	✓			✓	✓		✓												
Meng et Wang (2011)	CSAp-HLP	✓		Non-convex	✓	✓			✓	✓	✓	✓												
Almeida et al. (2013)	CMAp-HLP	✓		PLNE		✓	✓		✓	✓		✓												
Serper et Alumur (2016)	CSAp-HLPv	✓		MILP	✓		✓		✓	✓		✓	✓		✓									
Alumur et al. (2016)	C(S/M)Ap-HLP		✓	MILP	✓					✓		✓	✓											
Esmaeilbeigi et al. (2017)	CSAp-HLP	✓		QIP		✓	✓		✓	✓		✓												
Hu et al. (2018)	CMAp-HLP	✓		Non-convex		✓	✓		✓	✓	✓	✓		✓		✓								
Mrabti et al. (2020)	CSAp-HLP		✓	MILP	✓	✓			✓	✓	✓	✓		✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Mrabti et al. (2021)	C(S/M)Ap-HLP		✓	MILP	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

**Tableau 16.** Tableau récapitulatif de l'analyse de la littérature du DNDP

## 5. Conclusion

Ce chapitre présente une analyse exhaustive de la littérature sur la collaboration horizontale d'une manière générale et sur la conception des réseaux de distribution traditionnels, en particulier. Concernant la collaboration horizontale, les études sont classées selon les trois niveaux de décision, à savoir le niveau stratégique, le niveau tactique et le niveau opérationnel. Le premier niveau concerne les études traitant les deux problèmes : la conception des réseaux de distribution collaboratifs et la sélection des partenaires. Le deuxième niveau concerne les études traitant les décisions relatives à la répartition des bénéfices et à l'inventaire. Le troisième niveau comprend les études traitant les problèmes de planification du transport collaboratif et d'échange de demandes. Nous avons pu montrer que la plupart des études ont traité le niveau de décision opérationnel et que globalement l'aspect économique est le plus évalué dans la littérature. Dans un deuxième temps, nous avons cité quelques projets de collaboration horizontale menés par des industriels internationaux. La littérature et le retour d'expérience des projets ont démontré l'efficacité de la collaboration horizontale dans la réduction des coûts logistiques et des émissions de CO<sub>2</sub>, l'amélioration du niveau de service et la possibilité d'accéder aux nouveaux marchés. Nous avons également identifié les différents facteurs clés de succès et d'échec de la collaboration horizontale, à savoir la sélection des partenaires, la répartition des bénéfices, les conflits, le partage des informations et la coordination entre les partenaires ainsi que la confiance, etc. Nous avons également réalisé un état de l'art sur le problème de conception des réseaux de distribution dans le but de positionner nos contributions. Dans le chapitre suivant, nous nous baserons sur la littérature pour formuler les indicateurs de performance utilisés afin concevoir des réseaux de distribution collaboratifs en tenant compte de la durabilité économique, environnementale et sociale/sociétale.

# Chapitre 3. Formulation des indicateurs de durabilité

## 1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons démontré que la mutualisation logistique permet d'améliorer les différents aspects de durabilité. Cependant, les travaux de recherche sont principalement axés sur la minimisation des coûts qui est une approche incomplète et ne permet pas d'améliorer tous les aspects de durabilité. Récemment certaines études ont commencé à donner plus d'attention à l'aspect environnemental spécialement par la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dues au transport de marchandises. L'aspect social/sociétal n'a pas encore eu une grande attention dans la recherche scientifique. Les entreprises qui envisagent de fournir des solutions et des alternatives de manière plus durable doivent tenir compte des trois aspects. Pour cette raison, l'objectif de ce chapitre est de traiter le problème de mutualisation en tenant compte de tous les aspects de la durabilité. Nous présentons par la suite la formulation des indicateurs de durabilité qui vont être utilisés pour proposer des modèles mathématiques afin de concevoir des réseaux de distribution collaboratifs. Dans ce chapitre, la formulation des indicateurs est basée sur la revue de littérature et les rapports statistiques.

## 2. Choix des indicateurs

La Figure 32 représente un réseau de distribution mutualisé à deux échelons qui se compose de deux parties définies par rapport à l'ensemble des entrepôts (Origine-Hub-Destination).

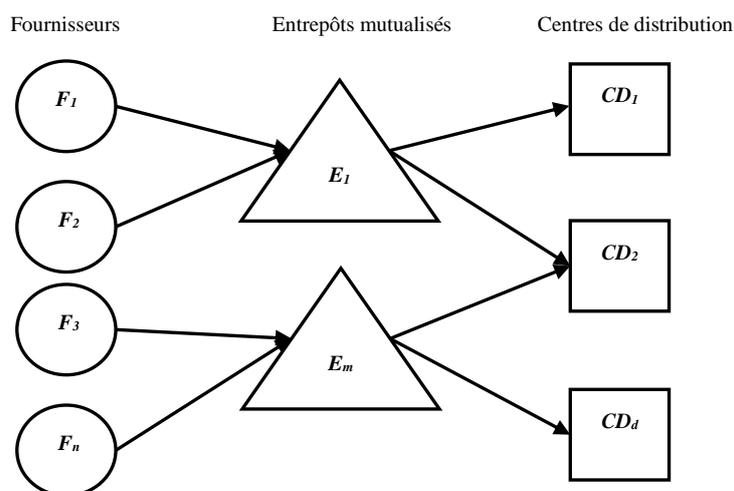


Figure 32. Réseau de distribution mutualisé O-H-D

Les différentes parties de la chaîne logistique sont définies par rapport aux entrepôts, ainsi il est nécessaire de connaître leur constitution pour bien déterminer les différents indicateurs à évaluer à l'intérieur de ces entrepôts. D'après (Makaci et al., 2017), un entrepôt mutualisé est composé de trois processus à savoir :

**Processus opérationnel** : C'est le processus clé, qui comprend plusieurs sous processus allant de la réception des palettes de divers partenaires à la livraison en camion.

**Processus de contrôle** : Ce processus est caractérisé par la collaboration de tous les acteurs (fournisseurs, prestataires logistiques et détaillants, etc.), l'objectif principal de ce processus est la gestion de l'entrepôt mutualisé.

**Processus de support** : Ce processus représente l'activité interne qui garantit les opérations de stockage. Il comprend la gestion des ressources humaines et physiques, des systèmes d'information et des méthodes, etc.

La Figure 33, extraite de (Makaci et al., 2017), explique ces trois processus et leur constitution.

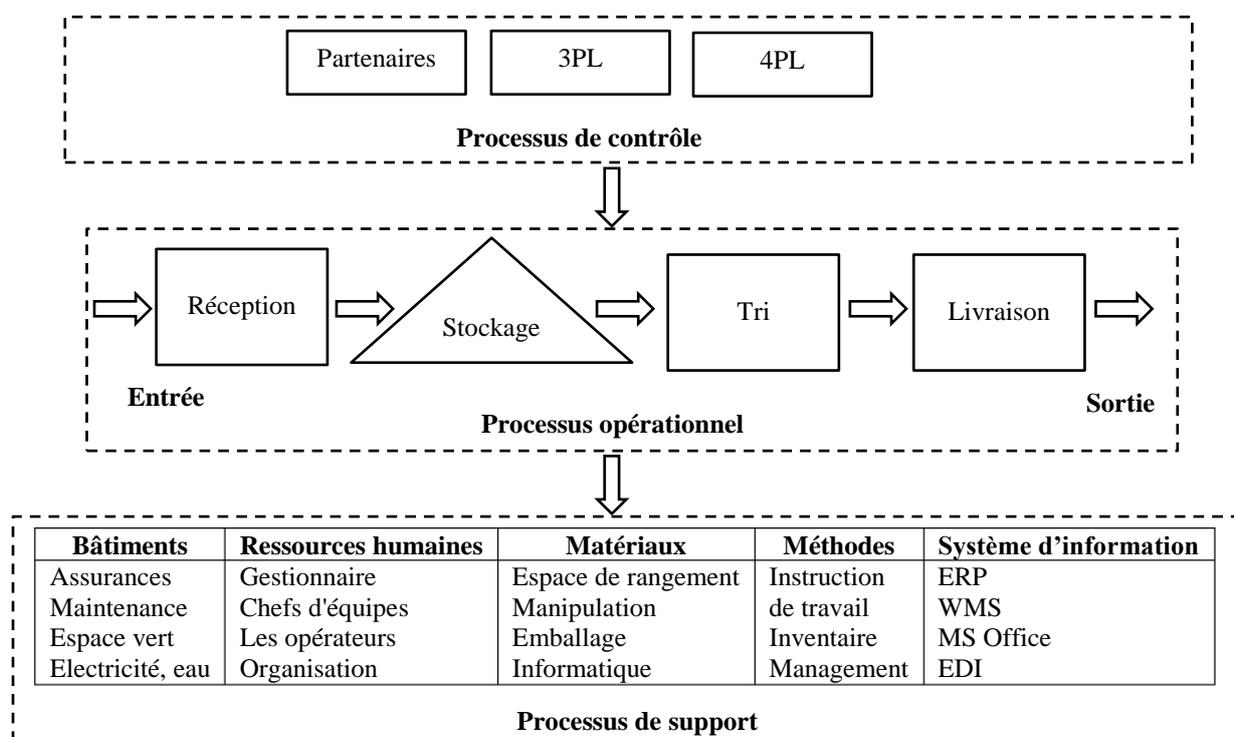


Figure 33. Cartographie d'un entrepôt mutualisé (Makaci et al., 2017)

À partir de cette cartographie, nous pouvons constater qu'il y a plusieurs types d'indicateurs que nous pouvons évaluer de l'entrée jusqu'à la sortie des marchandises.

Nous présentons ces indicateurs selon les trois parties suivantes.

– **En amont** : Nous pouvons évaluer plusieurs types d'indicateurs dans la partie située entre les fournisseurs et les entrepôts mutualisés. Au niveau économique, nous nous intéressons essentiellement au coût de transport et au taux de remplissage des véhicules. Au niveau environnemental, nous évaluerons les émissions de CO<sub>2</sub> dues aux véhicules. Dans notre étude, l'évaluation de la dimension écologique ne se limite pas aux émissions générées par le fonctionnement des véhicules mais aussi des émissions dues à l'amortissement des véhicules. Au niveau social/sociétal, nous nous concentrerons sur le bien-être et la sécurité des habitants

en estimant les effets négatifs du transport de marchandises sur la société. En se basant sur plusieurs travaux du développement durable, (cf. Chapitre 1) comme (Jensen, 2009 ; Lautso et al., 2003 ; Quak, 2008; Simongáti, 2010 ; Lautso et al., 2002), nous avons choisi d'évaluer le risque accident et le niveau de bruit engendrés par les véhicules.

– **A l'intérieur de l'entrepôt mutualisé** : Plusieurs indicateurs peuvent être évalués à l'intérieur de l'entrepôt. Au niveau économique, nous évaluerons le coût d'ouverture des entrepôts, le coût de manutention et le coût de stockage (ressources humaines, matériaux, méthodes et systèmes d'information). Au niveau environnemental, notre étude ne se limite pas aux émissions de CO<sub>2</sub> dues aux véhicules, mais nous évaluerons également les émissions de CO<sub>2</sub> générées par les entrepôts mutualisés qui sont dues à leur fonctionnement et à leur construction. Au niveau social, l'installation des entrepôts permet d'ouvrir des nouvelles opportunités d'emploi, par conséquent, nous évaluerons le taux d'embauche.

– **En aval** : En plus des indicateurs évalués dans la partie amont, nous évaluerons le coût de pénalité dû au retard de livraison dans la partie située entre les entrepôts mutualisés et les centres de distribution.

La liste des indicateurs évalués dans ce chapitre est résumée par le Tableau 17.

Niveau	Partie amont	Entrepôts	Partie aval
Economique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût de transport</li> <li>• Taux de remplissage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût de manutention</li> <li>• Coût de stockage</li> <li>• Coût d'ouverture des entrepôts</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût de transport</li> <li>• Coût de pénalité dû au retard de livraison</li> <li>• Taux de remplissage</li> <li>• Emissions de CO<sub>2</sub> dues au transport</li> </ul>
Environnemental	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emissions de CO<sub>2</sub> dues au transport</li> <li>• Emissions de CO<sub>2</sub> dues à l'amortissement des véhicules</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emissions de CO<sub>2</sub> dues aux opérations de stockage dans les entrepôts</li> <li>• Emissions de CO<sub>2</sub> dues à la construction des entrepôts</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emissions de CO<sub>2</sub> dues à l'amortissement des véhicules</li> </ul>
Social/Sociétal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risque d'accident corporel non mortel</li> <li>• Risque d'accident corporel mortel</li> <li>• Niveau de bruit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taux d'embauche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risque d'accident corporel non mortel</li> <li>• Risque d'accident corporel mortel</li> <li>• Niveau de bruit</li> </ul>

Tableau 17. Liste des indicateurs pris en compte

### 3. Formulation des indicateurs

#### 3.1. Formulation des indicateurs économiques

L'évaluation des indicateurs économiques est l'approche la plus étudiée dans la littérature scientifique. En effet, la plupart des études s'intéressent essentiellement aux coûts logistiques, en particulier, le coût de transport. Généralement, ces études ne prennent pas en compte le coût de stockage, le coût d'installation des entrepôts et le coût de pénalité dû au retard de livraison. La prise en compte de ces indicateurs permet aux partenaires d'avoir une vision exhaustive sur les bénéfices de la collaboration. D'autre part, elle permet de déterminer le nombre optimal des entrepôts à ouvrir, de réduire le niveau de stock dans les entrepôts et de garantir la satisfaction des clients dans les bons délais ; d'où l'importance d'intégrer tous ces indicateurs de performance.

### 3.1.1. Formulation du coût de transport

Généralement dans la littérature, il existe plusieurs méthodes pour modéliser le coût de transport soit en fonction de la distance parcourue ou de la quantité de marchandises transportée ou bien en fonction des deux ensembles.

La prise en compte de la distance dans la formulation du coût de transport est justifiée par le fait que ce dernier dépend de la distance parcourue. En effet, le coût de transport généré par une distance parcourue égale à 100 km n'est pas égal à celui généré dans 1000 km. Concernant la quantité de marchandises, l'objectif principal de la mutualisation est la massification des flux pour améliorer le taux de remplissage. Cet objectif est atteint par le regroupement des marchandises qui viennent des différentes origines pour qu'elles soient livrées vers les mêmes destinations. D'autre part, l'un des facteurs qui peuvent bloquer la réussite de la mutualisation est celui du partage des gains de manière non équitable. Pour cette raison, avec une formulation qui dépend seulement de la distance ou de la quantité, la continuité d'une telle collaboration n'est pas garantie. Par conséquent, la modélisation du coût de transport en combinant la quantité transportée et la distance parcourue semble être la meilleure approche.

Dans notre étude, la modélisation du coût de transport est basée sur la formulation proposée par Pan (2010) en se référant aux grilles tarifaires fournies par des entreprises pour déduire que le coût de transport dépend de la quantité transportée (nombre de palettes) et de la distance parcourue. Ces grilles sont fournies par deux partenaires du projet (Association du Club Déméter Environnement et Logistique) et (Fédération des Entreprises et Entrepreneurs de France).

Le Tableau 18 représente les paramètres utilisés pour modéliser le coût de transport.

Paramètre	Désignation	Unité
$CT_{ijt}$	Coût de transport de marchandises entre $i$ et $j$ pendant la période $t$	€
$q_{ijt}^p$	Quantité du produit $p$ transportée de $i$ vers $j$ à la période $t$	Palettes
$Q$	Capacité du véhicule	Palettes
$d_{ij}$	Distance parcourue entre $i$ et $j$	km
$C_q$	Coût unitaire de transport d'un véhicule en pleine charge	€/km
$C_o$	Coût unitaire de transport d'un véhicule vide	€/km
$N_{ijt}$	Nombre de véhicules ou de voyages nécessaires pour transporter la marchandise entre $i$ et $j$ pendant la période $t$	Véhicules ou voyages
$d$	Distance parcourue	km
$d'$	Distance de retour à vide	km

**Tableau 18.** Paramètres utilisés pour modéliser le coût de transport

L'approche relie entre la distance parcourue  $d_{ij}$ , la quantité transportée  $\sum_p q_{ijt}^p$  par des véhicules de capacité  $Q$  ainsi que les coûts unitaires d'un véhicule en pleine charge  $C_q$  et vide  $C_o$ . Le coût de transport entre deux points  $i$  et  $j$  à la période  $t$  est décrit par l'Équation (2).

$$CT_{ijt} = d_{ij} \cdot \left[ (C_q - C_o) \cdot \frac{\sum_p q_{ijt}^p}{Q} + C_o \cdot \left\lceil \frac{\sum_p q_{ijt}^p}{Q} \right\rceil \right] \quad (2)$$

Le coût de transport est décrit en fonction des coûts unitaires du véhicule vide et en pleine charge. Cette formule ne prend pas en compte le retour à vide. Il est évident que les trajets de retour à vide ne sont pas considérés dans la fonction (Pan, 2010).

Sachant que par hypothèse, un véhicule retourne à vide à son point d'origine, le coût de retour est égal à la multiplication des trois facteurs : distance parcourue lors du retour, coût

unitaire d'un véhicule vide et le nombre de véhicules ou de voyages nécessaires pour satisfaire les demandes des clients.

$$C_{jit} = d_{ji} \cdot C_o \cdot \left\lceil \frac{\sum_p q_{ijt}^p}{Q} \right\rceil \quad (3)$$

Les deux Équations (4) et (3) seront utilisées pour modéliser le coût de transport en tenant compte des frais du retour à vide :

- Dans le cas où la distance du trajet “aller” est différente de celle du trajet “retour” ( $d_{ij} \neq d_{ji}$ )

$$CT_{ij} = d_{ij} \cdot \left[ \frac{C_q - C_o}{Q} \cdot \sum_p q_{ijt}^p + C_o \cdot \left\lceil \frac{\sum_p q_{ijt}^p}{Q} \right\rceil \right] + d_{ji} \cdot C_o \cdot \left\lceil \frac{\sum_p q_{ijt}^p}{Q} \right\rceil \quad (4)$$

- Dans le cas où la distance du trajet “aller” est égale à celle du trajet “retour” ( $d_{ij} = d_{ji}$ )

$$CT_{ij} = d_{ij} \cdot \left[ \frac{C_q - C_o}{Q} \cdot \sum_p q_{ijt}^p + 2 \cdot C_o \cdot \left\lceil \frac{\sum_p q_{ijt}^p}{Q} \right\rceil \right] \quad (5)$$

Dans notre étude, nous supposons que la distance du trajet “aller” est égale à celle du trajet “retour”. Par conséquent, le coût du transport de la somme des quantités regroupées à partir d'une origine  $i$  (fournisseurs, entrepôts, etc.) vers une destination  $j$  sera égal à :

$$CT_{ijt} = d_{ij} \left[ \frac{C_q - C_o}{Q} \cdot \sum_p q_{ijt}^p + 2 \cdot C_o \cdot N_{ijt} \right] \quad (6)$$

Le nombre de véhicules ou de voyages est égal à la partie entière supérieure de la quantité transportée après regroupement divisée par la capacité du véhicule.

$$N_{ijt} = \left\lceil \frac{\sum_p q_{ijt}^p}{Q} \right\rceil \quad (7)$$

### 3.1.2. Formulation du coût de stockage

L'évaluation du niveau de stock dans les entrepôts mutualisés est importante pour optimiser les flux entrants et sortants ainsi que pour estimer le coût induit par le stockage. En effet, un niveau de stock trop important (sur stockage) génère des coûts superflus de stockage, appelés des Muris selon la méthode 3M (Muda, Mura, Muri). Les charges de stockage augmentent proportionnellement aux quantités de stock (taxes à payer, obsolescence, avaries, mises au rebut) et dépendent des caractéristiques des produits. Un stock trop faible (sous stockage), génère à son tour des coûts superflus (des Muras selon la méthode 3M). Les irrégularités dans ce contexte sont diverses : mauvaise exploitation des ressources (personnels, équipements et espaces), avec un impact qui peut s'étendre le long de la chaîne logistique aval (perturbation des ventes, rupture des stocks, perte des clients).

Le coût de stockage peut être défini comme l'ensemble des charges supportées et dues à la présence des stocks dans le magasin. Ces charges sont décomptées à partir de l'opération d'entrée de marchandises jusqu'à l'opération de sortie. Le stockage des marchandises, entraîne par conséquent les principales lignes de dépenses qui appartiennent essentiellement aux deux processus (opérationnel et support) présentés dans la Figure 33.

Nous nous sommes référés à la formule donnée par (Tuzkaya & Önüt, 2009) en l'adoptant à notre situation qui comporte une chaîne logistique plus généralisée avec  $m$  entrepôts mutualisés.

Les paramètres utilisés pour modéliser le coût de stockage sont représentés par le Tableau 19.

Paramètre	Désignation	Unité
$I_t^p$	Niveau d'inventaire du produit $p$ pendant la période $t$	Palettes
$CS_{mt}^p$	Coût de stockage du produit $p$ à la période $t$	€
$Cs_m^p$	Coût unitaire de stockage du produit $p$ dans l'entrepôt $m$	€
$I_{mt}^p$	Niveau d'inventaire du produit $p$ dans l'entrepôt $m$ à la période $t$	Palettes
$q_{imt}^p$	Quantité du produit $p$ transportée par le fournisseur $i$ vers l'entrepôt $m$ pendant la période $t$	Palettes
$q_{mjt}^p$	Quantité du produit $p$ transportée par l'entrepôt $m$ vers le centre de distribution $j$ pendant la période $t$	Palettes

**Tableau 19.** Paramètres utilisés pour modéliser le coût de stockage

À chaque période  $t$ , le coût de stockage du produit  $p$  dans l'entrepôt  $m$  correspond à la multiplication du niveau d'inventaire par le coût unitaire de stockage de chaque produit.

$$CS_{mt}^p = Cs_m^p \cdot I_{mt}^p \quad (8)$$

Le niveau d'inventaire d'un produit  $p$  est égal à la somme du niveau d'inventaire de la période précédente et la différence entre la quantité transportée par le fournisseur  $i$  vers l'entrepôt  $m$  et la quantité sortante de ce dernier vers le client  $j$ .

$$I_{mt}^p = q_{imt}^p - q_{mjt}^p + I_{m(t-1)}^p \quad (9)$$

### 3.1.3. Formulation du coût de pénalité

L'un des principaux objectifs de la mutualisation est de satisfaire les demandes des clients dans les bons délais tout en minimisant les coûts logistiques. Ainsi, l'estimation du coût de pénalité dû au retard de livraison est fondamentale. Le coût de pénalité représente aussi un des coûts nécessaires à prendre en compte lors de la conception d'un réseau de distribution mutualisé. En effet, il est possible de livrer en retard, ce qui influence la relation avec les clients. Par conséquent, parmi nos objectifs, nous proposons de minimiser le coût de pénalité dans la partie aval des entrepôts mutualisés.

Dans notre étude, le coût de pénalité est évalué en multipliant la quantité de marchandises retardées par le coût unitaire de retard. Cette approche est utilisée dans plusieurs études (Tuzkaya & Önüt, 2009 ; Yu et al., 2016).

Le Tableau 20 représente les paramètres utilisés pour la modélisation du coût de pénalité.

Paramètre	Désignation	Unité
$CD_t^p$	Coût de pénalité due au retard de livraison du produit $p$ pendant la période $t$	€
$Cd^p$	Coût unitaire de pénalité due au retard de livraison du produit $p$	€
$W_j^p$	Demande du client $j$ pour le produit $p$ à la période $t$	Palettes
$Wd_t^p$	Quantité retardée du produit $p$ à la période $t$	Palettes
$q_{mjt}^p$	Quantité du produit $p$ livrée par l'entrepôt $m$ vers le client $j$ à la période $t$	Palettes

**Tableau 20.** Paramètres utilisés pour modéliser le coût de pénalité

Nous supposons que le coût unitaire de pénalité dépend du type de produit et de la période car les demandeurs peuvent être plus exigeants dans certaines périodes (par exemple lorsqu'il s'agit des produits saisonniers fortement consommés au cours d'une saison donnée). La quantité retardée du produit  $p$  à la période  $t$  est égale à la somme de la quantité retardée à la période précédente et la différence entre la quantité demandée et la quantité livrée par tous les entrepôts mutualisés à la même période.

$$CD_t^p = Cd^p \cdot Wd_t^p \quad (10)$$

$$Wd_t^p = \sum_{j \in D} W_{jt}^p - \sum_{m \in M, j \in D} q_{mjt}^p + Wd_{(t-1)}^p \quad (11)$$

### 3.1.4. Formulation du coût d'ouverture d'un entrepôt

L'installation des entrepôts mutualisés engendre des coûts supplémentaires importants et elle influence la quantité d'émissions dégagées puisque, à chaque installation d'un entrepôt une augmentation de la distance totale provoque l'augmentation des émissions de CO<sub>2</sub>. Dans notre étude, le coût d'ouverture est déterminé en fonction de la surface souhaitée lors de la construction de l'entrepôt. Cette surface dépend de plusieurs facteurs tels que la capacité de stockage, les matériaux utilisés pour la manutention, l'espace nécessaire au transfert et la circulation. Le coût unitaire d'ouverture de l'entrepôt peut varier en fonction des différents paramètres, notamment l'emplacement de l'entrepôt, la taille, l'équipement et le type de produit à entreposer, etc.

Le Tableau 21 représente les paramètres utilisés pour la formulation du coût d'ouverture.

Paramètre	Désignation	Unité
$CW_m$	Coût d'ouverture d'un entrepôt $m$	€
$A_m$	Surface de construction d'un entrepôt $m$	$m^2$
$Cw_m$	Coût unitaire d'ouverture d'un entrepôt $m$	€/m <sup>2</sup>

**Tableau 21.** Paramètres utilisés pour modéliser le coût d'ouverture

Le coût d'ouverture est égal à la multiplication du coût unitaire d'ouverture par la superficie de l'entrepôt. Le coût unitaire d'ouverture peut être déterminé à partir des guides de construction.

$$CW_m = A_m \cdot Cw_m \quad (12)$$

### 3.1.5. Formulation des coûts de manutention

Le coût de manutention, représenté par l'Équation 13, se compose de trois parties liés aux opérations de déchargement, de tri et de déchargement dans les plateformes. L'évaluation de cet indicateur est réalisée lors de la conception d'un réseau de distribution à trois échelons qui comprend un nombre important d'entrepôts et de centres de distribution.

Le Tableau 22 représente les paramètres nécessaires pour la formulation du coût de manutention.

Paramètre	Désignation	Unité
$CH_{mt}^p$	Coût de manutention au niveau de l'entrepôt $m$	€
$cu^p$	Coût unitaire de déchargement du produit $p$	€/palette
$cs^p$	Coût unitaire de tri du produit $p$	€/palette
$cl^p$	Coût unitaire de chargement du produit $p$	€/palette

**Tableau 22.** Paramètres utilisés pour modéliser le coût de manutention

Pour chaque plateforme  $m$ , le coût de manutention est obtenu en multipliant la quantité de marchandises entrante (par toutes origines  $i$ ) ou sortante (vers toutes destinations  $j$ ) par le coût unitaire de manutention de chaque type de produit.

$$CH_{mt}^p = \sum_i q_{imt}^p \cdot cu^p + \sum_i q_{imt}^p \cdot cs^p + \sum_j q_{mjt}^p \cdot cl^p \quad (13)$$

### 3.1.6. Formulation du taux de remplissage des véhicules

L'une des solutions les plus importantes pour améliorer le taux de remplissage est la mutualisation, par le regroupement de plusieurs produits dans un même véhicule de transport. En effet, la mutualisation implique la massification des flux en concentrant les flux de transport dans un même site (entrepôt, plateforme de distribution, etc.). Selon (Rakotonarivo et al., 2009), la massification des flux se traduit par des livraisons plus fréquentes, un taux de service accru, des produits de meilleure qualité et des camions mieux remplis avec des coûts logistiques réduits.

Selon (Morana & Gonzalez-Feliu, 2014), le taux de remplissage est le rapport entre la charge transportée et la capacité du véhicule multipliée par le nombre de déplacements ou de véhicules nécessaires.

$$\text{Taux de remplissage} = \frac{\text{Charge transportée} \cdot \text{Nb de km en charge}}{\text{Charge utile} \cdot \text{Nb de km parcourus}} \quad (14)$$

Lorsque le nombre de kilomètres en charge est égal au nombre de kilomètres parcourus, le taux de remplissage devient.

$$\text{Taux de remplissage} = \frac{\text{Charge transportée}}{\text{Charge utile}} \quad (15)$$

L'Équation (15) est valable lorsqu'il s'agit d'une charge transportée inférieure ou égale à la charge utile d'où la nécessité de diviser cette formule par le nombre de déplacements (ou le nombre de véhicules) nécessaires pour transporter toute la marchandise. Celui-ci est égal à la partie entière supérieure de la charge transportée par la capacité du véhicule.

$$\text{Nombre de voyages} = \left\lceil \frac{\text{Charge transportée}}{\text{Charge utile}} \right\rceil \quad (16)$$

Dans notre étude, nous évaluons l'impact de la mutualisation sur les taux de remplissage des véhicules en amont et en aval. Le taux de remplissage global est la moyenne des deux taux.

$$F_1 = \frac{\sum_{i \in N, m \in M, p \in P, t \in T} q_{imt}^p}{Q \cdot \sum_{i \in N, m \in M, t \in T} N_{imt}} \quad (17)$$

$$F_2 = \frac{\sum_{j \in D, m \in M, p \in P, t \in T} q_{mjt}^p}{Q \cdot \sum_{j \in D, m \in M, t \in T} N_{mjt}} \quad (18)$$

$$F = \frac{F_1 + F_2}{2} \quad (19)$$

### 3.2. Formulation des indicateurs environnementaux

L'un des principaux objectifs du développement durable est l'amélioration du niveau écologique. Bien qu'il existe peu d'études qui traitent l'impact de la mutualisation sur l'environnement, cette dernière permet d'atteindre des résultats encourageants généralement par la réduction des émissions de GES dues au transport de marchandises. Ces émissions se composent principalement de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, etc. [Wright et al. \(2011\)](#) ont proposé d'évaluer les émissions de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>, puisque le secteur de transport routier est dominé par ces deux types d'émissions qui proviennent des combustibles fossiles. Les émissions de CO<sub>2</sub> sont directement liées à la quantité de carburant consommée par le véhicule, qui dépend à son tour de divers paramètres liés aux véhicules, à l'environnement et à la circulation, tels que la vitesse, la charge et l'accélération du véhicule. Les émissions de CH<sub>4</sub> s'expriment en fonction de nombreux aspects complexes de la dynamique de combustion et du type de systèmes de contrôle des émissions utilisées. Par conséquent, ce type d'émissions est difficile à l'évaluer. Dans notre étude, nous nous intéressons à l'évaluation des émissions de CO<sub>2</sub> dues aux véhicules (leur usage et leur amortissement) et aux entrepôts mutualisés (leur usage et leur construction).

#### 3.2.1. Emissions de CO<sub>2</sub> générées par les véhicules

Les émissions de CO<sub>2</sub> générées par les véhicules sont principalement dues à leur utilisation et à leur amortissement. Contrairement à la plupart des travaux de recherche, dans notre étude, nous prenons en considération ces deux types d'émissions.

##### 3.2.1.1. Emissions de CO<sub>2</sub> dues au transport

Selon [Faccio et al., 2013](#), l'estimation des émissions de CO<sub>2</sub> nécessite des calculs complexes, qui ne peuvent représenter qu'une approximation en raison de la difficulté d'évaluer certaines variables comme le style de conduite, les conditions météorologiques et de congestion.

En se référant à la littérature, on peut constater qu'il existe une variété de modèles de calcul qui diffèrent dans la façon dont ils évaluent la consommation de carburant ou les émissions de CO<sub>2</sub>. [Moutaoukil et al. \(2014\)](#) ont classé ces approches en trois catégories, à savoir :

- Approche basée sur la distance comme dans [Palmer, 2007](#)
- Approche basée sur la consommation d'énergie comme dans [Ubeda et al., 2011](#) et [Kopfer et al., 2014](#).
- Approche basée sur l'activité qui prend en compte le poids des marchandises transportées et la distance parcourue comme dans [Pan, 2010](#).

[Morana et Gonzalez-Feliu \(2014\)](#) ont donné une autre classification des différentes méthodes d'évaluation des émissions de CO<sub>2</sub>. Selon ces auteurs, les émissions de CO<sub>2</sub> peuvent être estimées et agrégées par différentes façons, à savoir :

- Approche en fonction de la distance parcourue et de la vitesse moyenne utilisée comme dans (André, 2004) ; (Ntziachristos & Samaras, 2000) ; (ADEME, 2007) et (LET et al., 2006). Ces approches peuvent être estimées à l'aide des tables de conversion.
- Approches en fonction de la distance parcourue et de la vitesse moyenne en tenant compte de l'accélération comme dans (Pluvinet et al., 2012).

La meilleure classification détaillée est celle de (Demir et al., 2014) qui consiste à classer les modèles d'estimation des émissions de CO<sub>2</sub> en trois catégories : factoriels, microscopiques et macroscopiques.

Le premier type consiste à convertir le carburant consommé par le véhicule en émissions de CO<sub>2</sub> par le biais d'un facteur de conversion (kg CO<sub>2</sub>/litre). Les modèles factoriels sont simples et faciles à appliquer dans les problèmes d'optimisation. Cependant, ils ne permettent pas d'évaluer directement les émissions et ils ne possèdent pas un lien direct avec le taux de remplissage des véhicules dont l'amélioration représente le principal objectif de la mutualisation. Par conséquent, certains auteurs ajoutent des hypothèses sur le taux de remplissage avant résolution des modèles d'optimisation.

Le deuxième type permet d'estimer les émissions de CO<sub>2</sub> d'une façon instantanée. Cependant, ils ont besoin d'un vaste ensemble de données. Ces modèles ne sont pas encore appliqués dans le problème de conception des réseaux de distribution car ils nécessitent une évaluation instantanée des émissions de CO<sub>2</sub>.

Le troisième type est utilisé pour estimer les émissions par régression au moyen d'un ensemble prédéfini de paramètres pour chaque classe de véhicules. Il est le plus connu dans la littérature scientifique. Selon (Demir et al., 2014), ces modèles sont particulièrement utiles à l'échelle, lorsque les informations sur le trafic et les modes de fonctionnement sont insuffisants.

Nous nous sommes intéressés dans notre étude à ce dernier type qui offre un bon compromis entre l'exactitude des résultats et la disponibilité des données nécessaires pour estimer l'empreinte carbone. Parmi les approches utilisées dans les modèles macroscopiques, l'approche MEET (*Methodologies for Estimating air pollutant Emissions from Transport*) est la plus utilisée dans la littérature scientifique.

Cette approche est basée sur plusieurs expériences et projets. Elle prend en considération la distance parcourue, le type de véhicule, la quantité de marchandises transportée, etc. Grâce à la prise en compte de ces différents paramètres et de sa facilité d'application dans les problèmes d'optimisation, le modèle MEET est le plus utilisé dans la littérature qui traite la collaboration horizontale. La mutualisation a pour objectif principal de massifier les flux logistiques par le regroupement de marchandises d'où la nécessité de prendre en considération les quantités, les distances et le nombre de véhicules dans le modèle d'estimation des émissions de CO<sub>2</sub>, d'où la favorisation du modèle MEET par rapport aux autres modèles.

Cette méthodologie est le résultat de l'action du projet COST (*European Cooperation in Science and Technology*) et du projet MEET (Jancovici, 2007 ; Hickman et al., 1999). Grâce à sa performance, le modèle MEET produit aussi les nouveaux résultats de base du logiciel COPERT (Ntziachristos & Samaras, 2000).

Les paramètres utilisés pour modéliser les émissions de CO<sub>2</sub> sont représentés dans le Tableau 23.

Paramètre	Désignation	Unité
$E_q$	Emissions de CO <sub>2</sub> du véhicule en plein charge pour un seul kilomètre parcouru	g/km
$E_o$	Emissions de CO <sub>2</sub> du véhicule vide pour un seul kilomètre parcouru	g/km
$C_{load}$	Correction du facteur de charge	
$\delta$	Le pourcentage du gradient	%
$v$	Vitesse du véhicule	km/h
$E_{ijt}$	Emissions de CO <sub>2</sub> dues au transport de marchandises entre le point $i$ et le point $j$ à la période $t$	g

**Tableau 23.** Paramètres utilisés pour modéliser les émissions de CO<sub>2</sub>

Dans le modèle MEET, la modélisation des émissions est basée sur les deux taux unitaires d'émissions  $E_o$  et  $E_q$  qui dépendent du PTAC (Poids Total Autorisé en Charge) du véhicule et de la vitesse de circulation. Pour la détermination de ces deux taux d'émission, nous nous sommes basés sur l'étude (Hickman et al., 1999). Ces auteurs ont présenté l'Équation (20) qui relie la quantité d'émissions de CO<sub>2</sub> d'un véhicule vide et la vitesse de circulation.

$$E_o(v) = K + a \cdot v + b \cdot v^2 + c \cdot v^3 + d/v + e/v^2 + f/v^3 \quad (20)$$

La constante  $K$  et les coefficients ( $a, b, \dots, f$ ) sont déterminés en fonction du PTAC. Leurs valeurs sont présentées par le Tableau 24.

PTAC	$K$	$a$	$b$	$10^6 c$	$d$	$e$	$f$
3.5 à 7.5	110	0	0	375	8702	0	0
7.5 à 16	871	-16	0.143	0	0	32031	0
16 à 32	765	-7.04	0	632	8334	0	0
32 à 40	1576	-17.6	0	1170	0	36067	0

**Tableau 24.** Valeurs de la constante et les coefficients pour le taux d'émission d'un véhicule qui circule à vide

Le taux d'émission d'un véhicule qui circule en pleine charge est égal à la multiplication de  $E_o$  par le facteur de correction de charge.

$$E_q = E_o \cdot C_{load}(\delta, v) \quad (21)$$

Le facteur de correction de charge dépend du pourcentage du gradient de la route et de la vitesse du véhicule. Il est donné par l'Équation (22).

$$C_{load}(\delta, v) = k + n \cdot \delta + p \cdot \delta^2 + q \cdot \delta^3 + r \cdot v + s \cdot v^2 + t \cdot v^3 + u/v \quad (22)$$

Il est difficile de connaître la pente de la route à chaque fois, ainsi, nous avons négligé le pourcentage du gradient. La nouvelle formule obtenue est la suivante.

$$C_{load}(v) = k + r \cdot v + s \cdot v^2 + t \cdot v^3 + u/v \quad (23)$$

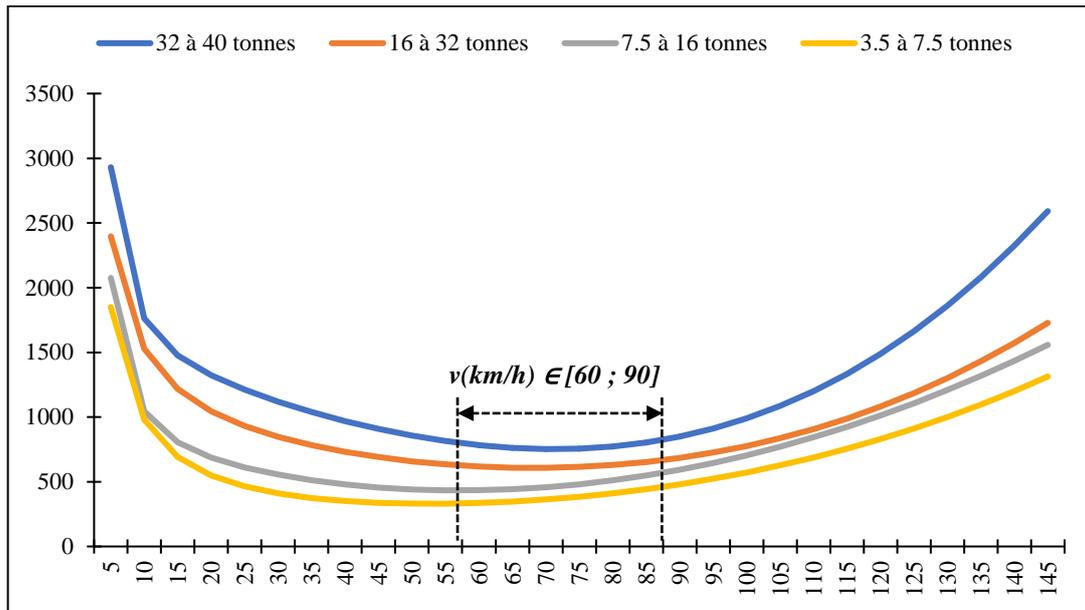
La constante  $k$  et les coefficients ( $r, s, t, u$ ) dépendent de la catégorie de véhicules (PTAC). Leurs valeurs sont résumées dans le Tableau 25 pour des PTAC entre 3.5 et 40 tonnes.

PTAC	$k$	$r$	$s$	$t$	$u$
3.5 à 7.5	1.27	-0.00235	0	0	-1.33
7.5 à 16	1.26	0	0	-2.03E-07	-1.14
16 à 32	1.27	0	0	0	-0.483
32 à 40	1.43	0	0	0	-0.916

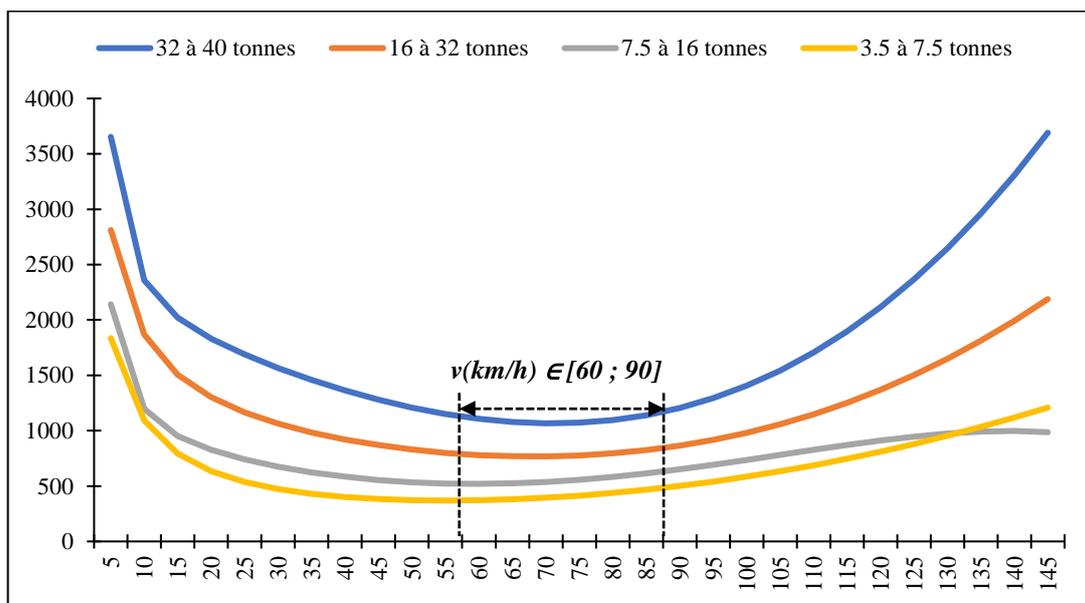
**Tableau 25.** Valeurs de la constante et des coefficients du facteur de correction de charge pour les PTAC (tonnes)  $\in [3.5 ; 40]$

Concernant le choix de vitesse, nous avons tracé les courbes des émissions  $E_o$  et  $E_q$  des différents PTAC en fonction de plusieurs valeurs de vitesse. L'objectif est de choisir une valeur de vitesse très proche de l'optimum qui génère une quantité minimale des émissions de  $\text{CO}_2$ .

Les deux Figures 34 et 35 représentent respectivement les émissions de  $\text{CO}_2$  d'un véhicule vide et en pleine charge en fonction de la vitesse de circulation. Comme le montre les deux figures,  $E_o$  et  $E_q$  sont généralement minimales pour une valeur de vitesse comprise entre 60 et 90  $\text{km/h}$ . Dans notre étude, nous avons choisi de fixer la vitesse de circulation à 80  $\text{km/h}$  qui est très proche de l'optimum. Cette valeur est utilisée aussi dans plusieurs études comme (Soysal et al., 2016 ; Pan, 2010 ; Pan et al., 2013).



**Figure 34.** Taux d'émissions  $E_o$  en fonction de la vitesse de circulation pour les PTAC (tonnes)  $\in [3.5 ; 40]$



**Figure 35.** Taux d'émissions  $E_q$  en fonction de la vitesse de circulation pour les PTAC (tonnes)  $\in [3.5 ; 40]$

Le Tableau 26 représente les valeurs du facteur de correction du gradient de la route et les taux d'émissions  $E_o$  et  $E_q$  pour les différentes catégories de PTAC. Ces valeurs sont calculées pour une vitesse moyenne égale à 80 km/h.

PTAC	$C_{load}$	$E_o$ (g/km)	$E_q$ (g/km)
3.5 à 7.5	1.065	410.78	437.63
7.5 à 16	1.142	511.2	583.70
16 à 32	1.264	629.56	795.74
32 à 40	1.419	772.68	1096.09

**Tableau 26.** Facteur de correction et taux d'émission des différentes catégories de PTAC pour une vitesse moyenne égale à 80 km/h

La formule générale des émissions de CO<sub>2</sub> est donnée par (Pan, 2010), elle admet la même forme que le coût de transport. Elle combine entre les deux taux d'émissions  $E_o$  et  $E_q$  ainsi que la quantité de marchandises transportées  $q_{ij}$  et la distance parcourue  $d_{ij}$ .

$$E_{ij} = d_{ij} \cdot \left( (E_q - E_o) \cdot \frac{q_{ij}}{Q} + E_o \cdot \left[ \frac{q_{ij}}{Q} \right] \right) \quad (24)$$

L'Équation (24) représente la quantité d'émissions dégagées par un véhicule de capacité  $Q$  et qui transporte une quantité de marchandises  $q_{ij}$ . Elle prend en considération aussi le nombre de véhicules (ou de voyages) nécessaires qui est donné par la partie entière supérieure de la division de la quantité livrée et la capacité des véhicules.

Cette formule générale ne tient pas compte de la quantité de CO<sub>2</sub> dégagée lors du retour à vide du véhicule (Pan, 2010). Par hypothèse, les véhicules retournent vides après chaque livraison, nous pouvons dire que la quantité d'émissions émise est égale à la multiplication de la distance du retour, le taux d'émission d'un véhicule qui circule à vide  $E_o$  et le nombre de véhicules ou de voyages.

$$E_{ji} = d_{ji} \cdot E_o \cdot \left[ \frac{q_{ij}}{Q} \right] \quad (25)$$

Les Équations (26-27) seront utilisées pour modéliser les émissions de CO<sub>2</sub> dues au transport de marchandises en tenant compte des émissions du retour à vide.

- Dans le cas où la distance du trajet "aller" serait différente de celle du trajet "retour" ( $d_{ij} \neq d_{ji}$ )

$$E_{ij} = d_{ij} \cdot \left[ \frac{E_q - E_o}{Q} \cdot Q + C_o \cdot \left[ \frac{q_{ij}}{Q} \right] \right] + d_{ji} \cdot E_o \cdot \left[ \frac{q_{ij}}{Q} \right] \quad (26)$$

- Dans le cas où la distance du trajet "aller" serait égale de celle du trajet "retour" ( $d_{ij}=d_{ji}$ )

$$E_{ij} = d_{ij} \cdot \left[ \frac{E_q - E_o}{Q} \cdot Q + 2 \cdot E_o \cdot \left[ \frac{q_{ij}}{Q} \right] \right] \quad (27)$$

Dans notre étude, nous supposons que la distance du trajet "aller" est égale à celle du trajet "retour". Ainsi, pendant chaque période  $t$ , la quantité d'émissions de CO<sub>2</sub> générées par le transport de marchandises à partir d'une origine  $i$  vers une destination  $j$  sera égale à :

$$E_{ijt} = d_{ij} \left[ \frac{E_q - E_o}{Q} \cdot \sum_p q_{ijt}^p + 2 \cdot E_o \cdot N_{ijt} \right] \quad (28)$$

Le nombre de véhicules est égal à la partie entière supérieure de la quantité transportée divisée par la capacité du véhicule utilisé (cf. Équation (29)).

$$N_{ijt} = \left\lceil \frac{\sum_p q_{ijt}^p}{Q} \right\rceil \quad (29)$$

### 3.2.1.2. Emissions de CO<sub>2</sub> générées par l'amortissement des véhicules

Afin d'évaluer de manière exhaustive les émissions de CO<sub>2</sub> provenant des véhicules, il convient d'inclure les émissions liées à leur amortissement. Ce type d'émissions est constitué des émissions des matériaux et des émissions des différents postes utilisés pendant la fabrication. Il existe deux méthodes pour modéliser ces émissions. La première méthode consiste à modéliser chaque type d'émission à part, tandis que la deuxième méthode consiste à utiliser les tableaux résultants des deux types par des observatoires. Dans le but de comparer les deux résultats, nous avons modélisé ces émissions par les deux méthodes.

- **Première méthode**

- *Estimation des émissions des matériaux*

Un véhicule de transport est composé en grande partie d'acier, de plastique, d'aluminium, de verre plat, de caoutchouc et de liquide, etc. Les émissions de ces différents éléments varient en fonction du poids du véhicule.

Le Tableau 27, extrait de (ADEME, 2010), représente les moyennes des pourcentages des différents matériaux utilisés pour la fabrication d'un véhicule.

Matériaux	$p_i$ Pourcentages par rapport au poids	$E_i$ Emissions en tonnes CO <sub>2</sub> /tonnes
Acier	50%	2.15
Aluminium	7%	9.84
Plastique	10%	2.39
Verre plat	4%	1.52
Caoutchouc	5%	2.39
Liquides	7%	1.84
Autres	17%	3.67

**Tableau 27.** Constitution des véhicules et émissions de CO<sub>2</sub> par tonnes de chaque matériau (ADEME, 2010)

D'une manière générale, nous pouvons noter que les émissions de CO<sub>2</sub> des matériaux sont égales à :

$$Emissions\ des\ matériaux = W_o \cdot \sum_i p_i \cdot E_i \quad (30)$$

$$Emissions\ des\ matériaux = 2.94 \cdot W_o \quad (31)$$

- *Les émissions des postes de fabrication (émissions hors matériaux)*

Un autre type des émissions dégagées lors de la fabrication du véhicule, ce sont les émissions des postes utilisés pour la fabrication. Selon (Abdessalem, 2014) et le rapport (ADEME, 2010), l'ensemble des émissions « hors matériaux » sont de l'ordre de 2.569 tonnes CO<sub>2</sub>/véhicules pour un véhicule particulier de 1.19 tonnes. En divisant ces émissions par le poids du véhicule, nous pouvons conclure que les émissions de CO<sub>2</sub> pour un véhicule de poids  $W_o$  sont égales à :

$$Emissions\ hors\ matériaux = 2.158 \cdot W_o \quad (32)$$

La somme des deux types d'émissions représente les émissions de CO<sub>2</sub> dues à la fabrication du véhicule. Selon (ADEME, 2010), il faut ajouter 10% qui correspondent aux autres postes (comme le fret et les déchets) produisant des émissions supplémentaires pendant la fabrication du véhicule.

$$\text{Emissions fabrication} = 5.1 \cdot W_o + 10\% \cdot 5.1 \cdot W_o \quad (33)$$

$$\text{Emissions fabrication} = 5.6 \cdot W_o \quad (34)$$

### • Deuxième méthode

Dans cette deuxième méthode, nous avons évalué la totalité des émissions de CO<sub>2</sub>, qui se compose des deux types cités précédemment, en utilisant le tableau suivant extrait de (OEET, 2012) (Observatoire Energie Environnement des Transports).

Le Tableau 28 donne les émissions de CO<sub>2</sub> de fabrication de chaque véhicule en fonction de son PTAC, son poids vide, sa capacité et sa durée de vie, etc.

Désignation	PTAC	Capacité de chargement	Durée de vie	Poids à vide	Fabrication en CO <sub>2</sub> e	Fabrication gCO <sub>2</sub> e/km
PTAC 3,5 tonnes	3.5 t	1.3 t	300 000 km	2.2 t	12.1 tCO <sub>2</sub> e	40.3 gCO <sub>2</sub> e/km
Porteur PTAC 19 tonnes	19.0 t	10 t	550 000 km	9 t	49.5 tCO <sub>2</sub> e	90.0 gCO <sub>2</sub> e/km
Ensemble articulé 40 tonnes frigorifique	40 t	22 t	750 000 km	18 t	99 tCO <sub>2</sub> e	132 gCO <sub>2</sub> e/km
Porteur PTAC 19 tonnes frigorifique	19 t	8.5 t	550 000 km	10.5 t	57.8 tCO <sub>2</sub> e	105 gCO <sub>2</sub> e/km
Porteur 7,5 t	7.5 t	3 t	380 000 km	4.5 t	24.8 tCO <sub>2</sub> e	65.1 gCO <sub>2</sub> e/km
Porteur 12 t	12 t	6 t	480 000 km	6 t	33 tCO <sub>2</sub> e	68.8 gCO <sub>2</sub> e/km
Ensemble articulé 26 tonnes	26 t	12 t	750 000 km	14 t	77 tCO <sub>2</sub> e	102.7 gCO <sub>2</sub> e/km
Ensemble articulé 35 tonnes	35 t	15 t	750 000 km	20 t	110 tCO <sub>2</sub> e	146.7 gCO <sub>2</sub> e/km
Ensemble articulé 40 tonnes	40 t	25 t	750 000 km	15 t	82.5 tCO <sub>2</sub> e	110 gCO <sub>2</sub> e/km
Fourgon 8 m <sup>3</sup>	3.5 t	8 t	250 000 km	2.2 t	12.1 tCO <sub>2</sub> e	48.4 gCO <sub>2</sub> e/km
Porteur 45 m <sup>3</sup>	19 t	45 t	550 000 km	10.5 t	57.8 tCO <sub>2</sub> e	105 gCO <sub>2</sub> e/km
Ensemble articulé 90 m <sup>3</sup>	40 t	90 t	750 000 km	15 t	82.5 tCO <sub>2</sub> e	110 gCO <sub>2</sub> e/km

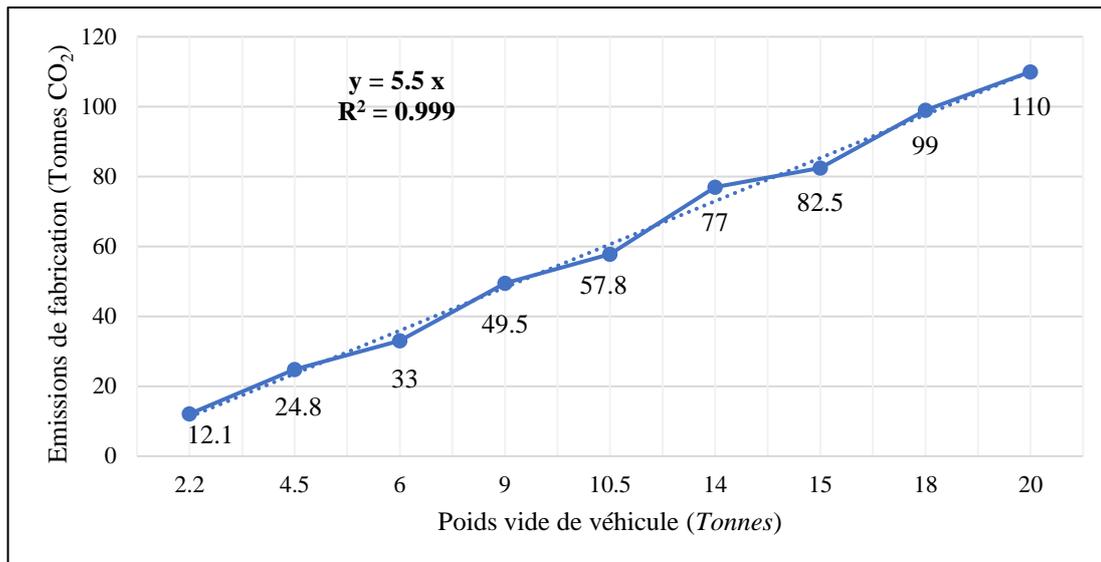
**Tableau 28.** Facteurs d'émission de la fabrication des véhicules en fonction de leur classe de PTAC (OEET, 2012)

Concernant les véhicules particuliers qui ne possèdent pas de poids à vide dans le Tableau 28, il est possible de tracer la courbe des émissions de fabrication en fonction du poids à vide. La courbe de tendance obtenue dans notre cas est une courbe linéaire avec un coefficient de détermination élevé égal à  $R^2 = 0.999$  (cf. Figure 36).

Ce résultat est conforme au résultat donné par (ADEME, 2010) en négligeant la valeur de l'ordonnée à l'origine qui est insignifiante devant le coefficient du poids à vide. En conclusion, la quantité d'émissions de CO<sub>2</sub> générées par la fabrication d'un véhicule de poids vide  $W_o$  construit en Europe est égale à :

$$Ev = 5.55 \cdot W_o \quad (35)$$

Dans le calcul des émissions de CO<sub>2</sub> dues à l'amortissement des véhicules, il est indispensable d'inclure l'amortissement de chaque véhicule utilisé dans la chaîne logistique en divisant les émissions de fabrication par la durée de vie du véhicule en kilomètres.



**Figure 36.** Emissions de fabrication du véhicule en fonction de son poids à vide

Pour la détermination de la durée de vie, nous nous sommes basés sur le rapport (ADEME, 2010). D'après les analyses des résultats, ce rapport a confirmé que pour chaque catégorie de PTAC, les émissions de fabrication sont fonction du poids vide et elles sont assez bien corrélées au PTAC. La consommation moyenne du véhicule est aussi très bien corrélée à son PTAC. En d'autres termes, selon (ADEME, 2010), en se basant au calcul des PTAC moyens, l'écart entre cette moyenne et les valeurs applicables aux véhicules les plus répandus de la catégorie ne sera jamais supérieur à 20%.

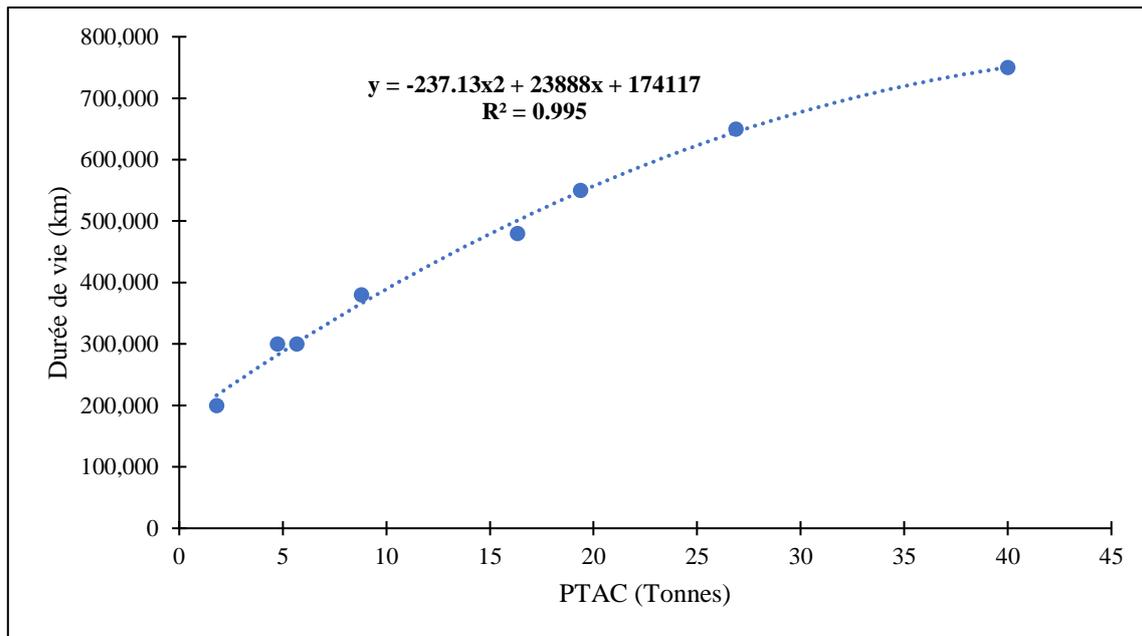
$$\text{Poids vide} = \text{PTAC} - \text{Charge utile} \quad (36)$$

Le Tableau 29 résume les durées de vie des véhicules (*km*) en fonction du PTAC, il est extrait de (ADEME, 2010).

Classe de PTAC	Moyenne du PTAC de la catégorie (tonnes)	Poids moyen à vide (tonnes)	Moyenne de la charge utile maximale (tonnes)	Durée de vie en km
< 1.5 tonnes	1.30	0.90	0.40	150 000
1.5 à 2.5 tonnes	1.80	1.10	0.70	200 000
2.51 à 3.5 tonnes	2.90	1.70	1.20	250 000
3.5 tonnes	3.50	2.10	1.40	300 000
3.51 à 5 tonnes	4.74	2.37	2.37	300 000
5.1 à 6 tonnes	5.67	2.84	2.84	300 000
6.1 à 10.9 tonnes	8.80	4.11	4.69	380 000
11 à 19 tonnes	16.32	6.53	9.79	480 000
19.1 à 21 tonnes	19.37	7.75	11.62	550 000
21.1 à 32.6 tonnes	26.87	10.21	16.66	650 000
Tracteurs routiers	40.00	15.00	25.00	750 000

**Tableau 29.** Durée de vie moyenne des véhicules en km en fonction de la classe de PTAC (ADEME, 2010)

Dans le cas où les statistiques ne sont pas disponibles pour le type de véhicule utilisé, nous pouvons faire une interpolation polynomiale pour déterminer l'équation qui relie la durée de vie des véhicules en fonction de son PTAC (cf. Figure 37).



**Figure 37.** Durée de vie (km) en fonction des PTAC

L'équation obtenue par la régression polynomiale est très proche de la formule donnée par (ADEME, 2010) avec une moyenne du taux d'erreur absolue égale à 0.15%.

$$\text{Durée de vie (km)} = -242.02 \cdot W^2 + 24135 \cdot W + 171683 \quad (37)$$

Par la suite, nous utilisons cette dernière formule pour déterminer la durée de vie d'un véhicule qui n'est pas catégorisée dans le Tableau 29.

Ainsi, la quantité d'émissions dues à l'amortissement des véhicules est décrite par l'Équation (38). Elle est égale à la division des émissions de CO<sub>2</sub> dues à la fabrication du véhicule par sa durée de vie.

$$EM = \frac{5.55 \cdot W_0}{-242.02 \cdot W^2 + 24135 \cdot W + 171683} \quad (38)$$

Le Tableau 30 montre la performance de cette formulation en la comparant avec les données statistiques. Le pourcentage d'erreur absolue allant de 0% à 19%.

PTAC (tonnes)	Durée de vie (calculée en km)	Poids à vide (tonnes)	$Ef = 5.55 W_0$ (g CO <sub>2</sub> )	$EM = Ef / \text{Durée de vie}$ (g CO <sub>2</sub> /km)	Statistique (g CO <sub>2</sub> /km)	$\epsilon\%$
3.5	253190.76	2.2	12.21	48.22	40.3	19.66%
19	542878.78	9	49.95	92.01	90	2.23%
40	749851.00	18	99.9	133.23	132	0.93%
19	542878.78	10.5	58.275	107.34	105	2.23%
7.5	339081.88	4.5	24.975	73.65	65.1	13.14%
12	426452.12	6	33.3	78.09	68.8	13.50%
26	635587.48	14	77.7	122.25	102.7	19.04%
35	719933.50	20	111	154.18	146.7	5.10%
40	749851.00	15	83.25	111.02	110	0.93%
3.5	253190.76	2.2	12.21	48.22	48.4	0.36%
19	542878.78	10.5	58.275	107.34	105	2.23%
40	749851.00	15	83.25	111.02	110	0.93%

**Tableau 30.** Comparaison entre les émissions de fabrication calculées et celles issues des statistiques

La résultante de la somme des deux types d'émissions donne les émissions totales dues au véhicule (sa fabrication et son fonctionnement) :

- Dans le cas où la distance du trajet “aller” est différente de celle du trajet “retour” ( $d \neq d'$ ), la formule est la suivante :

$$E(d, Q, x) = d \cdot \left( \left( \frac{E_q - E_o}{Q} \right) x + E_o \cdot \left[ \frac{x}{Q} \right] \right) + d' \cdot E_o \cdot \left[ \frac{x}{Q} \right] + (d + d') \cdot EM \cdot \left[ \frac{x}{Q} \right] \quad (39)$$

- Dans le cas où la distance du trajet “aller” est égale à celle du trajet “retour” ( $d=d'$ ), la formule est la suivante :

$$E(d, Q, x) = d \cdot \left( \left( \frac{E_q - E_o}{Q} \right) \cdot x + 2 \cdot (E_o + EM) \cdot \left[ \frac{x}{Q} \right] \right) \quad (40)$$

Dans notre étude, nous supposons que la distance du trajet “aller” est égale à celle du trajet “retour”. Les émissions dues aux véhicules à partir d'une origine  $i$  qui livre plusieurs types de produits vers une destination  $j$  sera égale à :

$$E_{ijt} = d_{ij} \cdot \left( \left( \frac{E_q - E_o}{Q} \right) \cdot \sum_p q_{ijt}^p + 2 \cdot (E_o + EM) \cdot N_{ijt} \right) \quad (41)$$

### 3.2.2. Les émissions dues aux bâtiments logistiques

La conception des réseaux de distribution mutualisés nécessite l'installation des entrepôts pour massifier le flux. Cependant, ces bâtiments sont des consommateurs importants d'énergie, donc des émetteurs non négligeables des émissions de GES. Selon le rapport (ADEME, 2007), les bâtiments industriels émettant jusqu'à 20% des émissions totales.

Dans le but d'évaluer d'une manière exhaustive l'impact de la collaboration horizontale sur l'aspect environnemental, il est indispensable d'estimer aussi les émissions de CO<sub>2</sub> générées par les entrepôts en plus de celles des véhicules.

De même pour les véhicules, les émissions dues aux bâtiments logistiques sont classées en deux catégories :

- Des émissions de GES dues à leur construction,
- Des émissions de GES dues à leur fonctionnement.

Les paramètres nécessaires pour modéliser les émissions de CO<sub>2</sub> dues aux bâtiments logistiques sont représentés par le Tableau 31.

Paramètre	Désignation	Unité
$EC_m$	Emissions de CO <sub>2</sub> dues à la construction de l'entrepôt $m$	$g CO_2$
$Ec_m$	Emissions unitaires de CO <sub>2</sub> dues à la construction d'un $m^2$ de surface	$g CO_2/m^2$
$A_m$	Surface de l'entrepôt	$m^2$
$EO_{mt}$	Emissions de CO <sub>2</sub> dues aux opérations de stockage dans l'entrepôt $m$ à la période $t$	$g CO_2$
$Eo_{mt}$	Emissions unitaires de CO <sub>2</sub> dues aux opérations de stockage dans l'entrepôt $m$ à la période $t$	$g CO_2/kwh$
$W_{mt}$	Energies consommées dans l'entrepôt $m$ à la période $t$	$kwh$

**Tableau 31.** Paramètres utilisés pour modéliser les émissions de CO<sub>2</sub> dues aux entrepôts

### 3.2.2.1. Les émissions de CO<sub>2</sub> dues à la construction des entrepôts

Il existe trois approches qui sont proposées par ADEME pour évaluer les émissions liées à la construction des bâtiments :

- Approche 1 : basée sur la surface de construction à l'aide des ratios moyens,
- Approche 2 : globale qui utilise la consommation énergétique,
- Approche 3 : plus détaillée par quantité de matériaux mis en œuvre.

Nous avons utilisé la dernière approche pour estimer les émissions de CO<sub>2</sub> car elle est plus détaillée ce qui diminue le pourcentage d'erreur.

Selon le rapport (ADEME, 2010), les bâtiments destinés au stockage (entrepôts) se caractérisent par une structure en acier et une façade en acier de bardage. Pour estimer les émissions dues à la construction, le calcul a été réalisé par l'ADEME en se basant sur cinq projets qui possèdent des émissions de CO<sub>2</sub> comprises entre 150 kg/m<sup>2</sup> et 265 kg/m<sup>2</sup> pour des SHON (Surfaces Hors Œuvre Nette) comprises entre 970 m<sup>2</sup> et 8650 m<sup>2</sup>.

L'ensemble des émissions sont réparties comme suit :

- 15 à 25% des émissions des CO<sub>2</sub> sont dues à la consommation du béton,
- 20 à 50% des Kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> émissions des CO<sub>2</sub> sont dues à l'acier de structure,
- 20 à 30% des émissions des CO<sub>2</sub> sont dues à l'acier de bardage et de couverture.

Par la suite, nous prendrons les extrémités des intervalles donnés par l'ADEME car ces valeurs sont un peu sous-estimées selon le retour d'expérience.

Nous estimons que 25% des émissions de GES sont issues du béton, 45% sont dues à l'acier de structure et finalement 30% des émissions sont dues à l'acier de bardage et de couverture.

Nous avons déterminé les émissions de construction en s'appuyant sur l'émission de chaque élément, puis, nous avons calculé la moyenne des trois résultats obtenus. La procédure de calcul est résumée dans le Tableau 32.

Élément	Pourcentage ( <i>Pi</i> )	Emission de l'élément ( <i>Ei</i> )	Emission de construction ( <i>Ec = Ei / Pi</i> )
Acier de structure	45%	90 Kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	200 Kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>
Acier de bardage	30%	60 Kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	200 Kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>
Béton	25%	50 Kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	200 Kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>
Moyenne			200 Kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>

**Tableau 32.** Emissions dues à la construction des entrepôts

Finalement, les émissions de CO<sub>2</sub> générées par la construction d'un entrepôt sont égales aux émissions unitaires (200 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>) multipliées par la surface de construction.

$$EC_m = Ec_m \cdot A_m \quad (42)$$

$$Ec_m = 200 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2 \quad (43)$$

### 3.2.2.2. Les émissions dues au fonctionnement des entrepôts

Quelque que soit l'activité de l'entrepôt, ce type d'émissions est dû aux deux processus, à savoir opérationnel et support. Il s'agit notamment des émissions dues au chauffage, au refroidissement, à la ventilation et aux auxiliaires, à la production d'eau chaude sanitaire, à l'éclairage des locaux ainsi qu'à l'entretien et la maintenance.

Nous avons utilisé l'approche qui consiste à convertir le nombre de *kwh* consommés dans l'entrepôt en équivalent d'émissions de CO<sub>2</sub>.

Que ce soit dans une centrale à charbon ou nucléaire, avec une éolienne ou un barrage, l'électricité est toujours produite à partir d'une énergie dite « primaire » comme le pétrole, le gaz, l'uranium et le solaire, etc. Dans notre travail, nous avons pris en compte les émissions de CO<sub>2</sub> dues à la production de l'énergie nécessaire utilisée ainsi que les pertes en ligne dites pertes à effet de Joule.

Selon le rapport (ADEME, 2010), la production d'un *kwh* d'électricité en France génère 23 g C, soit 85 g CO<sub>2</sub>. Ce facteur d'émission ne tient pas compte des pertes en ligne (pertes à effet de Joule) qui sont dues au transport et à la distribution de l'électricité depuis la centrale électrique jusqu'au consommateur. Ces pertes représentent en moyenne 8% de l'électricité finale consommée. Elles se répartissent comme suit :

- Environ 3% de l'électricité est perdue pendant l'acheminement sur le réseau de transport (Très Haute Tension ou *THT*),
- Environ 5% de l'électricité est perdue lors de la descente en tension (du *THT* à la Basse Tension *BT*).

En d'autres termes, s'il s'agit des consommateurs en *BT*, on ajoute 8% aux émissions calculées à partir de la consommation finale et s'il s'agit des consommateurs en *HT* (industrie), on ajoute seulement 3%. Les entrepôts utilisent les *HT*, donc, nous pouvons conclure que les émissions dues à l'électricité, dans un entrepôt *m* à la période *t*, sont égales à la multiplication du facteur unitaire d'émissions par l'énergie consommée :

$$EO_{mt} = Eo_{mt} \cdot W_{mt} \quad (44)$$

$$Eo_{mt} = 87.5 \text{ kg CO}_2/\text{kwh} \quad (45)$$

### 3.3. Formulation des indicateurs sociaux/sociétaux

Le développement durable est tout développement qui sert à économiser la nature sans nuire à la cohésion sociale ou, en d'autres termes, un développement qui respecte l'homme sans sacrifier son environnement. Il est indispensable d'évaluer l'impact de la conception des réseaux de distribution mutualisés sur les habitants. Par conséquent, dans ce paragraphe, nous modélisons les indicateurs qui s'intéressent à l'aspect sociétal en évaluant le niveau de bruit et le niveau de sécurité des personnes sur les routes par le calcul du risque accident engendré par le transport de marchandises. Nous évaluons également le taux d'embauche.

#### 3.3.1. Formulation du niveau de bruit (les émissions sonores)

L'évaluation du bruit est un élément important pour l'étude du confort des villes. Pour cette raison, nous nous sommes concentrés sur l'évaluation des niveaux sonores émis par le

transport routier de marchandises. Ce type d'indicateurs n'est pas évalué dans les travaux de la mutualisation. Ceci nous a amené à nous baser sur le guide du bruit des transports terrestres qui a été conçu par le Centre d'Etudes des Transports Urbains (CETU, 1987) pour estimer le niveau sonore, en mesurant son effet sur les populations en matière de nuisances et d'inconfort. Les études du bruit permettent de fournir des éléments quantifiés de nature à préciser les choix inhérents à la conception des réseaux logistiques.

Les différentes approches qui permettent d'évaluer les niveaux sonores sont au nombre de trois :

- La mesure par des appareils installés,
- Les simulations sur maquettes,
- Les calculs manuels ou automatisés.

Afin de mener une étude sur le niveau de bruit, il convient d'abord de caractériser les paramètres de circulation influant sur l'émission sonore ainsi que les éléments du site qui déterminent la propagation des sons.

Selon le guide du bruit des transports terrestres (CETU, 1987), les conditions de propagation sont fortement influencées par la nature du bâtiment qui existe au bord d'une voie. En ce qui concerne l'acoustique des transports, on peut établir une distinction entre un tissu fermé, à grande densité de construction, généralement peu « perméable » au bruit, et un tissu ouvert dégagant de vastes espaces entre les constructions qui seront plus facilement pénétrées par le bruit. Sur cette base, il est possible de faire la différence entre les :

- Rues en « U » en tissu fermé,
- Rues en tissu « ouvert ».

Les paramètres utilisés pour modéliser le niveau de bruit sont représentés par le Tableau 33.

Paramètre	Désignation	Unité
$NL$	Le niveau de bruit	$dB$
$Q^{VL}$	Le débit des véhicules légers	Véhicules
$Q^{PL}$	Le débit des véhicules à poids lourds	Véhicules
$E$	Le facteur d'équivalence acoustique entre véhicule légers et véhicules lourds	
$K_h$	La correction de la hauteur	
$K_v$	La correction de vitesse	
$K_r$	La correction de rampe	
$K_c$	La correction de carrefour	
$l$	La largeur entre les façades d'immeubles en mètres	$m$
$h$	La hauteur de point récepteur par rapport au plan de roulement	$m$
$d$	La distance au bord de la plateforme	$m$
$lc$	Le largeur de la chaussée	$m$
$\theta$	L'angle sous lequel on voit la route	degrés

**Tableau 33.** Paramètres utilisés pour la formulation du niveau de bruit

### 3.3.1.1. Niveau de bruit dans les rues en « U »

La rue en « U » correspond à une rue bordée de constructions quasi continues de part et d'autre des voies de circulation. Dans ce type de rues, le rapport de la hauteur divisé par la largeur entre façades est généralement élevé (supérieur à 0.2) de la hauteur des bâtiments étant à peu près homogène. Dans le cas de hauteur dissymétrique, c'est le rapport de la hauteur du plus petit côté par rapport à la largeur entre façades qui doit être supérieur ou égal à 0.2 pour

que la rue soit dite en « U ». Par exemple, dans la Figure 38, la rue est en « U » si et seulement si  $\frac{H2}{l} \geq 0.2$

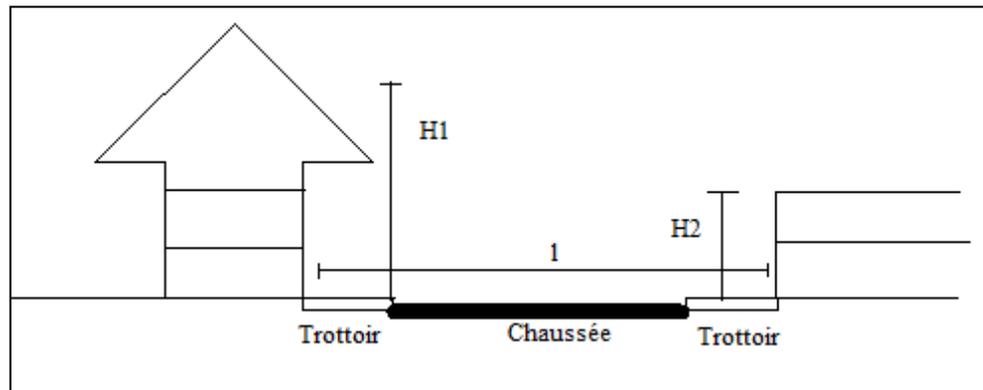


Figure 38. Rue en "U"

Dans ce type de rue, il y a deux méthodes pour déterminer les émissions sonores, soit par la formule ou bien par la lecture des abaques (lecture directe). Nous avons choisi d'utiliser la formule générale donnée par le guide du bruit des transports terrestres pour déterminer les niveaux du bruit pour ce type de rue (cf. Équation (46)) :

$$NL = 55 + 10 \cdot \log(Q^{VL} + E \cdot Q^{PL}) - 10 \cdot \log(l) + K_h + K_v + K_r + K_c \quad (46)$$

#### a. Les débits des véhicules

La fiabilité du résultat recherché est liée au débit des véhicules et leurs types. Cette formule de calcul s'intéresse aux deux catégories de véhicules légers et lourds :

- Véhicules légers : véhicules dont le poids total en charge est inférieur ou égale à 3.5 t,
- Véhicules poids lourds : véhicules dont le poids total en charge est supérieur à 3.5 t.

Le débit dans la formule sera exprimé en nombre de véhicules par périodes selon un comptage simple des véhicules nécessaires pour la livraison des marchandises. Il représente la partie entière supérieure du rapport entre la quantité transportée et la capacité du véhicule (cf. Équation (47)).

$$\text{Débit} = \left\lceil \frac{\text{Quantité livrée}}{\text{capacité de véhicule}} \right\rceil \quad (47)$$

Le nombre de déplacements ou de véhicules nécessaires pour transporter la quantité  $\sum_{p \in P} q_{ijt}^p$  entre un point  $i$  et point  $j$  par un véhicule de capacité  $Q$  est donnée par l'Équation (48).

$$\text{Débit} = N_{ijt} = \left\lceil \frac{\sum_{p \in P} q_{ijt}^p}{Q} \right\rceil \quad (48)$$

Le débit sera égal à  $Q^{VL}$  si le PTAC du véhicule utilisé est inférieur à 3.5 tonnes sinon il est égal à  $Q^{PL}$  pour les PTAC supérieurs à 3.5 tonnes.

#### b. L'équivalence acoustique

Les débits des véhicules en poids lourds sont pris en compte dans la même formule que les débits de véhicules légers. Selon le guide du CETU, l'équivalence acoustique  $E$  dans le cas

d'une rampe inférieure à 2% est fixée à 10 pour les rues en « U » puisqu'en moyenne les mesures de puissance acoustique émise par les différentes catégories de véhicules montrent que :

$$1 PL = 10 VL \quad (49)$$

### c. Les facteurs de correction

L'utilisation des facteurs de correction du niveau de bruit dans les rues en « U » ( $K_h$ ,  $K_v$ ,  $K_r$  et  $K_c$ ) permet d'adapter la formule à une situation précise.

#### ✓ Facteurs de correction de hauteur et de carrefour ( $k_h$ et $k_c$ )

Sans correction de hauteur, la formule permet de calculer le niveau sonore à tout point récepteur (personnes et bâtiments, etc.) situé à moins de 4 mètres au-dessus du sol. Cependant, pour un autre point récepteur situé au-dessus de ce niveau, les niveaux sonores seront atténués d'un coefficient  $K_h$  calculé par les deux formules suivantes.

$$K_h = -2 \cdot \frac{h - 4}{l} \text{ si } h > 4 \text{ m} \quad (50)$$

$$K_h = 0 \text{ si } h \leq 4 \text{ m} \quad (51)$$

Nous supposons que ce facteur est nul, ce qui revient à supposer que la personne soit située à une hauteur inférieure à 4 m au-dessus du sol. Concernant le facteur de correction du carrefour  $K_c$ , il consiste à calculer, pour un point récepteur  $R$  situé à proximité d'un carrefour (distance inférieure à 200 m), la valeur du bruit émis par la voie transversale qui doit être cumulée avec celui de l'artère principale pour connaître le niveau résultant en  $R$ . Pour garder une formule générale, nous supposons également que  $K_c$  est nul.

#### ✓ Facteurs de correction de vitesse ( $k_v$ )

D'après le guide du bruit relatif au transport terrestre, si la vitesse moyenne est en réalité inférieure à 60 Km/h, le niveau sonore dû au transport routier, entre 8h à 20 h reste à peu près constant. Dans le cas où la vitesse moyenne est supérieure à 60 km/h, une correction sera appliquée en ajoutant 1 dB(A) pour chaque 10 km/h.

#### ✓ Facteurs de correction de la rampe ( $k_r$ )

Le coefficient de la rampe  $k_r$  est nul lorsque la voie de circulation comporte une rampe inférieure à 2% dite voie en pallier. Dans le cas contraire, c'est-à-dire si la rampe dépasse cette valeur, il suffit de changer le coefficient d'équivalence qui est donné dans le Tableau 34 pour les différents pourcentages de rampe.

E	10 (1 PL = 10 VL)	13	16	18	20
% de rampe	< 2%	3%	4%	5%	> 6%

**Tableau 34.** Valeurs de coefficient d'équivalence en fonction des différents pourcentages de rampe

Il est difficile de connaître la rampe de la route à chaque fois, ainsi, nous supposons qu'elle est inférieure à 2%.

Du point de vue de la sécurité routière, un des critères importants d'une voie est sa largeur. À notre connaissance, il n'existe pas de normes opposables en France qui précisent les

caractéristiques techniques d'une route comme la largeur d'une voie. En revanche, il existe des guides techniques depuis très longtemps pour les routes et la responsabilité de l'État : Autoroutes et routes nationales.

La largeur d'une voie de circulation standard sur autoroute et sur route nationale est de 3.5 m. Aussi, en ville, la pratique a été pendant longtemps d'avoir des largeurs de voie également de 3.5 m voire plus dans des belles avenues. Nous supposons que la largeur entre deux façades séparées par une route de deux voies est égale à 10 m, comme si nous choisissons une route de deux voies (une voie par sens), chaque voie admet une largeur égale à 3.5 m. Concernant celle de la largeur séparant une façade et la frontière de la route, elle est égale à 1.5 m.

$$l = 10 \text{ m} \quad (52)$$

Dans ce cas, pour vérifier l'hypothèse d'une rue en « U », il faut que la hauteur  $h$  soit supérieure ou égale à 2 m (cf. Figure 39).

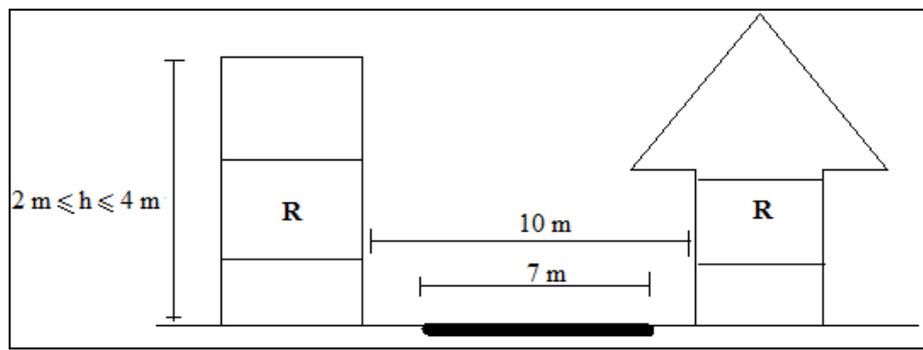


Figure 39. Exemple d'une rue en "U"

Pour conclure, ci-dessous la formule utilisée pour déterminer le bruit dû au transport de marchandises entre deux points  $i$  et  $j$  à une période  $t$  dans les rues en « U » qui se trouvent généralement dans les zones urbaines.

$$NL_{ijt} = 45 + 10 \cdot \log(Q_{ijt}^{VL} + 10 \cdot Q_{ijt}^{PL}) \quad (53)$$

### 3.3.1.2. Niveau de bruit dans les rues en tissu ouvert

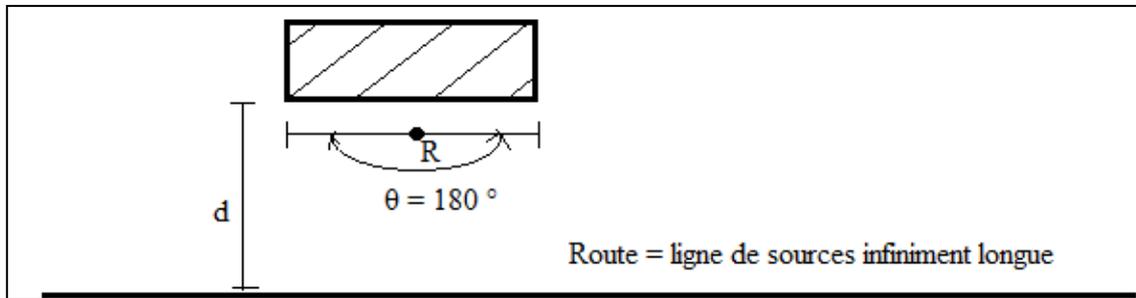
Selon le guide CETU, un tissu sera dit « ouvert », au sens de l'acoustique s'il vérifie les trois conditions suivantes :

- S'il est constitué de bâtiments éloignés les uns des autres, qui dégagent des espaces très perméables au bruit,
- S'il est constitué de bâtiments tous situés du même côté de la source sonore,
- S'il est de faible hauteur, et si l'espace dégagé autour de la source est important (rapport hauteur sur largeur inférieur à celui de la rue en « U »).

Les éléments caractéristiques de la circulation routière à prendre en compte dans les études de bruit seront essentiellement les débits, les vitesses et la composition du flot en différentes catégories de véhicules. Le niveau de bruit dans ce type de rue est donné par l'Équation (54).

$$NL = 20 + 10 \cdot \log(Q^{VL} + E \cdot Q^{PL}) + 20 \cdot \log(V) - 12 \cdot \log\left(d + \frac{lc}{3}\right) + 10 \log\left(\frac{\theta}{180^\circ}\right) \quad (54)$$

Dans le but de garder la généralité de la formule, nous supposons, dans cette étude, que l'angle  $\theta$  est égale à  $180^\circ$ , c'est-à-dire la ligne de source est infiniment longue (cf. Figure 40).



**Figure 40.** Récepteur qui perçoit le niveau sonore à un angle de  $180^\circ$

La formule de calcul des débits est la même pour le premier cas des rues en « U ». Cependant, l'équivalence acoustique change en fonction du degré de la rampe et du type de voie. Les valeurs sont résumées dans la Tableau 35.

	$r \leq 2\%$	$r = 3\%$	$r = 4\%$	$r = 5\%$	$r \geq 6\%$
Autoroute	4	5	5	6	6
Voie rapide urbaine	7	9	10	11	12
Voie urbaine (boulevard, etc.)	10	13	16	18	20

**Tableau 35.** Valeurs de l'équivalence acoustique ( $E$ ) en fonction du type de voie et du degré de rampe

Comme énoncé dans le paragraphe précédent, nous supposons que  $r$  est inférieur ou égale à 2%, donc nous nous intéressons aux valeurs de  $E$  qui se situent dans la première colonne du tableau ( $E = 4$ ,  $E = 7$  ou bien  $E = 10$ ).

La route choisie dans notre étude est une autoroute qui est une voie de communication routière à chaussées séparées, réservée à la circulation rapide des véhicules motorisés (automobiles, motos et poids lourds) donc  $E=4$ .

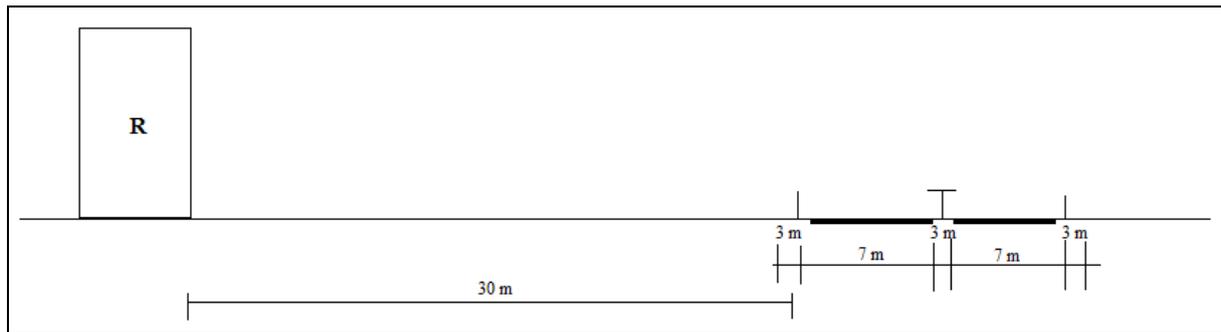
Nous supposons que la route est constituée de 4 voies rapides (2 par sens) et que chaque voie admet une largeur égale à 3.5 m.

$$lc = 23 \text{ m} \quad (55)$$

Concernant la distance au bord de la plateforme, elle est définie par la distance séparant le bord de la plateforme routière et le récepteur (les personnes et les bâtiments, etc.). Elle est exprimée en mètres. Nous supposons dans notre étude que le point récepteur est situé à 30 m de la route.

$$d = 30 \text{ m} \quad (56)$$

La Figure 41 représente le tissu ouvert choisi dans notre étude.



**Figure 41.** Exemple des voies en tissu ouvert

En plus de ces hypothèses, la vitesse est fixée à  $80 \text{ km/h}$ , donc le niveau de bruit dans une rue en tissu ouvert sera égal à :

$$NL = 39.15 + 10 \cdot \log(4 \cdot Q^{PL}) \quad (57)$$

La zone étudiée dans notre étude n'est pas une zone urbaine vu que la vitesse de circulation moyenne choisie est égale à  $80 \text{ km/h}$ . Par conséquent, dans notre étude, nous évaluons le niveau de bruit en utilisant l'Équation (57) destinée aux rues à tissu « ouvert ».

### 3.3.2. Estimation du risque accident

D'après l'organisation mondiale de la santé, les accidents de la route entraînent plus de 1.25 millions de décès par an. Ils sont les principales causes de décès chez les jeunes âgés de 15 à 29 ans. De plus, près de la moitié des personnes tuées sur les routes sont des usagers vulnérables (piétons, cyclistes et motocyclistes). Ces accidents influencent négativement l'économie des pays, puisqu'ils coûtent, à la plupart des pays, 3% de leur produit intérieur brut. Pour cette raison, le programme de développement durable à l'horizon 2030 des Nations Unies a fixé un objectif ambitieux pour la sécurité routière, à savoir diminuer de moitié le nombre total des morts et des blessés dus aux accidents de la route en 2020. Les véhicules à poids lourds (PL) sont moins accidentogènes que les autres véhicules mais les conséquences d'un accident sont plus graves puisque la mortalité se multiplie par trois quand un véhicule à poids lourds est impliqué dans un accident (ONISR, 2010). En effet, 413 personnes sont tuées dans les accidents impliquant au moins un véhicule de la catégorie PL en France (ONISR, 2016). D'autre part, dans un accident mortel impliquant au moins un véhicule lourd, les décès sont plus souvent parmi les non-occupants du véhicule lourd.

Les accidents sont liés à plusieurs facteurs. En effet, la vitesse affecte directement la probabilité d'avoir un accident et la gravité de ses conséquences. Aussi, la conduite, en état d'ébriété ou sous l'influence de substances psychoactives, augmente le risque d'accident causant des morts ou des blessés graves.

De nombreux travaux de recherche ont étudié l'impact spécifique des vitesses pratiquées sur le nombre et la gravité des accidents.

Un des anciens modèles est proposé par (Nilson, 1981). L'auteur, dans cette étude, a réalisé plusieurs tests pour conclure à la fin que les taux d'accidents dépendent fortement des vitesses de circulation et que le niveau de sécurité peut être amélioré lorsqu'il s'agit d'une réduction de la vitesse. Pour cette raison, Nilson (1981) a proposé une formulation qui relie le risque accident à la vitesse de circulation (Cameron & Elvik, 2008). Dans cette formulation, le risque accident est évalué selon différents niveaux de gravité des blessures. En effet,

l'augmentation du nombre des accidents mortels est liée à la quatrième puissance de l'augmentation de la vitesse moyenne, tandis que, l'augmentation du nombre d'accidents graves est liée à la troisième puissance et l'augmentation du nombre d'accidents (impliquant la mort ou des blessures) est liée à la deuxième puissance. Cette formule se fonde sur la théorie des lois cinétiques.

$$\frac{\text{nbre d'accidents après}}{\text{nbre d'accidents avant}} = \left( \frac{\text{vitesse moyenne après}}{\text{vitesse moyenne avant}} \right)^E \quad (58)$$

L'exposant  $E$  est utilisé pour déterminer le niveau de gravité des accidents ( $E=2$  pour les accidents corporels,  $E=3$  pour les accidents graves et  $E=4$  pour les accidents mortels).

Cette formule peut se traduire d'une façon plus simplifiée. En effet, une variation de la vitesse de 1% induit une variation du nombre d'accidents corporels de 2% et une variation du nombre d'accidents mortels de 4%.

Ce modèle a été appliqué dans la littérature pour prédire le risque accident lorsqu'il s'agit d'une variation de vitesse. Nous citons par exemple ; [Haworth et al. \(2000\)](#) qui ont estimé la réduction du nombre d'accidents de la route en Australie quand les vitesses moyennes varient de 60 km/h à 50 km/h. Dans une autre étude, [Corben et al. \(2004\)](#) ont estimé la réduction du nombre de victimes en Australie lorsqu'il s'agit d'une réduction de vitesse de 60 à 50 km/h. Les auteurs ont conclu que le nombre de décès est réduit de 25.2% et les blessures graves de 19.6%.

Après une longue étude faite sur le réseau Finlandais et Suédois, [Salusjarvi \(1981\)](#) a proposé une autre formulation qui relie la variation de vitesse et des accidents.

$$\Delta A = a \cdot \text{signe}(\Delta v) \cdot \sqrt{|\Delta v|} + b \quad (59)$$

Le paramètre  $\Delta A$  désigne la variation du nombre d'accidents graves ou mortels. Elle est exprimée en pourcentage. Le paramètre  $\Delta v$  désigne la variation de vitesse moyenne en km/h, tandis que,  $a$  et  $b$  sont deux paramètres numériques ajustés sur les données.

Par ailleurs, [Palšaitis et Petraška \(2012\)](#) ont évalué le risque accident engendré par le transport de marchandises en fonction de la distance parcourue. Cette formulation a été choisie par [\(Moutaoukil et al., 2013\)](#).

$$Rc = \frac{Ac \cdot 1000}{\text{Distance} \cdot 365} \quad (60)$$

Les deux paramètres  $Rc$  et  $Ac$  désignent respectivement le risque d'accident corporel par rapport à 1000 km et le nombre d'accidents corporels engendrés par les véhicules lourds.

La vitesse dans notre étude ne varie pas, elle est fixée à une vitesse moyenne égale à 80 km/h. Pour cette raison, nous nous sommes intéressés à cette dernière formulation qui relie la distance parcourue et le risque accident corporel.

Selon le bilan de sécurité routière ([ONISR, 2010](#)), un accident corporel est tout accident impliquant au moins un véhicule routier en mouvement, survenant sur une voie ouverte à la circulation publique, et dans lequel au moins une personne est blessée ou tuée. D'après cette définition, nous pouvons constater qu'un accident corporel peut être mortel ou non mortel. Par conséquent, nous évaluerons les trois niveaux d'accident (corporel, corporel non mortel et corporel mortel).

La détermination des deux autres types d'accidents (corporel mortel et non mortel) peut être faite en utilisant la même formule mais avec le nombre d'accidents mortels (cf. Équation (61)) ou non mortels (cf. Équation (62)) ou bien en utilisant le pourcentage de mortalité.

- **Première méthode**

La détermination des deux autres types d'accidents (corporel mortel et non mortel) peut être faite en utilisant la même formule mais avec le nombre d'accidents mortels (cf. Équation (61)) ou non mortels (cf. Équation (62)) ou bien en utilisant le pourcentage de mortalité.

$$Rm = \frac{Am \cdot 1000}{Distance \cdot 365} \quad (61)$$

$$Rn = \frac{An \cdot 1000}{Distance \cdot 365} \quad (62)$$

- **Deuxième méthode**

Le nombre d'accidents corporels  $Ac$  varie en fonction du type de véhicule (léger, lourd, etc.). Le nombre d'accidents mortels est déterminé par la multiplication entre le nombre d'accidents corporels et le pourcentage de mortalité des accidents impliquant un  $PL$  (Poids Lourds). Concernant le nombre d'accidents non mortels, il correspond à la différence entre le nombre d'accidents corporels et le nombre d'accidents corporels mortels.

$$Am = pm \cdot Ac \quad (63)$$

$$An = Ac - Am \quad (64)$$

D'après ces formules, nous pouvons constater que les trois risques d'avoir un accident seront déterminés par les Équations (65-67))

$$Rc = \frac{Ac \cdot 1000}{Distance \cdot 365} \quad (65)$$

$$Rm = pm \cdot Rc \quad (66)$$

$$Rn = Rc - Rm \quad (67)$$

Le nombre d'accidents  $Ac$ ,  $Am$  et  $An$  ainsi que le pourcentage de mortalité  $pm$  sont déterminés à partir des rapports statistiques de sécurité routière. Les véhicules de poids lourds sont moins accidentogènes que les autres véhicules mais les conséquences sont plus graves. En effet, selon le rapport de sécurité routière de 2016, les poids lourds représentent 3.1% des véhicules impliqués dans les accidents corporels, mais ils sont mortels dans 15% des cas, contre 5% pour les accidents sans  $PL$ . Ainsi, les accidents impliquant un  $PL$  comptent 35 tués pour 100  $BH$  (Blessures Hospitalières), contre 12 tués pour 100  $BH$  dans les accidents sans  $PL$ .

Le Tableau 36 résume les données collectées à travers les rapports de sécurité routière de 2013, 2014, 2015 et 2016. Les statistiques de ces quatre années sont à peu près stables donc nous pouvons faire la moyenne pour trouver la valeur de  $Ac$ ,  $Am$  et  $An$ .

Année	Ac	Nombre de tués	Nombres de BH	pm en %	Am	An
2013	2791	465	1458	12.5%	349	2442
2014	2762	480	1487	15.5%	429	2333
2015	2721	473	1444	14.0%	381	2340
2016	2797	493	1421	15.0%	420	2377
<b>Moyenne</b>	<b>2768</b>	<b>478</b>	<b>1453</b>	<b>14.3%</b>	<b>395</b>	<b>2373</b>

**Tableau 36.** Données statistiques des accidents routiers générés par un véhicule PL

### 3.3.3. Taux d'embauche

Dans cette thèse, le taux d'embauche est évalué dans les deux derniers chapitres 6 et 7. Ce choix est justifié par le fait que la conception du réseau de distribution à trois échelons nécessite l'utilisation d'un nombre important de hubs qui nécessite la création des nouveaux emplois.

Selon (Economics, 2020), un taux de chômage élevé peut entraîner une instabilité sociale et un effet multiplicateur négatif. Dans les études abordant la collaboration horizontale, cet indicateur est évalué par (Ouhader & El Kyal, 2017). Ces auteurs ont montré que la mutualisation a un effet négatif sur le nombre d'emplois créés vu qu'elle consiste à partager les moyens et les ressources entre les partenaires y compris les ressources humaines. Cette conclusion a poussé ces auteurs à négliger cet indicateur dans leur étude récente (Ouhader & El Kyal, 2020). Cependant, il est nécessaire d'évaluer les indicateurs qui présentent une limite dans certains cas de collaboration. La prise en considération de ce type d'indicateur permet de déterminer le degré de participation de chaque partenaire au développement durable, notamment au niveau social. D'autre part, contrairement à (Ouhader & El Kyal, 2017), l'évaluation du taux d'embauche s'avère intéressante lorsqu'il s'agit d'une comparaison entre plusieurs scénarios collaboratifs, notamment lorsque les réseaux de distribution sont composés de trois échelons. La prise en considération de cet indicateur peut amener à trouver un bon compromis entre les différentes dimensions de la durabilité par la réduction des coûts logistiques et des émissions de CO<sub>2</sub> et la maximisation du taux d'embauche.

L'Équation (68) représente la formulation du TE (Taux d'Embauche), donnée par (Ouhader & El Kyal, 2017). Selon ces auteurs, le TE est égal au rapport de la quantité de marchandises entrante par la capacité de l'installation  $m$  multiplié par le nombre d'emplois créés par l'ouverture de l'entrepôt.

$$TE = Nb \text{ Emplois créés par l'entrepôt} \cdot \frac{\text{Quantité entrante à l'entrepôt}}{\text{Capacité de l'entrepôt}} \quad (68)$$

Contrairement à (Ouhader & El Kyal, 2017), nous utilisons dans notre étude des taux d'embauche liés à la fois à la quantité de marchandises entrantes dans chaque hub, à la localisation des hubs et leur degré d'automatisation. Par conséquent, nous supposons que les entreprises partent sur une décision commune d'avoir la possibilité d'installer trois types de hubs, selon leur degré d'automatisation. Ces hubs peuvent être faiblement automatisés, semi-automatisés ou entièrement automatisés.

Il est assez évident que l'automatisation permet de réduire le besoin en main-d'œuvre, c'est-à-dire, plus le hub est automatisé plus le nombre d'employés diminue. Un hub robotisé et automatisé fait référence à l'utilisation des systèmes automatisés et des robots pour effectuer les diverses tâches. L'automatisation permet aux entreprises d'augmenter leur productivité, la précision et l'efficacité opérationnelle. Elle peut être utilisée pour faciliter les opérations de manutention (tri, préparation des commandes, etc.). Cependant, l'automatisation et la

robotisation des tâches ont un impact négatif sur la dimension sociale de la durabilité, notamment sur la main d'œuvre humaine. En effet, l'adoption des hubs automatisés peut entraîner une forte réduction d'effectifs voire une disparition totale de certains ouvriers qui font des tâches répétitives. Par conséquent, dans notre étude, nous supposons qu'un hub robotisé doit comporter un nombre minimal d'ouvriers par rapport aux autres types de hubs. Les employés ne sont pas totalement inexistantes mais ils sont réduits au maximum. Leur rôle se limite à suivre les instructions machines pour savoir où trouver et choisir le produit ainsi qu'à la maintenance de ces systèmes automatisés et l'assurance du chargement des camions. Du point de vue investissement, selon le degré d'automatisation, l'investissement peut être assez élevé. D'autre part, l'automatisation complète d'un hub nécessite une conception idéale.

Concernant les hubs semi-automatisés, ils offrent parfois un bon compromis entre le niveau d'investissement et la productivité des entrepôts. Ainsi, cette solution peut être utilisée dans cette période de difficultés économiques. Les entreprises peuvent choisir cette solution au lieu de se lancer dans une automatisation complète dans l'intention de réduire les coûts à long terme et gagner en efficacité. La semi-automatisation des hubs permet de réduire les coûts de préparation des commandes et de distribution sans un gros investissement pour rester compétitives. Au lieu de dépenser pour une automatisation complète, les entreprises peuvent bénéficier d'une automatisation créative et systématique de certaines tâches répétitives dans les hubs. Ainsi, nous supposons que le nombre d'employés nécessaires pour ce type de hubs est un peu supérieur au nombre d'employés nécessaires dans les hubs qui sont entièrement automatisés.

Un hub géré manuellement ou avec un faible niveau d'automatisation est un hub où une grande partie des tâches répétitives sont réalisées principalement par les employés. Par conséquent, ce genre de hubs nécessite un nombre d'employés supérieur à celui créé par un hub semi ou entièrement automatisé. Malgré qu'il nécessite une création importante d'emplois par rapport aux autres types de hubs, les hubs à faible niveau d'automatisation peuvent être avantageux pour les entreprises car ils sont faciles à redimensionner, ce qui permet d'embaucher des employés en cas de pics saisonniers ce qui les rend adaptables de manière flexible. D'autre part, les processus sont souvent moins complexes et plus faciles à comprendre et à gérer. De plus, les employés seront impliqués dans les décisions et les propositions dans le but d'améliorer l'efficacité des hubs. En effet, ils peuvent analyser les situations et utiliser leur créativité et leur esprit critique pour trouver des solutions.

Contrairement aux êtres humains, les robots ne peuvent pas s'adapter aux changements sur le lieu de travail vu qu'ils ne peuvent que suivre une programmation codée. En outre, la robotisation nécessite un investissement monétaire substantiel vu que les coûts initiaux et permanents du déploiement de la robotique peuvent être excessifs. Si les robots permettent aux entreprises de réduire les coûts de main-d'œuvre en éliminant la nécessité de payer des assurances et des avantages sociaux, elles doivent néanmoins payer pour la maintenance et la programmation. Les programmeurs robotiques qualifiés étant rares, une entreprise peut payer très cher pour conserver son personnel robotique. Sur le plan social, la création d'un hub à faible automatisation encourage à recruter plus d'employés. Les entreprises peuvent prétendre à plusieurs aides pour embaucher des salariés jeunes. Ces aides gouvernementales sont mises en place pour inciter les entreprises à recruter des ouvriers et des employés, notamment les jeunes. Avec ces aides le coût du recrutement d'un salarié représente un faible reste à charge voire quasi-nul.

D'autre part, les entreprises devraient trouver un bon compromis entre la création des emplois et les salaires à payer. Ainsi, nous avons introduit le critère géographique dans la

formulation du taux d'embauche. Ceci est dû à la différence des salaires entre les régions (par exemple le cas de la France). Cette différence est due au coût de la vie qui n'est pas le même. En conclusion, les entreprises se sont faces à deux choix :

- ✓ Ouvrir un hub automatisé avec un minimum d'employés dans des zones géographiques où les salaires sont supérieurs aux autres zones.
- ✓ Ouvrir un hub semi-automatisé avec un nombre moyen d'employés dans des zones géographiques où les salaires sont moins élevés que ceux dans les hubs automatisés.
- ✓ Ouvrir un hub à faible automatisation avec un nombre d'employés supérieur à celui des autres types de hubs, dans des zones géographiques où les salaires sont moins élevés. Cette idée est basée sur le fait que la croissance de l'activité compensera la modernisation des postes.

Les capacités des installations dans les deux chapitre 6 et 7 sont des variables de décision, ce qui rend la formulation non-linéaire et, par conséquent, la résolution des modèles mathématiques difficiles. Ainsi, nous adoptons la formule donnée en prenant en compte le nombre d'emplois  $E_m$  nécessaire pour la manutention de 100 palettes existantes dans le hub. Ce nombre dépend de la localisation du hub et donc de son degré d'automatisation. Le taux d'embauche dépend également de la quantité entrante au hub. La formulation sera donc égale à  $E_m$  multiplié par la quantité entrante dans chaque hub (cf. Equation 69).

$$TE_{mt} = E_m \cdot \frac{\text{Quantité entrante à l'entrepôt}}{100} \quad (69)$$

## 4. Conclusion

La mutualisation logistique est une stratégie innovante pour l'amélioration de la performance de la chaîne logistique. Cependant, la plupart des études évaluent son impact uniquement sur l'aspect économique. Par conséquent, nous avons proposé dans ce chapitre des indicateurs de performance qui permettent d'évaluer l'efficacité de la mutualisation logistique selon les trois dimensions de durabilité. Au niveau économique, nous avons modélisé les différents coûts logistiques dus au transport, au stockage, au retard de livraison, à la manutention et à l'ouverture d'entrepôts. Au niveau environnemental, nous avons modélisé les émissions de CO<sub>2</sub> dues aux véhicules (leur utilisation et leur amortissement) et aux entrepôts (leur fonctionnement et leur construction). Au niveau social/sociétal, nous avons modélisé le risque accident (corporel, mortel et non mortel), le niveau de bruit généré par les véhicules de transport et le taux d'embauche.

Dans le chapitre suivant, nous traitons le problème de conception des réseaux de distribution durables en utilisant les indicateurs modélisés dans ce chapitre.

# Partie 2

Cette deuxième partie comporte deux chapitres :

- Chapitre 4 : Conception d'un réseau de distribution collaboratif et durable à deux échelons
- Chapitre 5 : Partage de gains par récompense de flexibilité et de durabilité

# Chapitre 4. Conception d'un réseau de distribution collaboratif et durable à deux échelons

## 1. Introduction

Après l'analyse des travaux existants (cf. Chapitre 2) et la formulation des indicateurs de durabilité, nous présentons dans ce chapitre notre premier modèle mathématique. Il vise à concevoir un réseau de distribution à deux échelons qui comporte des fournisseurs collaborant pour livrer des centres de distribution par l'intermédiaire des entrepôts mutualisés. Ce problème appartient au niveau de décision stratégique qui a pour objectif principal de prendre en considération les trois principaux aspects de durabilité. Dans cette première approche, nous abordons ce problème en considérant les objectifs économiques et environnementaux par la minimisation des coûts logistiques et des émissions de CO<sub>2</sub>. Le niveau social/sociétal est évalué après résolution du modèle par l'estimation du risque accident et du niveau de bruit engendrés par le transport de marchandises.

## 2. Formulation du problème

La plupart des études de la littérature s'intéressent principalement à l'aspect économique. L'optimisation des chaînes logistiques collaboratives se concentre principalement sur les objectifs économiques (Adenso-Díaz et al., 2014 ; Danloup et al., 2013 ; Lozano et al., 2013 ; Pérez-Bernabeu et al., 2015 ; Quintero-Araujo et al., 2017 ; Tang et al., 2017 ; Ouhader et El Kyal, 2020). Ces études s'intéressent plus particulièrement à la réduction des coûts de transport, tandis qu'il est important d'évaluer également les autres types de coûts (ouverture des entrepôts, stockage, et pénalité, etc.). De même que les études qui traitent l'aspect environnemental, se concentrent seulement sur les émissions de CO<sub>2</sub> générées par le transport de marchandises. Cependant, d'autres types d'émissions peuvent être pris en considération comme les émissions dues à l'amortissement des véhicules. En outre, les véhicules ne sont pas la seule source d'émissions, les entrepôts mutualisés représentent également une autre source non négligeable d'émissions de CO<sub>2</sub> engendrées par leur fonctionnement et leur construction. L'aspect social/sociétal n'est pratiquement pas abordé dans les études qui traitent la collaboration horizontale.

Dans ce qui suit, nous présentons le modèle mathématique qui sera utilisé pour la conception des réseaux de distribution collaboratifs à deux échelons.

Les indices suivants seront utilisés pour la modélisation :

- $T_1$  : Ensemble des périodes sans compter le niveau de flexibilité de chaque partenaire,  $t=1..T_1$
- $T_2$  : Ensemble des périodes en comptant le niveau de flexibilité de chaque partenaire ; tel que  $t=1..T_1+max(a^p) \in p \in P$
- $N$  : Ensemble des fournisseurs,  $i=1..N$

- $M$  : Ensemble des entrepôts mutualisés,  $m=1..M$   
 $D$  : Ensemble des centres de distribution,  $j=1..D$   
 $P$  : Ensemble des produits,  $p=1..P$

Le Tableau 37 représente les notations utilisées pour la formulation du problème.

Paramètre	Désignation	Unité
<b>Données</b>		
$Ac$	Nombre d'accidents engendrés par les véhicules de poids lourd par an	accidents
$A_m$	Surface de l'entrepôt $m$	$m^2$
$a^p$	Délai de retard autorisé du produit $p$	périodes
$Cd^p_t$	Coût unitaire de pénalité due au retard de livraison du produit $p$ à la période $t$	€/palette
$C_m$	Capacité de l'entrepôt $m$	palettes
$C_o$	Coût unitaire de transport d'un véhicule vide	€/km
$C_q$	Coût unitaire de transport d'un véhicule en charge	€/km. Palette
$Cs^p_m$	Coût unitaire de stockage du produit $p$ dans l'entrepôt $m$	€/palette
$Cw_m$	Coût unitaire d'ouverture de l'entrepôt $m$	€/m <sup>2</sup>
$d$	Distance au bord de la plateforme	$m$
$d_{ij}$	Distance entre le fournisseur $i$ et le centre de distribution $j$	Km
$d_{im}$	Distance entre le fournisseur $i$ et l'entrepôt $m$	Km
$d_{mj}$	Distance entre l'entrepôt $m$ et le centre de distribution $j$	Km
$E$	Facteur d'équivalence acoustique	%
$Ec_m$	Emissions unitaires de CO <sub>2</sub> dues à la construction de l'entrepôt $m$	g CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>
$E_o$	Emissions unitaires de CO <sub>2</sub> générées par un véhicule vide	g/km
$EO_{mt}$	Emissions unitaires de CO <sub>2</sub> dues aux opérations de stockage dans l'entrepôt $m$ à la période $t$	g CO <sub>2</sub> /kwh
$E_q$	Emissions unitaire de CO <sub>2</sub> dues au véhicule en plein charge	g/km
$lr$	Largeur de la chaussée	$m$
$pm$	Pourcentage de mortalité	%
$Q$	Capacité du véhicule	palettes
$Q^{HW}_{imt}$	Débit du véhicule de poids lourd nécessaire pour livrer la marchandise entre le fournisseur $i$ et l'entrepôt $m$ à la période $t$	véhicules
$Q^{LV}, Q^{HW}$	Débit des véhicules légers et lourds	véhicules
$SD^p_m$	Quantité retardée initialement du produit $p$ par l'entrepôt $m$	palettes
$SI^p_m$	Niveau de stock initial du produit $p$ dans l'entrepôt $m$	palettes
$SP^p$	Niveau de stock de sécurité du produit $p$	palettes
$T$	Durée de vie d'un véhicule	km
$V$	Vitesse de circulation	km/h
$W$	Le PTAC (Poids Total Autorisé en Charge) du véhicule	tonnes
$W_{mt}$	Energie consommée par l'entrepôt $m$ à la période $t$	kwh
$W_o$	Poids vide d'un véhicule	tonnes
$W^p_{jt}$	Quantité demandée du produit $p$ par le centre de distribution $j$ à la période $t$	palettes
$\theta$	Angle sous lequel on voit la route	degrés
<b>Indicateurs</b>		
$CD$	Coût total dû au retard de livraison	€
$CD^p_t$	Coût de pénalité due au retard de livraison du produit $p$ à la période $t$	€
$CS$	Coût total de stockage	€
$CS^p_{mt}$	Coût de stockage du produit $p$ dans l'entrepôt $m$ à la période $t$	€
$CT$	Coût total de transport	€
$CT_{imt}$	Coût de transport entre le fournisseur $i$ et l'entrepôt mutualisé $m$ à la période $t$	€
$CT_{mjt}$	Coût de transport entre l'entrepôt $m$ et le centre de distribution $j$ à la période $t$	€
$CW$	Coût total d'ouverture des entrepôts	€
$CW_m$	Coût d'ouverture de l'entrepôt $m$	€
$D1$	Distance parcourue avant mutualisation	km
$D2$	Distance parcourue après mutualisation	km
$EC_m$	Emissions de CO <sub>2</sub> dues à la construction de l'entrepôt $m$	g CO <sub>2</sub>
$E_{imt}$	Emissions de CO <sub>2</sub> dégagées lors du transport de marchandises à partir du fournisseur $i$ vers l'entrepôt $m$	g CO <sub>2</sub>
$EM$	Emissions de CO <sub>2</sub> dues à l'amortissement du véhicule	g CO <sub>2</sub> /km
$E_{mjt}$	Emissions de CO <sub>2</sub> dégagées lors du transport de marchandises à partir de l'entrepôt $m$ vers le centre de distribution $j$	g CO <sub>2</sub>
$EO_{mt}$	Emissions de CO <sub>2</sub> dues au fonctionnement de l'entrepôt $m$ à la période $t$	g CO <sub>2</sub>
$ET$	Emissions totales de CO <sub>2</sub> dues aux véhicules (transport et amortissement)	g CO <sub>2</sub>
$Ev$	Emissions de CO <sub>2</sub> dues à la fabrication du véhicule sans compter l'amortissement	g CO <sub>2</sub>
$EW$	Emissions totales de CO <sub>2</sub> dues aux entrepôts	g CO <sub>2</sub>
$F$	Taux de remplissage moyen	%

$F1$	Taux de remplissage en amont	%
$F2$	Taux de remplissage en aval	%
$NL_{imt}$	Niveau de bruit engendré par le transport de marchandises du fournisseur $i$ vers l'entrepôt $m$ à la période $t$	$dB$
$NL_{mjt}$	Niveau de bruit engendré par le transport de marchandises de l'entrepôt $m$ vers le centre de distribution $j$ à la période $t$	$dB$
$Rc$	Risque d'accident corporel	%
$Rc1$	Risque d'accident corporel avant mutualisation	%
$Rc2$	Risque d'accident corporel après mutualisation	%
$Rf$	Risque d'accident corporel mortel	%
$Rf1$	Risque d'accident corporel mortel (avant mutualisation)	%
$Rf2$	Risque d'accident corporel mortel (après mutualisation)	%
$Rn$	Risque d'accident corporel non mortel	%
$Rn1$	Risque d'accident corporel non mortel (avant mutualisation)	%
$Rn2$	Risque d'accident corporel non mortel (après mutualisation)	%
<b>Variables de décision</b>		
$P_{mt}$	Niveau d'inventaire du produit $p$ dans l'entrepôt $m$ à la période $t$	<i>palettes</i>
$N_{imt}$	Nombre de véhicules ou de voyages nécessaires pour transporter la marchandise du fournisseur $i$ vers l'entrepôt $m$ à la période $t$	<i>véhicules</i>
$N_{mjt}$	Nombre de véhicules ou de voyages nécessaires pour transporter la marchandise de l'entrepôt $m$ vers le centre de distribution $j$ à la période $t$	<i>véhicules</i>
$q^p_{imt}$	Quantité de produit $p$ livrée du fournisseur $i$ vers l'entrepôt $m$ à la période $t$	<i>palettes</i>
$q^p_{mjt}$	Quantité de produit $p$ livrée de l'entrepôt $m$ vers le centre de distribution $j$ à la période $t$	<i>palettes</i>
$Wd^p_t$	Quantité retardée du produit $p$ à la période $t$	<i>palettes</i>
$x_{im}$	Variable binaire égale à 1 si le fournisseur $i$ est affecté à l'entrepôt $m$	
$z_m$	Variable binaire égale à 1 si l'entrepôt $m$ est ouvert	

Tableau 37. Les paramètres utilisés

La Figure 42 représente le réseau de distribution traité où plusieurs fournisseurs collaborent pour livrer des centres de distribution communs. Le problème étudié est similaire au CSA-pHLP (*Capacitated Single Allocation p-Hub Location Problem*). En effet, le réseau de distribution à concevoir est composé d'un certain nombre de fournisseurs situés à des emplacements fixes, d'un certain nombre d'entrepôts mutualisés qui sont situés dans des emplacements inconnus (à sélectionner à travers le modèle) et d'un certain nombre des centres de distributions à des endroits connus. Chaque fournisseur peut admettre plusieurs produits. Les entrepôts mutualisés sont à sélectionner parmi un ensemble admettant plusieurs emplacements et plusieurs capacités de stockage. Les surfaces des entrepôts sont déterminées en fonction des capacités. Dans le but d'éviter la divergence des flux, nous supposons qu'un fournisseur n'est affecté qu'à un seul entrepôt mutualisé. Cette hypothèse est conforme à l'hypothèse de (Pan, 2010). En effet, la divergence des flux dans le réseau pourra rendre sa gestion plus difficile. D'autre part, cette hypothèse garantit l'amélioration du taux de remplissage sortant de chaque fournisseur. Nous supposons aussi qu'un entrepôt peut être desservi par plusieurs fournisseurs et qu'un centre de distribution peut être desservi par plusieurs entrepôts mutualisés.

Le problème de conception d'un réseau de distribution consiste à :

- Déterminer le nombre, la localisation et les capacités des entrepôts à ouvrir,
- Affecter les fournisseurs et les centres de distribution aux entrepôts mutualisés,
- Déterminer la quantité de marchandises transportées en amont et en aval,
- Déterminer le niveau d'inventaire dans chaque entrepôt ouvert,
- Déterminer le nombre de véhicules ou de déplacements nécessaires pour satisfaire les demandes,
- Déterminer la quantité retardée.

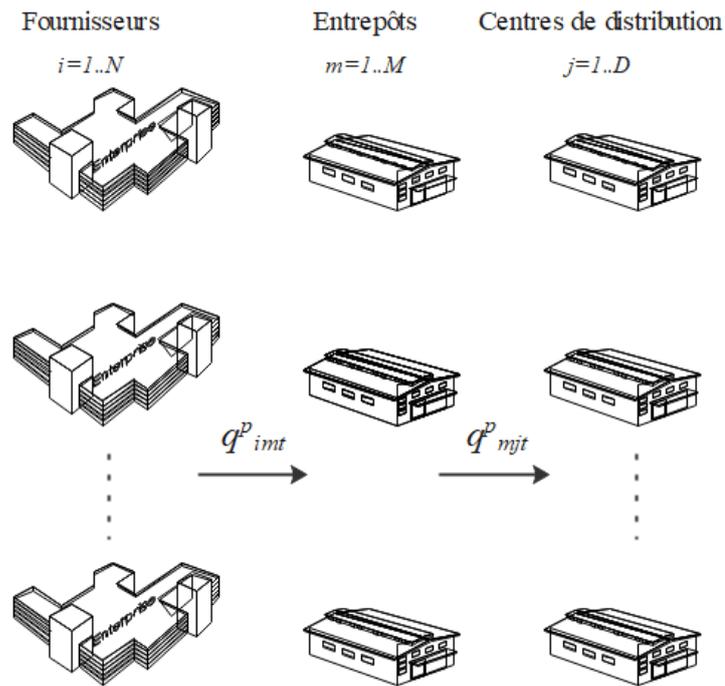


Figure 42. Le réseau de distribution étudié

Dans un premier temps, le modèle proposé sera résolu par les deux fonctions mono-objectif (économique ou environnemental) pour définir les solutions optimales. Ensuite, il sera résolu par la fonction multi-objectif (économique et environnemental) pour trouver un bon compromis entre la minimisation des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub>.

## 2.1. Fonction objectif économique

La fonction objectif économique (cf. Equation 65) vise à minimiser les différents coûts logistiques (cf. Figure 43).

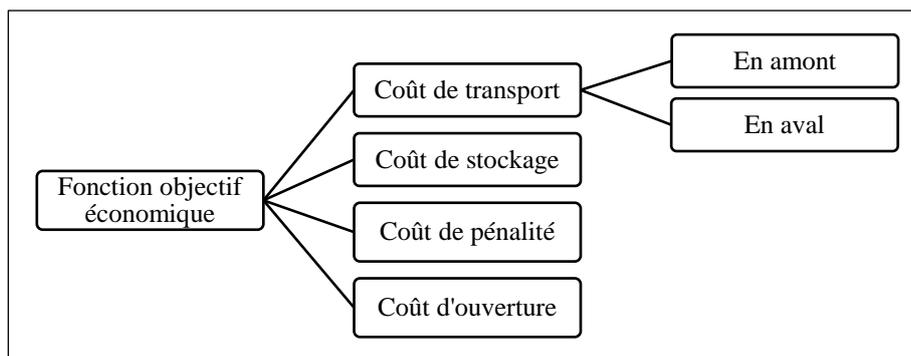


Figure 43. Composition de la fonction objectif économique

$$\text{Min } CT + CS + CD + CO \quad (70)$$

$$CT = \sum_{t \in T_2, m \in M, i \in N} CT_{imt} + \sum_{t \in T_2, m \in M, j \in D} CT_{mjt} \quad (71)$$

$$CS = \sum_{t \in T_2, m \in M, p \in P} CS_{mt}^p \quad (72)$$

$$CD = \sum_{t \in T_2, p \in P} CD_t^p \quad (73)$$

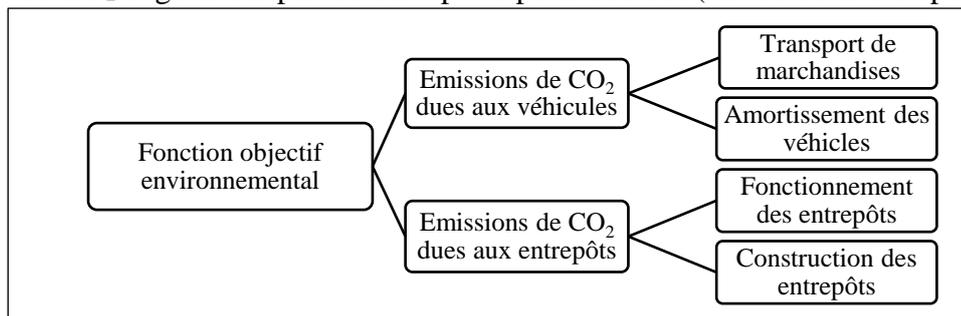
$$CW = \sum_{m \in M} CW_m \cdot z_m \quad (74)$$

La fonction objectif économique (70) est structurée en quatre parties. La première partie (71) consiste à minimiser le coût du transport qui est divisé en deux sous-parties. La première sous partie minimise les coûts du transport en amont. Elle vise à sélectionner les entrepôts à ouvrir et à affecter chaque fournisseur à l'entrepôt approprié. Elle vise également à déterminer la quantité optimale à transporter à partir des fournisseurs aux entrepôts. La seconde sous partie minimise le coût du transport en aval et elle consiste à améliorer le taux de remplissage des véhicules en regroupant les marchandises partant vers la même destination. La deuxième partie (72) vise à minimiser les coûts de stockage dans les entrepôts mutualisés en réduisant le niveau d'inventaire. Cette dernière est exprimée en fonction de la quantité entrante et celle sortante. Cela garantit de livrer le plus rapidement possible la marchandise afin de réduire le niveau d'inventaire. La troisième partie (73) permet de réduire le coût de pénalité engendrée par le retard de livraison en minimisant la quantité retardée. Cette partie vise à livrer la marchandise au bon moment. La quatrième partie (74) consiste à minimiser le coût d'ouverture des entrepôts. Chaque installation engendre un coût supplémentaire. Cette dernière partie permet de réduire le nombre d'entrepôts mutualisés à ouvrir ce qui permet de concentrer les flux et de mieux regrouper les marchandises provenant de plusieurs origines.

## 2.2. Fonction objectif environnemental

La réduction des émissions de CO<sub>2</sub> présente un enjeu important et un problème majeur. Cependant, un nombre limité des travaux se sont intéressés à ce problème stratégique en minimisant seulement les émissions générées par le transport (Nataraj et al., 2019 ; Ouhader & El Kyal, 2017 ; Ouhader & El kyal, 2020 ; Pan et al., 2013 ; Soysal et al., 2018). Contrairement à ces études, nous minimisons d'une manière exhaustive les différents types d'émissions de CO<sub>2</sub>.

Comme le montre la Figure 44, la fonction objectif environnemental consiste à réduire les émissions de CO<sub>2</sub> engendrées par les deux principales sources (véhicules et entrepôts).



**Figure 44.** Composition de la fonction objectif environnemental

La fonction objectif environnemental (75) se constitue de deux grandes parties. La première partie (76) vise à minimiser les émissions de CO<sub>2</sub> générées par l'utilisation et l'amortissement des véhicules. De même que le coût de transport, cette partie vise à optimiser les quantités transportées et à affecter les fournisseurs et les centres de distribution aux entrepôts appropriés. La seconde partie (77) permet de réduire le nombre d'entrepôts à ouvrir en minimisant les émissions de CO<sub>2</sub> dues à leur fonctionnement et à leur construction.

$$\text{Min } EV + EW \quad (75)$$

$$EV = \sum_{t \in T_2, m \in M, i \in N} E_{imt} + \sum_{t \in T_2, m \in M, j \in D} E_{mjt} \quad (76)$$

$$EW = \sum_{t \in T_2, m \in M} EO_{mt} \cdot z_m + \sum_{m \in M} EC_m \cdot z_m \quad (77)$$

### 2.3. Les contraintes prises en compte

Les contraintes prises en compte par le modèle sont les suivantes.

- **Contrainte de satisfaction des demandes**

La contrainte (78) garantit la satisfaction des quantités demandées par les centres de distribution. Pour chaque produit et à chaque période, la somme des quantités livrées en amont et le niveau d'inventaire doit être supérieure aux quantités livrées en aval.

$$\sum_{i \in N} q_{imt}^p + I_{m(t-1)}^p \geq \sum_{j \in D} q_{mjt}^p; \forall t \in T_2, p \in P, m \in M \quad (78)$$

- **Contrainte sur les délais de livraison**

La contrainte (79) assure que pour chaque produit  $p$ , la demande du centre de distribution  $j$  à la période  $t$  devrait être livrée dans la limite du nombre de périodes de retard autorisé ( $t+a^p$ ).

$$W_{jt}^p = \sum_{m \in M} \sum_{h=1}^{t+a^p} q_{mjh}^p - \sum_{h=1}^{t-1} W_{jh}^p; \forall t \in T_1, p \in P, j \in D \quad (79)$$

- **Contraintes de niveau d'inventaire**

La contrainte (80) permet de déterminer le niveau d'inventaire dans l'entrepôt  $m$  à la période  $t$ . Il est égal à la somme du niveau d'inventaire à la période précédente et la différence entre la quantité entrante et la quantité sortante à la période  $t$ . Dans le cas où l'entrepôt est ouvert, la contrainte (81) assure qu'initialement le niveau d'inventaire est égal au niveau du stock initial. Les contraintes (82 et 83) assurent, respectivement, que le niveau d'inventaire ne devrait pas dépasser la capacité de l'entrepôt  $m$  et qu'il reste toujours supérieur au niveau du stock de sécurité.

$$I_{mt}^p = \sum_{i \in N} q_{imt}^p - \sum_{j \in D} q_{mjt}^p + I_{m(t-1)}^p; \forall t \in T_2, m \in M, p \in P \quad (80)$$

$$I_{m0}^p = SI_m^p \cdot z_m; \forall m \in M, p \in P \quad (81)$$

$$\sum_{p \in P} I_{mt}^p \leq C_m; \forall t \in T_2, m \in M \quad (82)$$

$$S^p \cdot z_m \leq I_{mt}^p; \forall t \in T_2, m \in M, p \in P \quad (83)$$

- **Contraintes d'ouverture des entrepôts**

La contrainte (84) assure que  $z_m$  est une variable binaire qui est égale à 1 lorsque l'entrepôt  $m$  est ouvert, sinon elle est nulle, alors que, la contrainte (85) garantit que le nombre d'entrepôts à ouvrir ne dépasse pas le nombre total des entrepôts proposés. Les deux contraintes (86 et 87) assurent qu'un entrepôt ne peut être ouvert que s'il a y au moins un fournisseur affecté à cet entrepôt avec  $Z$  comme une grande constante.

$$z_m \in \{0,1\}; \forall m \in M \quad (84)$$

$$\sum_{m \in M} z_m \leq |M| \quad (85)$$

$$\sum_{i \in N} x_{im} \leq z_m \cdot Z; \forall m \in M \quad (86)$$

$$z_m \leq \sum_{i \in N} x_{im}; \forall m \in M \quad (87)$$

- **Contraintes d'affectation des fournisseurs aux entrepôts**

La contrainte (88) assure que la variable binaire  $x_{im}$  est égale à 1 lorsque le fournisseur  $i$  est affecté à l'entrepôt  $m$ , sinon elle est nulle. La contrainte (89) assure que chaque fournisseur est affecté à un seul entrepôt. Cette contrainte vise à éviter la dispersion des flux de marchandises sortants de la même origine. La contrainte (90) assure que la quantité de marchandises du fournisseur  $i$  ne peut être livrée à l'entrepôt  $m$  que si ce fournisseur est affecté à cet entrepôt. D'autre part, elle garantit le passage par un entrepôt lors de la livraison.

$$x_{im} \in \{0,1\}; \forall i \in N, m \in M \quad (88)$$

$$\sum_{m \in M} x_{im} = 1; \forall i \in N \quad (89)$$

$$q_{imt}^p \leq x_{im} \cdot Z; \forall t \in T_2, m \in M, p \in P, i \in N \quad (90)$$

- **Contraintes des quantités retardées**

La contrainte (91) assure que pour chaque produit  $p$  et à chaque période  $t$ , la quantité retardée est égale à la somme de la quantité retardée à la période précédente et la différence entre la demande et la quantité livrée à la même période. La contrainte (92) a pour but d'initialiser la quantité retardée.

$$Wd_t^p = \sum_{j \in D} W_{jt}^p - \sum_{m \in D, j \in D} q_{mjt}^p + Wd_{(t-1)}^p; \forall t \in T_2, p \in P \quad (91)$$

$$Wd_o^p = SD^p; \forall p \in P \quad (92)$$

- **Contraintes sur le nombre de véhicules/déplacements nécessaires**

Les deux contraintes (93) et (94) sont des contraintes classiques pour déterminer le nombre de véhicules ou des déplacements nécessaires dans les deux parties ; amont et aval.

$$\sum_{p \in P} \frac{q_{imt}^p}{Q} \leq N_{imt}; \forall t \in T_2, m \in M, i \in N \quad (93)$$

$$\sum_{p \in P} \frac{q_{mjt}^p}{Q} \leq N_{mjt}; \forall t \in T_2, m \in M, j \in D \quad (94)$$

### • Contraintes des domaines de définition des variables de décision

Ces dernières contraintes (95) et (96) décrivent le domaine de définition des différentes variables de décision proposées en plus des variables binaires.

$$q_{imt}^p; q_{mjt}^p; Wd_t^p; I_{mt}^p \geq 0 \quad (95)$$

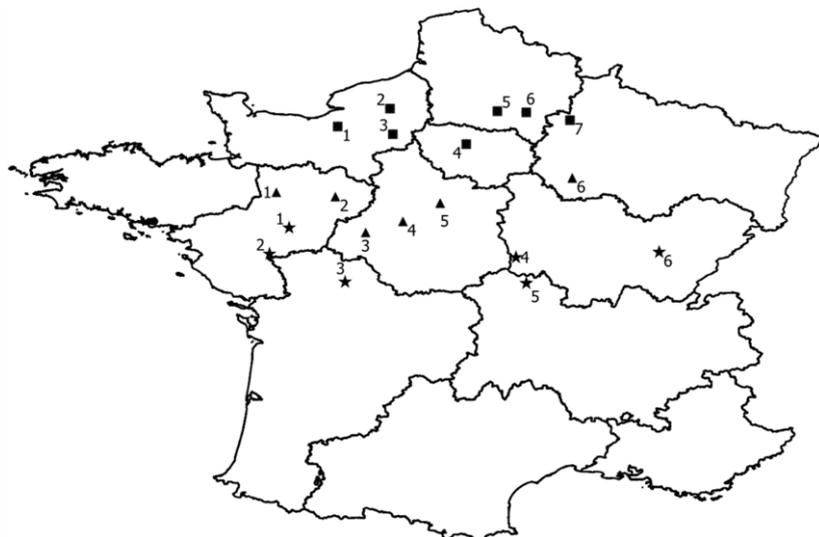
$$N_{imt}; N_{mjt} \in \mathbb{N} \quad (96)$$

## 3. Etude de cas

Dans ce paragraphe, nous illustrons la performance de la collaboration horizontale en étudiant un réseau de distribution national. L'objectif est de comparer les résultats des trois scénarios suivants.

- Premier scénario (Sc1) : chaque fournisseur livre son produit aux centres de distribution indépendamment des autres fournisseurs (sans mutualisation),
- Deuxième scénario (Sc2) : mutualisation avec minimisation des coûts logistiques,
- Troisième scénario (Sc3) : mutualisation avec minimisation des émissions de CO<sub>2</sub>.

Le réseau de distribution, représenté par la Figure 45, comporte 19 nœuds. Il s'agit de sept fournisseurs qui collaborent pour livrer six centres de distribution par l'intermédiaire d'un ensemble de six entrepôts. Les distances sont représentées par le Tableau 38.



Fournisseurs	1 : Lisieux 2 : Rouen 3 : Evreux 4 : Paris 5 : Compiègne 6 : Soissons 7 : Reims
Entrepôts	1 : Laval 2 : Le Mans 3 : Tours 4 : Blois 5 : Orléans 6 : Troyes
Centres de distribution	1 : Angers 2 : Cholet 3 : Poitiers 4 : Nevers 5 : Moulins 6 : Dole

Figure 45. Ensemble de nœuds sélectionnés

		Fournisseur						Centre de distribution						
		<i>i1</i>	<i>i2</i>	<i>i3</i>	<i>i4</i>	<i>i5</i>	<i>i6</i>	<i>i7</i>	<i>j1</i>	<i>j2</i>	<i>j3</i>	<i>j4</i>	<i>j5</i>	<i>j6</i>
Entrepôts	<i>m1</i>	308	264	211	255	273	210	210	308	264	211	255	273	210
	<i>m2</i>	315	262	209	190	401	285	285	315	262	209	190	401	285
	<i>m3</i>	237	183	131	125	323	206	206	237	183	131	125	323	206
	<i>m4</i>	336	282	229	201	421	305	305	336	282	229	201	421	305
	<i>m5</i>	373	319	266	194	458	342	342	373	319	266	194	458	342
	<i>m6</i>	265	212	159	217	307	194	194	265	212	159	217	307	194

**Tableau 38.** Distances entre les fournisseurs, les entrepôts et les centres de distribution

De même que la démarche suivie par (Alumur et al., 2016), nous choisissons des demandes distribuées uniformément dans l'intervalle  $([0 ; 50])$ . Le nombre de périodes traitées est égal à six périodes (semaines) en supposant que chaque fournisseur possède un seul type de produit.

$$W_{jt}^p = rand([0 ; 50]); \forall t \in T_1, j \in J, p \in P \quad (97)$$

La quantité totale à livrer et la capacité du véhicule sont déterminées en nombre de palettes vu que leur utilisation est plus pratique pour déplacer ou stocker les marchandises. La palette dispose d'une base en bois, en Aluminium ou en plastique sur laquelle sera disposée la marchandise durant son transport. Son utilisation offre plusieurs avantages. En effet, elle peut supporter une charge allant jusqu'à 1 tonne, elle s'adapte parfaitement aux contraintes du transport routier et elle permet de faire de meilleurs plans de chargement pour les camions et donc d'optimiser le taux de remplissage. L'utilisation de la palette réduit aussi le risque de dommage des marchandises. Au niveau environnemental, les palettes sont recyclables et peuvent être réutilisées, que ce soit pour le transport ou le stockage. Les palettes utilisées dans la chaîne logistique mutualisée sont souvent à standardiser puisqu'elles doivent servir diverses entreprises qui collaborent entre elles. Nous nous intéressons aux palettes de type européen vu qu'il est le plus utilisé par les entreprises. La dimension d'une palette européenne est  $(1200 \times 800) \text{ mm}^2$ . Nous avons collecté les données de plusieurs entreprises de location des véhicules, qui sont accessibles en ligne, afin de voir le nombre de palettes que le moyen de transport peut supporter en fonction de sa capacité de charge utile et de son volume.

Le Tableau 39 résume les données collectées qui décrivent la capacité des principaux types de véhicules en palettes.

Type de véhicule	Charge utile du véhicule (tonnes)	Volume du véhicule ( $\text{m}^3$ )	Nombre de palettes européennes
<b>Véhicules légers (PTAC &lt; 3.5 t)</b>			
Voiture	0.45	2 à 3	1
Fourgon	0.8	3.49	2
Véhicule caisse fourgon hayon	0.8	18.66	8
Camionnette (4 ou 5 $\text{m}^3$ )	0.8	4 à 5	2
Camionnette (16 ou 20 $\text{m}^3$ )	1	16 à 20	6 à 8
Grand volume avec hayon	1	20	8
Véhicule caisse fourgon ou bâche	1.2	18.66	8
Camionnette (14 $\text{m}^3$ )	1.2	14	5
Fourgon (12 $\text{m}^3$ )	1.2	12	4
<b>Véhicules lourds (PTAC &gt; 3.5 t)</b>			
Poids lourd 5 tonnes avec hayon	5	35	16
Camion 13 à 16 tonnes	8.9	30 à 45	15 à 18
Porteur	9.2	50	20
Poids lourd 10 tonnes avec hayon	10	50	20

Camion 19 tonnes	11	40 à 50	18 à 21
Semi-remorque	24	89.96 à 103.29	33 à 34
Camion complet	25	80	33
Camion-remorque	26	97.6 à 126	38 à 39
Semi-remorque fourgon	20 à 26	90	33

**Tableau 39.** Nombre de palettes transportées pour les principaux types de véhicules

Dans notre cas, la capacité du véhicule choisi est de 33 palettes d'un PTAC égale à 40 tonnes pour un poids à vide de 15 tonnes. En se référant aux guides ([guide 1](#) et [guide 2](#)), nous avons également estimé le coût unitaire d'ouverture des entrepôts. En effet, l'ordre de grandeur du prix de construction d'un entrepôt en France est de 300 à 400 €/m<sup>2</sup>. Nous avons pris un coût unitaire égal à 400 €/m<sup>2</sup>. Autres données sont extraites des guides et des rapports techniques comme les émissions unitaires (ADEME, 2010 ; Hickman, 1999). Le nombre d'accidents et le pourcentage de mortalité causés par les poids lourds sont extraits de l'Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière ONISR (2013, 2014, 2015, 2016).

Le nombre de semaines autorisées pour le retard est représenté par le Tableau 40. Il se réfère au niveau de flexibilité de chaque fournisseur.

<i>i1</i>	<i>i2</i>	<i>i3</i>	<i>i4</i>	<i>i5</i>	<i>i6</i>	<i>i7</i>
1	0	0	1	0	2	1

**Tableau 40.** Nombre de périodes autorisées pour le retard de livraison

Initialement, nous supposons il n'y a ni stock dans les entrepôts ni quantités retardées. La surface des entrepôts dépend de plusieurs facteurs (capacité de stockage, équipement de manutention, espace nécessaire pour transporter les palettes, etc.). Afin de prendre en compte l'espace de transfert, nous supposons que la surface estimée de l'entrepôt est égale à deux fois la surface de stockage. Cette dernière est égale à la capacité de stockage multipliée par la surface d'une palette.

Le Tableau 41 représente l'ensemble des entrepôts proposés avec leurs capacités et leurs surfaces.

Entrepôt	<i>m1</i>	<i>m2</i>	<i>m3</i>	<i>m4</i>	<i>m5</i>	<i>m6</i>
Capacité (palettes)	1000	900	1100	800	900	1000
Surface (m <sup>2</sup> )	1920	1728	2112	1536	1728	1920

**Tableau 41.** Les capacités et les surfaces des différents entrepôts

Concernant le scénario non-collaboratif, nous supposons que chaque fournisseur possède une zone de stockage dans son propre local avec une capacité égale à 300 qui représente la somme des maximums de demandes ( $\max \{ \text{rand}(0 ; 50) \} \times 6$  centres de distribution).

Le Tableau 42 représente le reste des données.

Paramètre	Valeur
$C_o$	0.5 €/km
$C_q$	1 €/km
$Q$	33 palettes
$Cs_m^p$	10 €/palette
$Cd^p$	5 €/palette
$Cw_m$	400 €/m <sup>2</sup>
$S^p, SP_m, SD_m^p$	0 palettes
$C$ (sans mutualisation)	300 palettes

$W_{mt}$	50 kwh/m <sup>2</sup>
$E_q$	1096.06 g/km
$E_o$	772.68 g/km

Tableau 42. Autres données utilisées

### 3.1. Résolution mono-objectif

La résolution des différents scénarios est réalisée avec le solveur CPLEX 12.10 Intel® Core™i5-4210M CPU (2.60 GHz) avec 8 GB de RAM. Le premier scénario consiste à livrer directement la marchandise du fournisseur vers le centre de distribution sans mutualisation. Nous avons surestimé la performance de ce premier scénario en supposant qu'il n'y a pas de retard de livraison. Les deux autres scénarios sont collaboratifs : le premier consiste à résoudre le modèle proposé avec la fonction objectif économique, tandis que le deuxième est obtenu grâce à la résolution du modèle avec minimisation des émissions de CO<sub>2</sub> dues aux véhicules et aux entrepôts.

La Figure 46 représente la configuration du réseau de distribution mutualisé obtenue lors de la minimisation des coûts logistiques et des émissions de CO<sub>2</sub> dans les deux scénarios collaboratifs. Il est clair que les fournisseurs devront expédier leurs marchandises vers le seul entrepôt 4.

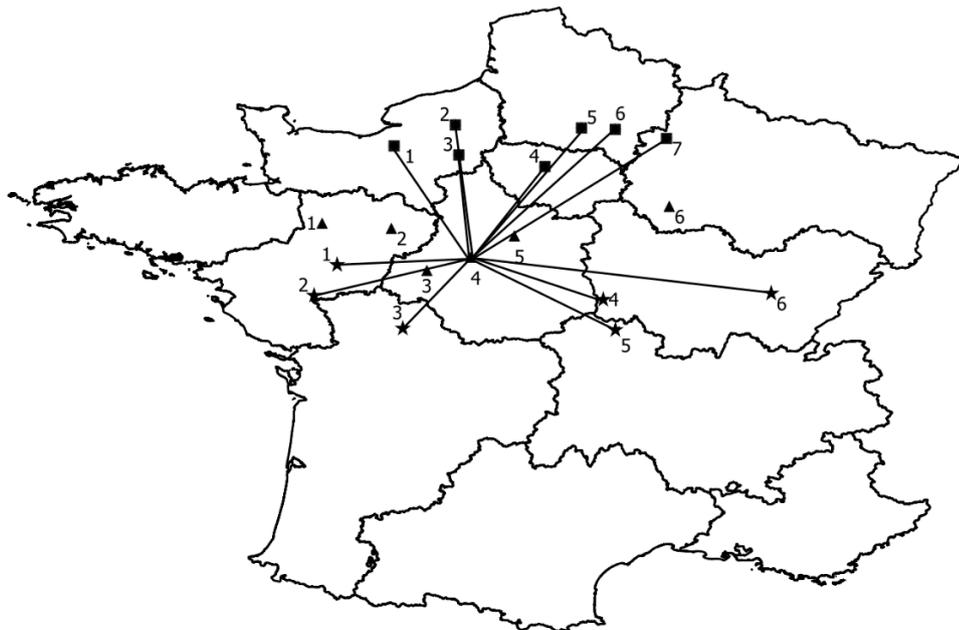


Figure 46. Réseau de distribution des deux scénarios Sc2 et Sc3

Les résultats des trois scénarios sont résumés dans le Tableau 43.

Indicateur	Sc1	Sc2	Sc3
Coût de transport (€)	2.18E+05	2.05E+05	2.08E+05
Coût de stockage (€)	37980	2231.8	36133
Coût de pénalité (€)		492.58	4500
Coût d'ouverture des entrepôts (€)	1.61E+06	6.14E+05	6.14E+05
Coût logistique total (€)	1.87E+06	8.22E+05	8.63E+05
Taux de réduction économique (%)	0%	56.01%	53.81%
Emissions de CO <sub>2</sub> dues aux véhicules (g CO <sub>2</sub> )	3.08E+08	2.89E+08	2.80E+08
Emissions de CO <sub>2</sub> dues aux entrepôts (g CO <sub>2</sub> )	8.07E+08	3.07E+08	3.07E+08
Emissions de CO <sub>2</sub> globales (g CO <sub>2</sub> )	1.11E+09	5.96E+08	5.87E+08
Taux de réduction environnemental (%)	0%	46.55%	47.33%

Taux de réduction du risque accident corporel (%)	0%	7.19%	10.47%
Taux de réduction du risque accident corporel motel (%)	0%	1.03%	1.50%
Taux de réduction du risque accident corporel non mortel (%)	0%	6.16%	8.97%
Niveau de bruit (dB)	23596.8	8367.62	8738.79
Taux de réduction du niveau de bruit	0%	64.54%	62.97%
Taux de réduction social/sociétal	0%	35.86%	36.72%
Taux de remplissage (%)	68.40%	97.7%	98.6%
Distance parcourue (Km)	299970	278410	268560

**Tableau 43.** Résultats des trois scénarios Sc1, Sc2 et Sc3

- **Comparaison entre le premier et le deuxième scénario**

La résolution du deuxième scénario Sc2 montre que seul le quatrième entrepôt devrait être ouvert, c'est-à-dire que tous les fournisseurs devraient transporter leurs marchandises jusqu'au quatrième entrepôt qui possède une capacité égale à 800 palettes. D'après la Figure 46, il s'avère que ce choix soit dû à la proximité de cet entrepôt de l'ensemble des autres nœuds non-hubs et à sa capacité. Ces deux critères sont liés directement au coût de transport et au coût d'installation. Notons qu'il s'agit d'une amélioration remarquable des différents niveaux de durabilité. En effet, il y a une réduction significative de la distance parcourue qui se traduit par une amélioration des taux de remplissage qui est passée de 68.4% à 97.70%. L'amélioration du taux de remplissage, obtenue par le regroupement des marchandises en aval de l'entrepôt mutualisé, montre que l'objectif principal de la mutualisation est atteint. Il s'agit d'une massification importante des flux grâce au regroupement des marchandises. Sur le plan économique, l'amélioration est notable en termes de coûts du transport ainsi que de la réduction au niveau des coûts de stockage et d'ouverture des entrepôts. Cette réduction est due au partage de l'entrepôt. Le coût logistique engendré par le scénario collaboratif Sc2 est réduit de 56.01%. Sur le plan environnemental, il s'agit d'une amélioration importante, notamment en termes des émissions de CO<sub>2</sub> générées par les entrepôts. Cette réduction considérable est également due au partage de l'entrepôt de stockage. Ceci permet de réduire les différentes émissions générées par le fonctionnement et la construction des entrepôts.

D'autre part, la collaboration horizontale a permis une amélioration remarquable au niveau des émissions dues aux véhicules avec un taux de réduction égal à 6.35%. Au niveau social/sociétal, le taux de réduction du risque accident corporel par rapport au premier scénario Sc1 est égal à 7.19%, réparti respectivement en 1.03% comme risque d'accident mortel et 6.16% comme risque d'accident non mortel. En ce qui concerne le niveau de bruit, il s'agit d'une réduction remarquable de 64.54%. La réduction de l'impact néfaste de la mutualisation sur le confort et la sécurité des habitants est due à la réduction de la distance totale parcourue et du nombre de véhicules utilisés. Ceci s'explique par le regroupement de marchandises. En effet, la fonction objectif, en particulier, la minimisation du coût de transport permet de sélectionner les meilleures entrepôts à ouvrir et de les affecter aux fournisseurs et aux centres de distribution d'une manière optimale. Ceci permet d'améliorer le taux de remplissage pour réduire le nombre de véhicules utilisés.

- **Comparaison entre le premier et le troisième scénario**

La résolution du troisième scénario Sc3 indique que seulement le quatrième entrepôt qui possède une capacité de 800 palettes doit être ouvert. Ce troisième scénario a permis d'atteindre une amélioration significative du taux de remplissage qui est passé de 68.40% à 98.60%. Cette amélioration a permis de réduire la distance totale parcourue grâce au regroupement des marchandises pour qu'elles puissent être livrées dans les mêmes véhicules. Le troisième

scénario permet d'atteindre une amélioration notable du coût logistique total spécialement le coût d'ouverture d'entrepôts. Les coûts engendrés par le transport et le stockage sont également réduits par rapport au premier scénario. Au niveau des émissions de CO<sub>2</sub>, le troisième scénario génère les moindres quantités d'émissions avec une réduction importante de 47.33%. Cette diminution est due principalement à la réduction remarquable des émissions de CO<sub>2</sub> engendrées par les entrepôts. De plus, les émissions dues aux véhicules ont été minimisées de 9.17%. Sur le plan social/sociétal, le taux de réduction du risque accident est égal à 10.47% par rapport au premier scénario. Ce taux est réparti en 1.50% pour le taux de réduction d'accident mortel et en 8.97% pour le taux de réduction du risque d'accident non mortel. En outre, le troisième scénario a permis une réduction importante de 62.97% du niveau de bruit.

- **Comparaison entre les deux scénarios collaboratifs (Sc2 et Sc3)**

Les deux scénarios collaboratifs ont permis de réduire les distances parcourues et améliorer le taux de remplissage des véhicules par rapport au scénario non-collaboratif. Sur tous les niveaux de durabilité, les résultats obtenus par la collaboration horizontale sont bien meilleurs que ceux du scénario non-collaboratif où les partenaires distribuent séparément leurs marchandises. Sur le plan économique, le deuxième scénario Sc2 est bien meilleur que le troisième scénario Sc3. En ce qui concerne le taux de remplissage du véhicule, il est comparable pour les deux scénarios. Le modèle économique privilégie la minimisation des coûts logistiques, notamment la réduction de coût de transport de stockage. Par conséquent, nous constatons que pour une meilleure performance économique, il est préférable d'utiliser le scénario Sc2. D'autre part, le troisième scénario Sc3 permet d'atteindre une meilleure performance au niveau environnemental, notamment en termes des émissions de CO<sub>2</sub> dues aux véhicules. Au niveau social/sociétal, les valeurs sont similaires, mais il est recommandé d'utiliser le modèle économique pour réduire le niveau de bruit. Toutefois, pour réduire le risque accident, il est conseillé d'utiliser le modèle environnemental.

## 3.2. Analyse de sensibilité

### 3.2.1. Optimisation multi-objectif

Dans le paragraphe précédent, nous avons résolu le modèle mono-objectif ce qui nous a permis de définir clairement les solutions optimales avec un seul objectif (économique ou environnemental). Cependant, la conception d'un réseau de distribution mutualisé avec plus d'un objectif est un problème de prise de décision multicritère. Ce type de problème de décision implique plusieurs objectifs contradictoires qui doivent être considérés simultanément. Dans cette partie, nous présentons la résolution du modèle avec la fonction objectif qui combine les coûts logistiques et les émissions de CO<sub>2</sub>. Cela permet d'étudier la sensibilité d'une fonction par rapport à l'autre et de trouver un bon compromis entre les deux fonctions.

En raison des caractères concurrentiels des objectifs, l'optimisation multi-objectif permet d'obtenir une infinité de solutions. Ces solutions sont appelées points de Pareto (Pareto, 1971). Un point  $x^* \in X$  est Pareto optimal si et seulement s'il n'existe pas un autre point  $x \in X$  tel que  $F(x) \leq F(x^*)$ , et pour au moins une fonction. Il revient aux décideurs de sélectionner une solution parmi l'ensemble généré, ce qui présente une difficulté de prioriser un objectif par rapport à un autre d'où la nécessité de l'optimal de Pareto.

Selon (Chircop & Zammit-Mangion, 2013), la génération de la frontière Pareto peut être réalisée par deux techniques, à savoir la scalarisation et les méthodes de vectorisation. La première méthode vise à convertir le problème d'optimisation multi-objectif en une série de

problèmes d'optimisation mono-objectif. Alors que la deuxième méthode s'attaque directement aux problèmes par des algorithmes. Cette dernière méthode nécessite un grand nombre d'évaluations de fonctions objectifs, ce qui provoque un temps important pour la résolution.

Concernant la scalarisation, plusieurs méthodes sont proposées dans la littérature comme la méthode d'agrégation (appelée aussi la somme linéaire pondérée), l'intersection des limites normales, la méthode des contraintes normales,  $\varepsilon$ -contrainte, la méthode de programmation physique, etc. Nous nous sommes intéressés à la méthode de  $\varepsilon$ -contrainte pour résoudre le modèle avec la fonction bi-objectif (économique et environnemental). Cette méthode est proposée pour la première fois par (Haimes et al., 1971).

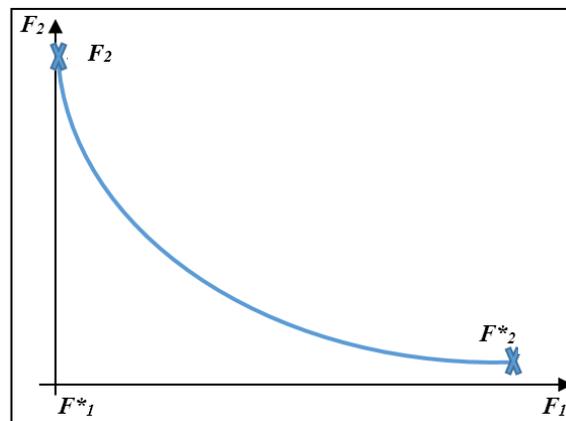
Selon (Chircop & Zammit-Mangion, 2013), la méthode  $\varepsilon$ -contrainte est très intuitive et simple à appliquer aux problèmes à deux critères. Elle manipule systématiquement les formulations des fonctions objectifs pour générer une frontière de Pareto diversifiée et bien distribuée, même dans le cas d'ensembles de Pareto non-convexes. La méthode  $\varepsilon$ -contrainte consiste à optimiser l'une des fonctions objectifs en mettant les autres fonctions sous formes de contraintes. En plus de sa simplicité, cette méthode ne nécessite pas d'imposer de variables supplémentaires au modèle mathématique. En outre, elle ne nécessite pas une mise à l'échelle commune vu qu'elle permet à chaque fonction objectif d'être représentée par sa propre échelle. Elle facilite également le nombre de points de grille dans chaque plage de fonction objectif. Ouhader et El kyal (2017) ont utilisé cette méthode en déterminant la valeur de  $\Delta\varepsilon$  en fonction des émissions optimales de CO<sub>2</sub> déterminées par la résolution du modèle environnemental et celles déterminées par la résolution du modèle économique. Dans notre étude, nous décrivons la valeur de  $\Delta\varepsilon$  non seulement en fonction des émissions de CO<sub>2</sub> dues au transport mais aussi en fonction des émissions dues à l'amortissement des véhicules et celles dues aux entrepôts.

La formule générale de la fonction bi-objectif : coûts logistiques ( $F_1$ ) et émissions de CO<sub>2</sub> ( $F_2$ ) est la suivante :

$$\text{Min } \{F_1; F_2\} \quad (98)$$

*Sous les contraintes {(73 – 91)}*

La méthode  $\varepsilon$ -contrainte commence par obtenir les points  $F_1^*$  et  $F_2^*$  correspondants aux valeurs minimales de chacune des fonctions objectifs en résolvant les deux problèmes d'optimisation mono-objectif. Dans notre étude, nous choisissons de mettre la fonction des coûts comme fonction objectif et les émissions de CO<sub>2</sub> comme contraintes. La Figure 47 représente un front de Pareto général de deux objectifs contradictoires  $F_1$  et  $F_2$ .



**Figure 47.** Frontière Pareto dans le cas général

La formulation suivante est appliquée pour générer la frontière de Pareto. Les deux paramètres  $n$  et  $C$  représentent respectivement le nombre d'instances et le compteur d'incrément. L'objectif est de résoudre le modèle pour plusieurs valeurs de  $C$  allant de zéro à  $n$ .

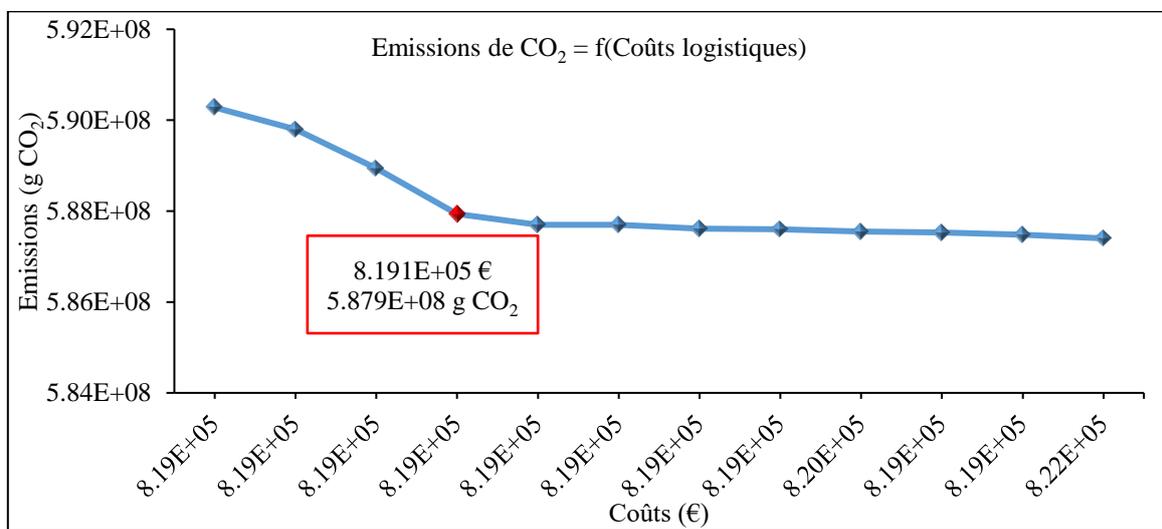
$$\text{Min } F_1 \quad (99)$$

Sous les contraintes  $\{(9 - 27)\}$

$$F_2 \leq F_2^*(S3) + C \cdot \Delta\varepsilon \quad (100)$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{F_2(S2) - F_2^*(S3)}{n} \quad (101)$$

Nous avons généré plusieurs instances en diminuant la valeur de  $\Delta\varepsilon$  par l'incrément du compteur d'un pas à chaque fois. Les temps de résolution des différentes instances générées ne dépassent pas une minute. Les résultats sont présentés dans la Figure 48.



**Figure 48.** Frontière Pareto entre les coûts logistiques (€) et les émissions de CO<sub>2</sub> (g)

Comme nous l'avons déjà évoqué précédemment, tous les points de la courbe sont des solutions au problème multi-objectif. Le point coloré en rouge qui correspond à une valeur de  $C = 3$  semble être la solution qui offre un bon compromis entre les coûts logistiques et les émissions de CO<sub>2</sub>. Ce point correspond à un coût logistique égal à 8.191E+05 € et à une quantité d'émissions de CO<sub>2</sub> égale à 5.879E+08 (g CO<sub>2</sub>). Le risque d'accident corporel et le niveau de bruit sont présentés dans la Figure 49. Au niveau social, le même point offre des résultats acceptables avec un niveau de bruit égal 8572.15 dB et un risque accident égal à 9.81%.

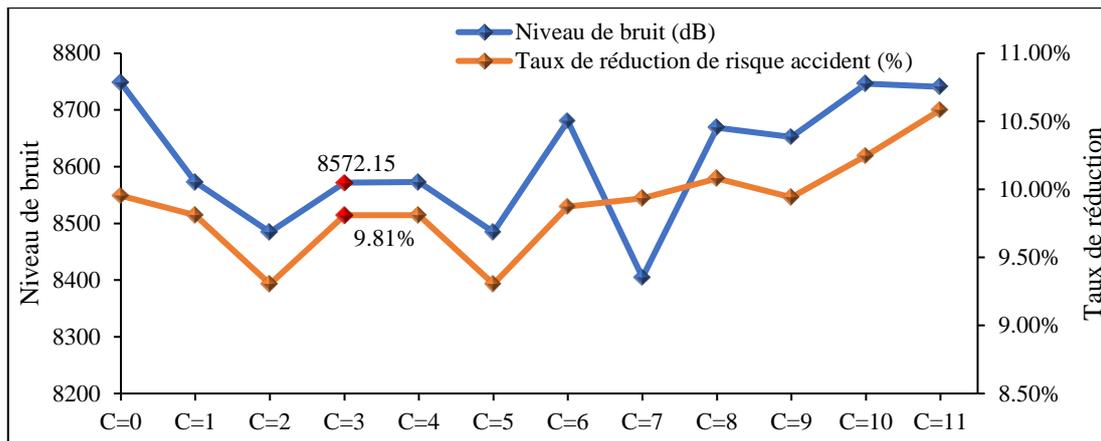


Figure 49. Le risque d'accident et le niveau de bruit correspondant aux solutions frontière Pareto

### 3.2.2. Réduction des frais de pénalité par la méthode d'agrégation complète

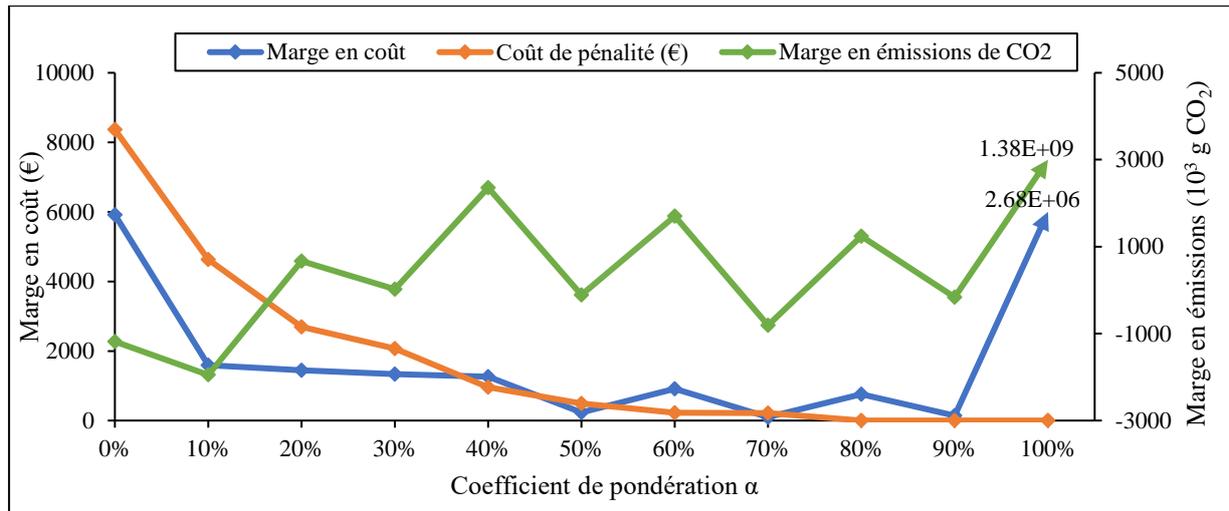
Selon (Esper & Williams, 2003), le principal objectif de la collaboration horizontale est de fournir un meilleur service et de réduire les coûts tout au long du processus de livraison. L'une des méthodes de fidélisation de la clientèle consiste à améliorer le niveau de service qui peut être obtenu en minimisant les coûts liés aux pénalités. Il est assez évident qu'une réduction de ce coût implique une amélioration du niveau de service. Pour cette raison, l'objectif de ce paragraphe est de réduire le coût de pénalité par la méthode d'agrégation complète. Cette dernière, appelée également la somme linéaire pondérée, est utilisée dans des fonctions multi-objectifs souvent contradictoires comme le cas de notre étude. En effet, la minimisation du coût de transport vise à ne pas livrer ou à retarder la livraison de marchandises pour améliorer le taux de remplissage par le regroupement de marchandises. D'autre part, la réduction du coût de stockage consiste à livrer le plus rapidement possible, tandis que, la réduction du coût de pénalité tend à livrer au bon moment. La méthode d'agrégation complète consiste à attribuer des poids aux différentes parties de la fonction objectif afin de favoriser la minimisation de l'une par rapport aux autres. Nous avons appliqué cette méthode sur le deuxième scénario qui consiste à concevoir un réseau de distribution mutualisé en minimisant les coûts logistiques. La fonction objectif économique est ainsi divisée en deux fonctions :

- Fonction 1 : coût de pénalité
- Fonction 2 : somme des trois autres coûts

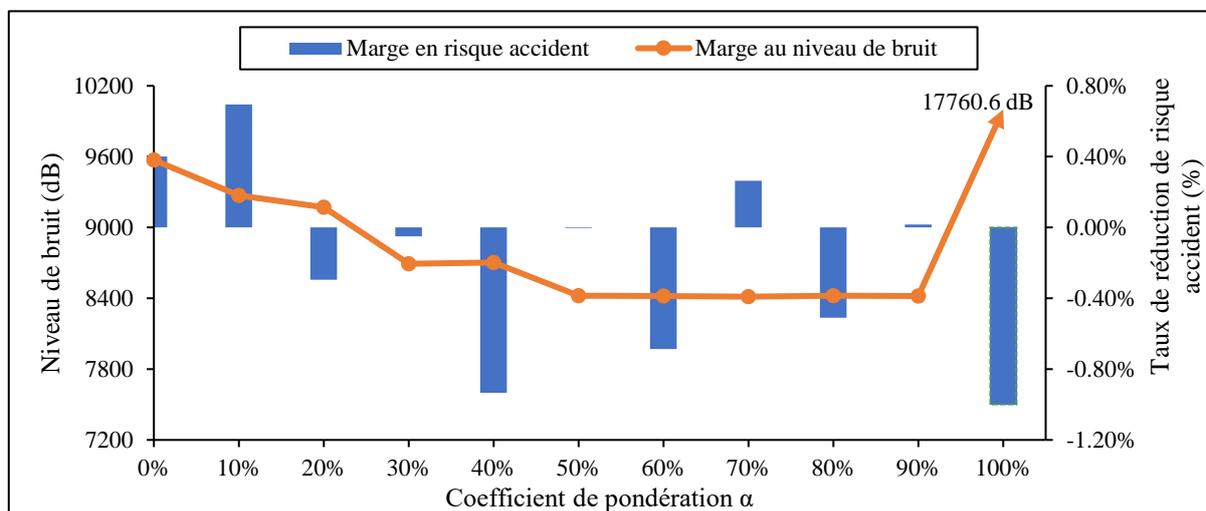
$$\text{Fonction objectif} = \alpha \cdot \text{Fonction1} + \beta \cdot \text{Fonction2} \quad (102)$$

Les deux coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  désignent respectivement les coefficients de pondération de la *Fonction1* et de la *Fonction2* à condition que la somme des deux coefficients soit égale à l'unité. L'objectif est de trouver la valeur de pondération  $\alpha$  qui offre un coût de pénalité minimal avec une marge négligeable du coût total par rapport à celui de l'optimal trouvé lors de la résolution de la fonction mono-objectif.

Les différents scénarios sont obtenus en faisant varier le coefficient  $\alpha$ . Les temps de résolution des différents scénarios sont généralement faibles (inférieurs à 1 minute).



**Figure 50.** Variation du coût de pénalité et des marges au niveau des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub> en fonction de  $\alpha$



**Figure 51.** Variation des marges au niveau du risque accident et du bruit en fonction de  $\alpha$

La Figure 50 représente l'évolution du coût de pénalité, les marges de coûts logistiques et des émissions de CO<sub>2</sub> en fonction du coefficient de pondération  $\alpha$ . Pour chaque valeur de  $\alpha$ , la marge est égale à la différence entre la valeur calculée de chaque indicateur et la valeur optimale obtenue lors de la résolution du deuxième scénario Sc2.

La résolution du modèle est réalisée en variant la pondération du coût de pénalité de 0% à 100% avec un pas de 10%. Il est clair que le coût de pénalité diminue lorsqu'on favorise sa minimisation par rapport aux autres coûts logistiques. Il commence à être inférieur à celui obtenu dans Sc2 à partir du coefficient de pondération de 50% et il devient égal à zéro lorsque  $\alpha$  appartient à l'intervalle [80% - 100%]. Concernant la marge des coûts logistiques, sa courbe est décroissante jusqu'à un coefficient de pondération égal à 50%, puis, elle commence à croître. Nous remarquons aussi que pour  $\alpha$  égale à 100%, la marge des coûts logistiques augmente de façon exponentielle, ceci est dû à l'augmentation du coût d'ouverture des entrepôts. En effet, ce coefficient correspond à l'ouverture de quatre entrepôts. Pour un coefficient de pondération égal à 50%, les marges en coûts logistiques et celles des émissions de CO<sub>2</sub> sont très proches de zéro. Les valeurs minimales de marge des coûts, où le coût de pénalité est inférieur à celui obtenu en Sc2, sont situées dans l'intervalle [50% - 90%]. Par

conséquent, nous pouvons conclure que pour un meilleur niveau de service avec une marge minimale des coûts logistiques par rapport à l'optimal, il est recommandé de choisir un coefficient de pondération dans l'intervalle [50% - 90%]. La meilleure valeur de marge en coût logistique est obtenue pour un coefficient de pondération égale à 70%.

Concernant la marge des émissions de CO<sub>2</sub>, certaines valeurs sont négatives vu que les quantités d'émissions de CO<sub>2</sub> pour ces valeurs sont inférieures à celles des émissions obtenues dans le deuxième scénario. De même que les coûts logistiques, la meilleure valeur de marge en émissions de CO<sub>2</sub> obtenue pour un coût de pénalité proche de zéro est obtenue pour un coefficient de pondération égal à 70%. Concernant l'aspect social/sociétal, les marges de risque accident et de niveau de bruit sont représentées par la Figure 51. Nous remarquons que les valeurs de la marge du niveau de bruit sont positives, ceci implique que le niveau de bruit est supérieur à celui du deuxième scénario. La meilleure valeur obtenue pour le niveau de bruit correspond à un coefficient de pondération égal à 70%. Concernant le risque accident, cette valeur correspond à une marge acceptable égale à 0.26%. De même que les marges des coûts logistiques et des émissions de CO<sub>2</sub>, le coefficient de pondération 100% influence négativement l'aspect social/sociétal.

Finalement, nous pouvons conclure que les valeurs des coefficients de pondération  $\alpha$  qui appartiennent à l'intervalle [50% ; 90%] permettent d'améliorer le niveau de service, en particulier la valeur 70%. Cette valeur offre un bon compromis entre la réduction du coût de pénalité et les différentes marges des coûts logistiques, des émissions de CO<sub>2</sub>, de risque accident et de niveau de bruit par rapport au deuxième scénario.

### 3.2.3. Impact de la variation des périodes autorisées pour le retard de livraison sur la performance de la mutualisation

Dans ce paragraphe, nous analysons l'impact de la flexibilité des délais de livraison sur le résultat de la mutualisation au niveau de la durabilité. L'objectif est de résoudre le modèle mono-objectif économique sur plusieurs instances en variant à chaque fois le nombre de périodes autorisées pour le retard de livraison  $a^p$ .

Le Tableau 44 représente les instances traitées. Les temps de résolution des différentes instances ne dépassent pas une minute.

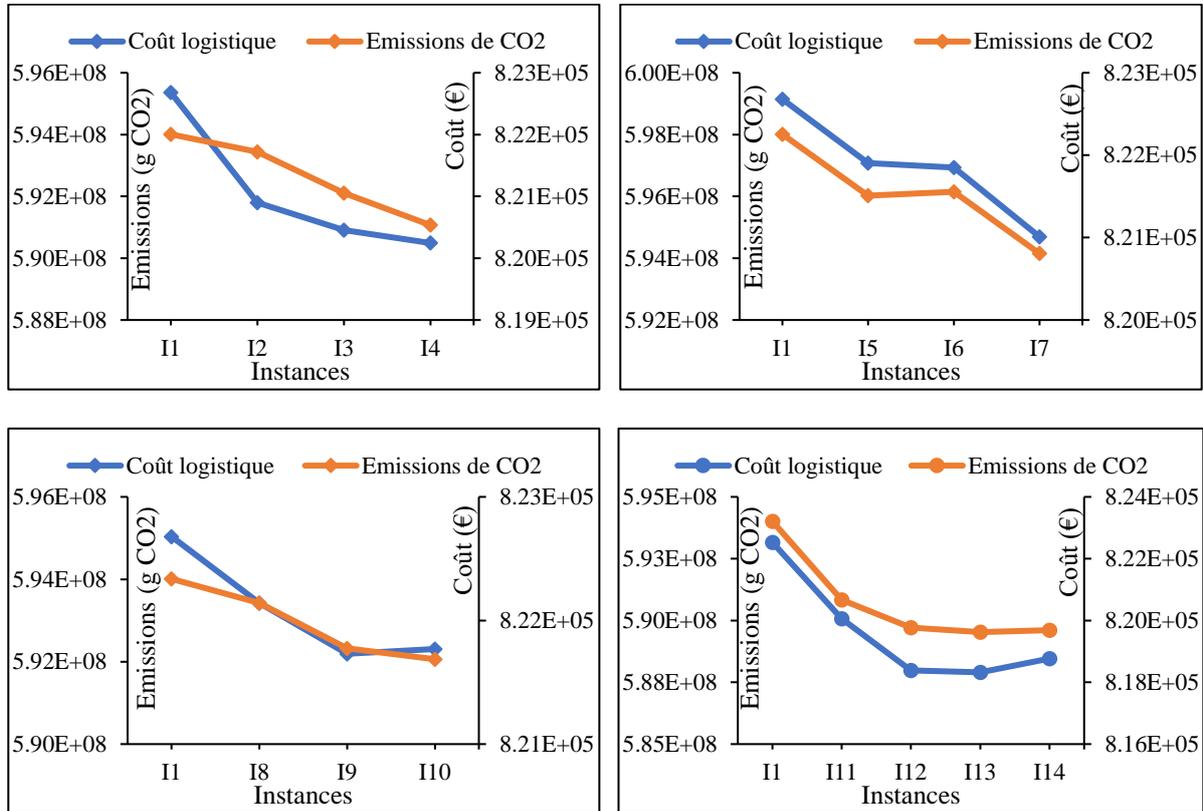
Instance	Périodes autorisées pour le retard de livraison	Instance	Périodes autorisées pour le retard de livraison
I1	a=[0 0 0 0 0 0]	I8	a=[3 3 0 0 0 0]
I2	a=[1 1 0 0 0 0]	I9	a=[3 3 3 3 0 0]
I3	a=[1 1 1 1 0 0]	I10	a=[3 3 3 3 3 3]
I4	a=[1 1 1 1 1 1]	I11	a=[1 2 2 1 1 2]
I5	a=[2 2 0 0 0 0]	I12	a=[1 2 2 3 3 2]
I6	a=[2 2 2 2 0 0]	I13	a=[1 2 2 3 3 3]
I7	a=[2 2 2 2 2 2]	I14	a=[1 2 2 3 3 3]

**Tableau 44.** Instances traitées en variant le nombre de périodes autorisées pour le retard de livraison

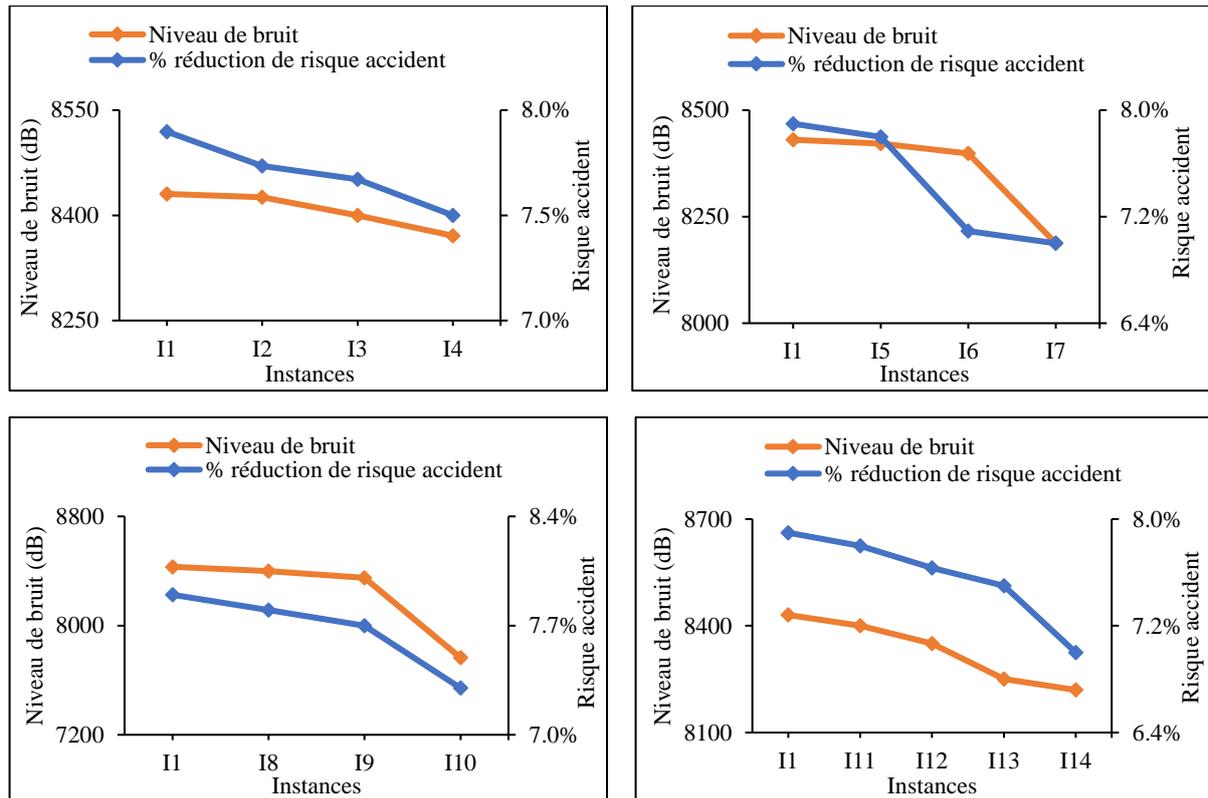
La Figure 52 représente les coûts logistiques et les émissions de CO<sub>2</sub> pour les 14 instances. Nous pouvons facilement remarquer que le gain de la collaboration dépend fortement de la flexibilité que chaque partenaire autorise dans ses conditions de livraison. Les résultats de la mutualisation au niveau des trois dimensions de la durabilité sont améliorés. En effet, d'après la Figure 52, on constate que les courbes des coûts logistiques et des émissions de CO<sub>2</sub> sont généralement décroissantes ce qui confirme que les coûts logistiques et les émissions de CO<sub>2</sub>

s'améliorent lorsque le nombre des périodes autorisées augmente. Ce résultat est conforme aux résultats de (Khalifehzadeh et al., 2015). Selon ces auteurs, « les entreprises peuvent délibérément livrer des produits à leurs clients tardivement car ils en bénéficient, ils peuvent réduire les frais de transport ».

Sur le plan social/sociétal, il s'agit généralement d'une réduction notable au niveau du bruit et au niveau du risque accident (cf. Figure 53).

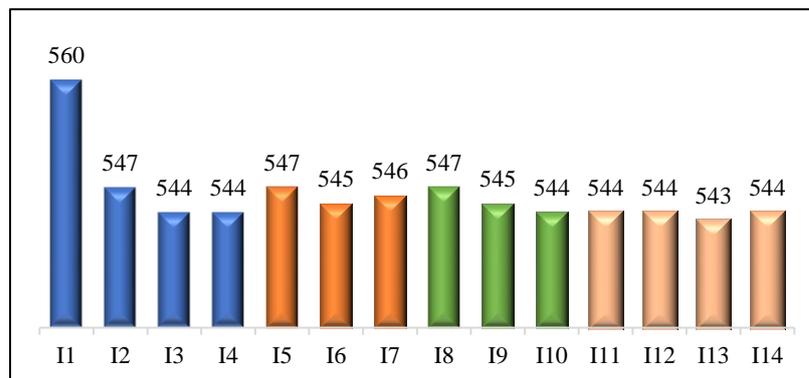


**Figure 52.** Coûts logistiques et émissions de CO<sub>2</sub> en fonction du nombre de périodes autorisées pour le retard de livraison



**Figure 53.** Risque accident et niveau de bruit en fonction du nombre de périodes autorisées pour le retard de livraison

Selon (Vanovermeire & Sørensen, 2014) l'assouplissement des délais de livraison permet à la collaboration horizontale d'exploiter davantage des opportunités d'optimisation et de créer des plans de distribution meilleurs et moins chers. Ces résultats sont obtenus grâce au principal objectif de la mutualisation. En effet, l'un des principaux effets positifs de la collaboration horizontale est la réalisation d'économies d'échelle en transportant plus de volume à chaque voyage et en réduisant le nombre de voyages redondants (cf. Figure 54). D'autre part, l'assouplissement au niveau des délais de livraison permet de retarder des quantités bien déterminées pour les regrouper avec d'autres quantités et pour trouver un bon plan de distribution qui maximise le taux de remplissage des véhicules.



**Figure 54.** Nombre de véhicules/déplacements utilisés pour satisfaire les demandes en fonction des différentes instances

### 3.2.4. Impact de la taille de la collaboration

Afin de tester la performance de la mutualisation et généraliser les résultats obtenus, nous avons construit plusieurs instances en changeant à chaque fois le nombre des Fournisseurs-Entrepôts-Centres de distribution (F-E-C).

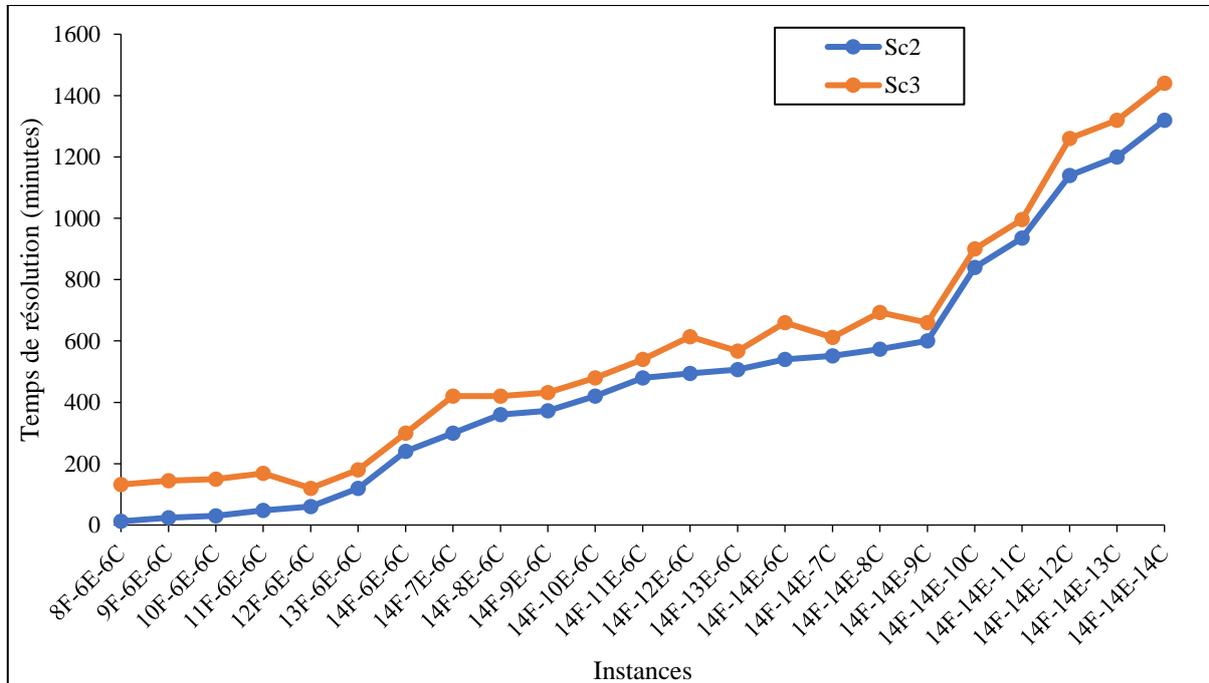


Figure 55. Temps de résolution (en minutes)

Concernant le temps de résolution des deux scénarios collaboratifs, généralement, il augmente de manière exponentielle en fonction du nombre de nœuds (Pan et al., 2014 ; Toth et Vigo, 2002). Comme le montre la Figure 56, le temps de résolution augmente avec l'augmentation du nombre de nœuds, en particulier pour le scénario Sc3 qui possède toujours un temps de résolution bien supérieur à celui du scénario Sc2 (cf. Figure 55).

Les résultats obtenus sont représentés par le Tableau 45 et la Figure 56. Ces derniers montrent que le gain de la collaboration dépend du nombre de partenaires, des entrepôts et des centres de distribution. Les taux de réduction positifs confirment que les deux scénarios collaboratifs (Sc2 et Sc3) offrent toujours de meilleurs résultats par rapport à la livraison directe sans collaboration. Ces taux de réduction s'améliorent proportionnellement à la taille de la collaboration puisqu'ils augmentent avec l'augmentation du nombre des partenaires et du nombre de centres de distribution. Par conséquent, nous pouvons conclure qu'il est plus avantageux d'utiliser la collaboration lorsqu'il s'agit d'un grand nombre de partenaires pour satisfaire une quantité importante de demandes.

Par ailleurs, les conclusions obtenues dans le paragraphe 3.1 sont toujours valables pour ces instances. Au niveau économique, le scénario Sc2 est toujours meilleur que celui de Sc3. Au niveau environnemental, les résultats sont comparables : le scénario Sc3 est légèrement meilleur que le scénario Sc2.

Concernant les entrepôts ouverts, les deux scénarios collaboratifs utilisent généralement les mêmes entrepôts mutualisés sauf pour quelques instances. Le scénario Sc2 tend à trouver un bon compromis entre la proximité des entrepôts et leurs coûts d'installation, tandis que le

scénario Sc3 vise à trouver un choix des entrepôts selon leur proximité de tous les nœuds et leur consommation d'énergie, en d'autres termes leurs émissions de CO<sub>2</sub>. Les deux scénarios Sc2 et Sc3 commencent à utiliser deux entrepôts mutualisés à partir de l'instance 13F-6E-6C.

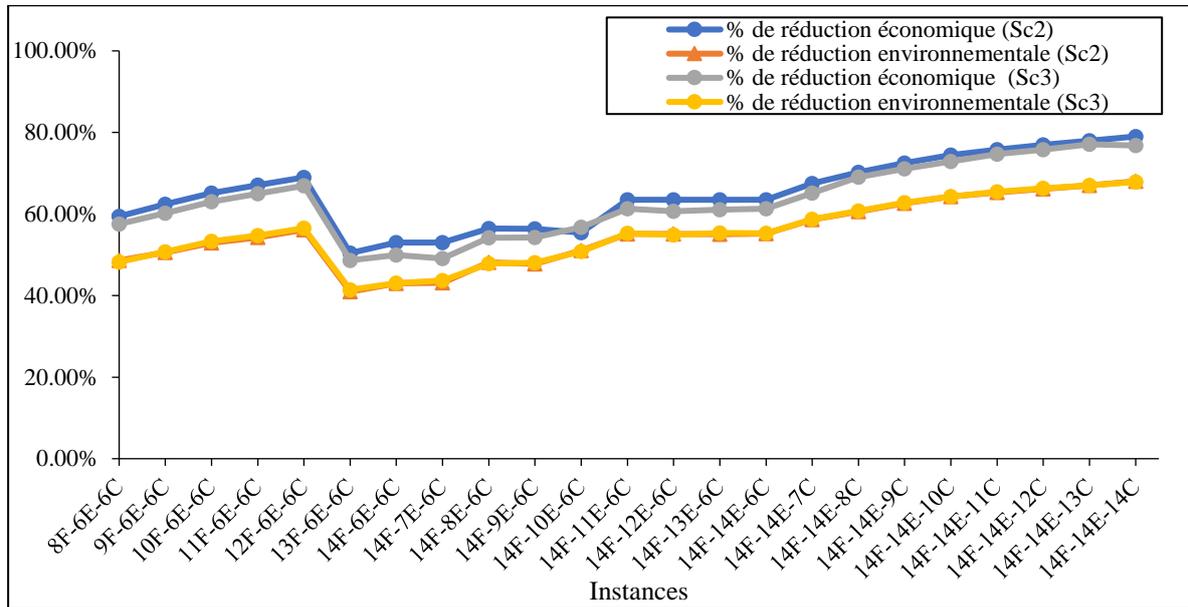


Figure 56. Variation des taux de réduction dans les quatre scénarios

Instances	Scénario 1 (Sc1)		Scénario 2 (Sc2)				Scénario 3 (Sc3)					
	Coût (10 <sup>6</sup> €)	Emissions de CO2 (10 <sup>9</sup> g)	Coût (10 <sup>6</sup> €)	% de réduction économique	Entrepôts ouverts	Emissions de CO2 (10 <sup>9</sup> g)	% de réduction environnementale	Coût (10 <sup>6</sup> €)	% de réduction économique	Emissions de CO2 (10 <sup>9</sup> g)	% de réduction environnementale	Entrepôts ouverts
8F-6E-6C	2.09	1.23	0.849	59.40%	m4	0.63	48.60%	0.889	57.50%	0.634	48.24%	m4
9F-6E-6C	2.35	1.38	0.884	62.39%	m4	0.68	50.61%	0.936	60.21%	0.679	50.71%	m4
10F-6E-6C	2.61	1.53	0.91	65.15%	m4	0.72	52.92%	0.967	63.00%	0.714	53.31%	m4
11F-6E-6C	2.87	1.68	0.945	67.09%	m4	0.769	54.23%	1.01	64.94%	0.761	54.69%	m4
12F-6E-6C	3.13	1.83	0.974	68.93%	m4	0.806	56.10%	1.04	66.94%	0.797	56.55%	m4
13F-6E-6C	3.40	1.99	1.68	50.43%	{m4;m5}	1.17	40.96%	1.74	48.65%	1.16	41.43%	{m4;m5}
14F-6E-6C	3.66	2.15	1.72	52.99%	{m4;m5}	1.22	43.00%	1.83	49.98%	1.22	43.08%	{m4;m5}
14F-7E-6C	3.66	2.15	1.72	53.03%	{m4;m5}	1.22	43.13%	1.86	49.12%	1.21	43.65%	{m4;m7}
14F-8E-6C	3.66	2.15	1.59	56.47%	{m4;m8}	1.11	48.12%	1.68	54.19%	1.12	47.87%	{m4;m8}
14F-9E-6C	3.66	2.15	1.60	56.39%	{m4;m8}	1.12	47.75%	1.67	54.24%	1.11	48.04%	{m4;m8}
14F-10E-6C	3.66	2.15	1.63	55.43%	{m8;m10}	1.05	51.01%	1.58	56.75%	1.06	50.82%	{m8;m10}
14F-11E-6C	3.66	2.15	1.34	63.47%	{m10;m11}	0.963	55.11%	1.42	61.26%	0.959	55.31%	{m10;m11}
14F-12E-6C	3.66	2.15	1.34	63.49%	{m10;m11}	0.963	55.12%	1.44	60.70%	0.968	54.86%	{m10;m11}
14F-13E-6C	3.66	2.15	1.34	63.45%	{m10;m11}	0.965	55.02%	1.42	61.09%	0.958	55.32%	{m10;m11}
14F-14E-6C	3.66	2.15	1.34	63.49%	{m10;m11}	0.962	55.17%	1.42	61.26%	0.96	55.26%	{m10;m11}
14F-14E-7C	4.27	2.50	1.39	67.51%	{m10;m11}	1.03	58.64%	1.49	65.12%	1.03	58.70%	{m10;m11}
14F-14E-8C	4.87	2.85	1.45	70.25%	{m10;m11}	1.12	60.63%	1.51	69.07%	1.12	60.76%	{m10;m11}
14F-14E-9C	5.48	3.21	1.51	72.51%	{m10;m11}	1.20	62.67%	1.59	71.04%	1.19	62.79%	{m10;m11}
14F-14E-10C	6.09	3.56	1.56	74.42%	{m10;m11}	1.27	64.30%	1.65	72.88%	1.27	64.29%	{m10;m11}
14F-14E-11C	6.70	3.92	1.62	75.82%	{m10;m11}	1.36	65.29%	1.69	74.71%	1.36	65.45%	{m10;m11}
14F-14E-12C	7.31	4.28	1.68	76.99%	{m10;m11}	1.45	66.15%	1.77	75.79%	1.44	66.32%	{m10;m11}
14F-14E-13C	7.93	4.64	1.75	77.98%	{m10;m11}	1.53	66.98%	1.82	77.09%	1.53	67.00%	{m10;m11}
14F-14E-14C	8.54	5.00	1.79	79.02%	{m10;m11}	1.60	68.02%	1.98	76.82%	1.61	67.86%	{m11;m13}

**Tableau 45. Résultats des différentes instances**

### 3.2.5. Impact du nombre d'entrepôts ouverts sur les coûts et les émissions de CO<sub>2</sub>

Pan (2010) a présenté la courbe d'évolution des émissions de CO<sub>2</sub> et des coût générés par le transport en fonction du nombre des entrepôts mutualisés ouverts. Selon cet auteur, l'augmentation du nombre de hubs ouverts permet d'améliorer les possibilités de regroupement des flux ce qui permet de massifier, de plus, les flux.

La Figure 57, extraite de (Pan, 2010) montre que les coûts et les émissions engendrés par le transport diminuent lorsque le nombre des entrepôts augmente.

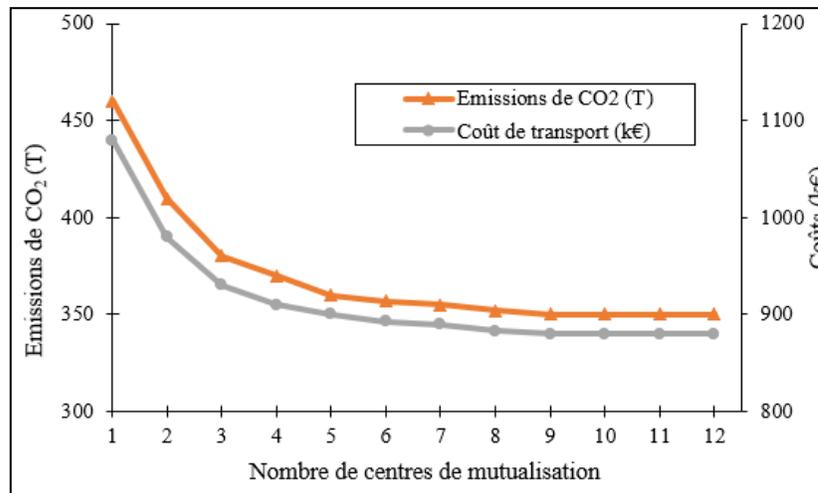


Figure 57. Emissions de CO<sub>2</sub> et coût de transport par rapport au nombre d'entrepôts mutualisés (Pan, 2010)

Nous avons analysé le scénario Sc2 pour vérifier ces conclusions en étudiant l'instance (14F-14E-10C). La Figure 58 montre la variation des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub> engendrés par le transport de marchandises. Il est clair que pour avoir des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub> minimaux, le nombre d'entrepôts à ouvrir doit être supérieur ou égal à cinq entrepôts mutualisés.

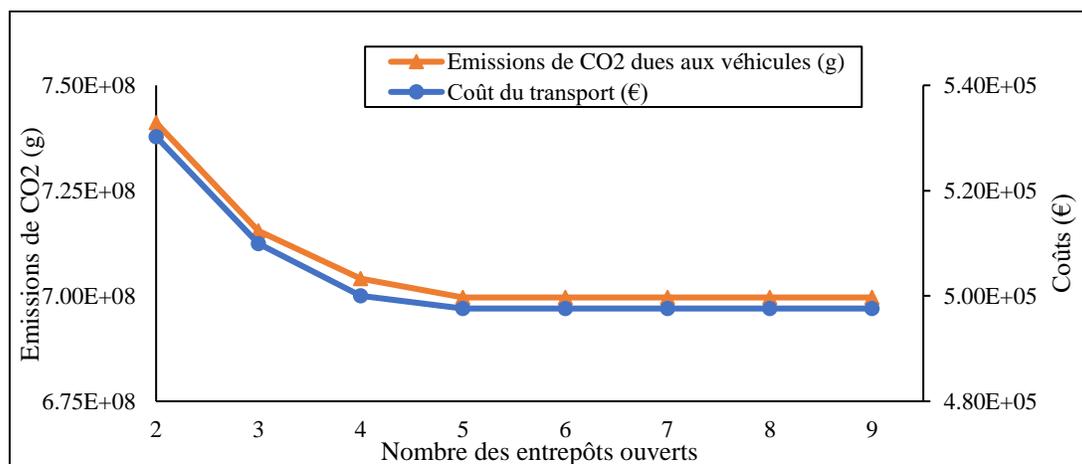
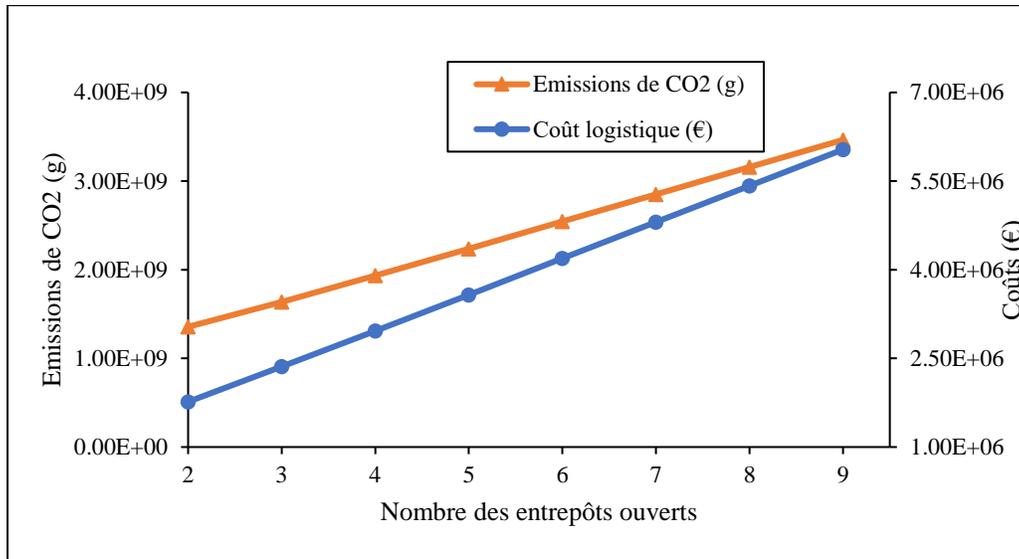


Figure 58. Emissions de CO<sub>2</sub> dues aux véhicules et coût du transport en fonction du nombre des entrepôts ouverts

Pan (2010) a précisé que cette conclusion pourrait être différente lorsqu'on prend en considération les coûts et les émissions de CO<sub>2</sub> engendrés par l'ouverture des hubs. En effet, chaque installation génère des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub> supplémentaires comme dans notre étude.



**Figure 59.** Emissions de CO<sub>2</sub> et coût logistique en fonction du nombre d'entrepôts ouverts

Comme le montre la Figure 59, les coûts logistiques et les émissions de CO<sub>2</sub> ne cessent de croître avec l'augmentation du nombre de hubs ouverts. Par conséquent, le nombre d'entrepôts à ouvrir pour avoir une performance optimale est égal à deux.

En résumé, la conception des réseaux de distribution en optimisant seulement les coûts ou les émissions engendrés par le transport de marchandises nous indique qu'il faut ouvrir un nombre d'entrepôts supérieur ou égal à cinq. Ce résultat n'est pas précis et ne reflète pas la réalité. Le problème de conception des réseaux de distribution est un problème stratégique qui concerne l'orientation générale de l'entreprise et implique des décisions à long terme qui affecte son avenir. Par conséquent, il est indispensable d'évaluer un nombre exhaustif des indicateurs afin de prendre des décisions correctes et de ne pas les regretter après avoir pris des engagements à long terme. Dans notre étude, le nombre optimal d'entrepôts est égal à deux. Nous pouvons conclure que la prise en considération des coûts et des émissions d'installation force le modèle à choisir un nombre minimal de hubs. Celle-ci peut faciliter la gestion des ressources humaines et des flux d'information.

## 4. Conclusion

Nous avons proposé dans ce chapitre un modèle mathématique en MILP consistant à identifier la stratégie optimale pour concevoir un réseau de distribution mutualisé en tenant compte de la durabilité. Sur le plan économique, contrairement à d'autres travaux, nous avons minimisé conjointement les différents coûts logistiques engendrés par le transport, le stockage, la pénalité et l'ouverture des entrepôts. Cela permet de prendre en compte plusieurs contraintes lors de la conception d'un réseau de distribution mutualisé pour se rapprocher de la réalité. Sur le plan

environnemental, nous avons pris en considération les émissions de CO<sub>2</sub> dues aux véhicules par leur fonctionnement et leur amortissement et celles dues aux entrepôts par leur fonctionnement et leur construction. Sur le plan social/sociétal, nous avons évalué le niveau de bruit et le risque accident (corporels, mortels et non mortels). À notre connaissance, cette contribution est la première étude qui prend en considération d'une manière exhaustive de nombreux indicateurs de durabilité lors de la conception d'un réseau de distribution collaboratif. La performance de la collaboration horizontale est étudiée à travers une étude de cas d'un réseau de distribution national. L'optimisation mono-objectif du modèle a montré que la collaboration horizontale permet d'obtenir des résultats notables en termes d'indicateurs évalués. L'optimisation multi-objectif est réalisée par la méthode  $\varepsilon$ -contrainte pour étudier la sensibilité entre les coûts logistiques et les émissions de CO<sub>2</sub> en déterminant la frontière de Pareto. Le niveau de bruit et le risque accident sont évalués après la résolution du modèle. En outre, la méthode d'agrégation est utilisée pour améliorer le niveau de service par la réduction du coût de pénalité. D'autre part, une étude de sensibilité est réalisée pour étudier l'impact de plusieurs paramètres sur les résultats de la mutualisation.

Dans le chapitre suivant, nous étudions le problème de la répartition des gains entre les partenaires en tenant compte des indicateurs de durabilité évalués dans ce chapitre.

# Chapitre 5. Partage de gains par récompense de flexibilité et de durabilité

## 1. Introduction

La collaboration horizontale a démontré, dans le chapitre précédent, qu'elle représente une solution efficace pour améliorer les trois principaux aspects de durabilité. Cependant, plusieurs contraintes peuvent bloquer son succès et entraîner des conflits entre les partenaires. Il s'agit notamment du problème de partage des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub>. Plusieurs études dans la littérature ont abordé ce problème. Néanmoins, l'implication de chaque partenaire dans la durabilité et la flexibilité n'est pas prise en compte lors du partage des coûts. Nous présentons, dans ce chapitre, les différents types d'approches utilisées lors du partage des coûts/bénéfices de la collaboration. Ensuite, nous montrons l'importance de la durabilité et d'introduire la flexibilité au niveau des délais de livraison. Nous proposons deux approches d'allocation qui permettent d'encourager les partenaires à assouplir leurs conditions de livraison afin de participer au mieux à l'amélioration des résultats de la collaboration.

## 2. Typologie des méthodes d'allocation

Il existe plusieurs facteurs à négocier entre les partenaires avant la mise en place de la collaboration. Comme évoqué dans le chapitre 2, le partage des coûts est l'un de ces facteurs qui peuvent bloquer la réussite et la continuité de la collaboration. L'objectif du problème est de savoir comment le coût total ou les économies doivent être répartis entre les partenaires. La littérature (cf. Chapitre 2) évoque une large liste d'articles et d'applications développant plusieurs méthodes d'allocation. Généralement ces méthodes sont classées en deux types : des méthodes classiques et des méthodes basées sur la théorie des jeux coopératifs (Guajardo & Rönnqvist, 2016 ; Kellner & Otto, 2012 ; Ouhader & El Kyal, 2020).

### 2.1. Les méthodes classiques

Concernant les méthodes classiques, elles sont simples à appliquer. Selon (Frisk et al., 2010), les entreprises utilisent principalement les méthodes d'allocation les plus simples qui peuvent être facilement interprétées et offrent une certaine transparence. Comme le montre l'Équation (103), ces méthodes consistent à réaliser la répartition en multipliant le coût total  $C(N)$  de la collaboration par un taux de pondération  $\alpha(i)$  correspondant à chaque partenaire.

$$C(i) = \alpha(i) \cdot C(N); \forall i \in N \quad (103)$$

Le taux  $\alpha(i)$  peut être en lien avec le poids de la marchandise, le nombre de palettes, ou les distances parcourues, etc. Kellner et Otto (2012) ont classé les approches classiques en deux sous-types en se basant sur leurs indépendances de distance.

Dans les approches simples indépendantes de la distance, nous trouvons l'approche EA (*Egalitarian Solution*) qui consiste à diviser le coût de manière égale entre les partenaires. L'approche PA (*Payload Allocation*) est exprimée en fonction de la charge de marchandises. La méthode SPA (*Allocation based on tours Stops and Payload*) consiste à partager les coûts en fonction du nombre total d'arrêts et du poids de marchandises de chaque partenaire. La méthode Volume qui vise à partager les coûts en utilisant la quantité transportée. La deuxième catégorie regroupe les méthodes qui consistent à allouer les coûts en fonction d'un vecteur de pondération dépendant de la distance parcourue, à savoir DDA (*Direct Distance weighted Allocation*), CenA (*Centrality weighted Allocation*), ToKmA (*Tons-Km weighted Allocation*), SDA ainsi que l'approche KTA (*Allocation basing on Tons-km*). Ces approches sont faciles à appliquer mais elles ne sont pas tout à fait équitables parce qu'elles ne considèrent pas les coûts marginaux. D'autre part, le partage des coûts selon la distance (quantité de marchandises) permet à certains partenaires de profiter des autres en envoyant des quantités de marchandises importantes (faibles) à faibles (grandes) distance.

## 2.2. Les méthodes basées sur la théorie des jeux coopératifs

La deuxième façon pour traiter le problème d'allocation est plus avancée et consiste à utiliser des méthodes basées sur la théorie des jeux coopératifs. La majorité des problèmes de transport collaboratif utilisent les concepts et les méthodes de la théorie des jeux coopératifs (Guajardo & Rönnqvist, 2016). Ces approches modélisent un problème d'allocation en tant que jeu coopératif utilitaire transférable et développe des schémas d'allocation des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub> (Kellner & Otto, 2012). Elles ont été largement utilisées car elles sont considérées comme étant efficaces pour résoudre les conflits entre deux ou plusieurs partenaires. Les concepts de la théorie des jeux peuvent facilement être transférés au cadre de la distribution collaborative, et par conséquent, un problème de répartition des coûts ou des émissions de CO<sub>2</sub> pourrait être abordé comme un jeu coopératif (Vanovermeire et al., 2014). Etant donné un ensemble de  $N$  partenaires, chaque partenaire  $p$  ayant un coût de distribution autonome  $C(p)$ , représentant le coût devant être payé par le partenaire  $p$  pour livrer toutes ses commandes. La grande coalition  $N$  est définie comme la coalition de tous les partenaires. Pour toute sous-coalition  $S \subseteq N$ , il existe un coût de distribution  $C(S)$  à payer afin de satisfaire toutes les demandes. La littérature de la collaboration horizontale a identifié plusieurs méthodes basées sur la théorie des jeux coopératifs. Dans ce qui suit, nous citons les méthodes les plus connues et les plus utilisées dans la littérature.

- La méthode Shapley value : la méthode d'allocation Shapley value est l'une des méthodes les plus utilisées dans les jeux coopératifs (Guajardo & Rönnqvist, 2016). Comme le montre l'Équation (104), cette méthode consiste à attribuer à chaque partenaire  $i$  une moyenne de son coût marginal généré par sa participation à la sous-coalition  $S$ .

$$C(i) = \sum_{S \subseteq N: i \in S} \left[ \frac{(|N| - |S|)! (|S| - 1)!}{|N|!} \right] \cdot [C(S) - C(S \setminus \{i\})]; \forall i \in N \quad (104)$$

- La méthode Nucleolus : cette méthode date des travaux de (Schmeidler, 1969). Elle a pour objectif d'allouer les coûts de telle sorte qu'aucun partenaire ne fera mieux en participant ou en quittant la sous-coalition. Etant donné que  $V$  est l'ensemble des vecteurs avec des allocations de bénéfices efficaces, l'Équation (105) représente la série des programmes linéaires à maximiser pour partager les coûts. L'idée est de maximiser le plus petit excédent d'une sous-coalition  $S$ . La caractérisation la plus générale de (Moulin, 1988), qui inclut également des jeux à noyau vide, indique que cette méthode engendre un souci égalitaire des excès de diverses

coalitions (Vanovermeire et al., 2014). En effet, le Nucleolus est l'unique allocation du coût total qui maximisera le plus petit excédent d'une coalition  $N$ .

$$\text{Max}_{x \in V} \left[ \text{Min}_{S \subseteq N} \left( \sum_{i \in S} x_i - C(S) \right) \right] \quad (105)$$

$$\sum_{i \in N} x_i = C(N) \quad (106)$$

- La méthode ECM (*Equal Cost Method*) : comme le montre l'Équation (107), cette méthode distingue les coûts séparables, c'est-à-dire les coûts marginaux de chaque partenaire rejoignant la coalition finale et les coûts non séparables qui sont répartis d'une manière égale entre les différents partenaires.

$$C(i) = C(N) - C(N \setminus i) + \frac{C(N) - \sum_{j \in N} [C(N) - C(N \setminus j)]}{|N|}; \forall i \in N \quad (107)$$

- $\tau$ -Value : cette méthode, appelée aussi CGM (*Cost Gap Method*), est introduite par (Tijs & Driessen, 1986). Elle s'intéresse principalement à la répartition des écarts des coûts. Le coût alloué au partenaire comprend son coût marginal et une part du coût commun non séparable. Dans cette méthode d'allocation, le partenaire quitte la coalition tant qu'il y a une autre où il est le moins responsable des coûts. Cette approche consiste à attribuer au partenaire  $p$  son coût marginal  $m^p$  qui implique le coût résultant de sa participation à la grande coalition en ajoutant également le coût commun non séparable  $g(N)$  multiplié par le taux du coût non séparable.

$$Y^p = m^p + g(N) \cdot w^p / \sum_{p=1}^N w^p; \forall p \in N \quad (108)$$

$$m^p = C(N) - C(N/p); \forall p \in N \quad (109)$$

$$g(N) = C(N) - \sum_{p=1}^N m^p \quad (110)$$

$$w^p = \min_{S \subseteq N} g(S); \forall p \in S \subseteq N \quad (111)$$

- La méthode ACAM (*Avoided Cost Allocation Method*) : selon (Kellner & Otto, 2012), cette approche est similaire à l'approche  $\tau$ -value. En effet, le coût total à répartir est divisé en deux parties : coûts séparables et coûts non séparables en fonction de la pondération donnée exprimant les économies marginales réalisées par chaque partenaire  $r^p$ . La formulation de cette approche est similaire à celle de la méthode  $\tau$ -Value. Il suffit de remplacer  $w^p$  par  $r^p$ , qui désigne le bénéfice restant du partenaire  $p$  lorsqu'il participe à la grande coalition  $N$ .

$$r^p = C(p) - m^p \quad (112)$$

### 3. Les propriétés des méthodes d'allocation de gains

Etant donné la grande variété des méthodes de répartition des coûts, il est indispensable de savoir si une approche est « meilleure » qu'une autre. En général, il n'y a pas de réponse précise à cette question mais dans la littérature, il existe des critères pour évaluer ces approches d'allocation (Young, 1985 ; Tijs & Driessen, 1986).

Par la suite, nous énumérons certaines des propriétés de base extraites de la littérature. Selon (Dahlberg et al., 2017), il n'y a aucune méthode de répartition qui satisfait toutes les propriétés.

- **Parteo-efficacité, (*Pareto efficiency*) (P1) :**

Cette propriété est l'une des propriétés principales de la théorie des jeux coopératifs. Elle stipule que le partenaire ne peut réduire ses coûts sans ajouter des coûts supplémentaires aux autres partenaires. En d'autres termes, la somme des résultats alloués aux collaborateurs doit être égale au coût total de la coalition.

$$\sum_{p \in N} \varphi(p) = C(N) \quad (113)$$

- **Rationalité individuelle, (*Individual Rationality*) (P2)**

Cette propriété garantit qu'aucun partenaire ne paie plus que son coût autonome  $C(p)$  avant collaboration.

$$\varphi(p) \leq C(p) \quad (114)$$

- **Anonymat, *Anonymity* (P3)**

La propriété *Anonymat*, appelée aussi *Symmetry*, impose que les partenaires qui sont identiques (i.e. qui génèrent le même coût dans chaque coalition) doivent se voir attribuer le même coût.

$$C(S \cup i) = C(S \cup j) \rightarrow \varphi(i) = \varphi(j) \quad (115)$$

- **Stabilité, *Stability* (P4)**

Cette propriété assure qu'aucun partenaire ne devrait pouvoir faire mieux en quittant une sous-coalition et en entrant dans une autre.

$$\sum_{p \in N} \varphi(p) \leq C(S) \text{ et } \sum_{p \in N} \varphi(p) = C(N) \quad (116)$$

- **Monotonie coalitionnelle, *Coalitional Monotonicity* (P5)**

Si la valeur d'une coalition augmente (diminue) alors que la valeur de toutes les autres coalitions reste la même, tous les acteurs de cette coalition devraient recevoir une part plus élevée (respectivement, plus faible).

$$v(S) \leq v'(S) \text{ et } v(T) = v'(T) \forall T \neq S \Rightarrow \varphi(i) \leq \varphi'(i) \quad (117)$$

- **Monotonie de la population, *Population monotonicity* (P6)**

Lorsqu'un nouveau partenaire rejoint une coalition avec aucun nouvel excédent, aucun des partenaires ne devrait en bénéficier.

$$\forall i \in N, \text{ si } M = N \cup j \text{ et } v(N) = v(M) \Rightarrow \varphi(i \in N) \geq \varphi(i \in M) \quad (118)$$

- **Propriété factice, *Dummy property* (P7)**

Si un partenaire ajoute zéro avantage à une coalition, il ne devrait pas recevoir une part des gains de la coalition.

$$v(S \cup i) = 0 \forall S \Rightarrow \varphi(i) = 0 \quad (119)$$

- **Additivité, *Additivity* (P8)**

Cette propriété assure la non-influence de la répartition des coûts par la formation des coalitions plus importantes à l'avance. En effet, la répartition des coûts d'une combinaison de coalitions distinctes est égale à la somme des valeurs d'allocation distinctes de ces coalitions.

$$\varphi(i + j) = \varphi(i) + \varphi(j) \quad (120)$$

- **Décentralisation, *Decentralizability* (P9)**

Cette propriété assure que la part d'un partenaire ne dépend que de son propre coût et du coût total de la coalition.

Le Tableau 46 représente un récapitulatif des approches d'allocation ainsi que leurs propriétés respectives. Les cases vides indiquent que la méthode ne vérifie pas la propriété ou bien il n'y a aucune indication la dessus dans la littérature.

Comme évoqué dans le chapitre 2, la majorité des études étudient le problème d'allocation des coûts logistiques, notamment celui du transport. D'autre part, certaines approches ne sont pas suffisamment étudiées pour vérifier d'une manière exhaustive leurs propriétés. En outre, le développement durable est devenu une nécessité à prendre en compte dans les trois niveaux de décision : stratégique, tactique et opérationnelle. Les études l'ont pris en considération uniquement lors de conception des réseaux de distribution et de planification du transport, tandis que, le problème de partage des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub> est étudié sans prendre en considération l'interdépendance entre les différents aspects, ce qui permet à certains partenaires d'en profiter plus que d'autres.

Approche	Référence	Propriété								
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
<b>Approches classiques</b>										
ABC	Vanovermeire et Sörensen (2014)	•				•				
EA	(Habibi et al., 2018 ; Kellner & Otto, 2012)	•								
PA	(Dai et Chen, 2012 ; Ramaekers et al., 2017 ; Liu et al., 2010 ; Kellner & Otto, 2012)	•								
Volume	(Vanovermeire et Sörensen, 2014 ; Defryn et al., 2014 ; Habibi et al., 2018 ; Defryn et al., 2019 ; Hacardiaux et al., 2020)	•				•	•			•
CenA ; ToKmA	Kellner et Otto (2012)	•								
KTA ; DDA	Kellner et Otto (2012)	•	•							
SDA	(Kellner & Otto, 2012 ; Hacardiaux et al., 2020)	•	•							
<b>Approches basées sur la théorie des jeux coopératifs</b>										
ACAM	(Audy et al., 2011 ; Frisk et al., 2010 ; Defryn et al., 2014 ; Kellner & Otto, 2012)	•		•						
CCPS	Algaba et al. (2019)	•		•	•					
Core-centre	Lozano et al. (2013)	•	•	•	•		•	•		
Demand	Engvall et al. (1998)	•	•	•	•		•	•		
Nucleolus										
ECM	(Vanovermeire et Sörensen, 2014 ; Frisk et al., 2010)	•	•	•		•				•
EPM	(Audy et al., 2011 ; Frisk et al., 2010)	•	•	•		•				•
ES	Algaba et al. (2019)				•					
LEPM	Dahlberg et al. (2017)	•	•	•		•				•
Minmax core	Lozano et al. (2013)	•	•		•					
Nucleolus	(Özener and Ergun, 2008 ; Vanovermeire et Sörensen, 2014 ; Massol et Tchong-Ming, 2010 ; Liu et al., 2010 ; Engvall et al., 1998 ; Vos and Raa, 2018 ; Kellner & Otto, 2012)	•	•	•	•		•	•		
Shapley value	(Lozano et al., 2013 ; Özener and Ergun, 2008 ; Vanovermeire et Sörensen, 2014 ; Massol et Tchong-Ming, 2010 ; Habibi et al., 2018 ; Ouhader et El kyal, 2020 ; Krajewska et al., 2008 ; Liu et al., 2010 ; Engvall et al., 1998 ; Wong et al., 2007 ; Vos and Raa, 2018 ; Frisk et al., 2010 ; Sanchez et al., 2016 ; Kellner & Otto, 2012)	•	•	•	•	•		•	•	
WRSA	(Liu et al., 2010 ; Kellner & Otto, 2012)	•		•						
$\tau$ -Value	(Lozano et al., 2013 ; Frisk et al., 2010 ; Engvall et al., 1998 ; Leenders et al., 2017 ; Kellner & Otto, 2012)	•	•	•	•				•	

Tableau 46. Classification des approches selon les propriétés

#### 4. Facteurs d'amélioration des résultats de la collaboration horizontale

L'analyse de la littérature et les conclusions du chapitre 4 ont montré que les résultats de la collaboration horizontale peuvent encore être améliorés en assouplissant les délais de livraison. D'autre part, la plupart des études proposent la prise en compte de la durabilité parce qu'elle est devenue un objectif important pour les entreprises. Dans les paragraphes suivants, nous démontrons l'importance de la flexibilité et de la durabilité lors de l'allocation des avantages de la collaboration.

#### 4.1. Importance de la flexibilité

Les possibilités d'optimisation des transports augmentent avec le nombre de livraisons à effectuer et la flexibilité des conditions de livraison. En général, plus les entreprises imposent des restrictions dans leur planification, plus le coût total augmente.

Certaines études ont démontré que le bénéfice de la collaboration dépend fortement de la flexibilité que chaque partenaire autorise dans ses conditions de livraison. Cette flexibilité peut concerner les dates de livraison et la taille des commandes, etc. [Vanovermeire et al. \(2014\)](#) ont prouvé le rôle de la flexibilité dans la réduction des coûts de transport. Dans le chapitre précédent, nous avons démontré l'importance de la flexibilité dans l'amélioration des trois niveaux de durabilité en réduisant les coûts logistiques, les émissions de CO<sub>2</sub>, le niveau de bruit et le risque d'accident. Les avantages de la flexibilité sont dus à l'exploitation d'un plus grand nombre d'alternatives et de possibilités d'optimisation. En effet, l'assouplissement des conditions de livraison permet de retarder une quantité de marchandises pour créer des plans de distribution optimaux.

L'exemple expliqué dans la Figure 60 montre l'importance de la flexibilité pour réduire le nombre des véhicules nécessaires lors de la planification du transport sur plusieurs périodes.

L'exemple contient trois cas en utilisant un camion de 33 palettes :

- S1 (Sans mutualisation) : chaque fournisseur est indépendant des autres.
- S2 (Mutualisation) : les fournisseurs collaborent pour satisfaire leurs clients en regroupant les marchandises sans assouplir leurs conditions de livraison.
- S3 (Mutualisation avec flexibilité) : les fournisseurs collaborent et assouplissent leurs délais de livraison ; F1 (2 périodes maximum), F2 et F3 (1 période maximum).

La flexibilité des conditions de livraison contribue à la réduction des coûts de distribution en diminuant le nombre de voyages. L'exemple montre que l'assouplissement des délais de livraison des partenaires a davantage amélioré l'efficacité de la collaboration horizontale. La réduction du nombre de voyages réduit la distance totale parcourue, ce qui non seulement minimise les coûts logistiques mais réduit également les émissions de CO<sub>2</sub>, le risque d'accident, le niveau de bruit et les encombrements. Les entreprises peuvent livrer leurs produits à leurs clients en retard, car cela leur permet de réduire les coûts ([Khalifehzadeh et al., 2015](#) ; [Vanovermeire et al., 2014](#)).

Afin d'encourager les partenaires à assouplir leurs conditions de livraison, il sera utile de les récompenser. Étant donné que la collaboration est composée d'entreprises individuelles en concurrence et soucieuses de leurs propres intérêts, le problème de la répartition peut être un facteur important pour récompenser chaque partenaire par rapport à son niveau de flexibilité.

Périodes	Véhicules (33 palettes)	F1		F2		F3	
		Palettes	Véh.	Palettes	Véh.	Palettes	Véh.
T=1	 3	22	1	18	1	30	1
T=2	 3	30	1	20	1	18	1
T=3	 3	20	1	26	1	16	1
T=4	 3	15	1	23	1	21	1
T=5	 3	10	1	26	1	30	1
Total	 15	97	5	113	5	115	5

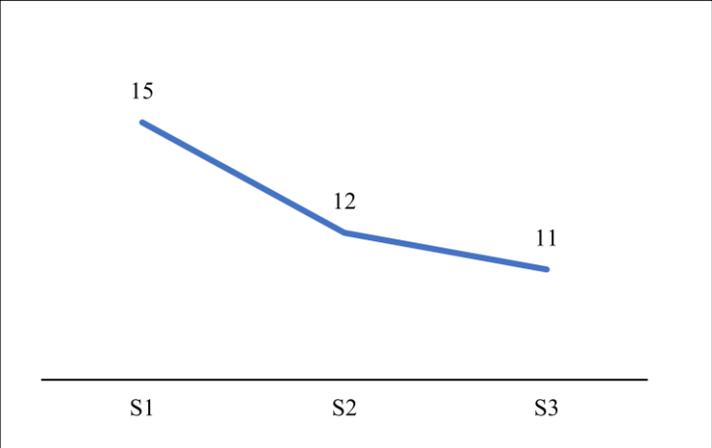
a) Quantités et nombre de véhicules du premier cas

Périodes	Véhicules (33 palettes)	Quantités (palettes)		
		F1	F2	F3
T=1	 3	22	18	23
T=2	 3	30	20	30
T=3	 2	20	26	16
T=4	 2	15	23	21
T=5	 2	10	26	28
Total	 12	97	113	115

b) Quantités et nombre de véhicules du deuxième cas

Périodes	Véhicules (33 palettes)	Quantités (palettes)		
		F1	F2	F3
T=1	 1	0	0	30
T=2	 3	30	38	18
T=3	 3	42	26	16
T=4	 1	0	23	10
T=5	 3	25	26	41
Total	 11	97	113	115

c) Quantités et nombre de véhicules du troisième cas



d) Nombre de véhicules dans les trois cas

Figure 60. Impact de la flexibilité sur les résultats de la collaboration horizontale

## 4.2. Importance de la durabilité

En évaluant les indicateurs présentés dans la Figure 61, nous avons démontré dans le chapitre précédent que les objectifs des trois aspects de durabilité sont contradictoires. Par ailleurs, le problème de partage des coûts est généralement étudié uniquement sur la base des critères économiques (coûts marginaux, coûts non séparables, etc.). Cela permet à certains partenaires de tirer profit des autres partenaires.

Pour cette raison, l'inclusion de l'impact de chaque partenaire sur tous les aspects de la durabilité s'avère être la meilleure solution pour se rapprocher de la réalité et obtenir un partage équitable qui satisfasse tous les partenaires. Cette démarche peut encourager les partenaires à s'impliquer davantage dans l'amélioration de la durabilité et peut les rendre conscients de son importance dans les activités de la logistique et de transport. En outre, elle peut garantir la continuité et le succès de la collaboration. De même que l'implication de la flexibilité, le problème de l'allocation peut être un facteur important pour récompenser la durabilité.

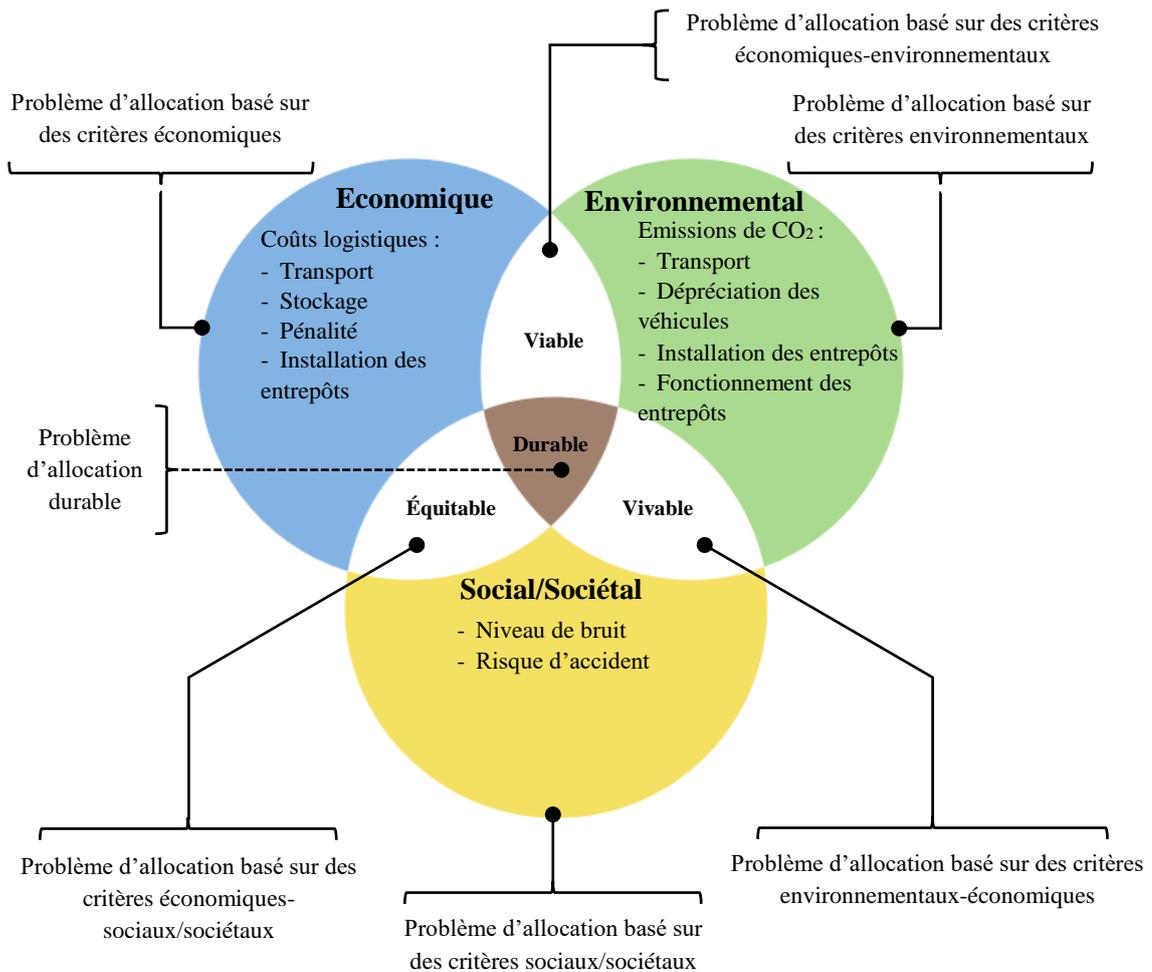


Figure 61. Indicateurs pris en compte lors du partage des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub>

## 5. Proposition d'une approche de partage de gains avec prise en compte de la durabilité et de la flexibilité

Dans cette section, nous étudions le problème de partage des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub> en tenant compte de la flexibilité et des indicateurs de durabilité cités dans le chapitre précédent. L'approche proposée est divisée en deux étapes. La première étape consiste à déterminer un taux global de durabilité et de flexibilité pour chaque partenaire en utilisant les indicateurs évalués au niveau stratégique. Ce taux permet d'identifier l'impact néfaste de chaque partenaire sur les différents niveaux de durabilité, ainsi que sa participation à la flexibilité en termes de délais de livraison. La deuxième étape consiste à introduire ce taux dans deux approches d'allocation, l'une est classique et l'autre est basée sur la théorie des jeux coopératifs.

### 5.1. Détermination du Taux de Durabilité et de Flexibilité (TDF)

Nous nous inspirons de (Rajak et al., 2016) et (Simongáti, 2010) qui évaluent les performances du transport sur la base d'une échelle fournie par des experts et des décideurs du secteur du transport. Contrairement à ces études et étant donné que les entrepôts sont d'importants consommateurs d'énergie et d'importants émetteurs de CO<sub>2</sub>, notre étude est dédiée non seulement au transport mais aussi à l'entreposage. Le taux de durabilité dépend de la combinaison des trois dimensions ; économique, environnemental et social/sociétal.

Les indices et les paramètres suivants sont utilisés pour la modélisation.

- $P$  : Ensemble des partenaires,  $p = 1..P$   
 $I$  : Ensemble des aspects de durabilité,  $i = 1..I$   
 $J$  : Ensemble des critères,  $j = 1..J$   
 $K$  : Ensemble des sous critères,  $k = 1..K$   
 $TD^p_i$  : Taux de l'aspect  $i$  du partenaire  $p$   
 $TD^p_{ij}$  : Taux du critère  $j$  de  $AR^p_i$   
 $TD^p_{ijk}$  : Taux du sous-critère  $k$  de  $AR^p_{ij}$   
 $a_{ijk}$  : Coefficient de pondération de  $AR^p_{ijk}$   
 $TD^p$  : Taux de durabilité du partenaire  $p$   
 $|k|$  : Nombre de sous-ensembles de sous-critères  
 $|j|$  : Nombre de sous-ensembles de critères  
 $|i|$  : Nombre des aspects

Chaque aspect  $i$  de durabilité est composé de différents critères  $j$  qui dépendent principalement d'un ensemble de sous-critères  $k$ . En d'autres termes, les critères sont les indicateurs évalués et les sous-critères représentent les variables dont ils dépendent. Par exemple, le coût du transport est un critère qui appartient au niveau économique et qui dépend principalement des trois sous-critères : distance, quantité et nombre de véhicules. Dans un deuxième temps, nous avons attribué un coefficient de pondération à chaque sous-critère. Le tableau 47 résume la méthode de décomposition appliquée.

La première colonne représente le premier niveau où nous avons placé les trois niveaux de durabilité. La deuxième colonne représente les critères pour chaque niveau. La troisième colonne contient tous les sous-critères. La dernière colonne contient les coefficients de pondération de chaque sous critères.

Aspect ( $TD^p_i$ )	Critère ( $TD^p_{ij}$ )	Sous-Critère ( $TD^p_{ijk}$ )	Coefficient $a_{ijk}$	
Economique $TD^p_1$	Coût de transport $TD^p_{11}$	Distance $TD^p_{111}$	$a_{111}$	
		Quantité $TD^p_{112}$	$a_{112}$	
		Nombre de véhicules $TD^p_{113}$	$a_{113}$	
	Coût de stockage $TD^p_{12}$	Niveau d'inventaire $TD^p_{121}$	$a_{121}$	
		Coût unitaire de stockage $TD^p_{122}$	$a_{122}$	
		Coût unitaire de pénalité $TD^p_{131}$	$a_{131}$	
	Coût de pénalité $TD^p_{13}$	Quantité retardée $TD^p_{132}$	$a_{132}$	
		Coût unitaire d'ouverture $TD^p_{141}$	$a_{141}$	
		Quantité $TD^p_{142}$	$a_{142}$	
	Coût d'ouverture $TD^p_{14}$	Quantité $TD^p_{151}$	$a_{151}$	
		Nombre de véhicules $TD^p_{152}$	$a_{152}$	
		Taux de remplissage $TD^p_{15}$		
	Environnemental $TD^p_2$	Emissions de CO <sub>2</sub> dues au transport $TD^p_{21}$	Distance $TD^p_{211}$	$a_{211}$
			Quantité $TD^p_{212}$	$a_{212}$
			Nombre de véhicules $TD^p_{213}$	$a_{213}$
Emissions de CO <sub>2</sub> dues à la dépréciation des véhicules $TD^p_{22}$		Nombre de véhicules $TD^p_{221}$	$a_{221}$	
		Distance $TD^p_{222}$	$a_{222}$	
Emissions de CO <sub>2</sub> dues au fonctionnement des entrepôts $TD^p_{23}$		Niveau d'inventaire $TD^p_{231}$	$a_{231}$	
Emissions de CO <sub>2</sub> dues à la construction des entrepôts $TD^p_{24}$		Quantité $TD^p_{241}$	$a_{241}$	
Risque d'accident $TD^p_{31}$	Nombre de véhicules $TD^p_{311}$	$a_{311}$		

Social/Sociétal		Distance $TD_{312}^p$	$a_{312}$
$TD_3^p$	Niveau de bruit $TD_{32}^p$	Nombre de véhicules $TD_{321}^p$	$a_{321}$

Tableau 47. Méthode de décomposition

### • Coefficients de pondération

La détermination des coefficients de pondération se fait sur la base de la formulation des indicateurs. En effet, nous avons étudié la formulation  $F$  de chaque indicateur, qui est la combinaison d'un certain nombre des sous-critères. La formulation générale de  $F$  est la suivante.

$$F = F_1 + F_2 + \dots + F_t \quad (121)$$

$$F = \sum_t F_t \quad (122)$$

$$F_t = \left\{ \begin{array}{l} a_t \cdot x \text{ (Sous critère simple)} \\ a_t \cdot x_1 \cdot x_2 \text{ (Multiplication de deux sous critères)} \\ a_t \cdot x_1 / x_2 \text{ (Division de deux sous critères)} \end{array} \right\} \quad (123)$$

La formulation générale  $F_t$  peut être un simple sous-critère, une multiplication ou une division de deux ou plusieurs sous-critères multipliés par un facteur  $a_t$ . La Figure 62 explique la démarche utilisée pour déterminer le coefficient de pondération de chaque sous-critère. À l'aide de l'Équation (121), nous avons déterminé une matrice  $M$  dont les lignes sont la liste des indicateurs  $F_t$  et les colonnes sont les sous-critères  $x_k$ . Les éléments de cette matrice sont déduits de l'Équation (122).

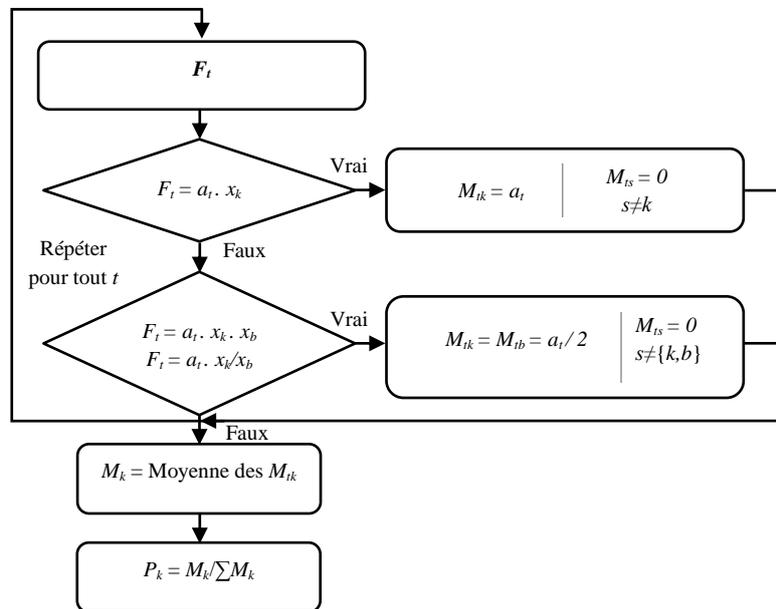


Figure 62. Détermination des coefficients de pondération

Si  $F_t$  est un simple sous-critère, alors l'élément d'intersection  $M_{tk}$  de  $F_t$  et  $x_k$  sera égal au facteur  $a_t$  et les autres éléments de la même ligne seront nuls. Sinon, lorsque  $F_t$  est la combinaison des deux sous-critères, les éléments d'intersection  $M_{tk}$  et  $M_{tb}$  de  $F_t$  et des deux colonnes  $x_k$  et  $x_b$  seront égaux à la moitié du facteur  $a_t$  et les autres éléments seront nuls. La

pondération  $P_k$  de chaque sous-critère est égale au rapport entre la moyenne  $M_k$  et la somme des moyennes (cf. Figure 62).

L'exemple présenté dans le Tableau 48 explique la procédure suivie pour déterminer les coefficients de pondération des sous-critères de l'Équation (124).

$$F = F_1 + F_2 + F_3 = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_1 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_2 / x_3 \quad (124)$$

	$x_1$	$x_2$	$x_3$
$F_1$	$a_1$	0	0
$F_2$	$0.5 \cdot a_2$	$0.5 \cdot a_2$	0
$F_3$	0	$0.5 \cdot a_3$	$0.5 \cdot a_3$
Moyenne	$M_1 = (a_1 + 0.5 \cdot a_2)/3$	$M_2 = (0.5 \cdot a_2 + 0.5 \cdot a_3)/3$	$M_3 = 0.5 \cdot a_3/3$
Pondération	$M_1/(M_1+M_2+M_3)$	$M_2/(M_1+M_2+M_3)$	$M_3/(M_1+M_2+M_3)$

**Tableau 48.** Exemple de détermination des coefficients de pondération

- **Taux de critères**

Les critères sont les indicateurs évalués au niveau stratégique (cf. Tableau 43). Chaque critère dépend d'un ensemble de sous-critères ou de variables. Pour chaque aspect  $i$ , l'Équation (125) du taux du critère  $j$  pour chaque partenaire  $p$  est basée sur les taux des sous-critères avec leurs coefficients de pondération.

$$TD_{ij}^p = \frac{(\sum_{k \in K} TD_{ijk}^p \cdot a_{ijk})}{\sum_{k \in K} TD_{ijk}^p}; \forall p \in N, i \in I, j \in J \quad (125)$$

- **Taux d'aspect**

L'objectif principal de notre approche est d'assurer l'équité du partage des bénéfices entre les partenaires. Par conséquent, nous ne favorisons pas un indicateur par rapport à un autre. Pour chaque partenaire  $p$ , le taux d'aspect  $i$  est égale à la moyenne des taux de critères calculés précédemment.

$$TD_i^p = \frac{1}{|J|} \cdot \sum_{j \in J} TD_{ij}^p; \forall p \in N, i \in I \quad (126)$$

- **Taux de Durabilité TD**

En ce qui concerne le poids des trois niveaux de durabilité, le principe le plus important de la durabilité est que les trois dimensions (économique, environnementale et sociale/sociétale) soient considérées de manière égale (Simongáti, 2010). Par conséquent, les trois principaux niveaux devraient se voir accorder des poids strictement égaux. L'objectif est de proposer une approche de répartition qui tienne compte de la durabilité, ce qui justifie la non-préférence d'un aspect par rapport à un autre. Cette hypothèse est conforme à l'objectif de durabilité. En effet, la préférence d'un aspect par rapport à un autre rend le résultat du problème de partage non équitable, ce qui impacte la continuité de la collaboration. Par conséquent, le taux de durabilité global est déduit par la moyenne des trois niveaux de durabilité.

$$TD^p = \frac{1}{|I|} \cdot \sum_i TD_i^p; \forall p \in N \quad (127)$$

- **Taux de Flexibilité TF**

La flexibilité permet à l'entreprise de s'adapter aux changements de ses exigences et de son environnement. Dans notre cas, la flexibilité fait référence à la capacité d'un partenaire à assouplir ses délais de livraison afin de retarder la livraison d'une certaine quantité. Cela permet d'améliorer davantage le taux de remplissage des véhicules. Pour chaque partenaire  $p$ , le taux de flexibilité est décrit en fonction du nombre de périodes  $x^p$  autorisées pour le retard de livraison.

$$TF^p = 1 - \left( x^p / \sum_{p \in N} x^p \right); \forall p \in N \quad (128)$$

- **Taux de Durabilité et de Flexibilité TDF**

Le taux global de durabilité et de flexibilité  $TDF^p$  de chaque partenaire  $p$  est la combinaison des deux taux calculés précédemment. Les coefficients de pondération ( $a_D$  et  $a_F$ ) permettent de favoriser soit la durabilité ou la flexibilité lors de la répartition des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub>. Ce taux donne un aperçu global du niveau de flexibilité de chaque partenaire et de son impact sur les différents niveaux de durabilité. Il sera utilisé dans la deuxième étape pour réaliser la répartition des coûts entre les partenaires.

$$TDF^p = a_D \cdot TD^p + a_F \cdot TF^p; \forall p \in N \quad (129)$$

$$a_D + a_F = 1 \quad (130)$$

## 5.2. Les approches d'allocation

La dernière étape de notre contribution consiste à développer deux approches pour allouer les coûts et les émissions de CO<sub>2</sub> en introduisant le taux de durabilité et flexibilité.

Les paramètres suivants sont utilisés pour modéliser les approches d'allocation.

$N$  : La grande coalition qui réunit tous les partenaires de la collaboration

$S$  : Sous coalition  $S \subseteq N$

$Y^p$  : Coûts alloués au partenaire  $p$

$C(N)$  : Coûts après mutualisation de l'ensemble de la coalition  $N$

$m^p$  : Coûts marginaux du partenaire  $p$

$w^p$  : Taux du coût non séparable dans la sous-coalition  $S$

$g(N)$  : Coûts non séparables dans la grande coalition  $N$

$B(N/p)$  : Coûts de la mutualisation sans participation des partenaires  $p$

$B(N)$  : Coûts après mutualisation de tous les partenaires

$TDF^p$  : Taux de durabilité et de flexibilité du partenaire  $p$

### 5.2.1. Approche d'allocation basée sur les méthodes classiques

Comme nous avons déjà expliqué dans l'état de l'art (cf. Paragraphe 2.2.1), l'approche classique de la répartition des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub> consiste à adopter une répartition proportionnelle qui peut être basée sur le volume ou le poids global des produits transportés (Vanovermeire & Sørensen, 2014). Malgré sa simplicité et sa facilité, cette approche ne permet pas d'obtenir une répartition équitable entre les partenaires. En effet, elle permet à certains

partenaires de tirer profit des autres partenaires en livrant des quantités de petites tailles de grandes distances. Pour que l'approche soit plus équitable, il s'avère intéressant d'utiliser plusieurs indicateurs possibles en ne se limitant pas uniquement à des critères économiques mais aussi en prenant en considération les indicateurs des trois aspects, à savoir économique, environnemental et social/sociétal. Pour ce faire, nous intégrons dans cette approche le taux qui combine la flexibilité et les trois dimensions. Cette démarche permet de garantir une forte concurrence entre les collaborateurs pour améliorer leur participation à la durabilité et à l'assouplissement des délais de livraison.

$$Y^p = TDF^p \cdot B(N); \forall p \in N \quad (131)$$

### 5.2.2. Approche d'allocation basée sur la théorie des jeux coopératifs

La revue de la littérature propose plusieurs approches d'allocation basées sur la théorie des jeux coopératifs. Parmi ces approches, nous avons choisi l'approche  $\tau$ -value. Cette dernière permet de distinguer les coûts marginaux des coûts non séparables. Elle permet de déterminer le coût généré par la participation de chaque partenaire à la grande coalition. L'approche  $\tau$ -value semble prometteuse en termes d'équité (Curiel, 1997). C'est l'une des meilleures méthodes basées sur la théorie des jeux coopératifs. Elle impose une pénalité aux partenaires qui sont responsables de la perte. De même, cette méthode récompense les partenaires qui sont responsables de la réduction des pertes (Kumar & Khatod, 2018). Cette approche garantit la continuité de la collaboration puisqu'elle est juste et offre une certaine équité entre les partenaires.

L'approche  $\tau$ -value consiste à attribuer au partenaire  $p$  son coût marginal  $m^p$  qui implique le coût résultant de sa participation à la grande coalition en ajoutant également le coût commun non séparable  $g(N)$  multiplié par le taux du coût non séparable.

Il est clair que le coût alloué dans l'Équation (108) ne dépend que des critères économiques. Ce coût est divisé en deux parties. La première partie désigne le coût marginal, qui implique l'impact du partenaire  $p$  dans sa participation à la coalition  $N$ . La deuxième partie désigne le coût non séparable résultant de la mutualisation multiplié par un taux économique.

La mutualisation améliore non seulement l'aspect économique mais aussi les deux autres aspects, à savoir environnemental et social/sociétal. Par conséquent, nous avons introduit le taux de durabilité et de flexibilité au lieu du taux économique.

Dans la nouvelle approche adoptée, nous avons pris en compte l'impact de chaque partenaire sur les différents niveaux de durabilité en récompensant sa flexibilité au niveau des délais de livraison. En outre, selon l'Équation (132), pour tout partenaire  $p$  de la coalition  $S$ , on peut affirmer que s'il est tenu responsable de tous les coûts restants (émissions) de la coalition, il ne restera pas dans cette coalition, s'il existe une autre coalition où il est moins responsable. L'implication du taux de durabilité et de flexibilité représente une récompense qui encourage les différents partenaires à assouplir leurs conditions de livraison et à réduire leurs impacts négatifs sur la durabilité.

$$Y^p = m^p + g(N) \cdot TDF^p / \sum_{p=1}^N TDF^p; \forall p \in N \quad (132)$$

$$m^p = B(N) - B(N/p); \forall p \in N \quad (133)$$

$$g(N) = B(N) - \sum_{p=1}^N m^p \quad (134)$$

$$TDF^p = \min TDF^p(S); \forall p \in S \subseteq N \quad (135)$$

La prise en compte de la flexibilité et de la durabilité garantit une concurrence importante entre les partenaires pour assouplir leurs conditions de livraison et pour améliorer davantage leur participation à la durabilité qui est basée non seulement sur l'aspect économique mais aussi sur l'aspect environnemental et l'aspect social/sociétal. Ces deux approches peuvent être appliquées pour répartir les coûts logistiques ainsi que les émissions de CO<sub>2</sub>.

## 6. Etude de cas

Dans ce paragraphe, nous étudions les performances des approches proposées à travers le même exemple illustratif du chapitre précédent. L'objectif est de comparer les résultats d'allocation (des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub>) obtenus avant et après implication du taux de durabilité et de flexibilité. Nous comparons dans cette section les résultats des quatre approches suivantes :

- ✓ La méthode classique « Volume »
- ✓ La méthode classique durable
- ✓ La méthode  $\tau$ -value
- ✓ La méthode  $\tau$ -value durable

Tout d'abord, nous avons utilisé la programmation C avec Dev C++ pour déterminer les différents taux de durabilité et de flexibilité. Concernant l'approche  $\tau$ -value, le modèle proposé dans le chapitre précédent est résolu pour chaque sous-coalition possible  $S \subseteq N$  (cf. Annexe) en utilisant le solveur IBM ILOG CPLEX. Le coût  $C(S)$  et l'émission de CO<sub>2</sub>  $E(S)$ , ainsi que le taux de durabilité et de flexibilité, sont évalués pour chaque sous-coalition  $S$ .

La durabilité et la flexibilité ont une influence sur les résultats si la sous-coalition est composée d'au moins deux partenaires. C'est pour cette raison que nous avons envisagé ce concept uniquement pour les coalitions de deux partenaires ou plus. Nous avons également considéré que la durabilité et la flexibilité ont le même impact ( $a_D = a_F = 0.5$ ).

Les résultats de l'allocation sont représentés par les deux Figures 63 et 64. Indépendamment de l'approche utilisée, les résultats montrent que les partenaires feront mieux lorsqu'ils collaborent. En effet, les résultats des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub> obtenus par tous les partenaires sont toujours inférieurs aux résultats obtenus lorsqu'ils ne participent pas à la collaboration.

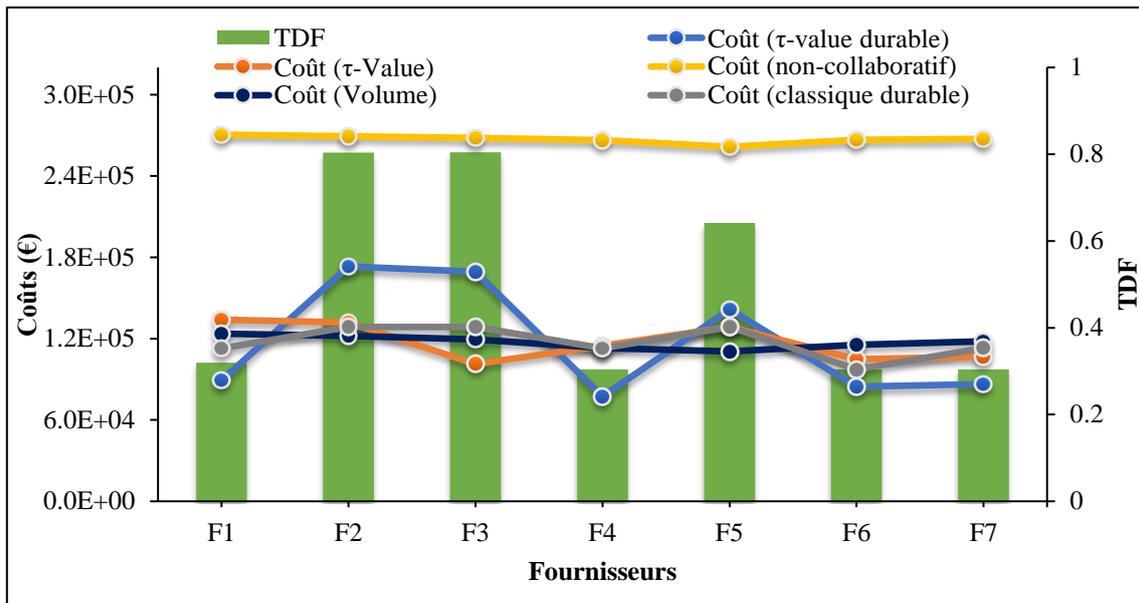
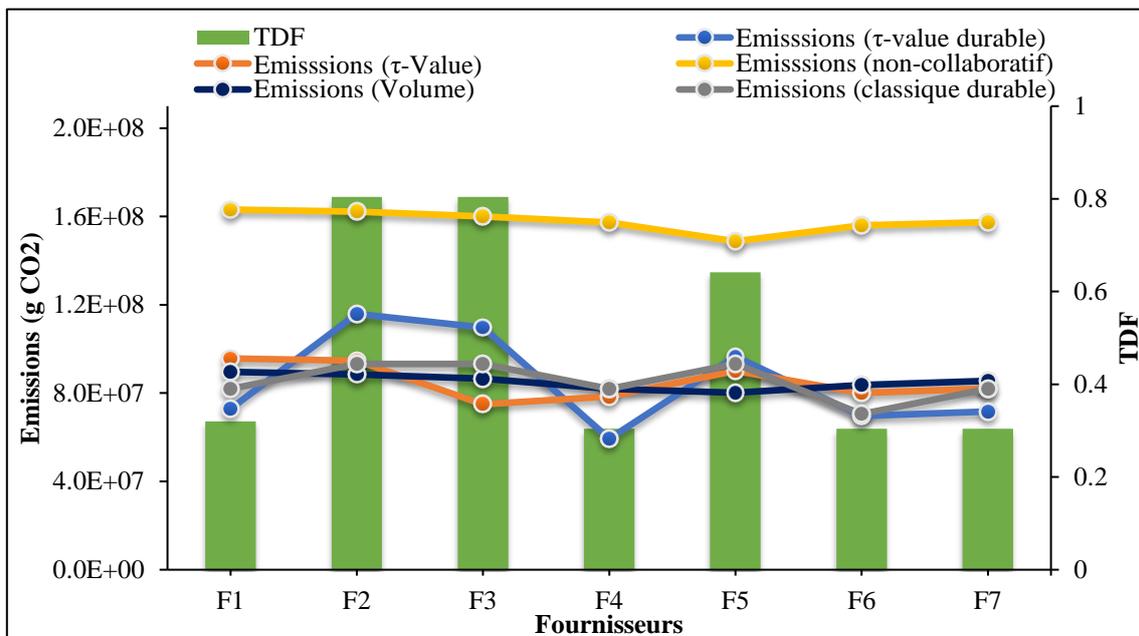


Figure 63. Résultats du partage des coûts

Figure 64. Résultats du partage des émissions de CO<sub>2</sub>

- Comparaison entre les méthodes  $\tau$ -value et  $\tau$ -value durable

Les résultats montrent que le partenaire F2 possède le coût et les émissions de CO<sub>2</sub> les plus élevés. En effet, ce partenaire possède le plus grand impact néfaste sur la durabilité. Il est également le moins flexible en termes de délai de livraison. En revanche, le coût et les émissions de CO<sub>2</sub> attribués au partenaire F4 sont les plus faibles, ce qui se justifie par le fait que ce partenaire est flexible et possède le moins d'impact néfaste sur la durabilité.

L'approche  $\tau$ -value durable permet de récompenser les partenaires pour leur participation à la durabilité. Cette méthode de répartition encourage les partenaires à améliorer leurs performances et à assouplir leurs conditions de livraison. L'ancienne approche  $\tau$ -value ne prend en compte que l'impact des partenaires sur un seul aspect. En effet, pour partager les coûts,

l'approche  $\tau$ -value classique ne prend en considération que l'impact de chaque partenaire sur l'aspect économique. Par conséquent, les résultats de l'allocation ne sont pas équitables. En d'autres termes, un partenaire peut bénéficier d'un coût minimal malgré le fait qu'il soit responsable d'un nombre important d'accidents et d'une quantité importante d'émissions de CO<sub>2</sub>. De cette manière, les autres partenaires seront exploités et opprimés ce qui les pousse à quitter la collaboration. Cela empêche la continuité et la réussite de la collaboration horizontale.

- Comparaison entre la méthode « Volume » et la méthode classique durable

En comparant les résultats obtenus par ces deux approches classiques, nous pouvons constater que bien que les résultats d'allocation soient comparables mais il existe quand même une différence remarquable. En effet, selon les résultats de la méthode « Volume », le coût et les émissions les plus élevés sont attribués au partenaire F1 et les moins élevés sont alloués au partenaire F5. En revanche, selon les résultats de la méthode classique durable, le coût et les émissions les plus élevés sont attribués au partenaire F5 et les moins élevés sont alloués au partenaire F6. La première méthode considère le partenaire F5 comme le moins responsable en coûts et émissions. Ceci est dû à sa part minimale en quantité transportée. En pratique, l'utilisation de la méthode « Volume » peut poser un problème car les distances parcourues pour satisfaire les clients de chaque partenaire ne sont pas prises en considération. L'approche classique durable permet d'ajuster les résultats alloués car elle utilise le taux de durabilité et de flexibilité qui combine plusieurs indicateurs.

- Comparaison entre les méthodes classiques et les méthodes basées sur la théorie des jeux coopératifs

Les deux approches basées sur la théorie des jeux coopératifs sont bien meilleures que les deux approches classiques présentées ci-dessus. En effet, elles permettent d'allouer les coûts et les émissions en tenant compte de l'impact de la participation de chaque partenaire sur les sous-coalitions. Le Tableau 49 représente la classification des quatre approches selon leurs avantages et leurs limites.

Approche	Avantages	Limites
<b>Approches basées sur la théorie des jeux coopératifs</b>		
$\tau$ -value durable	- Prend en considération l'impact de la participation de chaque partenaire aux sous-coalitions - Récompense les partenaires selon leur participation au niveau de la durabilité et de la flexibilité des délais de livraison	- Difficile à appliquer lorsqu'il s'agit d'un nombre important de partenaires
$\tau$ -value	- Prend en considération l'impact de la participation de chaque partenaire aux sous-coalitions	- Difficile à appliquer lorsqu'il s'agit d'un nombre important de partenaires - Ne permet pas de récompenser les partenaires selon leur participation au niveau de durabilité et de flexibilité des délais de livraison
<b>Approches classiques</b>		
Méthode classique durable	- Facile à appliquer - Récompense les partenaires sur leur participation au niveau de la durabilité et de la flexibilité des délais de livraison	- Ne prend pas en considération l'impact de la participation de chaque partenaire aux sous-coalitions
Méthode du Volume	- Facile à appliquer	- N'est pas équitable car elle utilise seulement les quantités transportées

**Tableau 49.** Les avantages et les limites des approches utilisées

## 7. Analyse de sensibilité

Dans ce paragraphe, nous présentons une analyse de sensibilité pour voir l'impact de la durabilité et de la flexibilité sur les résultats de l'allocation des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub>.

- Impact de la flexibilité et de la durabilité sur les résultats de l'allocation

Les quatre figures 65, 66, 67 et 68 représentent les résultats d'allocation des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub> en considérant respectivement la durabilité ( $a_D=1$  ;  $a_F=0$ ) et la flexibilité ( $a_D=0$  ;  $a_F=1$ ).

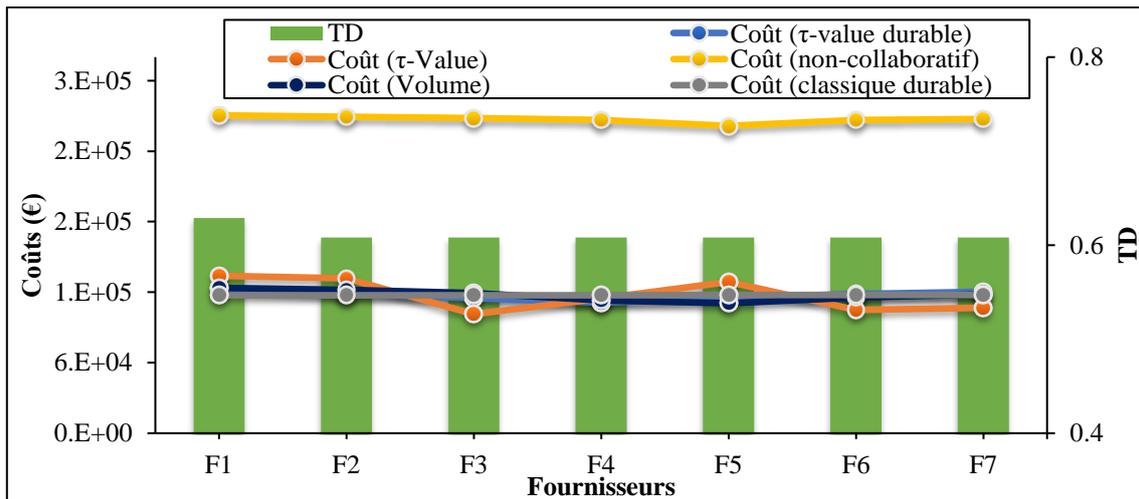


Figure 65. Résultats de l'allocation des coûts en considérant seulement la durabilité ( $a_D=1$  ;  $a_F=0$ )

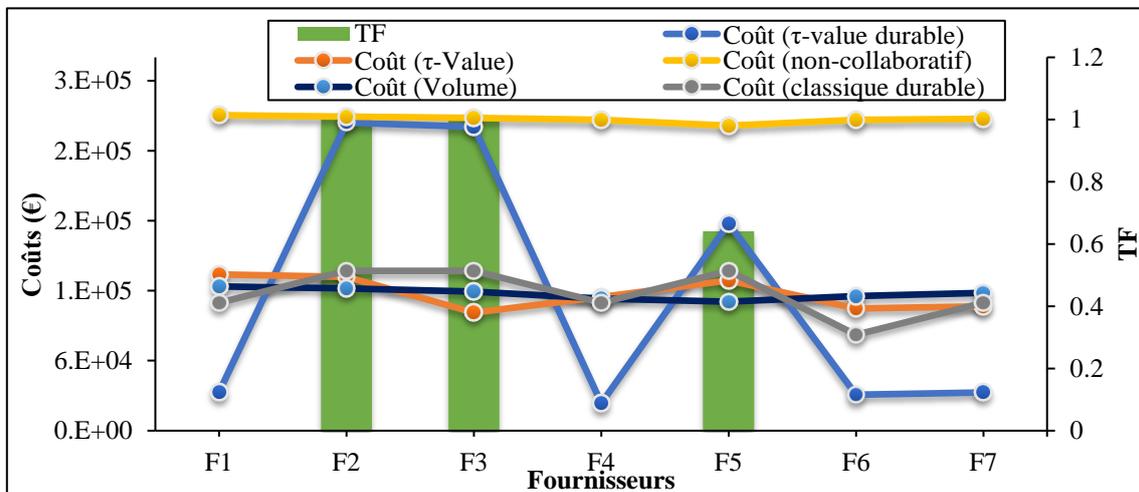


Figure 66. Résultats de l'allocation des coûts en considérant seulement la flexibilité ( $a_D=0$  ;  $a_F=1$ )

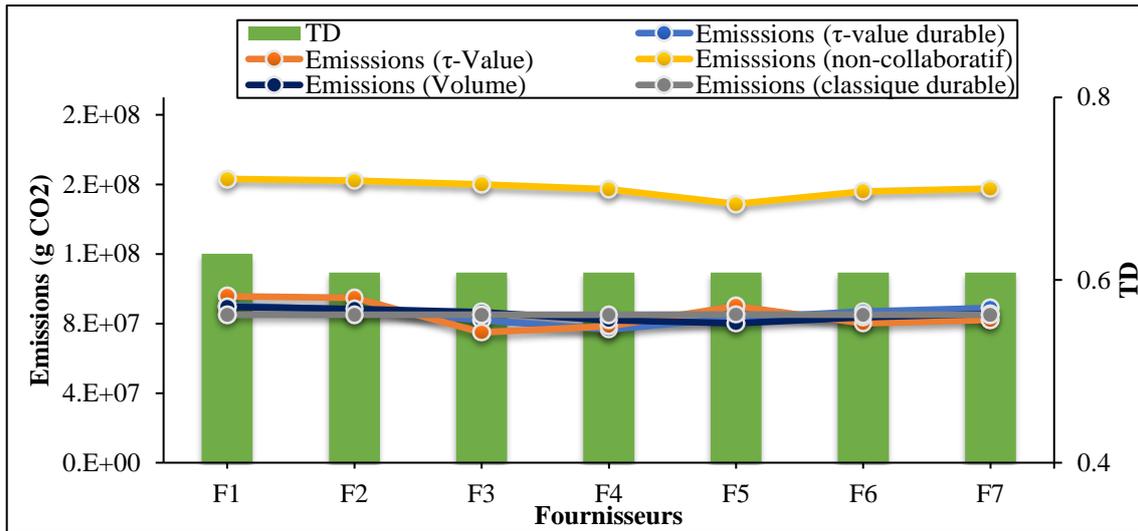


Figure 67. Résultats de l'allocation des émissions de CO<sub>2</sub> en considérant seulement la durabilité ( $a_D=1$  ;  $a_F=0$ )

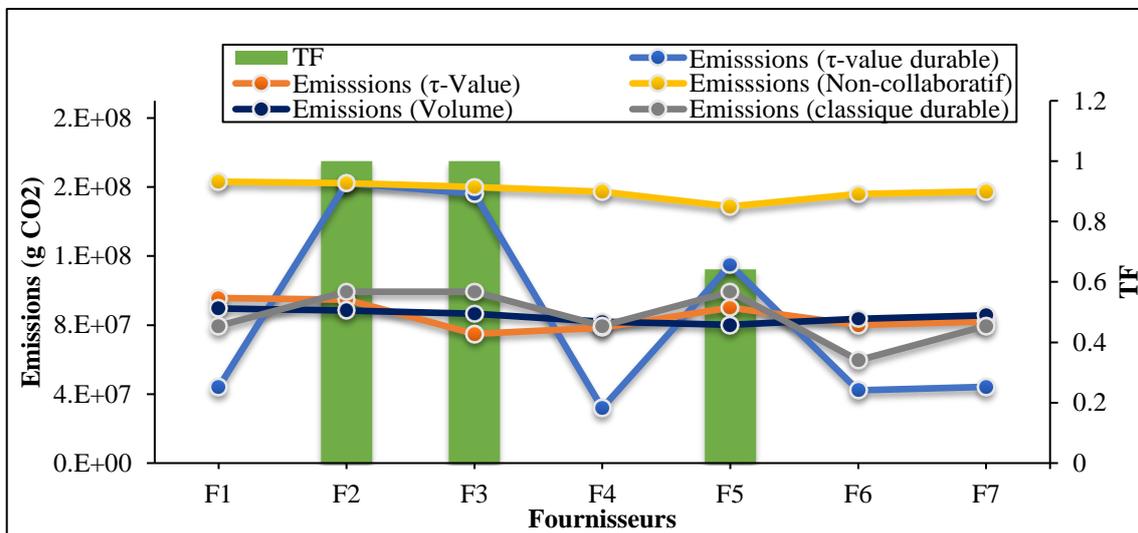


Figure 68. Résultats de l'allocation des émissions de CO<sub>2</sub> en considérant seulement la flexibilité ( $a_D=0$  ;  $a_F=1$ )

Les deux figures 65 et 67 montrent que la répartition, en considérant uniquement l'impact de chaque partenaire sur la durabilité, donne des résultats comparables. L'implication de la durabilité seule permet d'ajuster le résultat de l'allocation en fonction de l'impact de chaque partenaire sur les trois niveaux de durabilité. Les deux figures 66 et 68 indiquent que la prise en compte de la flexibilité uniquement permet de récompenser les partenaires flexibles malgré leurs impacts négatifs sur la durabilité (cas de F1, F4, F6, et F7). Elle pénalise également les partenaires moins flexibles malgré leur participation à la durabilité (cas de F2, F3, et F5). D'autre part, lorsqu'on considère seulement le niveau de flexibilité de chaque partenaire, les coûts et les émissions alloués aux deux fournisseurs F2 et F3 sont pratiquement égaux à ceux des scénarios non-collaboratifs, ce qui ne permet pas d'encourager ces deux partenaires à participer à la collaboration. La prise en compte de la flexibilité uniquement ne donne pas un partage équitable entre les partenaires, d'où l'importance d'introduire également la durabilité.

- Variation des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub> en fonction de l'assouplissement des délais de livraison

La Figure 69 illustre la variation des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub> en fonction du nombre de périodes de flexibilité du partenaire F2. Notons qu'indépendamment de l'approche utilisée pour répartir les coûts et les émissions de CO<sub>2</sub>, les courbes sont décroissantes. Ceci montre que les deux approches durables proposées permettent de récompenser le partenaire qui assouplit ses conditions de livraison.

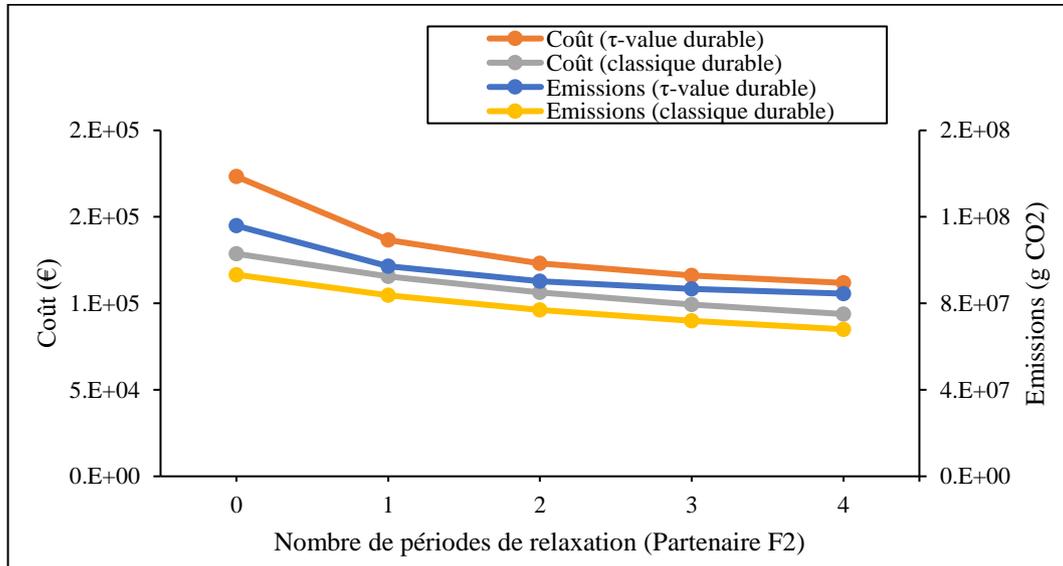


Figure 69. Variation des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub> en fonction de la flexibilité du partenaire F2

## 8. Conclusion

Après une analyse de la revue de la littérature, nous avons développé deux approches d'allocation qui tiennent compte de la participation de chaque partenaire à la durabilité et à la flexibilité. Ces deux approches utilisent un taux combinant tous les indicateurs pour introduire l'impact néfaste de chaque partenaire sur la durabilité. Nous avons prouvé à l'aide de l'exemple du chapitre précédent que nos deux approches permettent de récompenser le partenaire le plus flexible et qui possède le moins d'impact négatif sur la durabilité. Cette démarche assure la continuité de la collaboration et une concurrence importante entre les partenaires pour adoucir leurs conditions de livraison et améliorer leur participation à la durabilité.

Dans la partie suivante, nous traitons le problème de conception des réseaux de distribution collaboratifs à trois échelons.

# Partie 3

Cette troisième partie comporte deux chapitres :

- Chapitre 6 : Conception d'un réseau de distribution collaboratif et durable multi- échelons
- Chapitre 7 : Optimisation des réseaux de distribution collaboratifs par les méta-heuristiques

# Chapitre 6. Conception d'un réseau de distribution collaboratif et durable multi- échelons

## 1. Introduction

En raison des longues distances entre les origines et les destinations, il est préférable de distribuer les marchandises par l'intermédiaire des hubs situés en amont et en aval pour assurer une double massification des flux. L'objectif de ce chapitre est d'étendre le modèle mathématique proposé dans le chapitre 4 pour concevoir un réseau de distribution à trois échelons en tenant compte des trois aspects de la durabilité. L'aspect économique est assuré par la réduction des coûts générés par le transport, le stockage, la manutention, la pénalité due au retard de livraison et l'installation des hubs. L'aspect environnemental est atteint par la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dues aux véhicules et aux hubs. Contrairement au chapitre 4, l'aspect social est garanti en maximisant les opportunités d'emploi créées et en minimisant le risque d'accident et le niveau de bruit. Deux scénarios collaboratifs sont comparés à un scénario non-collaboratif en se basant sur les indicateurs mentionnés. Tout d'abord, les modèles mathématiques proposés sont résolus de manière mono-objective pour définir les solutions optimales. Ensuite, la méthode  $\epsilon$ -contrainte est utilisée pour résoudre les modèles multi-objectifs afin de trouver un bon compromis entre les trois dimensions de la durabilité.

## 2. Positionnement par rapport à la littérature

Les contributions dans ce chapitre sont basées sur l'analyse de la littérature relatives à la conception des réseaux de distribution (cf. Chapitre 2.4).

(i) Il est clair que la plupart des études ont accordé plus d'attention à la durabilité économique, notamment à travers l'évaluation des coûts de transport. Ce résultat est conforme aux conclusions de la littérature concernant la collaboration horizontale (Aloui et al., 2021b ; Mrabti et al., 2021 ; Ouhader & El Kyal, 2020 ; Pan et al., 2019). Les trois objectifs de durabilité sont pris en considération dans ce chapitre afin d'améliorer la performance globale du réseau en matière de durabilité. Le niveau économique ne se limite pas aux coûts de transport, mais comprend également les coûts d'installation des hubs, de stockage, de la manutention et de la pénalité due au retard de livraison. En revanche, le niveau environnemental ne se limite pas aux émissions de CO<sub>2</sub> causées par le transport de marchandises mais comprend également les émissions résultant de la dépréciation des véhicules et celles causées par la construction et l'exploitation des plateformes. Le niveau social/sociétal est évalué par les opportunités d'emplois créées par l'ouverture des plateformes, par le niveau de bruit et par le risque d'accident. Par conséquent, nous adoptons une approche holistique de la durabilité.

(ii) Trois scénarios seront comparés en termes d'indicateurs de durabilité en appliquant l'optimisation mono-objectif et multi-objectif.

(iii) Les réseaux de distribution étudiés dans ce chapitre comprennent trois échelons. La planification du transport est réalisée sur plusieurs périodes et elle est effectuée par une flotte hétérogène des véhicules. Les capacités des hubs sont des variables de décision, qui seront déterminées par les modèles. Ainsi, les surfaces et les ressources utilisées peuvent être dimensionnées de manière optimale.

(iv) L'économie d'échelle dans ce chapitre est modélisée en utilisant une flotte hétérogène de véhicules. Ceci est bénéfique pour la mutualisation puisque l'utilisation d'une flotte hétérogène permet de choisir la capacité appropriée pour chaque expédition ce qui permet d'améliorer le taux de remplissage et par conséquent de réduire la distance totale parcourue.

(v) La résolution des modèles est effectuée d'une manière mono-objective pour définir clairement les solutions optimales et d'une manière multi-objective pour trouver un bon compromis entre les coûts, les émissions et le taux d'embauche.

En plus de ces contributions, le présent chapitre étend le problème de conception du réseau de distribution traité dans le chapitre 4. Sur le plan pratique, les demandes des clients sont commandées sur un horizon de temps. Par conséquent, pour contribuer à une meilleure approximation de la réalité pratique, la planification du transport dans ce chapitre est effectuée sur plusieurs périodes. En effet, l'optimisation des quantités à livrer, le nombre de véhicules et leurs types, le niveau d'inventaire et les quantités retardées, devient une question non seulement de « ou » mais aussi de « quand ». Ainsi, l'envoi des quantités sur un horizon de temps permet d'ajuster les capacités des hubs à installer.

### **3. Formulation du problème**

#### **3.1. Description du réseau de distribution étudié**

Le réseau de distribution visé est constitué de fournisseurs qui collaborent pour livrer leurs produits aux détaillants par l'intermédiaire des entrepôts et des centres de distribution mutualisés (cf. Figure 70).

Ce problème est défini comme un HLP (*Hub Location Problem*). En effet, l'objectif est de déterminer le nombre et les localisations des deux types de hubs (entrepôts et centres de distribution). Ces hubs ont des capacités limitées, qui seront déterminées à partir des modèles en fonction des quantités entrantes dans chaque hub. Nous supposons que les hubs en amont ont des délais de stockage. D'autre part, nous supposons que les hubs en aval n'ont pas de délais de stockage ; ils sont similaires aux plateformes de cross-docking. La fonction principale de ces plateformes est le tri des marchandises et leur distribution aux détaillants. Les autres objectifs consistent à affecter les fournisseurs et les centres de distribution aux entrepôts et les détaillants aux centres de distribution. En outre, les modèles mathématiques aident à déterminer les quantités livrées à chaque période dans les trois parties (amont, intermédiaire et aval), le niveau des stocks dans les entrepôts, les quantités retardées ainsi que le nombre et le type de véhicules utilisés.

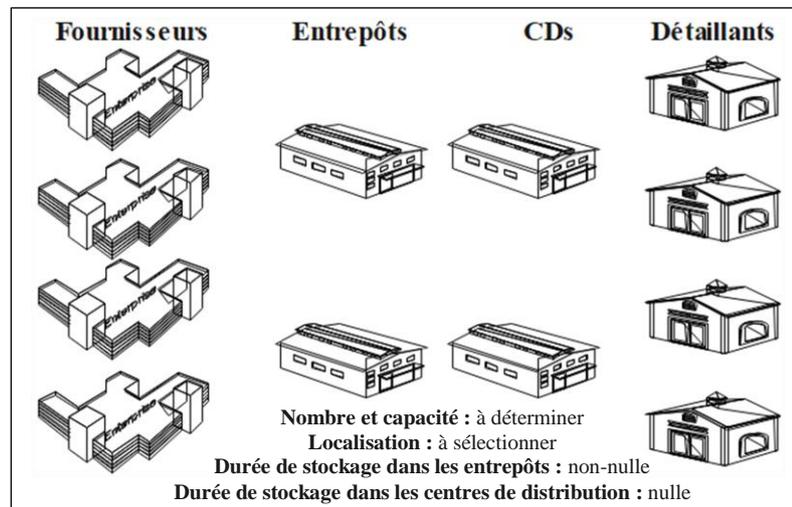


Figure 70. Constitution du réseau de distribution étudié

### 3.2. Indicateurs de durabilité

Nous avons montré dans les chapitres précédents que la durabilité est l'un des défis les plus importants de nos jours et que la collaboration horizontale est l'une des solutions les plus efficaces pour surmonter ce défi. Cette performance est due au partage des ressources et des moyens et à la massification des flux par le regroupement des marchandises dans les hubs. Dans le chapitre 4, nous avons utilisé plusieurs indicateurs de durabilité pour concevoir un réseau de distribution à deux échelons en utilisant une flotte homogène de véhicules et des entrepôts possédant des capacités fixes de stockage. Dans le présent chapitre, nous développons une extension du modèle proposé dans le chapitre 4. En plus des indicateurs pris en compte dans les chapitres précédents, nous ajoutons deux autres indicateurs, à savoir le coût de maintenance et le taux d'embauche (cf. Tableau 50).

Dimension économique	Dimension environnementale	Dimension sociale
- Coût de transport	- Emissions de CO <sub>2</sub> dues aux véhicules (leur utilisation et leur amortissement)	- Taux d'embauche
- Coût de stockage	- Emissions de CO <sub>2</sub> dues aux hubs (leur fonctionnement et leur construction)	- Risque accident
- Coût de pénalité		- Niveau de bruit
- Coût de maintenance		
- Coût d'installation		

Tableau 50. Indicateurs de durabilité évalués

#### 3.2.1. Indicateurs économiques

Les paramètres utilisés pour formuler les indicateurs économiques sont représentés dans le Tableau 51.

Paramètre	Désignation	Unité
$AP$	Surface d'une palette	$m^2$
$CD_t^p$	Coût de pénalité du produit $p$ à la période $t$	€
$Cd_t^p$	Coût unitaire de pénalité du produit $p$ à la période $t$	€/palette
$cl^p$	Coût unitaire de chargement du produit $p$	€/palette
$cs^p$	Coût unitaire du tri du produit $p$	€/palette
$CS_{m,t}^p$	Coût de stockage du produit $p$ dans le hub $m$ à la période $t$	€
$CS_m^p$	Coût unitaire de stockage du produit $p$ dans le hub $m$ à la période $t$	€/palette
$CT_{i,j,t}^p$	Coût du transport entre l'origine $i$ et la destination $j$ par le véhicule $v$ à la période $t$	€
$cu^p$	Coût unitaire de déchargement du produit $p$	€/palette

$C_o^v$	Coût unitaire de transport d'un véhicule vide de type $v$	€/km
$C_q^v$	Coût unitaire de transport d'un véhicule de type $v$ entièrement chargé	€/km
$CW_m$	Coût d'ouverture du hub $m$	€
$Cw_m$	Coût unitaire d'ouverture du hub $m$	€/m <sup>2</sup>
$d_{i,j}$	Distance entre l'origine $i$ et la destination $j$	Km
$Q^v$	Capacité des véhicules de type $v$	Palettes
$q_{i,j,t}^{p,v}$	Quantité transportée de l'origine $i$ à la destination $j$ par le véhicule de type $v$ à la période $t$	Palettes
$N_{i,j,t}^v$	Nombre de véhicules de type $v$ utilisés entre les deux nœuds $i$ et $j$ à la période $t$	Véhicules
$I_{m,t}^p$	Niveau d'inventaire du produit $p$ dans le hub $m$ à la période $t$	Palettes
$Wd_t^p$	Quantité du produit $p$ retardée à la période $t$	Palettes
$W_j^p$	Quantité du produit $p$ demandée par le détaillant $j$ à la période $t$	Palettes
$A_m$	Surface d'un hub $m$	m <sup>2</sup>
$\alpha$	Coefficient supérieur ou égal à 2	
$C_m$	Capacité du hub $m$	Palettes

Tableau 51. Paramètres utilisés pour la formulation des indicateurs économiques

### a. Coût de transport

L'utilisation d'une flotte hétérogène de véhicules permet de planifier efficacement les plans de transport et d'améliorer le taux de remplissage (Serper & Alumur, 2016). La formulation du coût de transport est expliquée dans le chapitre 3. Elle dépend de la quantité transportée, du type de véhicule (capacité et coût unitaire) et du nombre de véhicules ou de déplacements nécessaires. Le coût de transport entre deux nœuds  $i$  et  $j$  utilisant le véhicule  $v$  à la période  $t$  est donné par l'Équation (136).

$$CT_{i,j,t}^v = d_{i,j} \cdot \left( \frac{C_q^v - C_o^v}{Q^v} \cdot \sum_p q_{i,j,t}^{p,v} + 2 \cdot C_o^v \cdot N_{i,j,t}^v \right) \quad (136)$$

### b. Coût de stockage

Dans ce chapitre, le coût de stockage ne concerne que les entrepôts mutualisés. Cette hypothèse permet d'améliorer le niveau de service dans la partie aval du réseau de distribution. Ce coût, donné par l'Équation (137), est obtenu en multipliant le coût unitaire par le niveau d'inventaire dans l'entrepôt  $m$  pour chaque produit  $p$  à la période  $t$ .

$$CS_{m,t}^p = I_{m,t}^p \cdot CS_m^p \quad (137)$$

### c. Coût de pénalité

Ce coût ne change pas par rapport à celui présenté dans le chapitre 4. Il est déterminé en multipliant le coût unitaire de pénalité de chaque produit  $p$  par la quantité retardée pendant chaque période  $t$ .

$$CD_t^p = Wd_t^p \cdot Cd_t^p \quad (138)$$

### d. Coût d'installation des hubs

Comme évoqué précédemment, les capacités des hubs du réseau de distribution à concevoir sont inconnues et seront déterminées par les modèles mathématiques. Le coût d'installation du hub  $m$  est la multiplication de la surface de construction par le coût d'installation unitaire (cf. Équation (139)). La zone du hub est constituée d'une surface de stockage et d'un espace pour le transfert et la circulation des marchandises. Par conséquent, elle est toujours supérieure à la surface destinée au stockage et au tri, qui est égale à la surface d'une palette multipliée par la capacité du hub. Nous supposons que la surface de construction dépend

linéairement de la surface du hub avec un coefficient  $\alpha$  qui est toujours supérieur à l'unité. La surface d'un hub  $m$  à construire est donnée par l'Équation (140).

$$CW_m = A_m \cdot Cw_m \quad (139)$$

$$A_m = \alpha \cdot AP \cdot C_m \quad (140)$$

### e. Coût de manutention

Contrairement au chapitre 4 et étant donné que le réseau de distribution traité est à trois échelons, il est nécessaire d'évaluer le coût de manutention (cf. Équation (141)).

$$CH_{m,t}^p = \sum_{i,v} q_{i,m,t}^{p,v} \cdot cu^p + \sum_{i,v} q_{i,m,t}^{p,v} \cdot cs^p + \sum_{j,v} q_{m,j,t}^{p,v} \cdot cl^p \quad (141)$$

### 3.2.2. Indicateurs environnementaux

Le Tableau 52 présente les paramètres utilisés pour modéliser les émissions de CO<sub>2</sub>.

Paramètre	Désignation	Unité
$EC_m$	Emissions de CO <sub>2</sub> dues à la construction du hub $m$	$g \text{ CO}_2$
$Ec_m$	Emissions unitaires de CO <sub>2</sub> dues à la construction du hub $m$	$g \text{ CO}_2/m^2$
$EM^v$	Emissions de CO <sub>2</sub> dues à l'amortissement du véhicule $v$	$g \text{ CO}_2/km$
$EO_{m,t}$	Emissions de CO <sub>2</sub> dues au fonctionnement du hub $m$ à la période $t$	$g \text{ CO}_2$
$Eo_{m,t}$	Emissions unitaires de CO <sub>2</sub> dues au fonctionnement du hub $m$ à la période $t$	$g \text{ CO}_2/kwh$
$E_o^v$	Emissions unitaires de CO <sub>2</sub> dues au véhicule de type $v$ vide	$g \text{ CO}_2/km$
$E_q^v$	Emissions unitaires de CO <sub>2</sub> dues au véhicule de type $v$ entièrement chargé	$g \text{ CO}_2/km$
$EV_{i,j,t}^v$	Emissions de CO <sub>2</sub> du véhicule de type $v$ entre l'origine $i$ et la destination $j$ au cours de la période $t$	$g \text{ CO}_2$
$W_{m,t}$	Energie consommée par le hub $m$ à la période $t$	$kwh$

**Tableau 52.** Paramètres utilisés pour la formulation des indicateurs environnementaux

#### a. Émissions de CO<sub>2</sub> dues aux véhicules

Comme le montre l'Équation (142), les émissions de CO<sub>2</sub> dépendent de la quantité de marchandises transportées entre l'origine  $i$  et la destination  $j$  ainsi que du type de véhicules utilisé (capacité  $Q^v$ , facteurs d'émissions  $E_o^v$  et  $E_q^v$ ).

$$EV_{i,j,t}^v = d_{i,j} \cdot \left( \frac{E_q^v - E_o^v}{Q^v} \right) \cdot \sum_p q_{i,j,t}^{p,v} + 2 \cdot (E_o^v + EM^v) \cdot N_{i,j,t}^v \quad (142)$$

#### b. Émissions de CO<sub>2</sub> dues aux hubs

La formulation des émissions de CO<sub>2</sub> engendrées par les hubs est bien expliquée dans le chapitre 3. Ces émissions sont causées par le fonctionnement (cf. Équation (143)) et la construction (cf. Équation (144)) des hubs qui peuvent être des entrepôts ou des centres de distribution.

$$EO_{m,t} = Eo_{m,t} \cdot W_{m,t} \quad (143)$$

$$EC_m = Ec_m \cdot A_m \quad (144)$$

### 3.2.3. Indicateurs sociaux/sociétaux

Comme évoqué précédemment, la conception d'un réseau de distribution à trois échelons nécessite l'ouverture d'un nombre important de hubs (entrepôts et centres de distribution), ce

qui permet de créer des nouvelles opportunités d'emplois. Ainsi, en plus des indicateurs sociaux utilisés dans le chapitre 4, nous évaluons le taux d'embauche.

La formulation du taux d'embauche est égale au nombre d'emplois créés pour manipuler 100 palettes  $E_m$  multiplié par la quantité entrante dans chaque hub (cf. Équation (145)).

$$TE_{mt} = E_m \cdot \sum_{i,v,p} q_{i,m,t}^{p,v} / 100 \quad (145)$$

### 3.3. Modèles mathématiques

Afin d'exposer formellement le problème, nous introduisons la notation suivante, qui sera utilisée tout au long de ce chapitre :

$F$  : Ensemble de fournisseurs

$W$  : Ensemble d'entrepôts

$D$  : Ensemble de centres de distribution

$R$  : Ensemble de détaillants

$V$  : Ensemble de véhicules

$P$  : Ensemble de produits

$T_1$  : Ensemble de périodes

$T_2 = T_1 + \{max(a^p); \forall p \in P\}$  : Ensemble de périodes avec considération de la flexibilité au niveau du retard de livraison

En plus des paramètres définis dans les tableaux ci-dessus, les variables de décision, présentées dans le Tableau 53, sont utilisées dans les modèles proposés.

	Paramètre	Désignation	Unité
Variables continues	$q_{i,j,t}^{p,v}$	Quantité du produit $p$ transportée par le véhicule de type $v$ entre les deux nœuds $i$ et $j$ à la période $t$	Palettes
	$I_{m,t}^p$	Niveau d'inventaire du produit $p$ dans l'entrepôt $m$ à la période $t$	Palettes
	$C_m$	Capacité du hub $m$	Palettes
	$N1_{i,j,t}^v$	Nombre de véhicules de type $v$ circulant entre deux nœuds $i$ et $j$ de premier échelon à la période $t$	Véhicules
	$N2_{i,j,t}^v$	Nombre de véhicules de type $v$ circulant entre deux nœuds $i$ et $j$ de deuxième échelon à la période $t$	Véhicules
	$N3_{i,j,t}^v$	Nombre de véhicules de type $v$ circulant entre deux nœuds $i$ et $j$ de troisième échelon à la période $t$	Véhicules
	$Wd_t^p$	Quantité du produit $p$ retardée à la période $t$	Palettes
	$A_m$	Surface du hub $m$	$m^2$
Variables binaires	$y_m$	1: Si l'entrepôt $m$ est ouvert 0: Sinon	
	$z_k$	1: Si le centre de distribution $k$ est ouvert 0: Sinon	
	$x_{i,m}$	1: Si le fournisseur $i$ est affecté à l'entrepôt $m$ 0: Sinon	
	$w_{m,k}$	1: Si l'entrepôt $m$ est affecté au centre de distribution $k$ 0: Sinon	
	$g_{k,j}$	1: Si le client $j$ est affecté au centre de distribution $k$ 0: Sinon	
Indicateurs évalués	$CT$	Coût total du transport	€
	$CS$	Coût de stockage	€
	$CD$	Coût de pénalité due au retard de livraison	€
	$CW$	Coût d'installation des hubs	€
	$CH$	Coût de manutention	€
	$EV$	Emissions de CO <sub>2</sub> dues aux véhicules	g CO <sub>2</sub>
	$EW$	Emissions de CO <sub>2</sub> dues aux hubs	g CO <sub>2</sub>
	$TE$	Taux d'embauche	

**Tableau 53.** Variables de décision utilisées et indicateurs évalués

Par la suite, nous présentons les fonctions objectifs et les contraintes utilisées dans chaque scénario.

### 3.3.1. Fonction multi-objectif

L'objectif dans ce chapitre est de prendre en considération les trois aspects de la durabilité, à savoir l'aspect économique, l'aspect environnemental et l'aspect social/sociétal. Par conséquent, la fonction multi-objectif consiste à réduire  $\Psi_1$  et  $\Psi_2$  ainsi que de maximiser  $\Psi_3$ . La première fonction  $\Psi_1$  à minimiser est égale au coûts logistiques engendrés par le transport, le stockage, le retard de livraison, l'installation des hubs et la manutention des marchandises dans les hubs. La deuxième fonction  $\Psi_2$  à minimiser est égale à la somme des émissions de CO<sub>2</sub> engendrées par les véhicules et les hubs. La troisième fonction  $\Psi_3$  à maximiser est égale au taux d'embauche nécessaire pour la collaboration horizontale.

$$\text{Min } \{\Psi_1; \Psi_2\} \wedge \text{Max } \{\Psi_3\} \quad (146)$$

$$\Psi_1 = CT + CS + CD + CW + CH \quad (147)$$

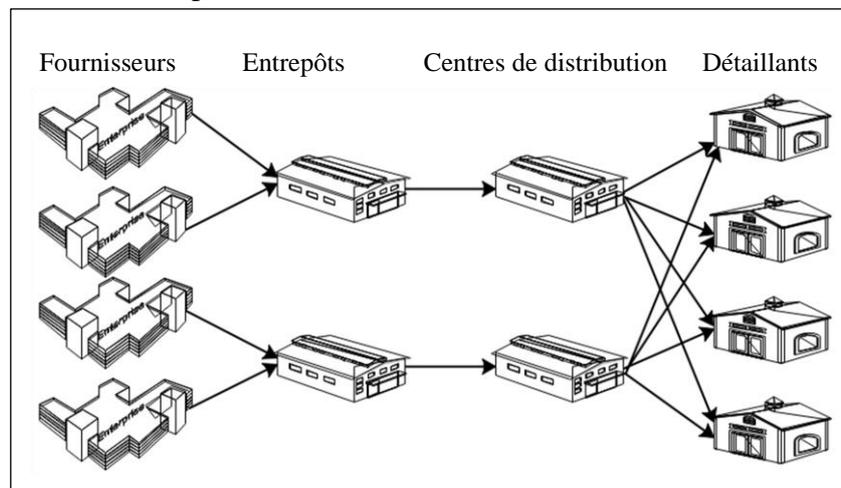
$$\Psi_2 = EV + EW \quad (148)$$

$$\Psi_3 = TE \quad (149)$$

Dans ce chapitre, nous étudions trois scénarios : un scénario non collaboratif et deux scénarios collaboratifs. Dans ce qui suit, nous expliquons chaque scénario et nous présentons les contraintes.

### 3.3.2. Premier scénario collaboratif

Comme le montre la Figure 71, dans ce scénario, chaque fournisseur est censé être affecté à un seul entrepôt (*Single Allocation*). Cette hypothèse permet de réduire les coûts des expéditions impliquées, car il est plus économique d'expédier une plus grande quantité à un seul entrepôt que d'expédier de plus petites quantités à plusieurs entrepôts (Cheong et al., 2007). Cette hypothèse facilite également la gestion des entrepôts (Pan et al., 2013). Nous supposons également qu'un entrepôt ne peut être affecté qu'à un seul centre de distribution, et qu'un détaillant peut être affecté à plusieurs centres de distribution.



**Figure 71.** Configuration du premier scénario collaboratif

Les contraintes suivantes sont utilisées pour modéliser ce scénario.

$$CT = \sum_{i \in F, m \in W, t \in T_2, v \in V} CT_{i,m,t}^v + \sum_{m \in W, k \in D, t \in T_2, v \in V} CT_{m,k,t}^v + \sum_{k \in D, j \in R, t \in T_2, v \in V} CT_{k,j,t}^v \quad (\text{Sc1-1})$$

$$CS = \sum_{m \in W, p \in P, t \in T_2} CS_{m,t}^p \quad (\text{Sc1-2})$$

$$CD = \sum_{p \in P, t \in T_2} CD_t^p \quad (\text{Sc1-3})$$

$$CW = \sum_{m \in W} CW_m + \sum_{k \in D} CW_k \quad (\text{Sc1-4})$$

$$CH = \sum_{m \in W, p \in P, t \in T_2} CH_{m,t}^p + \sum_{k \in D, p \in P, t \in T_2} CH_{k,t}^p \quad (\text{Sc1-5})$$

$$EV = \sum_{i \in F, m \in W, t \in T_2, v \in V} EV_{i,m,t}^v + \sum_{m \in W, k \in D, t \in T_2, v \in V} EV_{m,k,t}^v + \sum_{k \in D, j \in R, t \in T_2, v \in V} EV_{k,j,t}^v \quad (\text{Sc1-6})$$

$$EW = \sum_{m \in W} EC_m + \sum_{k \in D} EC_k + \sum_{m \in W, t \in T_2} y_m \cdot EO_{m,t} + \sum_{k \in D, t \in T_2} z_k \cdot EO_{k,t} \quad (\text{Sc1-7})$$

$$TE = \sum_{m \in W, t \in T_2} TE_{m,t} + \sum_{k \in D, t \in T_2} TE_{k,t} \quad (\text{Sc1-8})$$

$$\sum_{i \in F, v \in V} q_{i,m,t}^{p,v} + I_{m,(t-1)}^p \geq \sum_{k \in D, v \in V} q_{m,k,t}^{p,v}; \forall t \in T_2, m \in W, p \in P \quad (\text{Sc1-9})$$

$$\sum_{m \in W, v \in V} q_{m,k,t}^{p,v} = \sum_{j \in R, v \in V} q_{k,j,t}^{p,v}; \forall t \in T_2, k \in D, p \in P \quad (\text{Sc1-10})$$

$$W_{j,t}^p = \sum_{k \in D, v \in V} \sum_{h=1}^{t+q^p} q_{k,j,h}^{p,v} - \sum_{h=1}^{t-1} W_{j,h}^p; \forall t \in T_1, p \in P, j \in R \quad (\text{Sc1-11})$$

$$I_{m,t}^p = \sum_{i \in F, v \in V} q_{i,m,t}^{p,v} - \sum_{k \in D, v \in V} q_{m,k,t}^{p,v} + I_{m,(t-1)}^p; \forall t \in T_2, p \in P, m \in W \quad (\text{Sc1-12})$$

$$Wd_t^p = \sum_{j \in R} W_{j,t}^p - \sum_{k \in D, j \in R, v \in V} q_{k,j,t}^{p,v} + Wd_{(t-1)}^p; \forall t \in T_2, p \in P \quad (\text{Sc1-13})$$

$$S_m^p \cdot y_m \leq I_{m,t}^p; \forall t \in T_2, p \in P, m \in W \quad (\text{Sc1-14})$$

$$\sum_{i \in F, p \in P, v \in V} q_{i,m,t}^{p,v} \leq C_m; \forall t \in T_2, m \in W \quad (\text{Sc1-15})$$

$$\sum_{m \in W, p \in P, v \in V} q_{m,k,t}^{p,v} \leq C_k; \forall t \in T_2, k \in D \quad (\text{Sc1-16})$$

$$x_{i,m} \leq y_m; \forall i \in F, m \in W \quad (\text{Sc1-17})$$

$$w_{m,k} \leq z_k; \forall m \in W, k \in D \quad (\text{Sc1-18})$$

$$y_m \leq \sum_{i \in F} x_{i,m}; \forall m \in W \quad (\text{Sc1-19})$$

$$z_k \leq \sum_{m \in W} w_{m,k}; \forall k \in D \quad (\text{Sc1-20})$$

$$\sum_{m \in W} y_m \leq |W| \quad (\text{Sc1-21})$$

$$\sum_{k \in K} z_k \leq |D| \quad (\text{Sc1-22})$$

$$q_{i,m,t}^{p,v} \leq x_{i,m} \cdot Z; \forall t \in T_2, p \in P, v \in V, i \in F, m \in W \quad (\text{Sc1-23})$$

$$q_{m,k,t}^{p,v} \leq w_{m,k} \cdot Z; \forall t \in T_2, p \in P, v \in V, m \in W, k \in D \quad (\text{Sc1-24})$$

$$q_{k,j,t}^{p,v} \leq g_{k,j} \cdot Z; \forall t \in T_2, p \in P, v \in V, k \in D, j \in R \quad (\text{Sc1-25})$$

$$\sum_{m \in W} x_{i,m} = 1; \forall i \in F \quad (\text{Sc1-26})$$

$$\sum_{k \in D} w_{m,k} = y_m; \forall m \in W \quad (\text{Sc1-27})$$

$$\sum_{p \in P} q_{i,m,t}^{p,v} \leq Q^v \cdot N1_{i,m,t}^v; \forall t \in T_2, v \in V, i \in F, m \in W \quad (\text{Sc1-28})$$

$$\sum_{p \in P} q_{m,k,t}^{p,v} \leq Q^v \cdot N2_{m,k,t}^v; \forall t \in T_2, v \in V, m \in W, k \in D \quad (\text{Sc1-29})$$

$$\sum_{p \in P} q_{k,j,t}^{p,v} \leq Q^v \cdot N3_{k,j,t}^v; \forall t \in T_2, v \in V, k \in D, j \in R \quad (\text{Sc1-30})$$

$$N1_{i,m,t}^v \leq N \max_{i,m}^v; \forall t \in T_2, v \in V, i \in F, m \in W \quad (\text{Sc1-31})$$

$$N2_{m,k,t}^v \leq N \max_{m,k}^v; \forall t \in T_2, v \in V, m \in W, k \in D \quad (\text{Sc1-32})$$

$$N3_{k,j,t}^v \leq N \max_{k,j}^v; \forall t \in T_2, v \in V, k \in D, j \in R \quad (\text{Sc1-33})$$

$$\sum_{i \in F, v \in V, t \in T_2} q_{i,m,t}^{p,v} = \sum_{k \in D, v \in V, t \in T_2} q_{m,k,t}^{p,v}; \forall m \in W, p \in P \quad (\text{Sc1-34})$$

$$\sum_{m \in W, v \in V} q_{m,k,t}^{p,v} = \sum_{j \in R, v \in V} q_{k,j,t}^{p,v}; \forall t \in T_2, k \in D, p \in P \quad (\text{Sc1-35})$$

$$q_{i,m,t}^{p,v}, q_{m,k,t}^{p,v}, q_{k,j,t}^{p,v}, I_{m,t}^p, W d_t^p \geq 0; \forall t \in T_2, p \in P, v \in V, i \in F, m \in W, k \in K, j \in D \quad (\text{Sc1-36})$$

$$N1_{i,m,t}^v, N2_{m,k,t}^v, N3_{k,j,t}^v, C_m, C_k \in \mathbb{N}; \forall t \in T_2, p \in P, v \in V, i \in F, m \in W, k \in K, j \in D \quad (\text{Sc1-37})$$

$$x_{i,j}, w_{m,k}, g_{k,j}, y_m, z_k \in \{0; 1\}; \forall i \in F, m \in W, k \in K, j \in D \quad (\text{Sc1-38})$$

Les contraintes {(Sc1-1)-(Sc1-5)} représentent les formulations des coûts de transport, de stockage, de pénalité, d'installation des hubs et de manutention des marchandises.

Les contraintes {(Sc1-6)-(Sc1-7)} représentent les formulations des émissions de CO<sub>2</sub> dues aux véhicules et aux hubs.

Les contraintes {(Sc1-8)} permettent de déterminer le nombre d'emplois nécessaires au bon fonctionnement des hubs ouverts. Les deux contraintes {(Sc1-9)-(Sc1-10)} assurent la satisfaction des détaillants. En effet, les contraintes (Sc1-9) garantissent que la somme des quantités livrées par tous les fournisseurs à la période  $t$  et du niveau de stock de la période précédente est supérieure ou égale à la quantité de marchandises livrées entre les hubs. Les contraintes (Sc1-10) garantissent que la quantité de marchandises inter-hubs livrée de l'entrepôt  $m$  au centre de distribution  $k$  dans chaque période est exactement égale à la quantité livrée aux détaillants.

Les contraintes (Sc1-11) garantissent que les demandes sont satisfaites pendant les périodes autorisées. En effet, pour chaque produit, la demande du détaillant dans chaque période doit être livrée au plus tard dans la période  $(t + a^p)$ , où  $a^p$  désigne le nombre de périodes autorisées pour livrer le produit  $p$ . En d'autres termes, ce paramètre indique le niveau de flexibilité en termes de délai de livraison de chaque fournisseur.

Les contraintes {(Sc1-12)-(Sc1-13)} visent respectivement à déterminer le niveau de stock dans l'entrepôt  $m$  et la quantité retardée pour chaque produit dans chaque période. Initialement, il n'y a ni niveau de stock ni quantité retardée. Les contraintes (Sc1-14) indiquent que le niveau de stock de chaque produit dans les entrepôts ne doit pas être inférieur au niveau de stock de sécurité.

Les contraintes {(Sc1-15)-(Sc1-16)} garantissent que les quantités entrantes dans les entrepôts et les centres de distribution ne doivent pas dépasser leurs capacités de stockage. Les contraintes {(Sc1-17)-(Sc1-18)} révèlent respectivement que les fournisseurs ne sont pas affectés à un entrepôt fermé et que les entrepôts ne sont pas affectés à un centre de distribution fermé.

Les deux contraintes {(Sc1-19)-(Sc1-20)} garantissent respectivement qu'un entrepôt n'est ouvert que si au moins un fournisseur lui est affecté et qu'un centre de distribution n'est ouvert que si au moins un entrepôt lui est affecté, respectivement. Les contraintes {(Sc1-21)-(Sc1-22)} limitent le nombre de hubs ouverts. Ces contraintes ne sont pas obligatoires mais elles nous aideront dans l'analyse de sensibilité.

Les contraintes {(Sc1-23)-(Sc1-25)} sont utilisées pour limiter le flux sur les arcs. En effet, aucune quantité de marchandises ne circule entre les nœuds à moins que ces derniers ne soient reliés. Les contraintes (Sc1-26) garantissent qu'un fournisseur n'est affecté qu'à un seul entrepôt. Les contraintes (Sc1-27) garantissent qu'un entrepôt ouvert n'est attribué qu'à un seul centre de distribution.

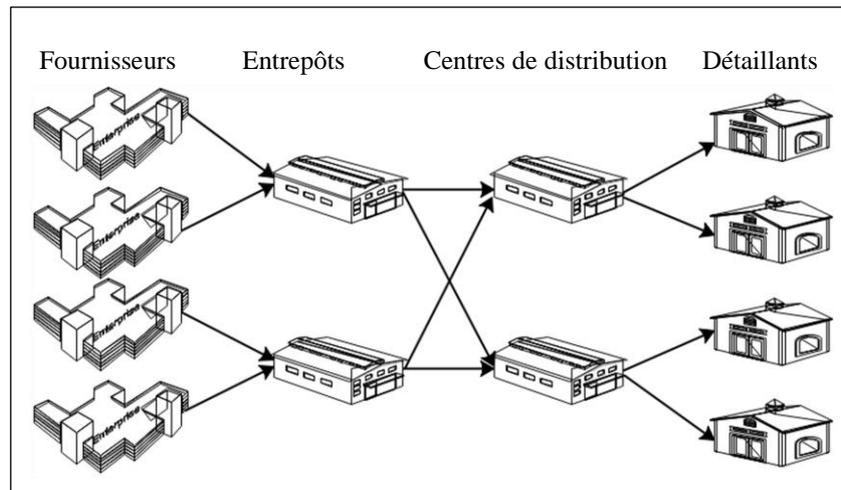
Les contraintes {(Sc1-28)-(Sc1-30)} servent à déterminer le nombre de véhicules nécessaires au transport des marchandises aux premier, deuxième et troisième échelons, respectivement. Les trois contraintes {(Sc1-31)-(Sc1-33)} limitent le nombre de véhicules utilisés.

Les deux contraintes {(Sc1-34)-(Sc1-35)} sont des contraintes de conservation des flux. Les dernières contraintes {(Sc1-36)-(Sc1-38)} spécifient les domaines de définition des variables de décision.

### 3.3.3. Deuxième scénario collaboratif

Comme le montre la Figure 72, le deuxième scénario collaboratif Sc2 diffère du premier de la manière suivante :

- Chaque détaillant est desservi par un seul centre de distribution, ce qui est garanti par l'ajout des contraintes (Sc2-1).
- Chaque entrepôt partagé peut desservir plusieurs centres de distribution en remplaçant les contraintes (Sc1-27) par (Sc2-2).



**Figure 72.** Configuration du deuxième scénario collaboratif

Ainsi, les contraintes utilisées dans Sc2 sont données ci-dessous :

{(Sc1-1)- (Sc1-26)}

$$\sum_{k \in D} g_{k,j} = 1; \forall j \in R \quad (\text{Sc2-1})$$

$$\sum_{k \in D} w_{m,k} \leq Z \cdot y_m; \forall m \in W \quad (\text{Sc2-2})$$

{(Sc1-28)-(Sc1-38)}

Notons également que la modélisation du scénario non-collaboratif est similaire à celle du premier scénario collaboratif en ouvrant un nombre d'entrepôts et de centres de distribution égal au nombre de fournisseurs.

## 4. Etude de cas

Dans ce paragraphe, nous présentons une étude de cas d'un réseau de distribution national (cf. Figure 73). Ce réseau est composé de sept fournisseurs qui collaborent pour satisfaire 13 détaillants en utilisant des entrepôts et des centres de distribution communs. Le nombre

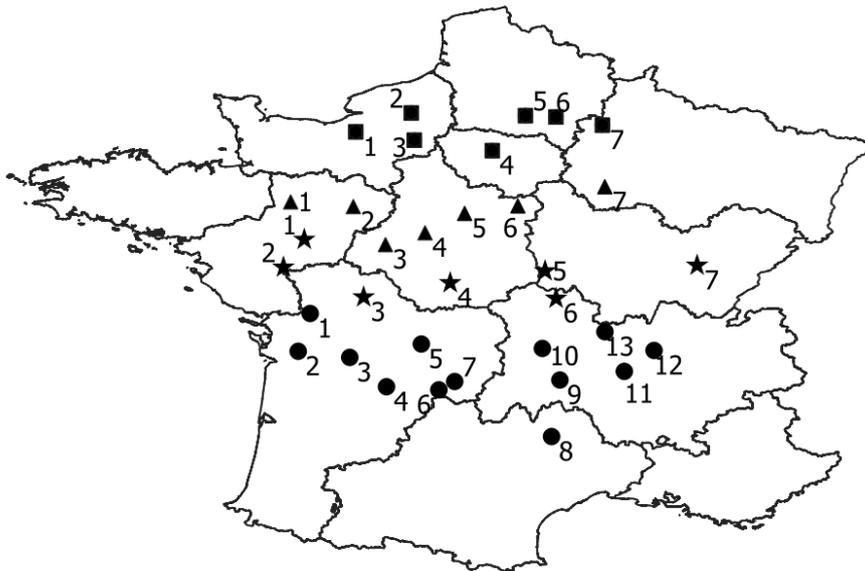
maximum d'entrepôts et de centres de distribution à ouvrir est égal à sept. Les localisations, le nombre et les capacités des hubs sont déterminés à partir des modèles mathématiques.

Le Tableau 54 représente les localisations des différents nœuds.

Fournisseurs	1: Lisieux 2: Rouen 3: Evreux 4: Paris 5: Compiègne 6: Soissons 7: Reims
Entrepôts	1: Laval 2: Le Mans 3: Tours 4: Blois 5: Orléans 6: Montargis 7: Troyes
Centres de distribution	1: Angers 2: Cholet 3: Poitiers 4: Châteauroux 5: Nevers 6: Moulins 7: Dole
Détaillants	1: Niort 2: Saintes 3: Angoulême 4: Périgueux 5: Limoges 6: Brive-la-Gaillarde 7: Tulle 8: Auxillac 9: Brioude 10: Clermont-Ferrand 11: Saint-Étienne 12: Lyon 13: Roanne

**Tableau 54.** Localisation des différents nœuds

Dans les parties amont et aval, l'objectif de la collaboration est de consolider les flux en regroupant les quantités de marchandises dans des hubs, ce qui implique le transport d'une grande quantité de fret. Ainsi, deux types de véhicules, d'une capacité égale à 33 et 39 palettes, ont été sélectionnés pour distribuer le fret dans les parties amont et aval. En revanche, les détaillants étant de plus en plus exigeants en termes de fréquence de livraison afin de réduire leurs niveaux de stockage, la distribution du fret dans la partie finale sera effectuée à l'aide de trois types de véhicules d'une capacité de 15, 33 et 39 palettes. Le Tableau 55 présente le nombre de semaines autorisées pour les retards de livraison pour chaque partenaire.



**Figure 73.** Réseau de distribution étudié

Fournisseur	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$	$i=7$
$a^p$	1	0	0	1	0	2	1

**Tableau 55.** Nombre de semaines autorisées pour le retard de livraison

Le Tableau 56 indique le nombre d'employés nécessaires pour manipuler 100 palettes par type de hubs. Pour ouvrir un centre hautement automatisé, on suppose que deux employés sont suffisants pour surveiller et suivre les robots. En revanche, la manutention de 100 palettes dans les centres semi-automatisés et faiblement automatisés nécessite respectivement trois et quatre employés.

Localisation	Niveau d'automatisation des hubs	Nb. Employés/100 palettes
Laval, Poitiers, Moulins	Faible	4
Tours, Blois, Orléans, Montargis,	Semi	3
Angers, Cholet, Châteauroux, Nevers		
Le Mans, Dole, Troyes	Fort	2

**Tableau 56.** Nombre d'employés nécessaires pour manipuler 100 palettes en fonction des types et des emplacements des hubs

Pour chaque produit, la demande des détaillants dans chaque période est choisie aléatoirement en utilisant des distributions uniformes dans l'intervalle  $[0, 50]$  palettes. La même méthode est appliquée par (Alumur et al., 2016). Le Tableau 57 représente plusieurs données caractérisant les véhicules (coûts unitaires et émissions unitaires de  $CO_2$ ), les produits (coût unitaire de stockage, pénalité et manutention), etc. Ces données ont été prises en compte dans tous les scénarios appliqués afin de réaliser une comparaison fiable. Les deux scénarios collaboratifs Sc1 et Sc2 ont été comparés au scénario non collaboratif Sc0. Ce dernier est obtenu à travers le scénario Sc1 en ouvrant un nombre d'entrepôts et de centres de distribution égal au nombre de fournisseurs.

Paramètre	Valeur	Source
$Ac$ (accidents/année)	2768	(ONISR, 2016)
$\alpha$	2	
$AP$ ( $m^2$ )	0.96	Taille d'une palette européenne (1.2 x 0.8)
$C_o^v$ (€/km)	(0.4 ; 0.5 ; 0.7)	
$C_q^v$ (€/km)	(0.8 ; 1 ; 1.3)	
$E_o^v$ ( $g CO_2/km$ )	(511.2; 772.68; 772.68)	(Hickman et al., 1999)
$E_q^v$ ( $g CO_2/km$ )	(583.7; 1096.09; 1096.09)	(Hickman et al., 1999)
$E_d^v$ ( $g CO_2/km$ )	(78; 111; 122)	(Hickman et al., 1999)
$Cd_t^p$ (€/palette)	5	
$Cs^p, Cl^p, Cu^p$ (€/palette)	1	
$Cs_m^p$ (€/palette)	10	
$Cw_m$ (€/m <sup>2</sup> )	400	guide 1 et guide 2
$Ec_m$ ( $kg CO_2/m^2$ )	200	(Abdessalem, 2014) et (ADEME, 2010)
$Eo_{m,t}$ ( $g CO_2/kwh$ )	87.5	(Abdessalem, 2014) et (ADEME, 2010)
$W_{m,t}$ ( $kwh$ )	50	
$S_m^p$	0	

**Tableau 57.** Autres données

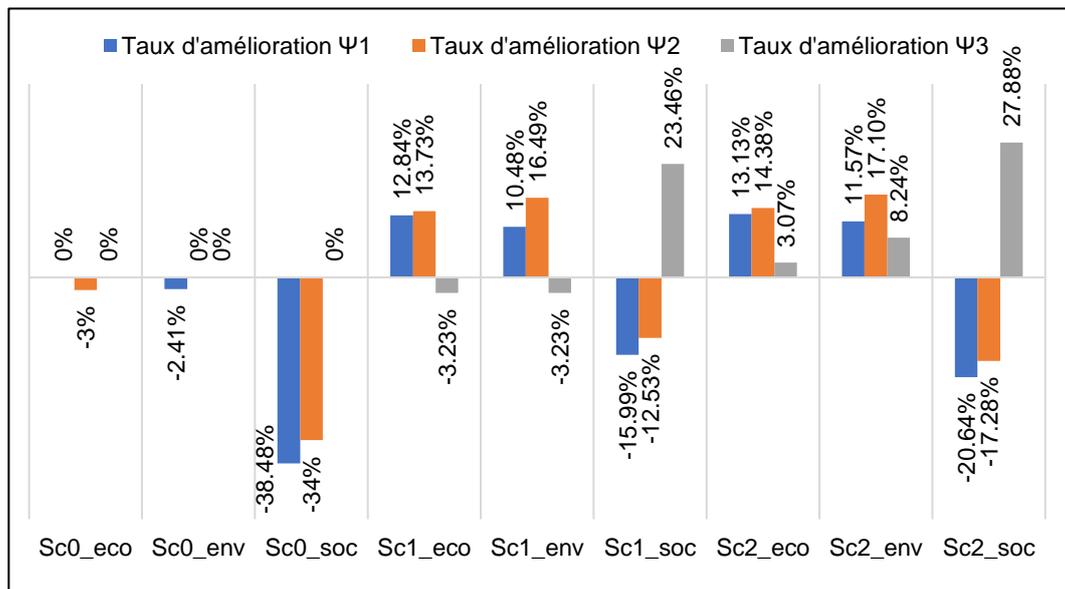
#### 4.1. Optimisation mono-objectif

L'optimisation mono-objectif permet de définir les solutions optimales pour chaque objectif : économique, environnemental et social/sociétal. La résolution est réalisée à l'aide du solveur CPLEX 12.10. En outre, les indicateurs de durabilité cités précédemment sont utilisés pour comparer les performances des différents scénarios : Sci\_eco, Sci\_env et Sci\_soc (avec  $i \in \{0, 1, 2\}$ ) désignent le scénario  $i$  résolu en utilisant une fonction objectif économique, environnemental et social, respectivement. Les résultats sont présentés dans le Tableau 58.

<b>Indicateurs</b>	<b>Indicateur</b>	<b>Sc0_eco</b>	<b>Sc0_env</b>	<b>Sc0_soc</b>	<b>Sc1_eco</b>	<b>Sc1_env</b>	<b>Sc1_soc</b>	<b>Sc2_eco</b>	<b>Sc2_env</b>	<b>Sc2_soc</b>
Economique	Distance parcourue (10 <sup>5</sup> km)	7.906	7.099	8.251	5.193	4.406	7.082	4.936	4.144	7.102
	Taux de remplissage (%)	89.00%	67.84%	85.00%	97.39%	82.96%	89.21%	96.82%	80.90%	90.80%
	Coût de transport (10 <sup>5</sup> €)	4.909	5.429	5.348	3.847	4.002	5.173	3.670	3.784	5.722
	Coût de stockage (10 <sup>3</sup> €)	11.68	75.22	117.1	6.485	103.2	91.99	6.305	53.69	82.20
	Coût de pénalité (10 <sup>3</sup> €)	41.310	42.635	45.915	41.707	43.185	42.910	42.230	43.295	45.765
	Coût d'installation (10 <sup>6</sup> €)	4.198	4.198	5.899	3.690	3.691	4.861	3.694	3.709	5.037
	Coût de manutention (10 <sup>3</sup> €)	78.780	78.780	78.780	78.780	78.780	78.780	78.780	78.780	78.780
	Coûts logistiques (10 <sup>6</sup> €)	4.821	4.937	6.676	4.202	4.316	5.592	4.188	4.263	5.816
Environnemental	Emissions de CO <sub>2</sub> dues aux véhicules (10 <sup>8</sup> g CO <sub>2</sub> )	7.263	6.542	7.312	5.311	4.544	6.679	5.097	4.288	7.111
	Emissions de CO <sub>2</sub> dues aux hubs (10 <sup>9</sup> g CO <sub>2</sub> )	2.099	2.099	2.950	1.845	1.846	2.431	1.847	1.855	2.519
	Emissions globales (10 <sup>9</sup> g CO <sub>2</sub> )	2.826	2.754	3.681	2.376	2.300	3.099	2.3579	2.283	3.230
Social	Taux d'embauche	792.41	792.41	792.41	766.81	766.81	978.33	816.7	857.73	1013.3
	Niveau de bruit (10 <sup>3</sup> dB)	59.59	59.02	58.30	18.23	17.88	25.52	19.83	20.54	18.09
	Taux de réduction du risque accident (%)	20.94%	29.01%	17.49%	48.07%	55.94%	29.18%	50.64%	58.56%	28.98%

**Tableau 58.** Résultats de l'optimisation mono-objectif exacte

La Figure 74 présente le taux d'amélioration au niveau des coûts, des émissions de CO<sub>2</sub> et du taux d'embauche. Ces taux ont été déterminés à partir des résultats obtenus respectivement par les scénarios non collaboratifs Sc0\_eco, Sc0\_env et Sc0\_soc.



**Figure 74.** Taux d'amélioration au niveau des coûts, des émissions et du taux d'embauche

Sur le plan économique, les deux scénarios collaboratifs ayant un objectif économique ont offert de meilleurs résultats que Sc0\_eco. En particulier, le scénario Sc2\_eco qui a permis de réduire les coûts logistiques de 13.13%. Cette amélioration est remarquable au niveau des coûts de transport. Les autres scénarios, à savoir Sc1\_eco, Sc2\_env et Sc1\_env ont permis de minimiser les coûts logistiques avec des taux de réduction égaux respectivement aux 12.84%, 11.57% et 10.48%.

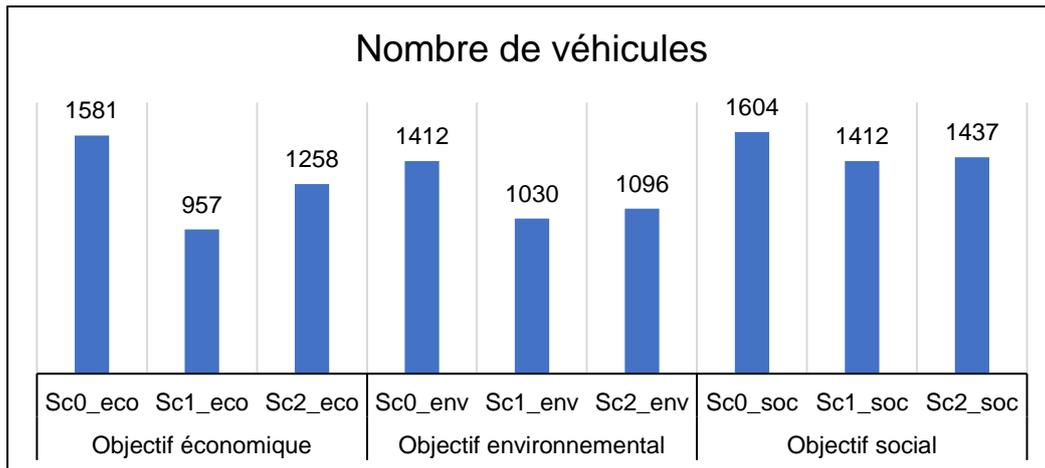
Sur le plan environnemental, les deux scénarios collaboratifs ayant un objectif environnemental ont fourni des résultats prometteurs en termes de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, notamment le deuxième scénario Sc2\_env avec un taux de réduction de 17.10%. Cette réduction est remarquable au niveau des émissions liées au transport. Les autres scénarios collaboratifs Sc1\_env, Sc2\_eco et Sc1\_eco possèdent des taux de réduction égaux respectivement à 16.49%, 14.38 et 13.73%.

Sur le plan social/sociétal, les deux scénarios collaboratifs à objectif social (Sc1\_soc et Sc2\_soc) ont permis de maximiser le taux d'embauche avec des taux d'amélioration égaux respectivement à 23.46% et 27.88%. Notons également que les scénarios Sc2\_eco et Sc2\_env sont les seuls scénarios permettant d'améliorer les résultats des trois objectifs simultanément, tandis que les scénarios Sc1\_eco et Sc1\_env ont réduit le taux d'embauche, cela est due à l'ouverture d'un seul centre de distribution semi-automatisé qui nécessite un nombre moyen d'employés.

Notons également que dans les cas où les partenaires choisissent d'implémenter les deux scénarios Sc1\_soc et Sc2\_soc, ils devront sacrifier leurs intérêts économiques et environnementaux face à l'amélioration du niveau social en termes des opportunités d'emploi créés. En effet, les taux d'amélioration des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub> dans les deux scénarios collaboratifs à objectif social Sc1\_soc et Sc2\_soc sont négatifs.

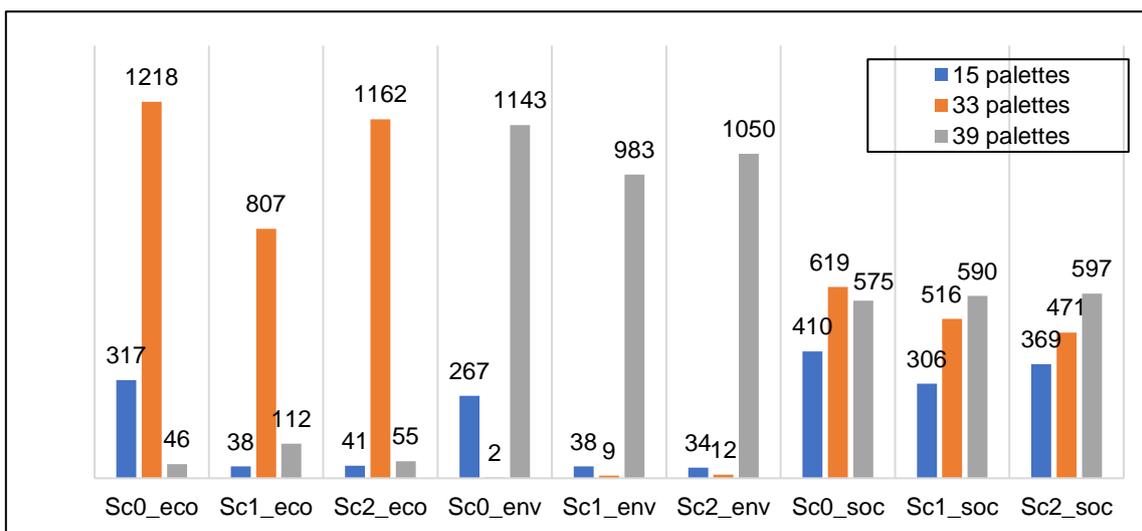
Le taux de réduction du risque d'accident a été calculé en prenant comme référence le risque d'accident pour  $10^6$  km parcourus. Tous les scénarios ont présenté des résultats notables en termes de cet indicateur, notamment le scénario Sc2\_env qui offre la meilleure réduction car il présente la distance parcourue la plus courte. De même que, tous les scénarios collaboratifs ont permis de réduire le niveau de bruit engendré par le transport.

Notons également que ces résultats remarquables proviennent d'une amélioration des taux de remplissage et d'un raccourcissement des distances parcourues. Concernant l'utilisation des véhicules, la Figure 75 montre que les scénarios collaboratifs ont permis de réduire le nombre de véhicules utilisés par rapport aux scénarios non-collaboratifs.



**Figure 75.** Nombre total de véhicules utilisés

En outre, les résultats expérimentaux révèlent que les scénarios à objectifs économiques privilégient l'utilisation des véhicules qui possèdent une capacité égale à 33 palettes, tandis que les scénarios à objectif environnemental privilégient l'utilisation des véhicules de grande capacité égale à 39 palettes. Les scénarios avec un objectif social n'ont pas particulièrement favorisé un type de véhicules par rapport à un autre mais ils ont recours généralement aux véhicules de type 33 et 39 palettes et dans une moindre mesure des véhicules de capacité égale à 15 palettes (cf. Figure 76).



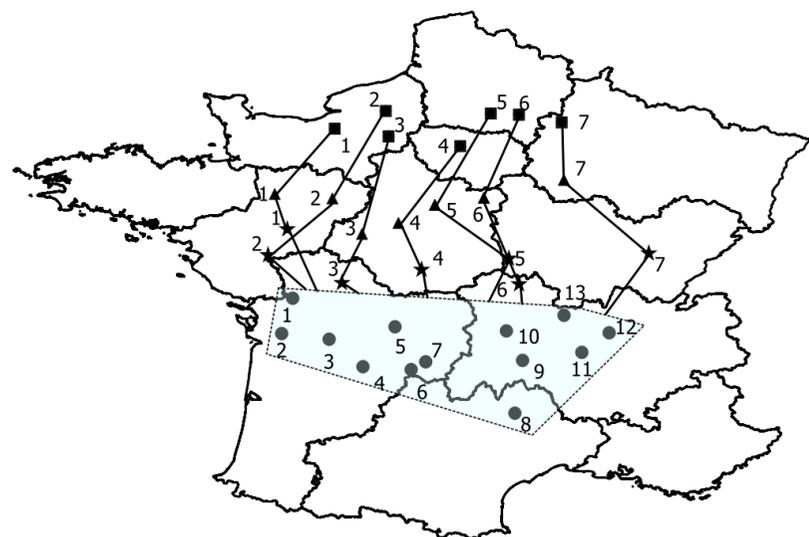
**Figure 76.** Nombre de véhicules utilisés dans les scénarios collaboratifs

Le Tableau 59 présente la liste des entrepôts et des centres de distribution ouverts dans chaque scénario et leurs capacités. Les scénarios à objectifs économiques et environnementaux favorisent l'ouverture des entrepôts 5 et 6 et le centre de distribution 4. Ces hubs ont été choisis en raison de leur proximité géographique avec tous les nœuds du réseau de distribution. Évidemment, la capacité totale des entrepôts et des centres de distribution est comparable. Les scénarios avec un objectif social ont favorisé l'ouverture de l'entrepôt 1, 4 et 5 et les deux centres de distribution 3 et 6, qui ont un faible niveau d'automatisation et nécessitent un grand nombre de travailleurs. Notons également que les scénarios à objectif social possèdent des capacités d'entrepôts élevées par rapport aux autres scénarios, ceci est justifié par le fait que leur objectif principal est de maximiser le taux d'embauche sans réduire les capacités des hubs. Etant donné que les capacités des entrepôts sont calculées selon les quantités de marchandises livrées à partir des fournisseurs, ces scénarios favorisent l'envoi des grandes quantités au cours de certaines périodes ce qui augmente la capacité de l'entrepôt correspondant.

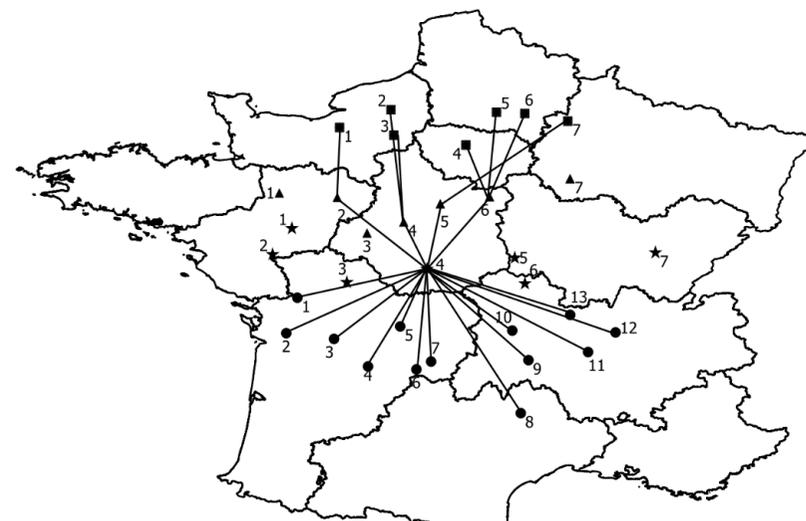
Scenarios	Entrepôts		Capacité totale (palettes)	Centres de distribution		Capacité totale (palettes)
	Hub	Capacité		Hub	Capacité	
Sc0_eco	Tous		2585	Tous		2881
Sc0_env	Tous		2585	Tous		2881
Sc0_soc	Tous		4560	Tous		3103
Sc1_eco	{2;4;5;6}	{352;768;380;945}	2445	{4}	{2360}	2360
Sc1_env	{2;4;5;6}	{352;400;925;768}	2445	{4}	{2360}	2360
Sc1_soc	{1;4;5}	{1975;1171;811}	3957	{3;6}	{1610;761}	2371
Sc2_eco	{5;6}	{1677;768}	2445	{3;4;5}	{534;894;937}	2365
Sc2_env	{3;5;6}	{352;1705;388}	2445	{3;4;6}	{753;1084;547}	2384
Sc2_soc	{1;4;5}	{2837;772;586}	4195	{3;6}	{1238;1122}	2360

**Tableau 59.** Capacités des hubs dans les trois scénarios

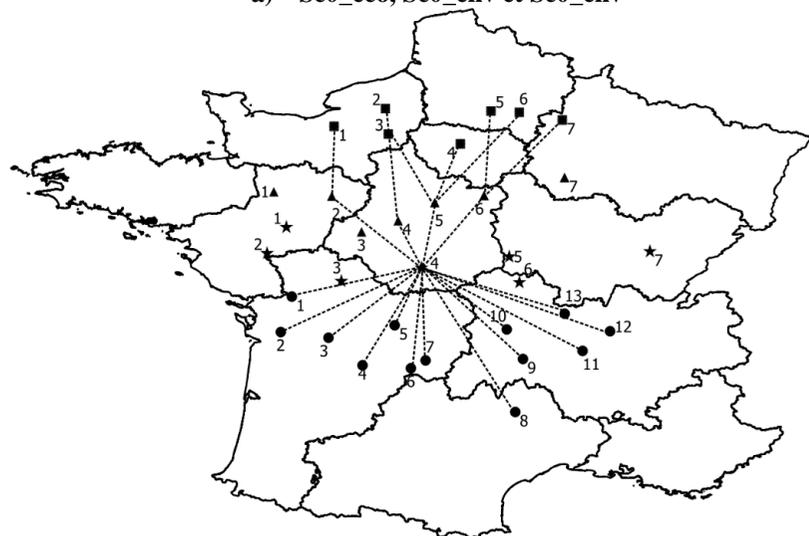
Les Figures 77 et 78 représentent les configurations des réseaux de distribution obtenus.



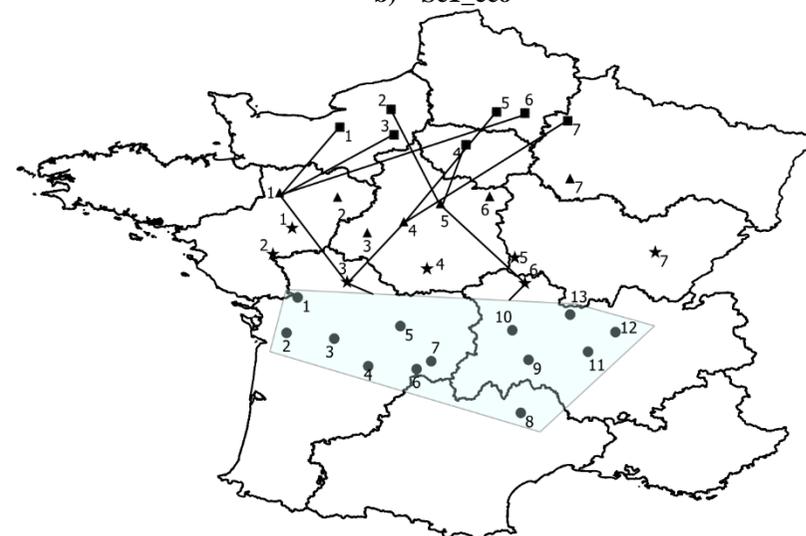
a) Sc0\_eco, Sc0\_env et Sc0\_env



b) Sc1\_eco

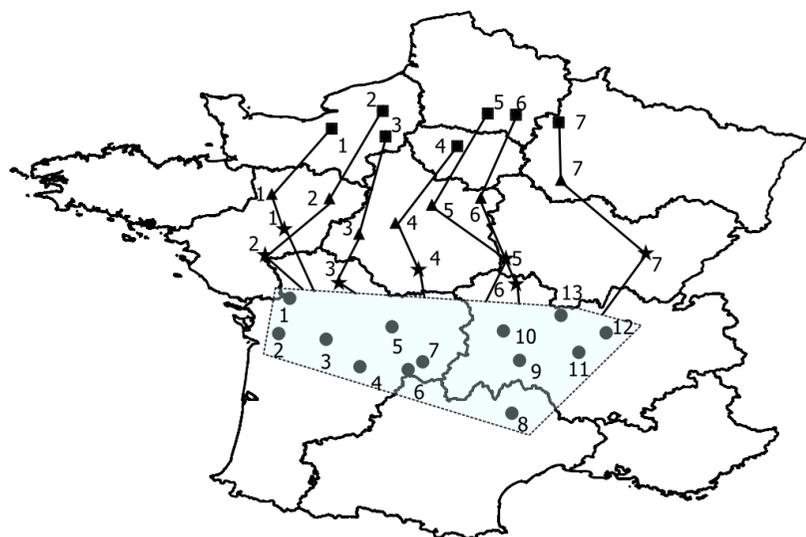


c) Sc1\_env

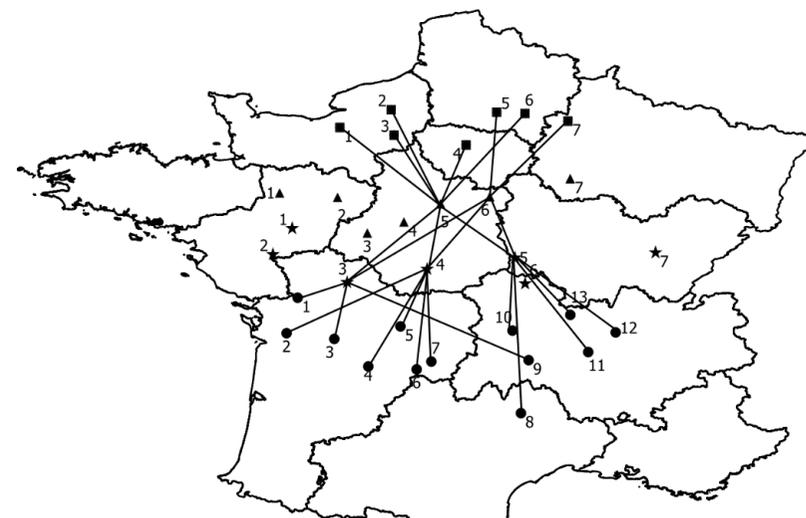


d) Sc1\_soc

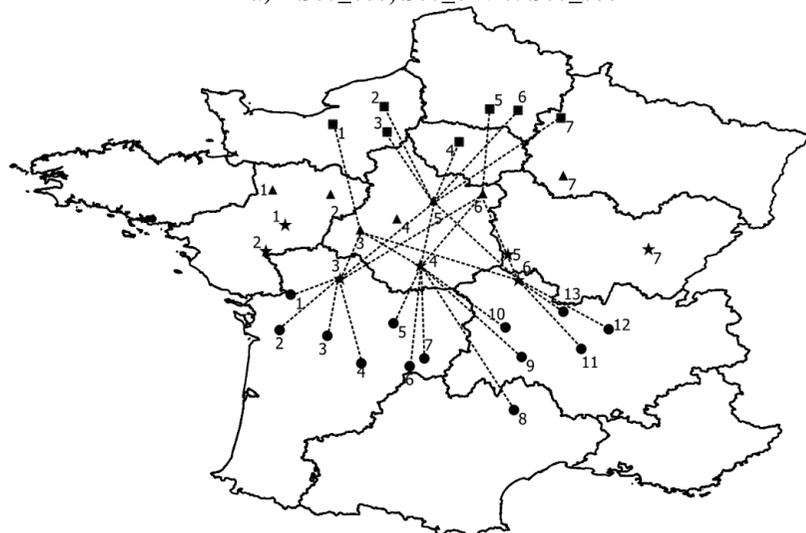
Figure 77. Configuration des réseaux de distribution obtenus (Sc0 et Sc1)



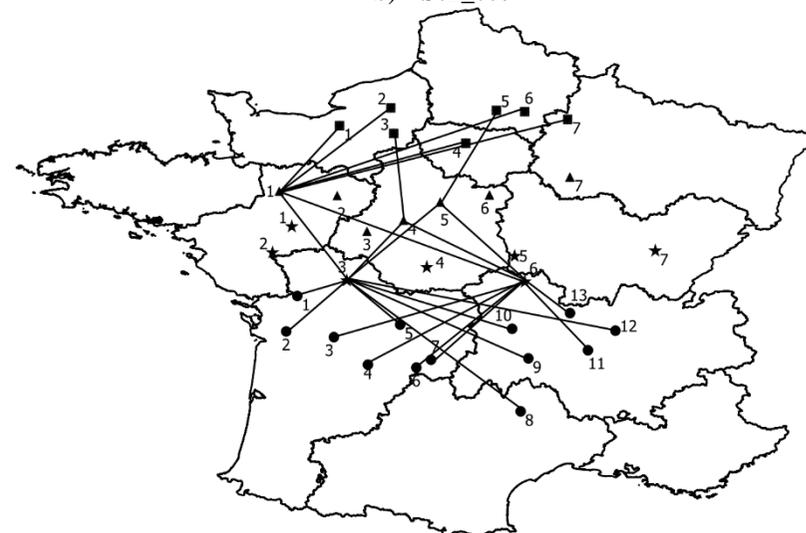
a) Sc0\_eco, Sc0\_env et Sc0\_soc



b) Sc2\_eco



c) Sc2\_env



Sc2\_soc

**Figure 78.** Configuration des réseaux de distribution obtenus (Sc0 et Sc2)

## 4.2. Résolution multi-objectif

Les chercheurs utilisent diverses méthodes pour résoudre un modèle multi-objectif telles que la somme pondérée,  $\varepsilon$ -contrainte, etc. De même que le chapitre 4, dans ce chapitre nous avons eu recours à la méthode de  $\varepsilon$ -contrainte pour résoudre les modèles multi-objectif. Pour appliquer correctement cette méthode, il est nécessaire de disposer de la plage optimale de chaque fonction obtenue dans le paragraphe précédent en utilisant l'optimisation mono-objectif. Nous avons choisi de minimiser les coûts logistiques et mettre les deux autres fonctions sous forme de contraintes. Selon (Zhu & Hu, 2017), le modèle multi-objectif est formulé de la manière suivante :

$$\text{Min } \Psi_1 \quad (150)$$

$$\Psi_2 \leq \Psi_2^{\min} + k \cdot \Delta\varepsilon_2 \quad (151)$$

$$\Psi_3 \geq \Psi_3^{\min} + k \cdot \Delta\varepsilon_3 \quad (152)$$

$$\Delta\varepsilon_2 = \frac{(\Psi_2^{\max} - \Psi_2^{\min})}{n} \quad (153)$$

$$\Delta\varepsilon_3 = \frac{(\Psi_3^{\max} - \Psi_3^{\min})}{n} \quad (154)$$

*Sous les contraintes de chaque scénario*

$n$  : nombre d'instances ;

$k$  : compteur ;

$\Psi_2^{\max}$  et  $\Psi_3^{\max}$  : valeurs maximales des émissions de CO<sub>2</sub> et de taux d'embauche, respectivement ;

$\Psi_2^{\min}$  et  $\Psi_3^{\min}$  : valeurs minimales des émissions de CO<sub>2</sub> et de taux d'embauche, respectivement.

Au total, 50 instances ont été générées en incrémentant la valeur du compteur d'un pas à chaque fois pour trouver le front de Pareto des solutions multi-objectifs. Les deux Figures 79 et 80 présentent le front de Pareto des deux scénarios collaboratifs Sc1 et Sc2.

Chaque point du graphique sur le front de Pareto représente une solution au problème multi-objectif. Dans les deux figures, le point 1 est le meilleur point économique et environnemental qui offre le minimum de coûts et d'émissions de CO<sub>2</sub>, tandis que le point 2 est le meilleur point offrant un maximum du taux d'embauche. Cependant, le choix d'une solution offrant un compromis optimal particulière n'est pas une tâche triviale, et l'interprétation d'un front de Pareto 3D est très difficile. Néanmoins, les points colorés en rouge s'avèrent correspondre aux solutions qui offrent un bon compromis entre les trois objectifs. Pour confirmer ce choix, nous avons représenté les fronts de Pareto 2D des coûts et du taux d'embauche (cf. Figures 81 et 82). En effet, la diminution des coûts logistiques s'accompagne d'une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> car les deux fonctions objectifs permettent de réduire les capacités des plateformes et donc des coûts et des émissions des hubs.

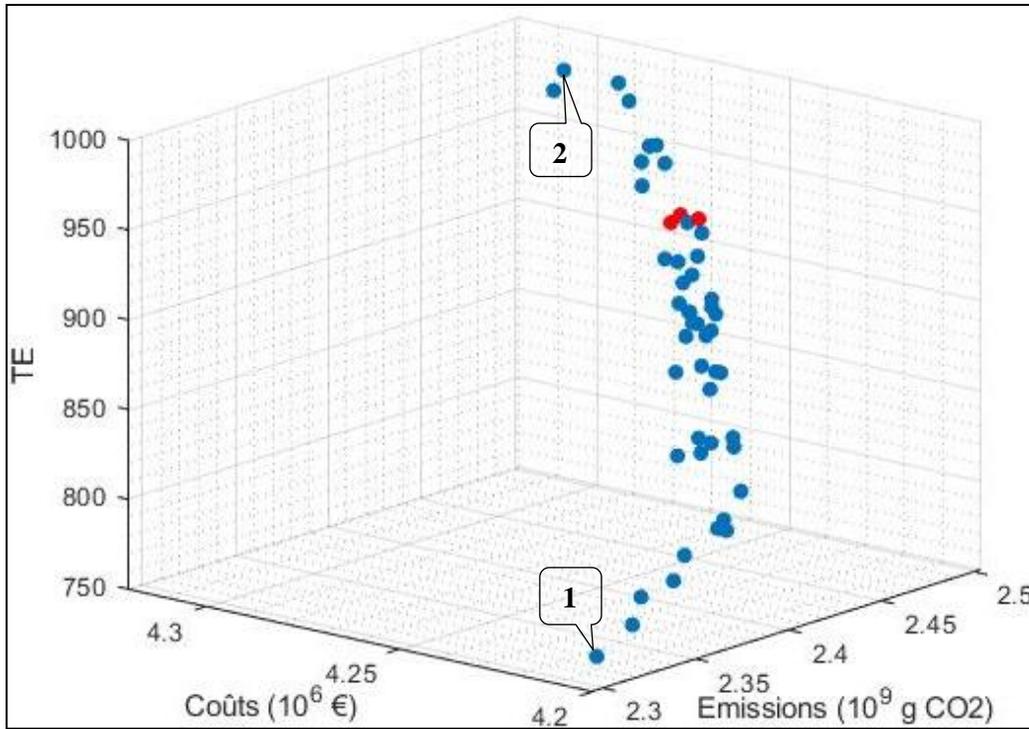


Figure 79. Compromis entre les coûts, les émissions de CO<sub>2</sub> et le taux d'embauche (Sc1)

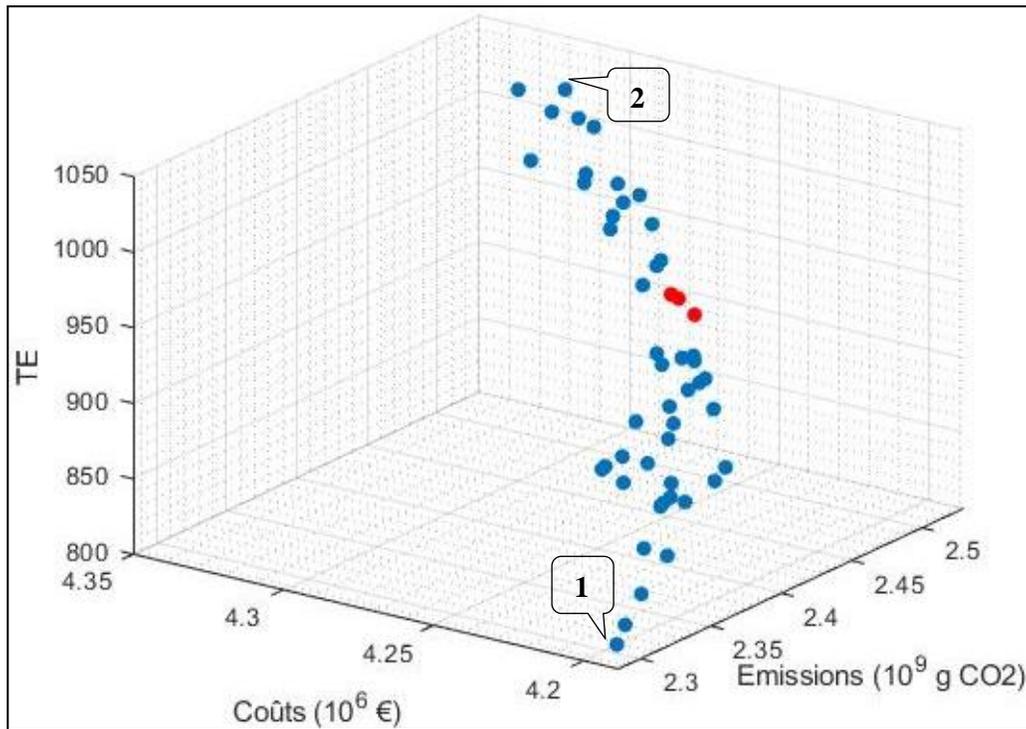
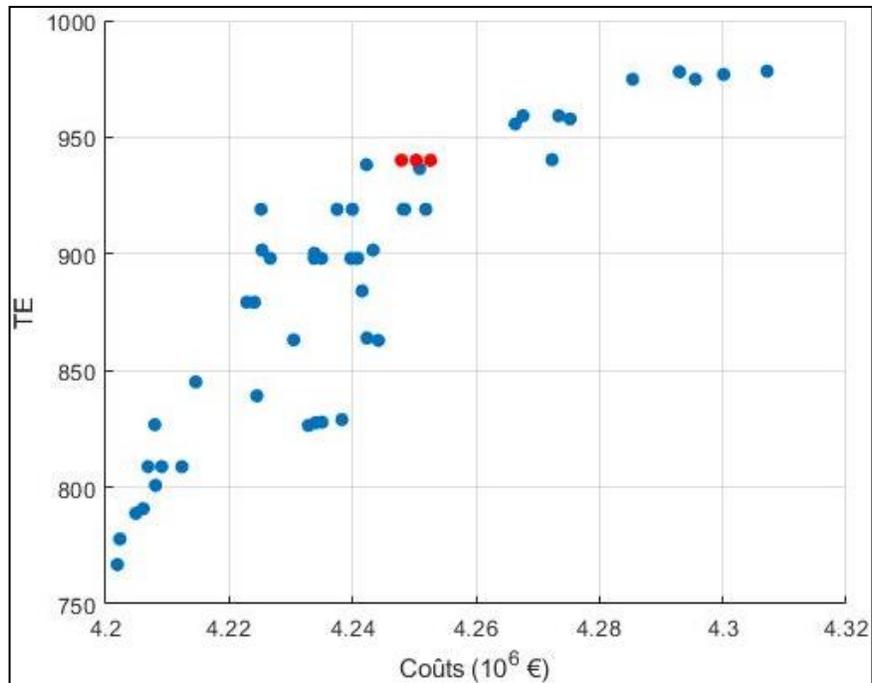
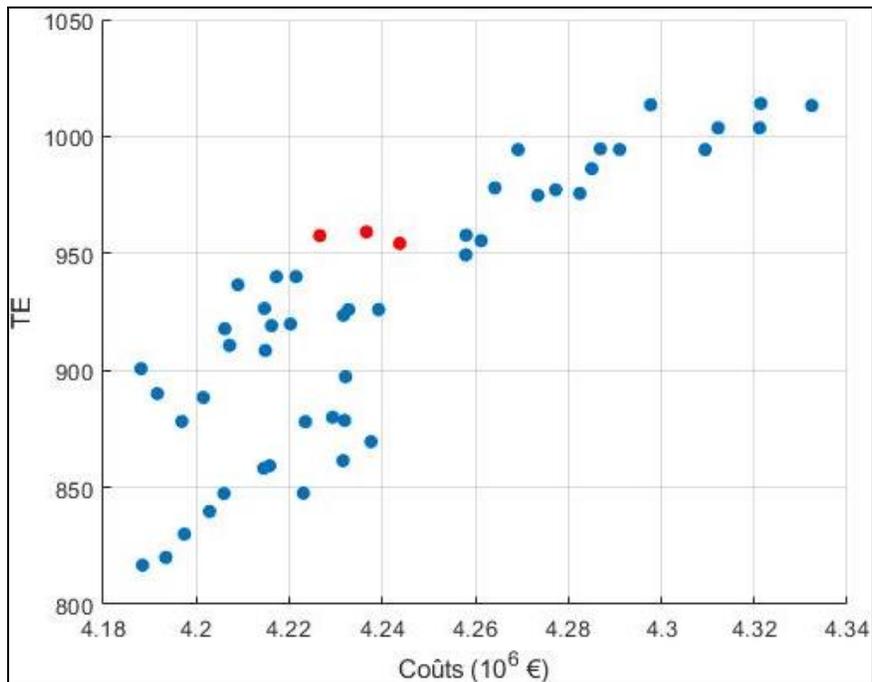


Figure 80. Compromis entre les coûts, les émissions de CO<sub>2</sub> et le taux d'embauche (Sc2)



**Figure 81.** Compromis entre les coûts et le taux d'embauche (Sc1)



**Figure 82.** Compromis entre les coûts et le taux d'embauche (Sc2)

En résumé, trois solutions apparaissent comme la meilleure zone garantissant des gains positifs en termes économiques, environnementaux et sociaux, sont sélectionnées pour analyser les résultats obtenus.

Le Tableau 60 présente les résultats des solutions sélectionnées, qui sont comparés à ceux du scénario non coopératif sous l'objectif économique Sc0\_eco.

<b>Sc1</b>				
<b>Indicateurs</b>	<b>Point</b>	<b>Point1</b>	<b>Point2</b>	<b>Point3</b>
<b>Coûts (10<sup>6</sup> €)</b>	Valeur	4.25	4.25	4.25
	Gain	11.83%	11.88%	11.78%
<b>Emissions (10<sup>9</sup> g CO<sub>2</sub>)</b>	Valeur	2.44	2.45	2.45
	Gain	13.77%	13.33%	13.18%
<b>Taux d'embauche</b>	Valeur	940.09	940.09	940.09
	Gain	18.64%	18.64%	18.64%
<b>Niveau de bruit (10<sup>3</sup> dB)</b>	Valeur	25.8992	27.084	25.704
	Gain	56.54%	54.55%	56.87%
<b>Taux de réduction de risque accident (%)</b>	Gain	14.74%	17.44%	18.35%
<b>Sc2</b>				
<b>Indicateurs</b>	<b>Point</b>	<b>Point1</b>	<b>Point2</b>	<b>Point3</b>
<b>Coûts (10<sup>6</sup> €)</b>	Valeur	4.23	4.26	4.26
	Gain	12.32%	11.67%	11.67%
<b>Emissions (10<sup>9</sup> g CO<sub>2</sub>)</b>	Valeur	2.42	2.45	2.46
	Gain	14.49%	13.25%	12.82%
<b>Taux d'embauche</b>	Valeur	957.58	949.37	957.8
	Gain	20.84%	19.81%	20.87%
<b>Niveau de bruit (10<sup>3</sup> dB)</b>	Valeur	20.8117	19.9874	20.9937
	Gain	65.08%	66.46%	64.77%
<b>Taux de réduction de risque accident (%)</b>	Gain	10.88%	17.47%	21.35%

**Tableau 60.** Les meilleures solutions multi-objectifs sélectionnées

Sur le plan pratique, les décideurs peuvent choisir l'une de ces solutions pour atteindre la durabilité tout en minimisant les coûts et les émissions de CO<sub>2</sub> et en maximisant le taux d'embauche. Ces solutions représentent également des gains significatifs en termes de niveau de bruit et de risque d'accident par rapport au scénario non collaboratif Sc0\_eco.

### 4.3. Analyse de sensibilité

#### 4.3.1. Impact de la flexibilité des délais de livraison sur la performance de la collaboration

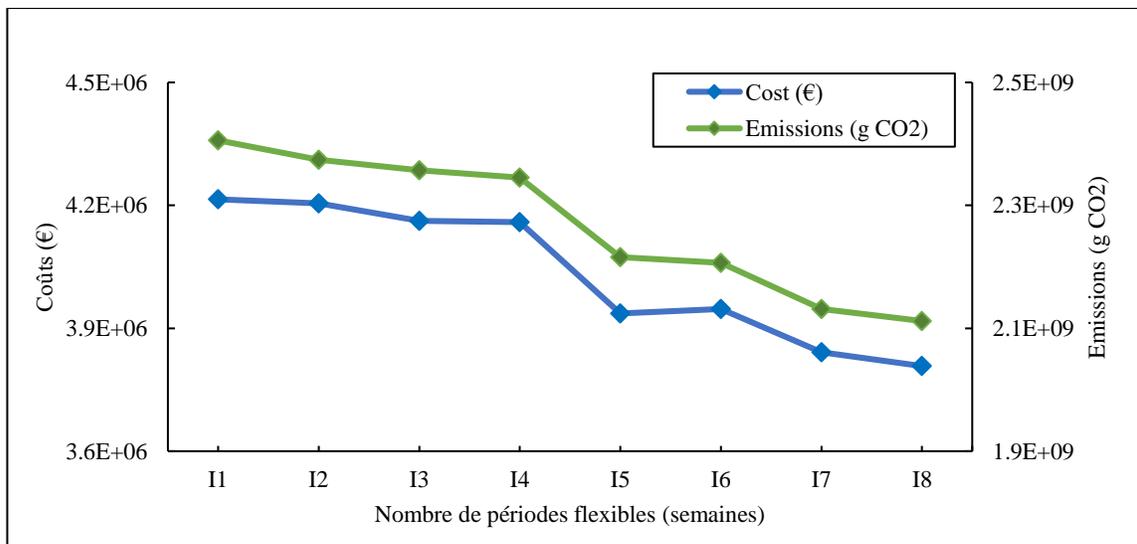
Comme nous l'avons démontré dans les chapitres précédents (cf. Chapitre 4 et Chapitre 5), le gain de la collaboration dépend fortement de la flexibilité que chaque partenaire autorise dans ses conditions de livraison (Vanovermeire & Sørensen, 2014). L'objectif de ce paragraphe est de vérifier si cette conclusion est toujours valable lorsqu'il s'agit d'un réseau de distribution à trois échelons. Ainsi, nous étudions l'analyse de plusieurs instances du scénario Sc2\_eco en variant à chaque fois les périodes autorisées de retard (cf. Tableau 61).

La Figure 83 montre que la flexibilité des délais de livraison a généralement amélioré les niveaux économique et environnemental. Ce résultat est cohérent avec celui obtenu par Khalifehzadeh et al. (2015, p.1) "les entreprises peuvent délibérément livrer des produits aux clients avec du retard, car elles en tirent profit. Par exemple, elles peuvent réduire les coûts de transport et de mise en place.". Les indicateurs sociaux/sociétaux ne se sont pas écartés de manière significative.

Instances	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7
I1	0	0	0	0	0	0	0
I2	1	1	1	0	0	0	0
I3	1	1	1	1	1	0	0
I4	1	1	1	1	1	1	1
I5	2	2	2	1	1	1	1
I6	2	2	2	2	2	1	1
I7	2	2	2	2	2	2	2
I8	3	3	3	2	2	2	2

**Tableau 61.** Nombre de périodes accordées pour une livraison tardive de chaque produit

En conclusion, la flexibilité des délais de livraison permet aux entreprises d'améliorer leur performance en matière de durabilité, notamment en termes économiques et environnementaux. Cependant, cette approche peut réduire la réactivité des entreprises vis-à-vis de leurs clients. Ainsi, trouver un bon compromis avec les clients est nécessaire pour définir les délais autorisés.



**Figure 83.** Impact de la flexibilité du nombre de périodes sur les coûts et les émissions de CO<sub>2</sub> (Sc2).

#### 4.3.2. Impact du nombre des centres de distribution ouverts sur la performance de la collaboration

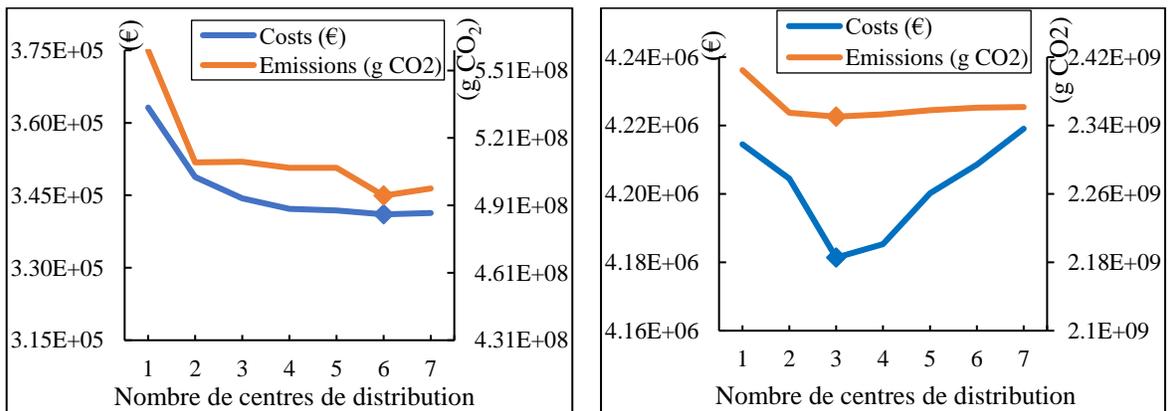
Dans ce paragraphe, nous analysons l'impact du nombre de centres de distribution ouverts sur la performance de la collaboration horizontale. Plusieurs auteurs (par exemple, [Pan et al., 2013](#) ; [Tang et al., 2019](#) ; [Yaman, 2009](#)) ont montré que les coûts de transport diminuent lorsque le nombre de hubs augmente. Ces auteurs ont constaté que l'augmentation du nombre de hubs ouverts permet d'améliorer la possibilité de regrouper les flux, permettant ainsi de massifier davantage les flux. Comme Sc2 a fourni les meilleurs résultats pour tous les niveaux de durabilité, nous analysons dans ce paragraphe l'impact des variations du nombre de centres de distribution ouverts sur le coût et les émissions de CO<sub>2</sub> obtenus par ce scénario, en particulier Sc2\_eco.

La variation des coûts et des émissions de transport en fonction du nombre de centres de distribution ouverts est représentée par la Figure 84-a. Il est clair que plus le nombre de centres de

distribution augmente, plus les coûts et les émissions diminuent. Par conséquent, le nombre optimal de centres de distribution est égal à six.

Comme évoqué dans le chapitre 4, cette conclusion peut être différente si on considère les coûts et les émissions de CO<sub>2</sub> générés par l'ouverture des hubs (Pan et al., 2013). En effet, chaque installation génère des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub> supplémentaires liés à la construction et à l'exploitation des hubs, comme dans notre cas (cf. Figure 84-b). De toute évidence, les coûts logistiques et les émissions de CO<sub>2</sub> augmentent régulièrement à partir de trois centres de distribution. Par conséquent, pour obtenir des performances optimales du point de vue économique et environnemental, le nombre de centres de distribution à ouvrir est égal à trois.

En résumé, concevoir des réseaux de distribution en optimisant uniquement les coûts ou les émissions générés par le transport de marchandises signifie que le nombre de centres de distribution ouverts devrait être égal à six. Ce résultat n'est pas exact et ne reflète pas la réalité. De plus, le DNDP est un problème stratégique qui concerne l'orientation générale de l'entreprise et implique des décisions à long terme qui affectent son avenir. Il est donc essentiel d'évaluer de manière exhaustive les indicateurs de durabilité afin de prendre des décisions correctes et utiles pour les engagements à long terme. La conclusion à laquelle nous sommes parvenus est que la prise en compte des coûts d'installation et des émissions oblige le modèle à choisir un nombre minimum de hubs lors de l'optimisation de leurs capacités, ce qui peut faciliter la gestion des ressources humaines et des flux d'information.



a) Coût du transport et émissions de CO<sub>2</sub> dues au transport (Sc2\_eco)

b) Coûts logistiques et émissions totales de CO<sub>2</sub> (Sc2\_eco)

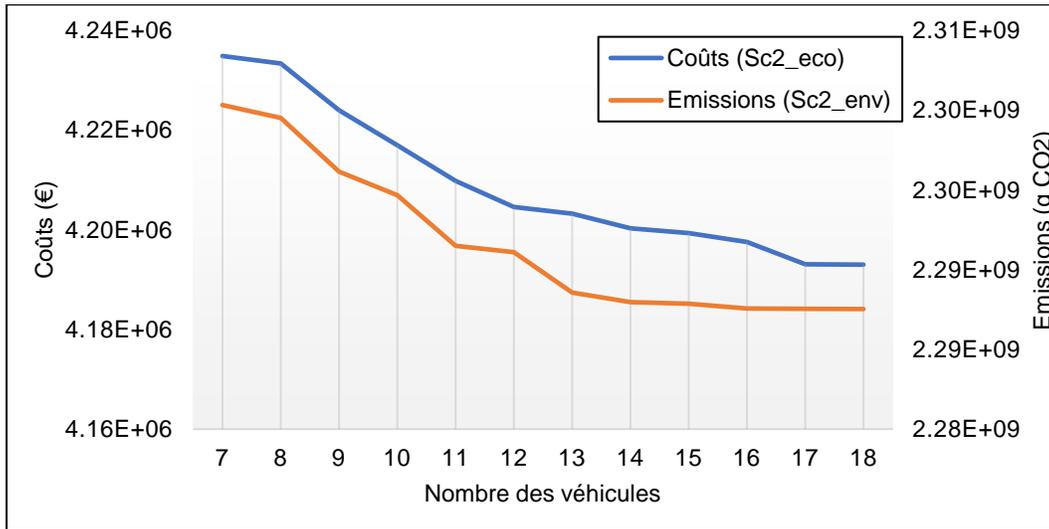
**Figure 84.** Variation des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub> en fonction du nombre de centres de distribution ouverts

### 4.3.3. Impact du nombre de véhicules disponibles sur la durabilité

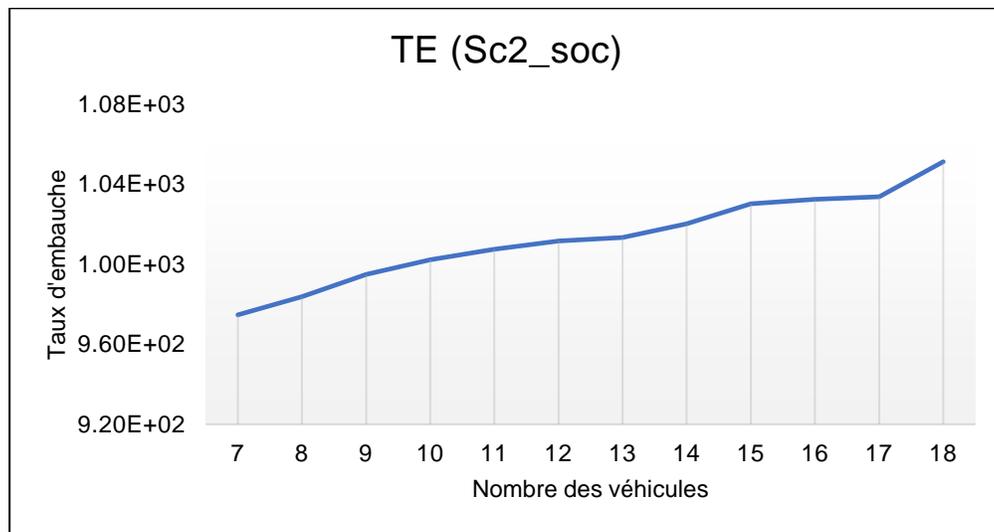
Dans ce paragraphe, nous analysons l'impact de la variation du nombre de véhicules sur la durabilité économique, environnementale et sociale. Pour ce faire, nous avons optimisé le meilleur scénario (scénario 2) en variant à chaque fois le nombre de véhicules des trois types utilisés.

La Figure 85 montre que plus le nombre de véhicules augmente, plus les coûts et les émissions de CO<sub>2</sub> diminuent. Il est également assez clair que plus le nombre de véhicules augmente

plus le taux d'embauche augmente (cf. Figure 86). Ceci est dû à la massification des flux envoyés dans certaines périodes.



**Figure 85.** Variation des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub> en fonction du nombre de véhicules disponibles

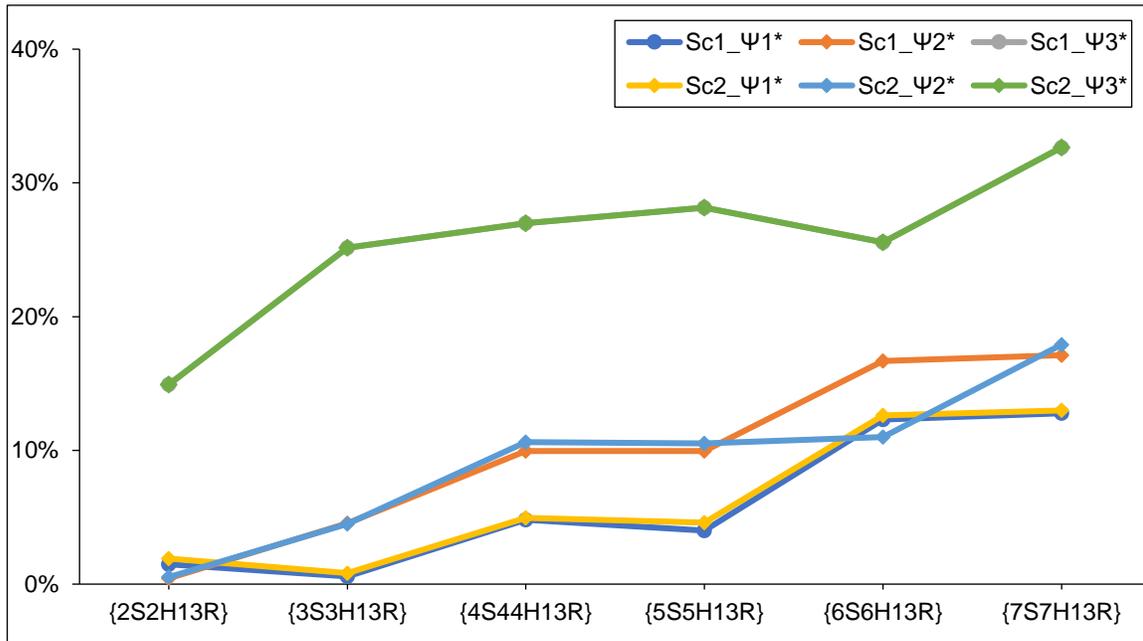


**Figure 86.** Variation du taux d'embauche en fonction du nombre de véhicules disponibles

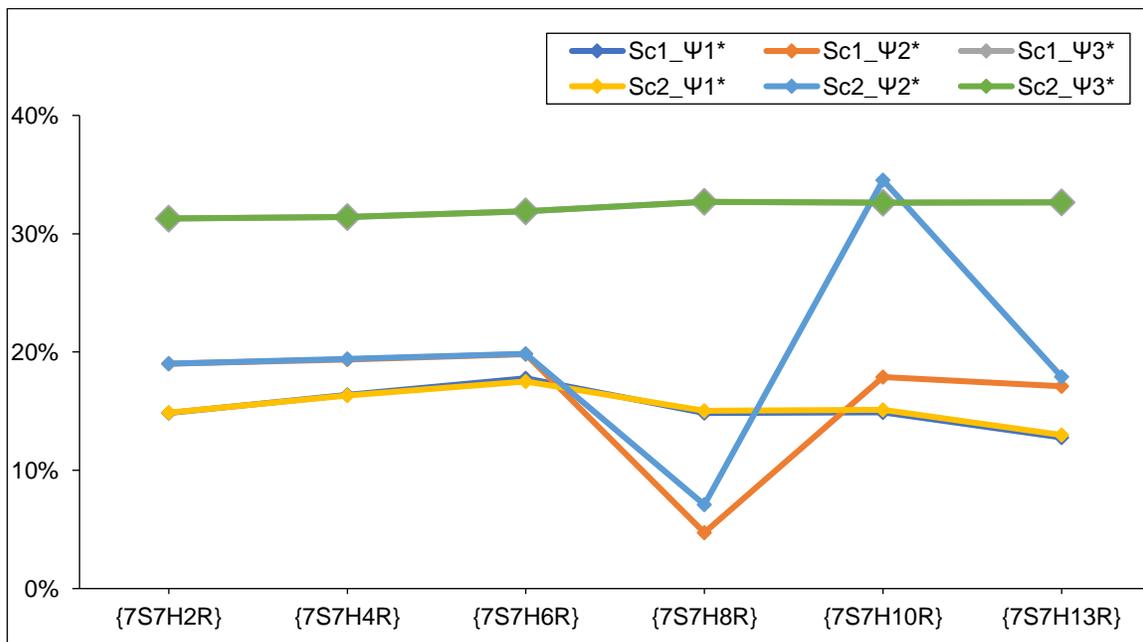
#### 4.3.4. Impact du nombre de partenaires et de détaillants sur la performance de la collaboration

Dans ce paragraphe, nous analysons l'impact de la taille du problème sur les économies qu'on peut atteindre par les deux scénarios collaboratifs par rapport au scénario non-collaboratif. Cette analyse est réalisée en variant le nombre de fournisseurs, de hubs et de détaillants {n° fournisseurs, n° hubs, n° détaillants}. Les deux Figures 87 et 88 illustrent les taux d'amélioration des coûts, des émissions de CO<sub>2</sub> et de taux d'embauche des scénarios collaboratifs calculés par rapport aux scénarios non-collaboratifs Sc0\_eco, Sc0\_env et Sc0\_soc. Les grandeurs Sci\_Ψ1\*, Sci\_Ψ2\*,

Sci\_Ψ3\* sont les valeurs minimales des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub> et la valeur maximale de taux d'embauche dans les scénarios  $i \in \{1, 2\}$ .



**Figure 87.** Gains obtenus en variant le nombre de partenaires



**Figure 88.** Gains obtenus en variant le nombre de détaillants

La Figure 87 montre que la collaboration horizontale offre toujours une meilleure performance par rapport à la non-collaboration. Il est assez clair que les avantages de la collaboration augmentent avec l'augmentation du nombre de partenaires collaborant entre eux. En revanche, on constate que le scénario Sc2 est généralement le meilleur scénario par rapport au

scénario Sc1. En fixant le nombre de fournisseurs à sept, la variation du nombre de détaillants influence de manière aléatoire les performances des scénarios de collaboration en raison de leur localisation (cf. Figure 88). Les deux scénarios présentent les mêmes taux d'amélioration de taux d'embauche. Par ailleurs, il est assez évident que le temps de résolution des différentes instances augmente avec l'augmentation de la taille du problème ce qui nous a poussés à résoudre les modèles mathématiques par les méta-heuristiques dans le chapitre suivant.

## 5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité le problème de conception d'un réseau de distribution collaboratif multi-échelons et multi-périodes. Les contributions de ce chapitre sont multiples. En effet, les modèles mathématiques proposés nous ont permis de déterminer le nombre optimal de chaque type de véhicules utilisés. En d'autres termes, ils nous ont permis de déterminer la taille optimale de la flotte hétérogène des véhicules. En outre, les modèles mathématiques développés permettent de sélectionner les localisations optimales, le nombre et les capacités des hubs (entrepôts et centres de distribution).

La performance de deux scénarios collaboratifs a été analysée par rapport à un scénario non-collaboratif en se basant sur une liste d'indicateurs de durabilité, à savoir les coûts logistiques, les émissions de CO<sub>2</sub> dues aux véhicules et aux hubs, le taux d'embauche, le niveau de bruit et le risque accident. Une étude de cas d'un réseau de distribution national a été étudiée. Tout d'abord, les résultats des scénarios collaboratifs ont été comparés à ceux du scénario non-collaboratif en résolvant les modèles avec des fonctions mono-objectif. La première fonction minimise les coûts logistiques, tandis que la deuxième minimise les émissions de CO<sub>2</sub> dues aux véhicules et aux hubs et la troisième fonction maximise le taux d'embauche. Ensuite, la méthode  $\varepsilon$ -contrainte est utilisée pour résoudre les modèles multi-objectifs et trouver des solutions offrant un certain compromis entre les objectifs. Les résultats ont montré qu'il est toujours bénéfique de faire la collaboration. En effet, la mutualisation a permis d'atteindre des résultats notables sur tous les niveaux de la durabilité.

Plusieurs conclusions, obtenues grâce à l'analyse de sensibilité, ont montré qu'il est possible d'améliorer davantage les résultats de la collaboration grâce à l'augmentation du nombre de véhicules disponibles, le nombre de nœuds, l'assouplissement des conditions de livraison, etc. Cependant, la principale limite rencontrée dans ce chapitre se focalise sur le temps de résolution qui ne cesse de s'accroître en fonction de la taille du problème. Dans le but de remédier à ce problème, dans le chapitre suivant, nous développerons des algorithmes méta-heuristiques pour trouver des solutions approchées avec un temps de résolution acceptable.

# Chapitre 7. Optimisation des réseaux de distribution collaboratifs par les méta-heuristiques

## 1. Introduction

Les modèles mathématiques développées sont NP-difficiles et leur résolution exacte est limitée au niveau du temps de calcul. Ainsi, il est nécessaire de développer des algorithmes méta-heuristiques pour trouver des solutions approchées avec un gap minimal dans un temps de résolution acceptable. Dans ce chapitre, nous recensons quelques travaux de la littérature qui sont proches de notre étude et qui ont eu recours aux méta-heuristiques pour résoudre le problème de conception des réseaux de distribution. Ensuite, nous développons deux algorithmes méta-heuristiques mono-objectif, à savoir l'algorithme génétique et le recuit simulé et un algorithme multi-objectif NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II*) pour trouver un bon compromis entre les trois aspects de durabilité. Nous réalisons également des expériences numériques sur le même réseau de distribution présenté dans le chapitre 6 en variant le nombre de nœuds.

## 2. Revue de la littérature

Pour une meilleure analyse, nous avons classé les études en deux catégories : optimisation mono-objectif et celle multi-objectif.

### 2.1. L'optimisation mono-objectif

[Gen et al. \(2006\)](#) ont considéré le problème de conception d'un réseau de distribution à deux échelons pour minimiser les coûts de transport et d'ouverture des entrepôts. Pour résoudre le problème, les auteurs ont eu recours à l'AG (Algorithme Génétique). Le même problème a été traité par [Stanimirovic \(2007\)](#) en prenant en compte les capacités des entrepôts. L'approche heuristique est basée sur l'algorithme génétique. [Melo et al. \(2008\)](#) ont proposé un modèle mathématique en MILP qui a été résolu par la recherche Tabou. L'objectif est de concevoir un réseau de distribution à trois échelons où la planification du transport est effectuée sur plusieurs périodes en minimisant divers coûts logistiques. Le même problème a été étudié par [Lin et al. \(2009\)](#) en utilisant un algorithme évolutif hybride HEA (*Hybrid Evolutionary Algorithm*) combiné avec la recherche local LS (*Local Search*) et un autre algorithme FLC (*Fuzzy Logic Control*).

[Wang et Hsu \(2010\)](#) ont pris en considération la logistique inverse lors de la conception d'un réseau de distribution à trois échelons. Le problème est modélisé en ILP (*Integer Linear Programming*) et résolu en utilisant l'AG. Par ailleurs, [Firoozi et al. \(2011\)](#) ont proposé un modèle

mathématique en MINLP (*Mixed Integer Linear Programming*) pour minimiser le coût de transport, d'ouverture et de stockage. La résolution est effectuée par un algorithme hybride combinant le HC (*Hill Climbing*) pour générer une solution initiale et le recuit simulé (en anglais SA : *Simulated Annealing*) pour améliorer cette solution et éviter l'optimal local.

Mehdizadeha et Afrabandpei (2012) ont étudié la conception d'un réseau de distribution à deux échelons en proposant un modèle mathématique en MINLP afin de minimiser les coûts de transport, de stockage et d'achat de véhicules. Les grandes instances sont résolues par un algorithme génétique hybride basé sur les priorités et un algorithme de recuit simulé. En plus, Desa (2014) a proposé un algorithme génétique avec une méthode de pénalisation appelée P-GA (*Penalty Genetic Algorithm*) pour minimiser les coûts de transport et d'ouverture des hubs. L'auteur a montré que cet algorithme nécessite un délai excessif pour obtenir une solution satisfaisante. L'amélioration de cet algorithme est effectuée en modifiant le croisement et la mutation au sein de cet algorithme. L'approche résultante est appelée HR-GA (*Heuristics Rules Genetic Algorithm*).

Plusieurs autres études ont eu recours à l'AG pour trouver des solutions approchées à leurs problèmes de conception de réseaux de distribution (Aravendan & Panneerselvam, 2015 ; Hlyal et al., 2015).

## 2.2. L'optimisation multi-objectif

La deuxième catégorie d'étude a traité le problème de conception du réseau de distribution en tenant compte de plusieurs objectifs contradictoires. Par la suite, nous citons les travaux les plus proches de notre étude.

Altiparmak et al. (2006) ont développé un MINLP pour trouver un bon compromis entre la minimisation des coûts logistiques et la maximisation de la satisfaction des clients. La résolution du problème est effectuée par deux algorithmes multi-objectif MOGA (*Multi Objective Genetic Algorithm*) et MOSA (*Multi Objective Simulated Annealing*). La comparaison des résultats a montré que le MOGA a surpassé le MOSA non seulement par le nombre moyen des solutions Pareto optimales mais aussi par leur qualité. Cependant, le temps de résolution de l'algorithme génétique est environ deux fois plus élevé que le recuit simulé bien que le même critère d'arrêt a été utilisé pour les deux algorithmes. Cette différence provient du fait que l'algorithme génétique comporte des mécanismes supplémentaires tels que la sélection et le croisement qui prennent beaucoup de temps.

Javanshir et al. (2012) ont présenté un MILP pour concevoir un réseau de distribution à 3-échelons en minimisant les coûts logistiques et le retard de livraison. Les auteurs ont montré que le NSGA-II fournit des résultats de meilleure qualité par rapport à MOPSO (*Multi Objective Particle Swarm Optimization*). Billal et Hossain (2020) ont développé un modèle mathématique sous forme de MILP pour concevoir un réseau de distribution composé de trois échelons où la planification du transport est effectuée sur plusieurs périodes. Pour les instances de petite taille, la résolution est effectuée par la méthode  $\epsilon$ -contrainte, tandis que, la résolution des instances de grande taille est assurée par deux algorithmes multi-objectif, à savoir MOGA (*Multi-Objective Genetic Algorithm*) et NSGA-II. Les résultats ont montré l'efficacité de ce dernier algorithme. En effet, ce dernier a permis d'obtenir des solutions sur le front de Pareto dominées par rapport au

MOGA qui utilisent une somme pondérée comme stratégie d'évaluation. En outre, [Samadi et al. \(2018\)](#) ont utilisé des méta-heuristiques basées sur l'algorithme génétique pour trouver un bon compromis entre les coûts et les émissions de CO<sub>2</sub>. Le NSGA-II a été utilisé également par [Brahmi et al. \(2020\)](#) pour résoudre un MILP, notamment les instances de grandes tailles. L'objectif est de concevoir un réseau de distribution en évaluant les coûts logistiques et les émissions de CO<sub>2</sub> dues au transport.

Après cette analyse de la littérature, nous pouvons conclure que la majorité des études traitant le problème de conception des réseaux de distribution peuvent être caractérisées par leurs fonctions objectifs. Généralement ces études donnent plus d'attention à l'aspect économique par la réduction des coûts logistiques, notamment celui du transport. Peu de travaux ont introduit l'aspect environnemental lors de la conception des réseaux de distribution.

Concernant l'optimisation mono objectif, la plupart des travaux utilisent l'AG, le PSO et le SA. Les deux premiers algorithmes sont basés sur la génération des populations, ce qui offre un espace de recherche plus grand, tandis que le SA est un algorithme à solution unique mais il offre la rapidité de la résolution.

Concernant l'optimisation multi objectif, la majorité des études utilisent le NSGA-II et le MOPSO. Ceci est justifié par le fait que ces algorithmes ont prouvé leur efficacité en termes de nombre de solutions Pareto optimales ([Billal & Hossain, 2020](#) ; [Javanshir et al., 2012](#)).

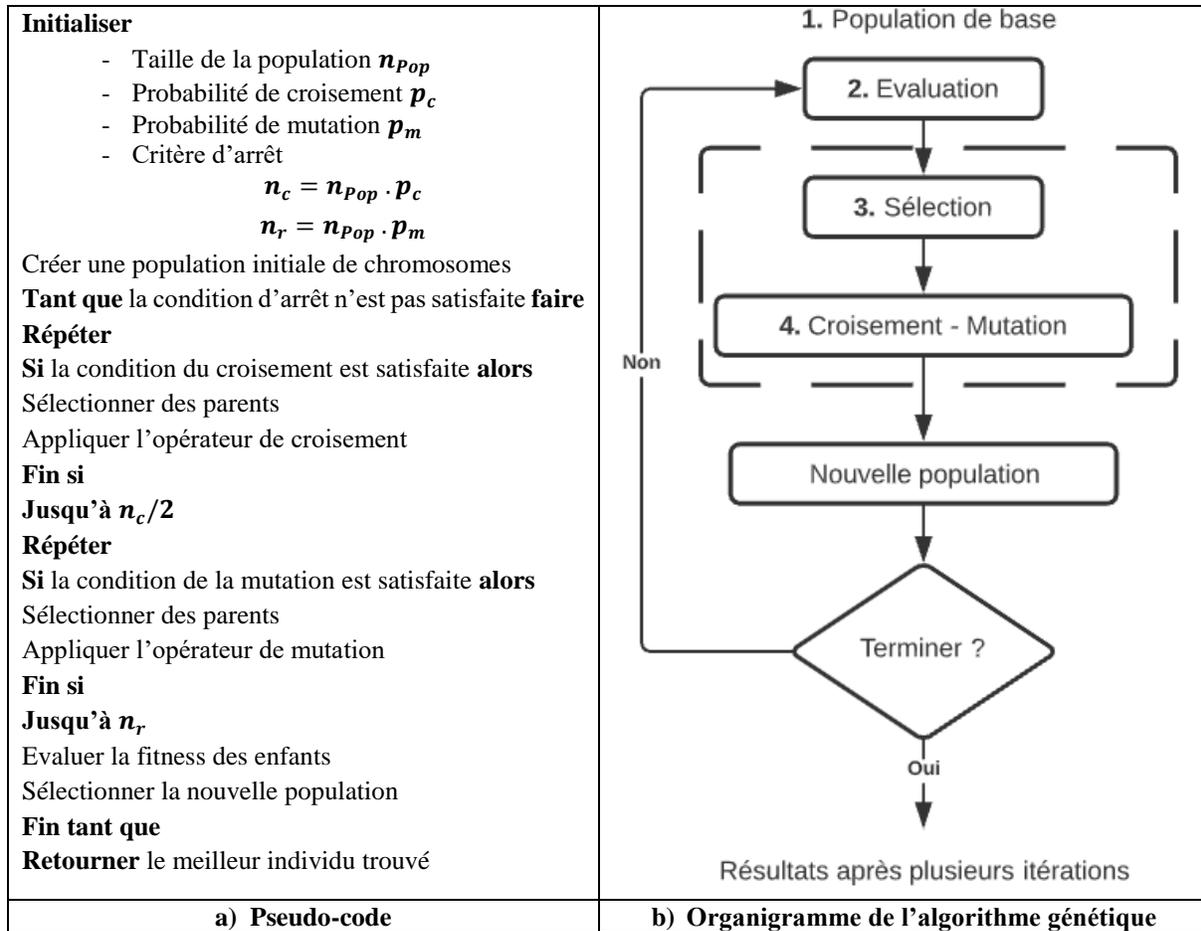
Les algorithmes AG, SA et NSGA-II sont choisis dans notre étude pour effectuer l'optimisation mono-objectif et multi-objectif. Ce choix est justifié par la performance et l'efficacité de ces algorithmes dans la littérature.

### 3. Approches méta-heuristiques

#### 3.1. L'algorithme génétique

L'algorithme génétique a été utilisé pour la première fois par [Holland \(1975\)](#) et il a prouvé qu'il est capable de fournir des résultats notables dans divers problèmes d'optimisation. Dans le but de synthétiser les meilleures caractéristiques des différents individus, l'algorithme génétique imite trois opérations génétiques sur une certaine population de base telles que la sélection, la mutation et le croisement.

Cet algorithme et ses variants sont très utilisés dans la littérature vu leur performance en termes de gap et de temps de résolution ([Shoja et al., 2019](#) ; [Hlyal et al., 2015](#)). Ces algorithmes permettent d'explorer des domaines possédant de très nombreuses solutions. L'algorithme génétique utilise généralement quatre éléments pour rechercher le ou les extrema(s) d'une solution définie sur un espace de données (cf. Figure 89).



**Figure 89.** Organigramme et pseudo-code de l'algorithme génétique

Les étapes de cet algorithme sont expliquées comme suit :

### ❖ Génération de la population initiale

Le démarrage de l'algorithme génétique commence par la génération aléatoire de la population initiale qui respecte les contraintes du problème étudié. La génération de la population initiale joue un rôle important dans la qualité de la solution finale (Altıparmak et al., 2006). Les solutions générées initialement sont représentées sous forme de chromosomes composés de plusieurs gènes.

### ❖ Evaluation

Après la génération de la population initiale, il est nécessaire d'attribuer une note à chaque individu pour distinguer les plus prometteurs qui participeront à l'amélioration de cette population dans les générations futures. Dans notre étude, la fonction d'évaluation, appelée fitness, est la fonction objectif qui vise à minimiser les coûts ou les émissions de CO<sub>2</sub> ou bien à maximiser le taux d'embauche. Selon (Holland, 1975), l'Équation (155) est utilisée pour évaluer la fitness comme suit.

$$fitness = \frac{\text{coût}}{\text{moyenne de la population}} \quad (155)$$

### ❖ Sélection

À chaque itération, l'algorithme génétique sélectionne les individus de la population actuelle qui survivront et se reproduiront pour créer une population intermédiaire. La phase de sélection joue un rôle important dans la détermination des performances et de la qualité des nouvelles générations. Les différentes techniques de sélection utilisées dans la littérature sont les suivantes (Durand, 2004).

#### - Sélection par tournoi

Dans une population de  $n$  paires de chromosomes, la sélection par tournoi consiste à faire lutter les individus les uns contre les autres et on détermine qui suivra la phase de reproduction. Pour ce faire, on ajoute un paramètre à l'algorithme génétique qui est la probabilité de victoire du plus fort, c'est-à-dire la chance que le meilleur individu de chaque paire soit sélectionné (en général de 70% à 100%).

#### - Sélection par la roulette « Roulette Wheel »

Chaque individu a une probabilité d'être sélectionné qui est proportionnelle à son adaptation au problème. Pour sélectionner un individu, on effectue un tirage homogène sur la roue de la fortune classique, sur laquelle chaque individu est représenté par une portion proportionnelle à son adaptation.

#### - Sélection uniforme

La phase de sélection se fait aléatoirement, uniformément et sans intervention de la valeur d'adaptation. Chaque individu a donc une probabilité égale à  $1/N$  d'être choisi, où  $N$  est le nombre total d'individus dans la population.

### ❖ Opérateurs de diversification

Cette phase consiste à diversifier la population et d'explorer l'espace du travail en utilisant des opérateurs de diversification tels que le croisement et la mutation.

#### - Croisement

L'opérateur de croisement vise à échanger des parties des chaînes de deux individus, ce qui permet d'enrichir la diversité de la population en manipulant la structure des chromosomes. Généralement, les croisements sont réalisés entre deux parents pour engendrer deux enfants. Il existe plusieurs types de croisement tels que le croisement multipoints, le croisement double points et le croisement à un point (cf. Figure 90).

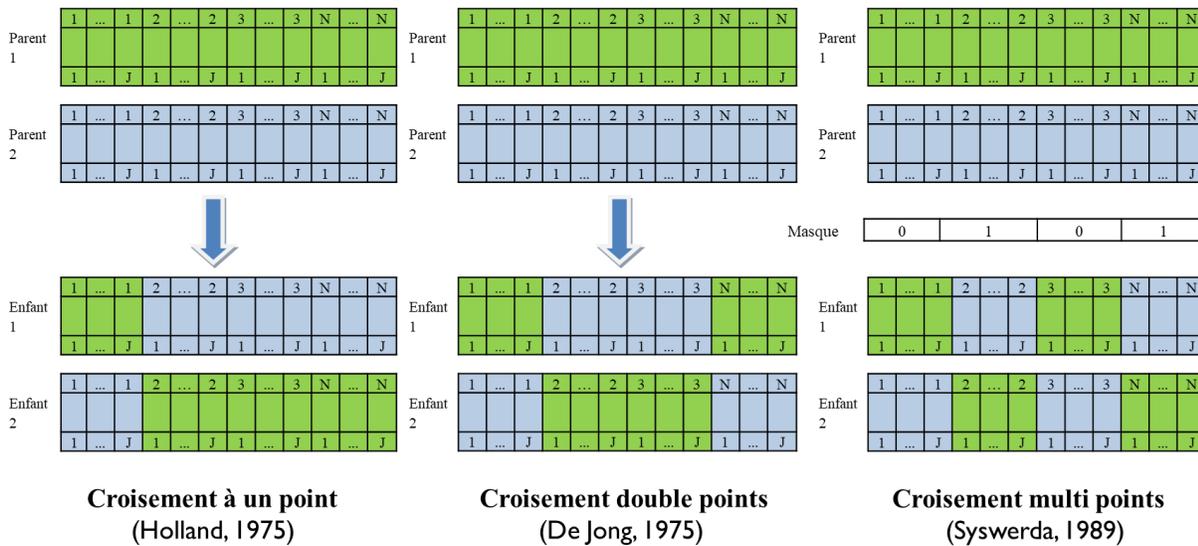


Figure 90. Les différentes techniques de croisement

### - Mutation

L'opérateur de mutation permet de garantir l'exploration de l'espace de travail. En d'autres termes, la mutation permet à l'algorithme génétique de mieux parcourir l'espace de recherche en infligeant une modification dans un gène. Dans notre étude, la mutation est exercée par plusieurs types expliqués dans la littérature (cf. Figure 91).

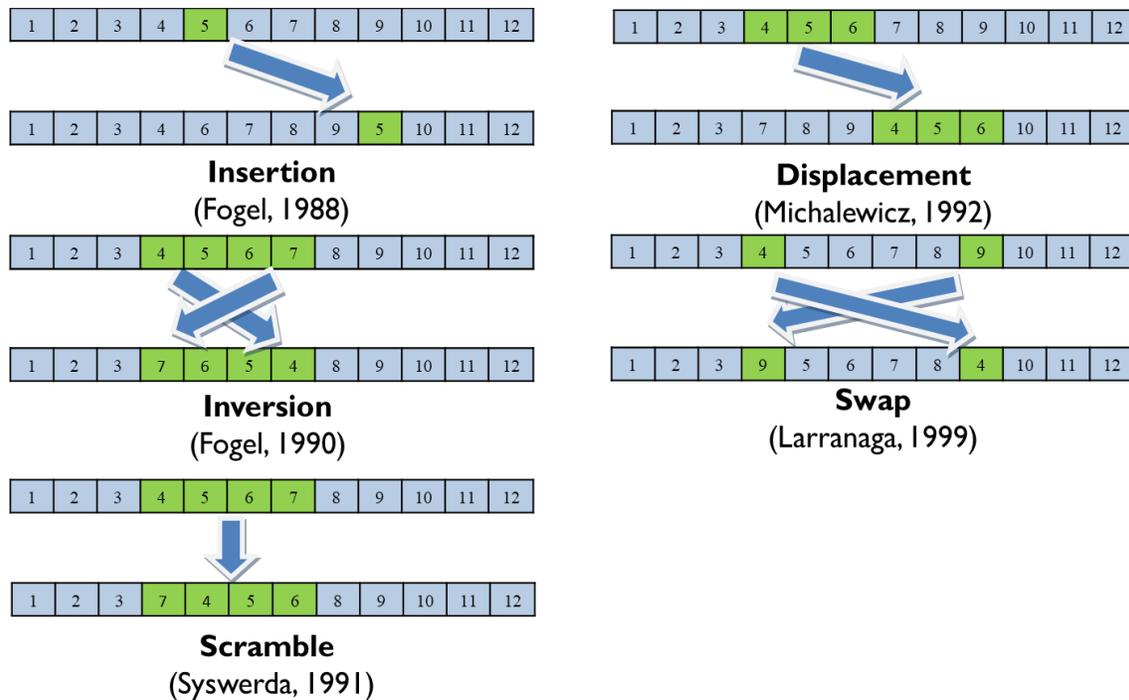


Figure 91. Les différentes techniques de mutation

### 3.2. Le recuit simulé

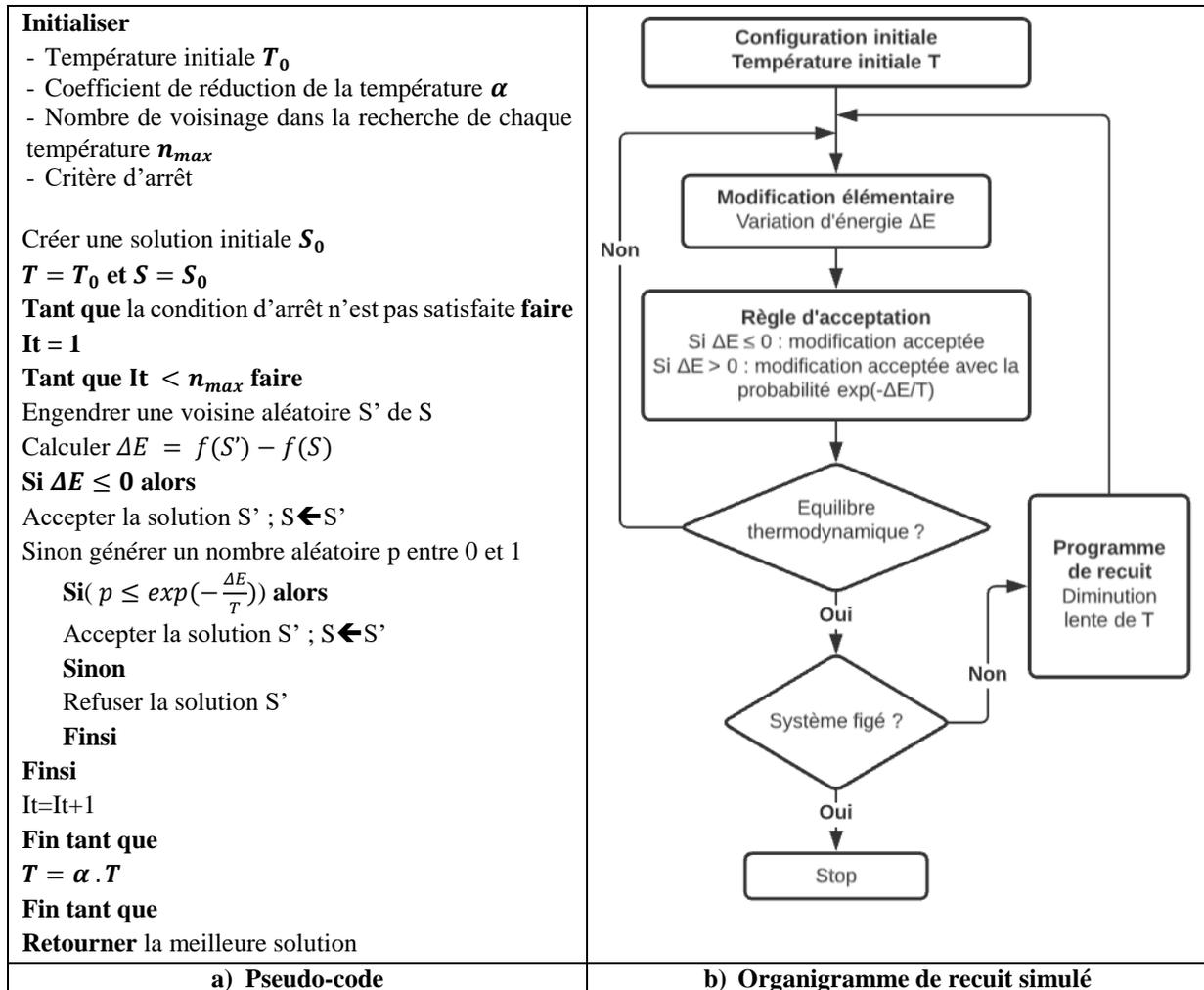
L'algorithme du recuit simulé a été proposé pour la première fois par [Kirkpatrick et al. \(1983\)](#). Il s'agit d'une méta-heuristique à solution unique dont l'idée provient du processus physique de recuit qui consiste à élever au maximum la température d'un métal jusqu'à la fusion. Ensuite, un refroidissement est effectué en baissant la température jusqu'à atteindre l'énergie minimale pour obtenir une structure cristallisée stable. En cas d'une vitesse de refroidissement rapide, le métal va être fragile. De même que l'AG, le SA consiste à générer une solution initiale aléatoire  $S$  (cf. paragraphe 3.1) et à chercher à chaque itération une solution de voisinage réalisable  $S'$ . Dans le cas où la nouvelle solution est améliorée, une mise à jour sera effectuée ( $S \leftarrow S'$ ). Sinon, la nouvelle solution peut être acceptée pour éviter d'être piégé dans les minimums locaux avec une certaine probabilité d'acceptation qui est décrite par l'Équation (156).

$$p_{acc} = \exp\left(\frac{f(S') - f(S)}{T}\right) \quad (156)$$

Où  $f$  est la fonction objectif qui peut être dans notre étude soit les coûts ou les émissions de  $\text{CO}_2$  ou bien le taux d'embauche.

Concernant l'acceptation des solutions, un nombre aléatoire uniforme dans l'intervalle  $[0, 1]$  est généré. Dans le cas où ce nombre est inférieur à la probabilité d'acceptation ; la nouvelle solution sera acceptée. La chance d'accepter des solutions de mauvaise qualité devient faible de proche en proche.

À chaque itération, la température est progressivement abaissée selon un coefficient de refroidissement  $\alpha < 1$  tel que  $T_{i+1} = \alpha \cdot T_i$ . La boucle est répétée jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit satisfait. Le pseudo-code de recuit simulé est représenté par la Figure 92.



**Figure 92.** Organigramme et pseudo-code de l'algorithme du recuit simulé

### 3.3. Le NSGA-II

L'algorithme génétique multi-objectif NSGA-II a été proposé par Deb et al. (2002). Il s'agit d'une extension et d'une amélioration de NSGA, qui a été proposé par Srinivas et Deb (1995).

L'algorithme NSGA-II est rapide et élitiste de tri non dominé qui manipule une population d'individus et utilise un mécanisme explicite de préservation de la diversité. La présence d'élites augmente les chances de créer de meilleurs enfants. Ceci implique qu'un algorithme utilisant l'élitisme convergera plus rapidement. Le principe de cette méthode est de générer aléatoirement une population  $PO$  de  $N$  solutions (ou individus) et les classer selon le principe de dominance. À chaque individu de cette population, on associe un rang selon son niveau de dominance, les individus du premier niveau sont les meilleurs (non dominés) et constituent le front  $F_1$ , suivis de ceux du deuxième niveau  $F_2$ , puis du troisième  $F_3$  et ainsi de suite. Les fronts  $F_i$  sont définis récursivement en ignorant les solutions des fronts précédemment détectés.

À l'itération  $t$ , le rang de l'individu  $X$  est défini par  $R(X, t) = 1 + p_i(t)$  avec  $p_i(t)$  le nombre d'individus qui dominent l'individu  $X$ . Les opérations usuelles de croisement, de mutation et de

sélection sont utilisées pour générer également une autre population d'individus enfants  $Q_t$  de taille  $N$ .

Ensuite, on compare les individus de la population courante avec les meilleurs individus non dominés. En effet, l'ancienne et la nouvelle population sont combinées pour former la population globale de taille  $2N$  solutions  $R_t = P_t \cup Q_t$ . Cette population  $R_t$  est divisée selon le principe de dominance. Par la suite, les solutions du premier rang  $F_1$  sont choisies, ensuite celles du deuxième rang  $F_2$  et  $F_3$  jusqu'à ce que le nombre d'individus choisis coïncide exactement avec  $N$  pour former la nouvelle population  $P_{t+1}$ . Les éléments manquants seront sélectionnés du dernier front à l'aide d'un opérateur qui s'appelle « *Crowding distance* ». Pour le calcul *Crowding distance* de chaque individu du dernier front, celui avec la distance la plus importante est sélectionné et ajouté à l'ensemble  $P_{t+1}$ . En d'autres termes, l'opérateur *Crowding distance* est une mesure de la distance séparant deux solutions voisines et permet d'assurer une diversité des individus et éviter les zones denses et isolées (Deb et al., 2002).

Soit  $x$  et  $y$  deux individus de la population, si le rang de l'individu  $x$  ( $x_{rang}$ ) est plus élevé, il sera choisi. Sinon, si les rangs des deux individus coïncident, c'est-à-dire appartiennent au même front, on choisit celui qui appartient à une zone dépeuplée ( $x_{distance}$  minimale). Autrement dit :

$$x > y \leftrightarrow \text{ou } \left\{ \begin{array}{l} x_{rang} < y_{rang} \\ x_{rang} = y_{rang} \text{ et } x_{distance} < y_{distance} \end{array} \right\}$$

Les solutions sont sélectionnées afin de compléter la nouvelle population  $P_{t+1}$ . Après cette mise à jour, le processus se répète jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit satisfait et ainsi le meilleur front de Pareto est retourné.

La Figure 93 illustre le principe de l'algorithme NSGA-II.

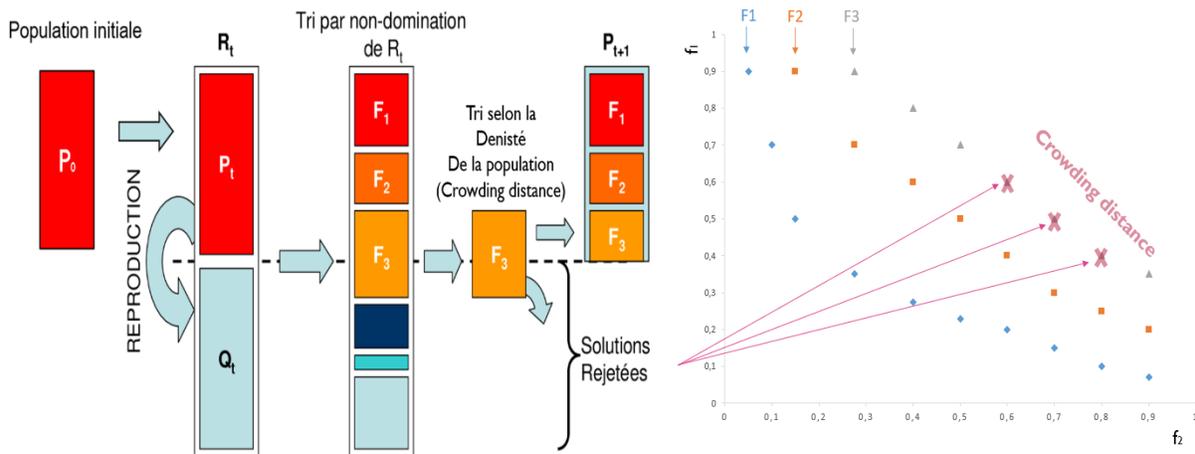


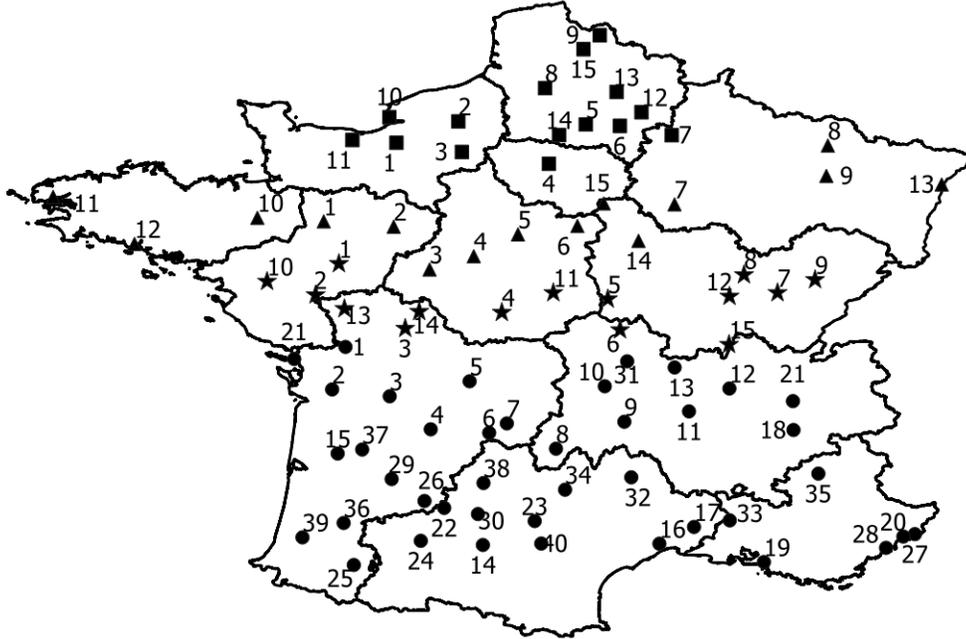
Figure 93. Principe de l'algorithme NSGA-II

#### 4. Résultats numériques

Dans ce paragraphe, nous utilisons les algorithmes mono-objectif AG et SA ainsi que le NSGA-II pour trouver des solutions approchées du problème de conception de réseau de distribution collaboratif.

Les résultats et les analyses sont basées sur les 85 nœuds d'un réseau de distribution national (cf. Figure 94). Ce réseau se constitue de 15 fournisseurs livrant leurs marchandises vers 40 détaillants par l'intermédiaire de 15 entrepôts et 15 centres de distribution.

Le Tableau 62 représente les localisations des différents nœuds.



**Figure 94.** Les différents nœuds choisis pour l'analyse des performances des algorithmes

Type de nœuds	Localisation
Fournisseurs	1 : Lisieux, 2 : Rouen, 3 : Evreux, 4 : Paris, 5 : Compiègne, 6 : Soissons, 7 : Reims, 8 : Amiens, 9 : Lille, 10 : Le Havre, 11 : Caen, 12 : Laon, 13 : Saint-Quentin, 14 : Creil, 15 : Lens
Entrepôts	1 : Laval, 2 : Le Mans, 3 : Tours, 4 : Blois, 5 : Orléans, 6 : Montargis, 7 : Troyes, 8 : Metz, 9 : Nancy, 10 : Rennes, 11 : Brest, 12 : Lorient, 13 : Strasbourg, 14 : Auxerre, 15 : Chaumont
Centres de distribution	1 : Angers, 2 : Cholet, 3 : Poitiers, 4 : Châteauroux, 5 : Nevers, 6 : Moulins, 7 : Dole, 8 : Dijon, 9 : Besançon, 10 : Nantes, 11 : Bourges, 12 : Beaune, 13 : Bressuire, 14 : Châtelleraut, 15 : Maçon
Détaillants	1 : Niort, 2 : Saintes, 3 : Angoulême, 4 : Périgueux, 5 : Limoges, 6 : Brive-la-Gaillarde, 7 : Tulle, 8 : Auxillac, 9 : Brioude, 10 : Clermont-Ferrand, 11 : Saint-Étienne, 12 : Lyon, 13 : Roanne, 14 : Toulouse, 15 : Bordeaux, 16 : Montpellier, 17 : Nîmes, 18 : Grenoble, 19 : Marseille, 20 : Nice, 21 : La Rochelle, 22 : Valence, 23 : Albi, 24 : Auch, 25 : Pau, 26 : Agen, 27 : Monaco, 28 : Cannes, 29 : Marmande, 30 : Montauban, 31 : Vichy, 32 : Mende, 33 : Avignon, 34 : Rodez, 35 : Gap, 36 : Mont-de-Marsan, 37 : Libourne, 38 : Cahors, 39 : Dax, 40 : Castres

**Tableau 62.** Localisation des nœuds du réseau de distribution

Les instances traitées sont représentées par le Tableau 63. Les instances consistent à changer à chaque fois, le nombre des fournisseurs collaborant entre eux, le nombre de hubs ainsi que le nombre des détaillants et le nombre de véhicules utilisés.

Instances	Fournisseurs	Entrepôts	CDs	Détaillants	Véhicules	Nombre de nœuds
I1	6	6	6	10	12	28
I2	7	7	7	13	15	34
I3	8	8	8	15	18	39
I4	8	8	8	18	22	42
I5	8	8	8	22	26	46
I6	10	10	10	22	30	52
I7	10	10	10	25	35	55
I8	12	12	12	25	40	61
I9	12	12	12	28	45	64
I10	12	12	12	30	48	66
I11	12	12	12	35	50	71
I12	13	13	13	35	55	74
I13	13	13	13	40	57	79
I14	14	14	14	40	60	82
I15	15	15	15	40	60	85

Tableau 63. Instances analysées

## 4.1. Codage et choix des paramètres

### 4.1.1. Le codage

Concernant le codage du problème, généralement les individus sont représentés par des vecteurs (Gen et al., 2006) ou par des tableaux (Shoja et al., 2019). Dans notre cas, nous avons représenté un individu candidat par un ensemble de tableaux. Chaque tableau représente une période (une semaine). Nous avons obtenu ainsi deux types de tableaux : un tableau des affectations et un autre qui concerne les flux qui circulent sur chaque arc.

✓ **Tableau Affectation** : c'est un tableau de quatre lignes associées respectivement aux indices des quatre ensembles de réseau. Le nombre de colonnes est la multiplication du nombre de fournisseurs et de clients. La première ligne représente les indices des fournisseurs, la deuxième et la troisième décrivent respectivement les entrepôts et les centres de distribution, tandis que la dernière ligne représente les détaillants.

Ce tableau est représenté une seule fois puisque l'affectation ne change pas au cours des périodes. La Figure 95 représente un cas simple avec deux fournisseurs, trois entrepôts, trois centres de distribution et trois clients.

✓ **Tableau Flux** : ce tableau possède la même taille que le tableau Affectation. Celle-ci représente les quantités des produits à transporter entre les fournisseurs et les détaillants. Etant donné que la planification du transport est effectuée sur plusieurs périodes, le nombre de tableaux est égal au nombre de périodes. Supposons que les demandes des trois clients des deux produits P1 et P2 sont respectivement {20 P1, 0 P2}, {18 P1, 0 P2} et {12 P1, 80 P2}. Le tableau Flux décrit cette solution.

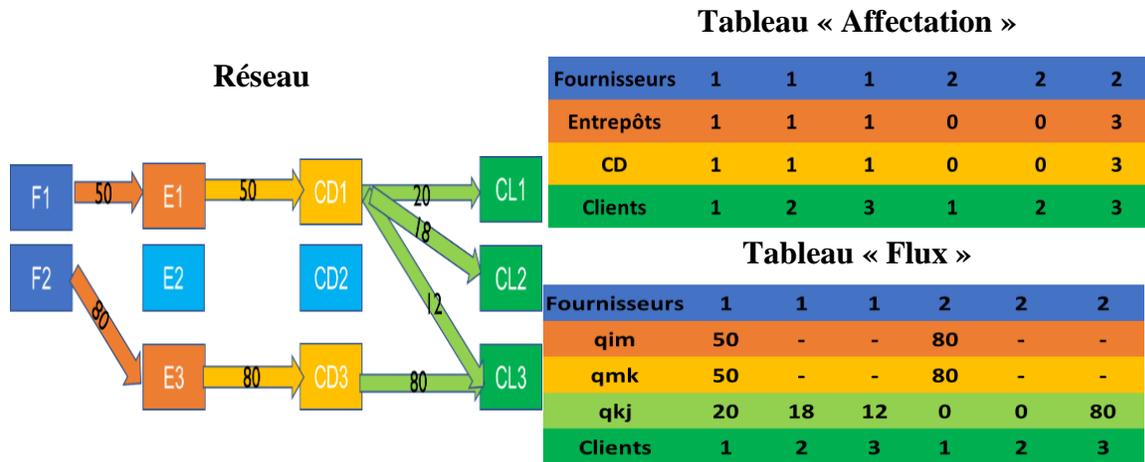


Figure 95. Le codage proposé

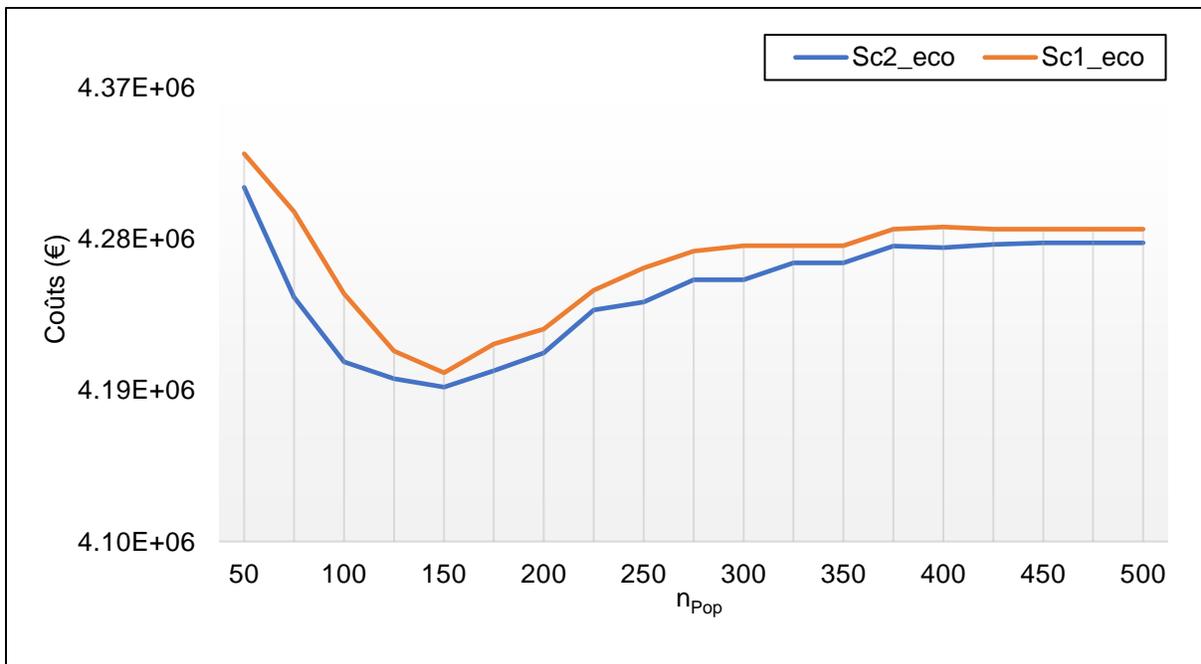
#### 4.1.2. Le choix des paramètres des algorithmes

L'implémentation efficace et l'optimisation de la performance des algorithmes proposés nécessitent le choix des paramètres optimaux ayant une influence considérable sur l'exploration des algorithmes. Pour ce faire, nous avons utilisé la méthode consistant à lancer les algorithmes proposés plusieurs fois avec différents paramètres et de garder les bons paramètres associés aux meilleures solutions. Les valeurs optimales des différents paramètres sont indiquées dans le Tableau 64.

Paramètres	Niveaux possibles
$n_{pop}$	50, 75, 100, 150, 200, 250, 300
$p_c$	0.7, 0.75, 0.8, 0.85, 0.9, 0.95
$p_m$	0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3
Croisement	Croisement à un point (Holland, 1975), double points (De Jong, 1975), multi point (Syswerda, 1989), Arithmétique (Michalewicz & Schoenauer, 1992)
Mutation	Swap (Larranaga, 1999), Displacement (Michalewicz & Schoenauer, 1992), Scramble (Syswerda, 1991), Inversion (Fogel, 1990), Insertion (Fogel, 1988), Mutation multi-non uniforme, Mutation non uniforme
Sélection	Sélection par roulette, Sélection par tournoi, Sélection uniforme
$T_0$	900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500, 1750, 2000
$\alpha$	0.93, 0.94, 0.95, 0.98
$n_{max}$	100, 200, 300, 400, 500, 600, 700

Tableau 64. Niveaux possibles pour les paramètres des algorithmes proposés

Concernant l'algorithme génétique, les résultats de la taille de la population  $n_{pop}$  pour les deux scénarios sont représentés par la Figure 96. La meilleure performance de l'algorithme génétique correspond à  $n_{pop} = 150$ ,  $p_c = 0.85$  et  $p_m = 0.3$ .



**Figure 96.** Variation des coûts en fonction de la taille de populations (Instance I2)

Le Tableau 65 résume les valeurs optimales des paramètres des deux algorithmes (algorithme génétique et recuit simulé) permettant d'obtenir les meilleures solutions.

Paramètre	Algorithme	
	Algorithme génétique	Recuit simulé
$n_{pop}$	150	
$p_c$	0.85	
$p_m$	0.3	
Croisement	Multipoint	
Mutation/voisinage	Swap et mutation multi-non uniforme	Swap
Sélection	Roulette	
$T_0$		1100
$\alpha$		0.95
$n_{max}$		100

**Tableau 65.** Paramétrage de l'algorithme génétique et du recuit simulé

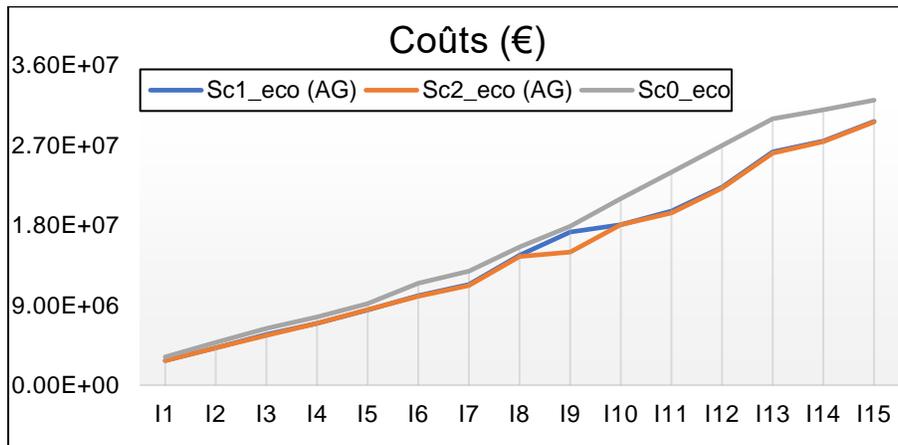
## 4.2. Résolution mono-objectif

En se basant sur les instances présentées ci-dessus, nous analysons dans ce paragraphe les performances de l'algorithme génétique et du recuit simulé.

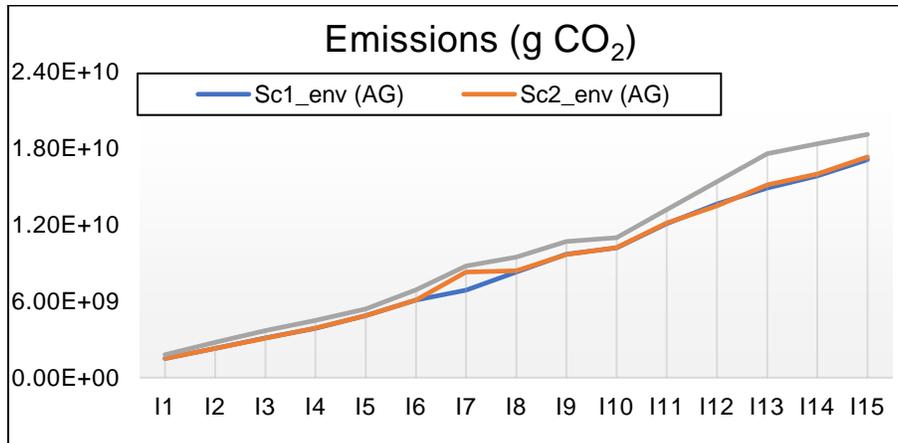
### 4.2.1. Comparaison entre les scénarios

Les résultats obtenus confirment que la collaboration horizontale offre toujours des meilleurs résultats par rapport à la non collaboration. La Figure 97 montre que les coûts obtenus dans les deux scénarios collaboratifs Sc1\_eco et Sc2\_eco sont toujours inférieurs à ceux du scénario non-collaboratif Sc0\_eco. Le taux d'amélioration des scénarios collaboratifs varie entre 4% et 19% par rapport au scénario non-collaboratif Sc0\_eco. Les émissions de CO<sub>2</sub> sont également réduites grâce

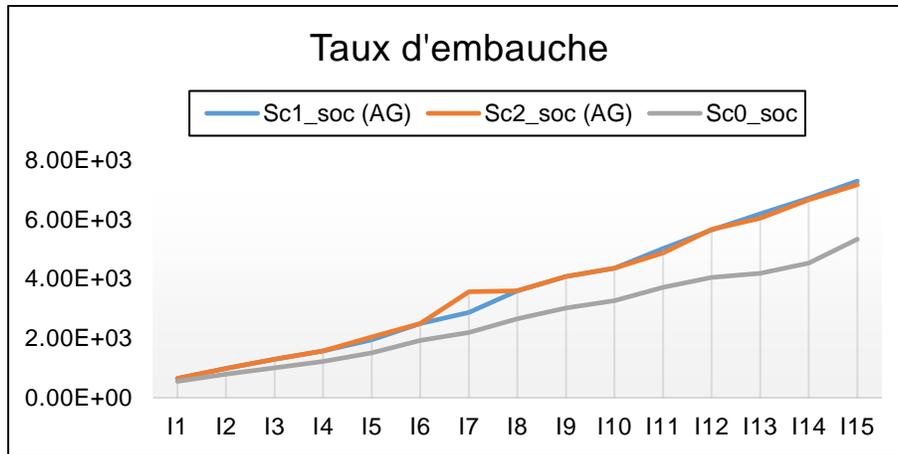
aux deux scénarios collaboratifs (cf. Figure 98) avec un taux d'amélioration qui varie entre 7% et 22%. La collaboration a permis également d'améliorer le taux d'embauche, cela est dû à la favorisation de l'utilisation des hubs semi et faiblement automatisés lors de la résolution des scénarios collaboratifs à objectif social (maximisation du taux d'embauche). Le taux d'amélioration du taux d'embauche dans les scénarios collaboratifs varie entre 18% et 60% (cf. Figure 99). Notons également que plus la taille du problème augmente plus la performance de la collaboration s'améliore sur tous les aspects de la durabilité.



**Figure 97.** Les coûts des scénarios collaboratifs Sc1\_eco et Sc2\_eco par rapport au scénario non-collaboratif Sc0\_eco



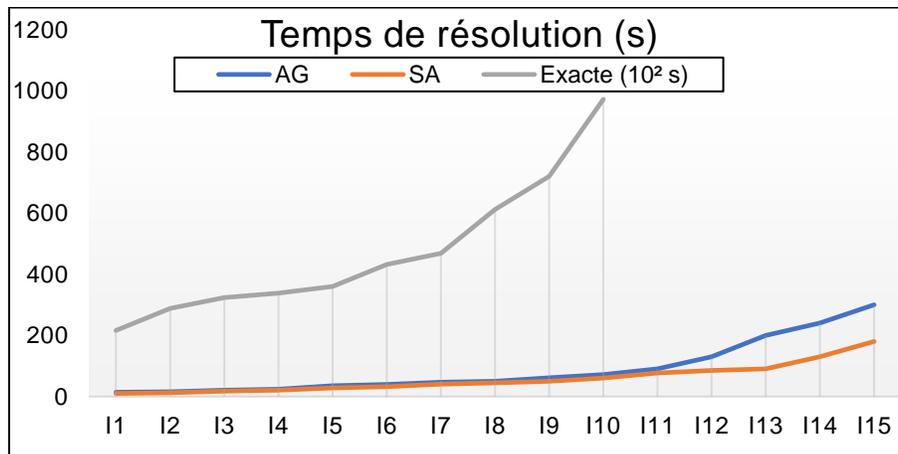
**Figure 98.** Les émissions de CO<sub>2</sub> des scénarios collaboratifs Sc1\_env et Sc2\_env par rapport au scénario non-collaboratif Sc0\_env



**Figure 99.** Taux d'embauche des scénarios collaboratifs Sc1\_soc et Sc2\_soc par rapport au scénario non-collaboratif Sc0\_soc

#### 4.2.2. Comparaison entre les algorithmes

En termes de temps de résolution, il est assez clair que plus le nombre de nœuds augmente, plus le temps de résolution augmente dans les deux algorithmes. Ceci est visible à partir de l'instance I10 où il est assez difficile de trouver les solutions optimales en utilisant le solveur CPLEX. Notons également que le recuit simulé est plus efficace en termes de temps de résolution par rapport à l'AG (cf. Figure 100).

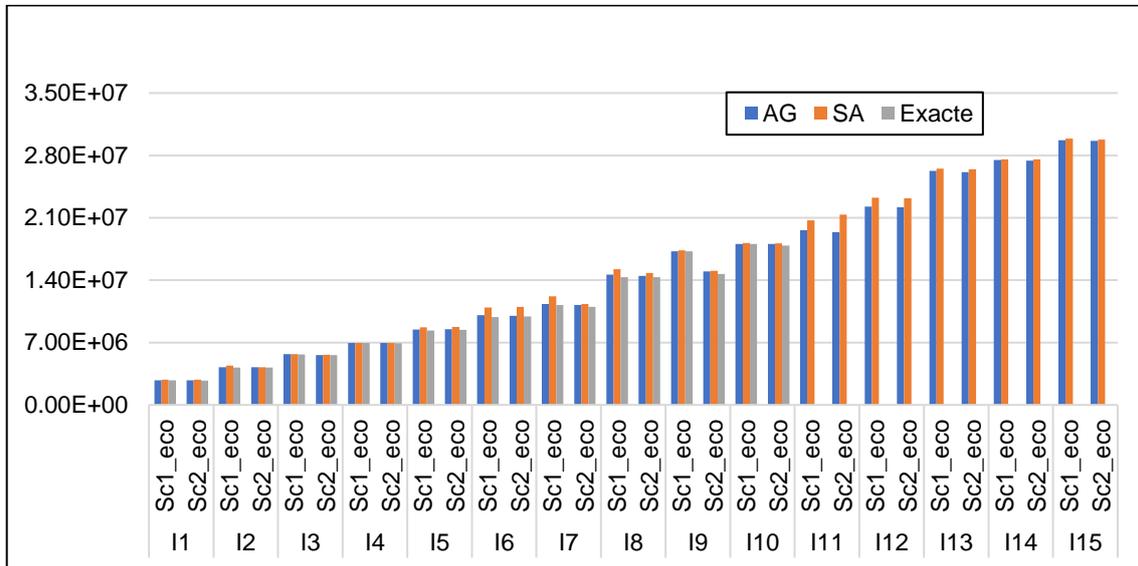


**Figure 100.** Temps de résolution (Exacte, AG et SA)

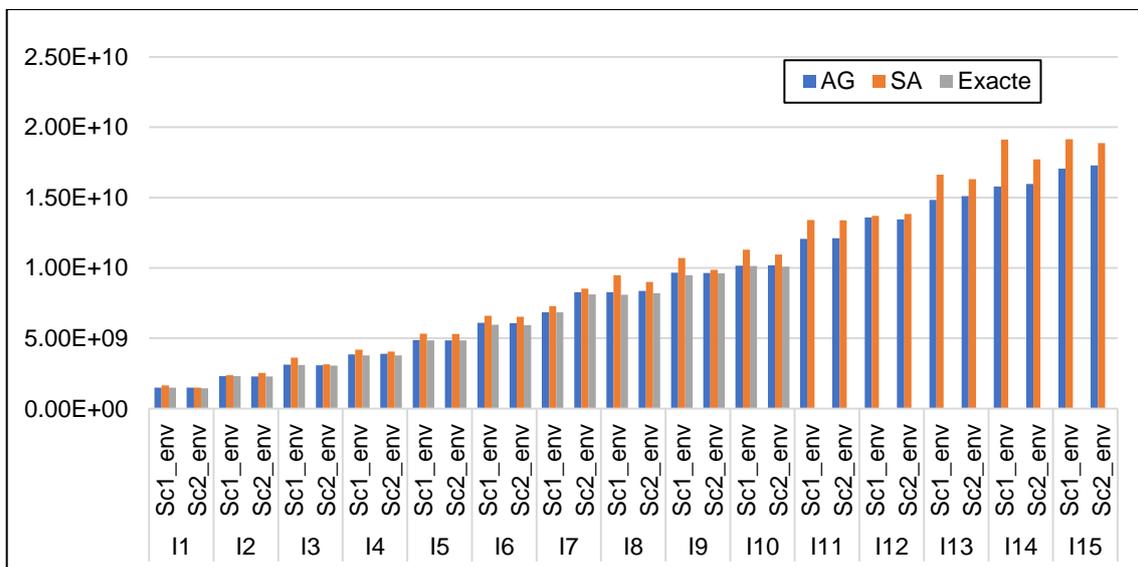
		Minimisation des coûts (€)					Minimisation des émissions (g CO <sub>2</sub> )					Maximisation du taux d'embauche				
		AG	Gap (AG)	SA	Gap (SA)	Solution Exacte	AG	Gap (AG)	SA	Gap (SA)	Solution Exacte	AG	Gap (AG)	SA	Gap (AG)	Solution Exacte
I1	Sc1	2.77E+06	0.36%	2.82E+06	2.05%	2.76E+06	1.50E+09	0.47%	1.66E+09	11.03%	1.49E+09	6.48E+02	10.08%	5.75E+02	20.13%	7.20E+02
	Sc2	2.76E+06	0.69%	2.82E+06	2.88%	2.74E+06	1.49E+09	2.70%	1.49E+09	2.68%	1.45E+09	6.48E+02	9.87%	6.37E+02	11.30%	7.19E+02
I2	Sc1	4.21E+06	0.28%	4.41E+06	4.86%	4.20E+06	2.31E+09	0.64%	2.37E+09	3.25%	2.30E+09	9.75E+02	0.31%	9.05E+02	7.51%	9.78E+02
	Sc2	4.21E+06	0.58%	4.22E+06	0.82%	4.19E+06	2.29E+09	0.08%	2.54E+09	11.15%	2.28E+09	9.76E+02	3.65%	8.47E+02	16.38%	1.01E+03
I3	Sc1	5.69E+06	0.30%	5.72E+06	0.75%	5.67E+06	3.12E+09	0.84%	3.63E+09	17.23%	3.09E+09	1.28E+03	0.75%	1.14E+03	11.64%	1.29E+03
	Sc2	5.60E+06	0.33%	5.61E+06	0.51%	5.58E+06	3.09E+09	0.72%	3.15E+09	2.58%	3.07E+09	1.29E+03	4.70%	1.15E+03	15.05%	1.35E+03
I4	Sc1	6.95E+06	0.12%	6.96E+06	0.36%	6.94E+06	3.85E+09	1.46%	4.20E+09	10.66%	3.80E+09	1.57E+03	0.00%	1.47E+03	6.60%	1.57E+03
	Sc2	6.95E+06	0.26%	6.97E+06	0.52%	6.93E+06	3.89E+09	2.71%	4.05E+09	6.89%	3.79E+09	1.57E+03	0.00%	1.33E+03	15.41%	1.57E+03
I5	Sc1	8.45E+06	1.00%	8.73E+06	4.28%	8.37E+06	4.86E+09	0.35%	5.34E+09	10.10%	4.85E+09	1.94E+03	1.18%	1.61E+03	18.00%	1.97E+03
	Sc2	8.49E+06	1.00%	8.73E+06	3.90%	8.41E+06	4.85E+09	0.00%	5.31E+09	9.51%	4.85E+09	1.94E+03	1.09%	1.82E+03	7.32%	1.97E+03
I6	Sc1	1.01E+07	2.00%	1.09E+07	10.87%	9.87E+06	6.09E+09	2.00%	6.59E+09	10.40%	5.97E+09	2.49E+03	1.07%	2.09E+03	17.02%	2.51E+03
	Sc2	1.00E+07	0.71%	1.10E+07	10.70%	9.93E+06	6.07E+09	2.00%	6.52E+09	9.57%	5.95E+09	2.49E+03	1.11%	2.04E+03	18.92%	2.51E+03
I7	Sc1	1.13E+07	1.00%	1.22E+07	8.81%	1.12E+07	6.86E+09	0.00%	7.29E+09	6.24%	6.86E+09	2.87E+03	1.14%	2.20E+03	24.23%	2.90E+03
	Sc2	1.12E+07	2.00%	1.13E+07	3.17%	1.10E+07	8.28E+09	2.00%	8.52E+09	4.97%	8.12E+09	3.57E+03	1.13%	2.20E+03	38.99%	3.61E+03
I8	Sc1	1.46E+07	2.00%	1.52E+07	6.36%	1.43E+07	8.27E+09	2.00%	9.47E+09	16.84%	8.11E+09	3.60E+03	1.17%	3.11E+03	14.60%	3.64E+03
	Sc2	1.45E+07	1.00%	1.48E+07	3.16%	1.43E+07	8.37E+09	2.00%	8.99E+09	9.64%	8.20E+09	3.60E+03	1.07%	2.72E+03	25.32%	3.64E+03
I9	Sc1	1.72E+07	0.00%	1.73E+07	0.67%	1.72E+07	9.66E+09	2.00%	1.07E+10	12.99%	9.47E+09	4.08E+03	1.07%	3.07E+03	25.50%	4.12E+03
	Sc2	1.50E+07	2.00%	1.50E+07	2.45%	1.47E+07	9.65E+09	0.31%	9.87E+09	2.62%	9.62E+09	4.08E+03	1.14%	3.12E+03	24.38%	4.12E+03
I10	Sc1	1.81E+07	0.06%	1.82E+07	0.61%	1.80E+07	1.02E+10	0.20%	1.13E+10	11.29%	1.01E+10	4.36E+03	0.99%	3.74E+03	15.09%	4.40E+03
	Sc2	1.81E+07	1.00%	1.81E+07	1.37%	1.79E+07	1.02E+10	1.01%	1.10E+10	8.53%	1.01E+10	4.36E+03	1.03%	3.49E+03	20.72%	4.40E+03
I11	Sc1	1.96E+07	-	2.07E+07	-	-	1.21E+10	-	1.34E+10	-	-	5.02E+03	-	4.19E+03	-	-
	Sc2	1.94E+07	-	2.13E+07	-	-	1.21E+10	-	1.34E+10	-	-	4.87E+03	-	3.90E+03	-	-
I12	Sc1	2.23E+07	-	2.33E+07	-	-	1.36E+10	-	1.37E+10	-	-	5.64E+03	-	5.62E+03	-	-
	Sc2	2.22E+07	-	2.32E+07	-	-	1.35E+10	-	1.38E+10	-	-	5.66E+03	-	5.60E+03	-	-
I13	Sc1	2.63E+07	-	2.65E+07	-	-	1.48E+10	-	1.66E+10	-	-	6.18E+03	-	4.68E+03	-	-
	Sc2	2.61E+07	-	2.64E+07	-	-	1.51E+10	-	1.63E+10	-	-	6.03E+03	-	4.55E+03	-	-
I14	Sc1	2.75E+07	-	2.76E+07	-	-	1.58E+10	-	1.91E+10	-	-	6.71E+03	-	5.12E+03	-	-
	Sc2	2.74E+07	-	2.76E+07	-	-	1.60E+10	-	1.77E+10	-	-	6.66E+03	-	5.49E+03	-	-
I15	Sc1	2.97E+07	-	2.99E+07	-	-	1.71E+10	-	1.91E+10	-	-	7.28E+03	-	5.77E+03	-	-
	Sc2	2.96E+07	-	2.98E+07	-	-	1.73E+10	-	1.89E+10	-	-	7.16E+03	-	5.83E+03	-	-

**Tableau 66.** Coûts, émissions de CO<sub>2</sub> et taux d'embauche et gap par rapport aux résultats obtenus par CPLEX

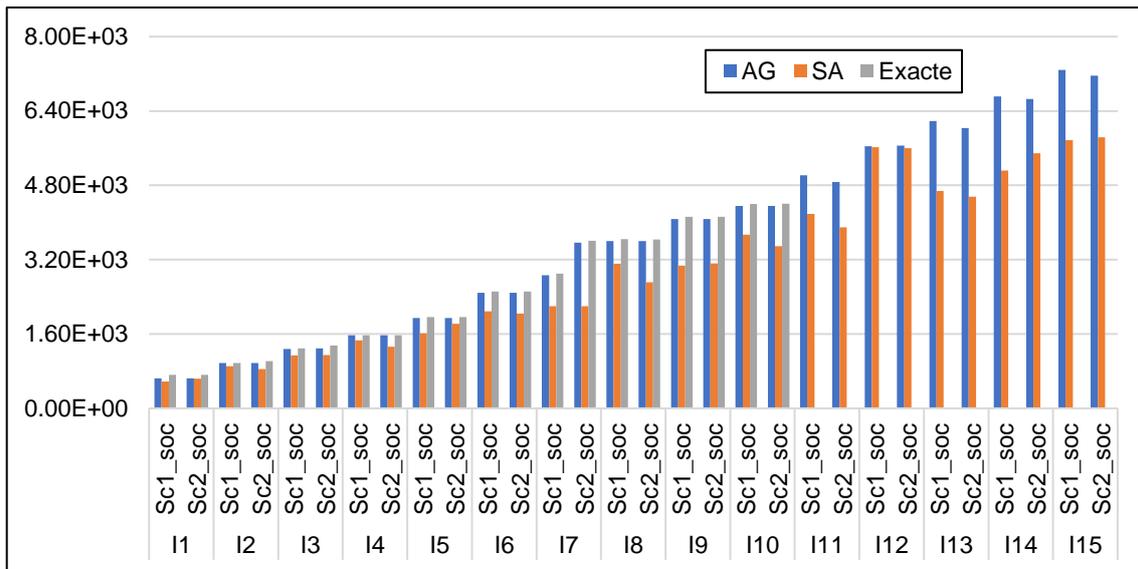
Les résultats obtenus montrent que l'AG possède les meilleures performances en termes de gap (cf. Tableau 66). Cette performance est claire, non seulement au niveau des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub> mais aussi au niveau du taux d'embauche (cf. Figures 101, 102 et 103). Dans certaines instances, la différence entre les deux algorithmes est remarquable. Ceci s'explique par la nature oscillante du recuit simulé, et donc le gap donné par le recuit simulé est généralement légèrement supérieur à celui de l'AG.



**Figure 101.** Coûts obtenus pour les différentes instances (Sc1\_eco et Sc2\_eco)

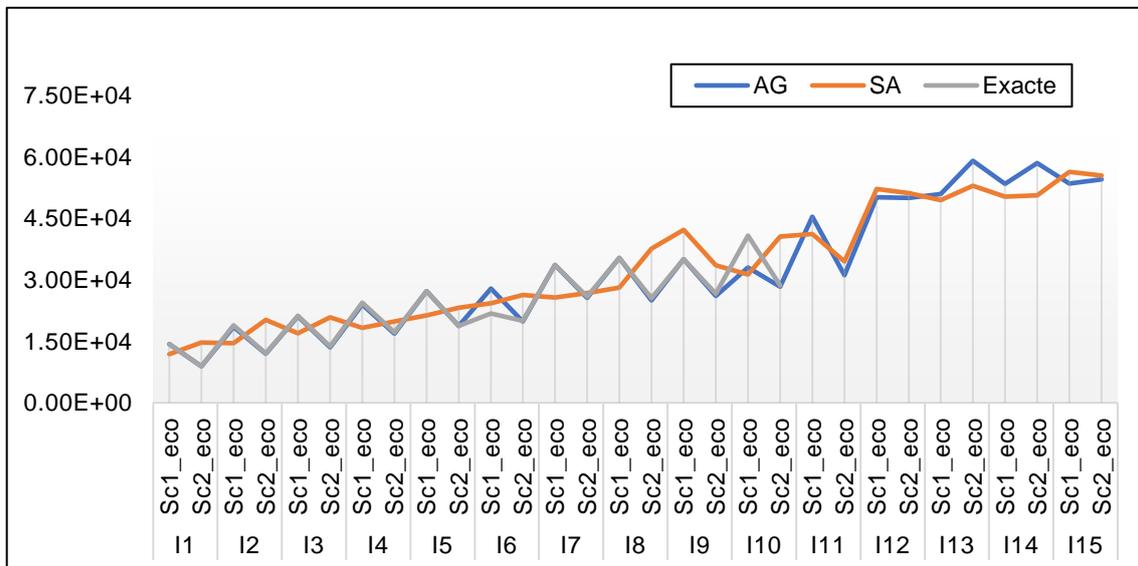


**Figure 102.** Emissions de CO<sub>2</sub> obtenues pour les différentes instances (Sc1\_env et Sc2\_env)



**Figure 103.** Taux d'embauche obtenus pour les différentes instances (Sc1\_soc et Sc2\_soc)

Indépendamment des objectifs économiques ou environnementaux, le niveau de bruit est généralement comparable dans les deux scénarios collaboratifs (cf. Figure 104). En outre, ces scénarios permettent également de réduire le risque accident, notamment les deux scénarios Sc1\_env et Sc2\_env (cf. Figures 105 et 106). Ceci est obtenu grâce à l'utilisation des véhicules de grandes capacités (39 palettes), ce qui permet de réduire les distances parcourues. Par ailleurs, il est assez clair que la maximisation du taux d'embauche engendre des coûts, des émissions, des niveaux de bruit et de risque accident élevés (cf. Figures 107). Ceci s'explique par le fait que la maximisation du taux d'embauche signifie la favorisation de l'installation des hubs qui nécessitent un nombre important d'ouvriers (semi et faible automatisation) sans prendre en considération les distances séparant les fournisseurs et les détaillants de ces hubs.



**Figure 104.** Niveau de bruit (Sc1\_eco et Sc2\_eco)

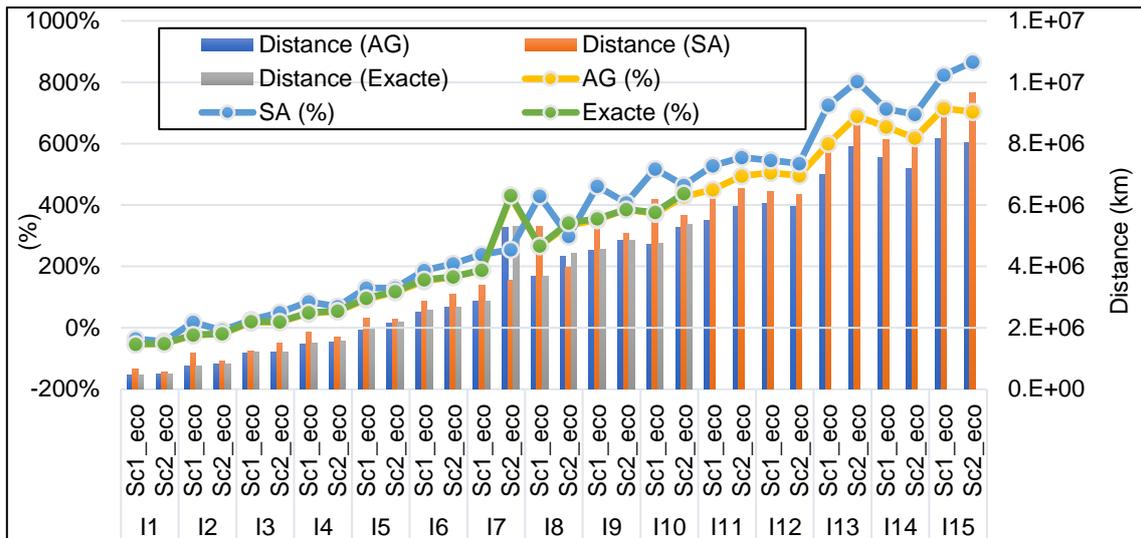


Figure 105. Distance et taux de réduction du risque accident par rapport à  $10^6$  km (Sc1\_eco et Sc2\_eco)

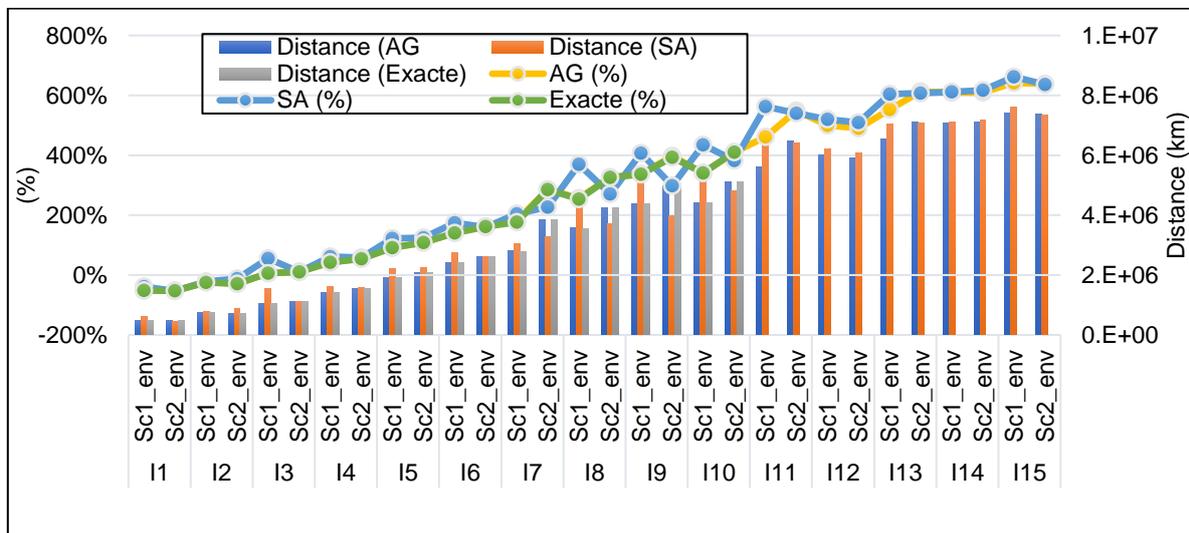


Figure 106. Distance et taux de réduction du risque accident par rapport à  $10^6$  km (Sc1\_env et Sc2\_env)

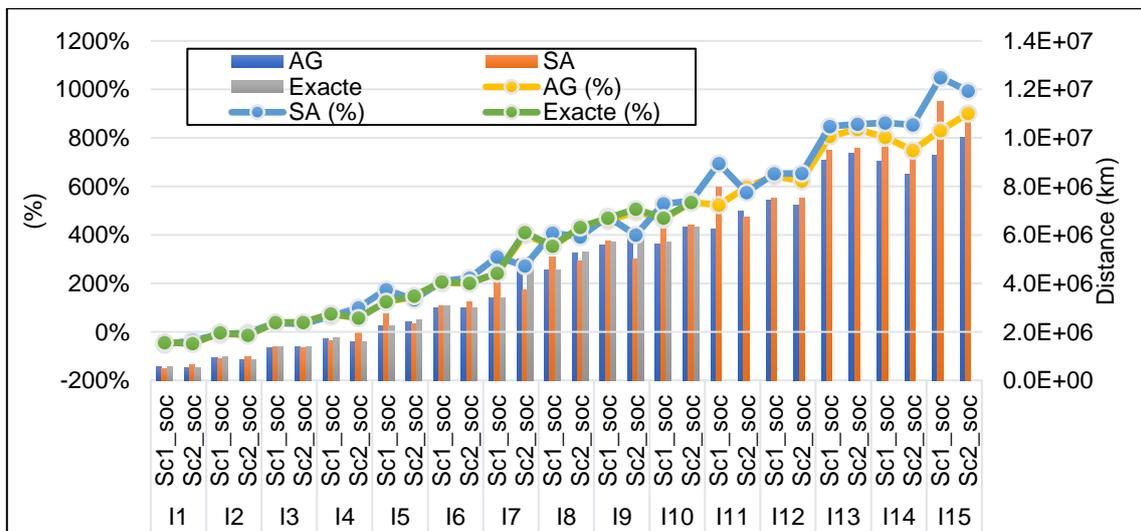


Figure 107. Distance et taux de réduction du risque accident par rapport à  $10^6$  km (Sc1\_soc et Sc2\_soc)

La Figure 108 représente un exemple du réseau de distribution obtenu lors de la résolution du deuxième scénario à objectif économique Sc2\_eco par l'AG.

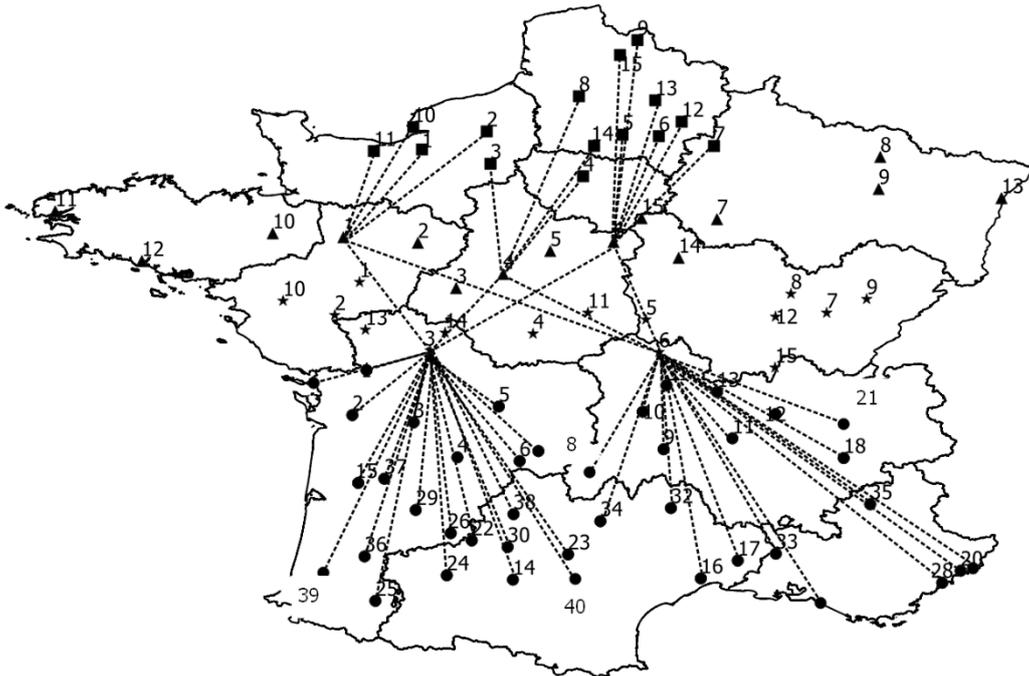


Figure 108. Réseau de distribution obtenu par l'AG (Sc2\_eco)

#### 4.3. Résolution multi-objectif

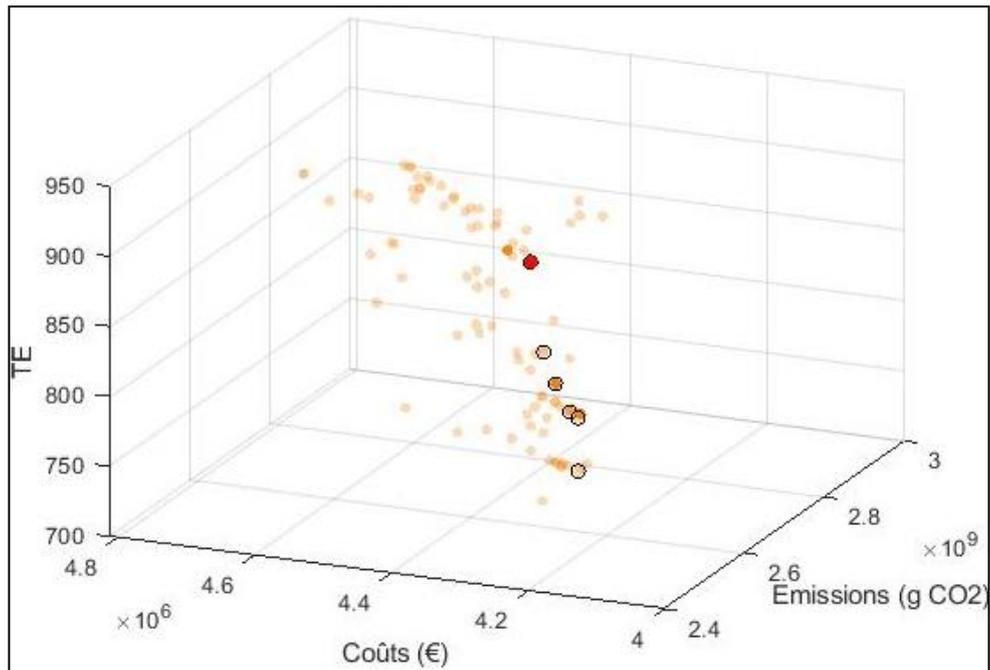
Comme évoqué dans les chapitres précédents, la conception d'un réseau de distribution collaboratif doit se faire en prenant en considération des trois aspects de durabilité. Etant donné que les objectifs économiques, environnementaux et sociaux/sociétaux sont généralement des objectifs contradictoires, une optimisation multi-objectif s'avère indispensable pour trouver un bon compromis entre ces objectifs. Dans le chapitre 6, nous avons eu recours à la méthode  $\varepsilon$ -contrainte qui consiste à minimiser un des objectifs en mettant le reste comme contraintes à respecter. Cependant, cette méthode est limitée en taille du problème. Par conséquent, nous avons eu recours à l'algorithme NSGA-II qui est le plus connu dans l'optimisation multi-objectif.

Dans ce paragraphe, nous présentons quelques résultats des deux instances I2 et I15.

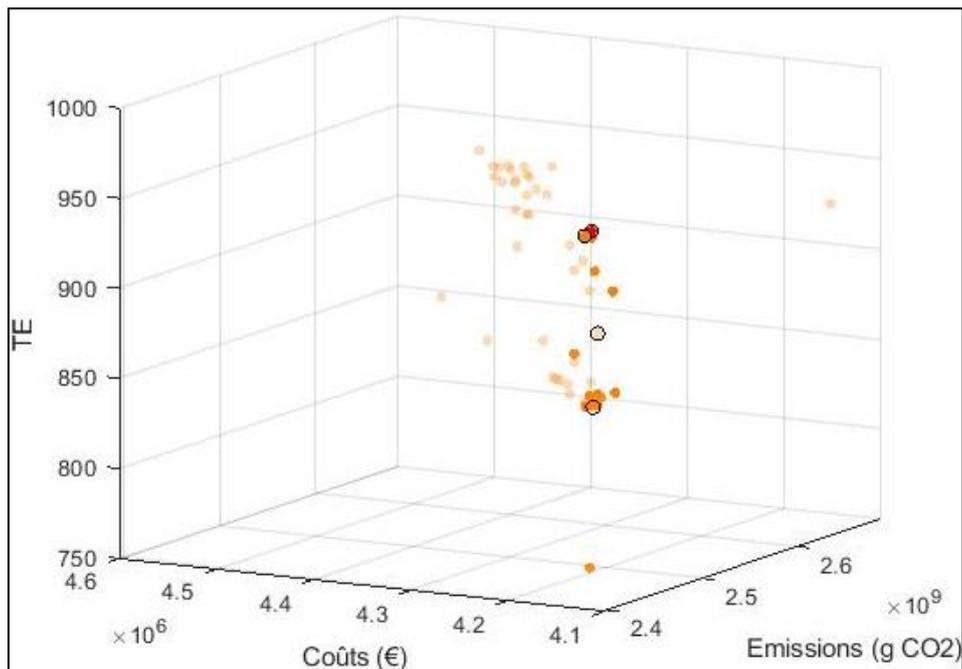
- **Instance I2**

Cette instance est celle de l'étude de cas du chapitre précédent (cf. Chapitre 6) qui se constitue de 34 nœuds (7 fournisseurs, 7 entrepôts, 7 centres de distribution et 13 détaillants). Nous comparons dans ce paragraphe les résultats de l'optimisation multi-objectif réalisée par la méthode  $\varepsilon$ -contrainte (cf. Figures 79 et 80) et l'algorithme NSGA-II.

Les deux Figures 109 et 110 représentent respectivement le résultat de l'optimisation multi-objectif des deux scénarios Sc1 et Sc2 par le NSGA-II.



**Figure 109.** 3D-front de Pareto (Sc1 : instance I2)



**Figure 110.** 3D-front de Pareto (Sc2 : instance I2)

Les points colorés en rouge semblent être les meilleurs points offrant un bon compromis entre les trois objectifs.

Le Tableau 67 représente une comparaison entre les résultats obtenus par cet algorithme et la méthode  $\varepsilon$ -contrainte.

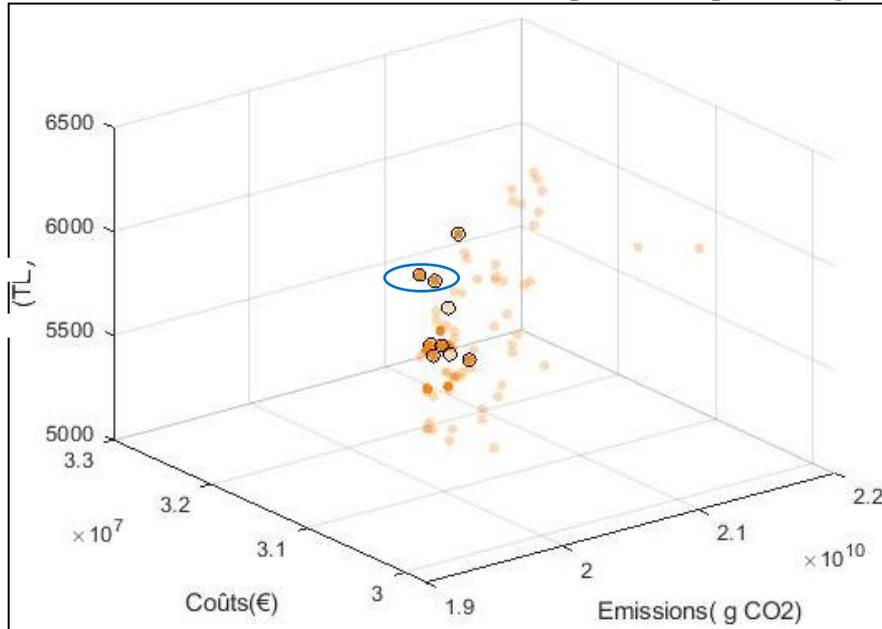
Il est assez clair que les deux approches donnent des solutions comparables au niveau des coûts, des émissions et de taux d'embauche. Notons également que le deuxième scénario offre toujours la meilleure performance de durabilité économique, environnementale et sociale.

Scénarios	Sc1		Sc2	
Indicateurs	$\varepsilon$ -contrainte	NSGA-II	$\varepsilon$ -contrainte	NSGA-II
Coûts ( $10^6$ €)	4.250	4.221	4.227	4.209
Emissions ( $10^9$ g CO <sub>2</sub> )	2.437	2.453	2.416	2.420
Taux d'embauche	940.09	922.6	957.58	959.24

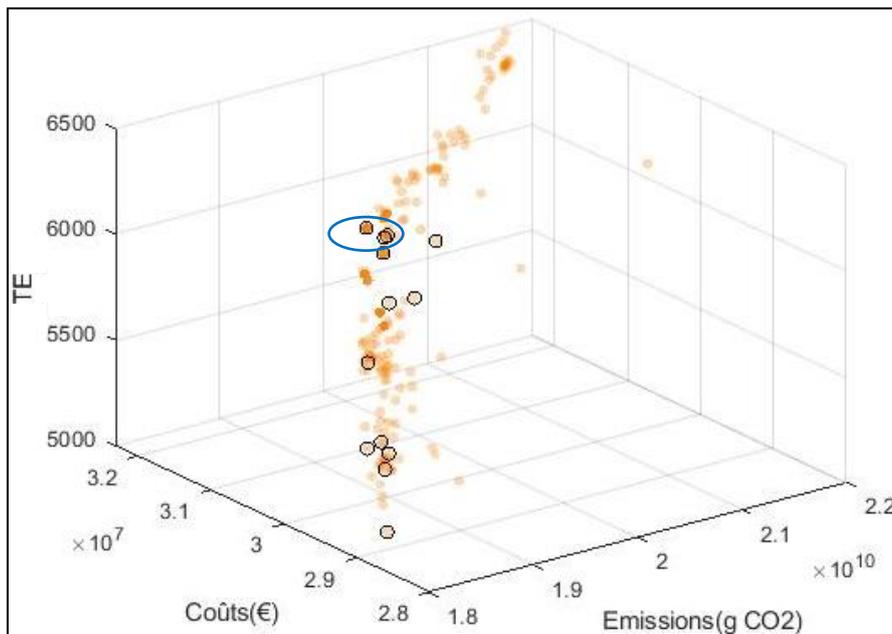
**Tableau 67.** Comparaison des solutions sélectionnées par la méthode  $\varepsilon$ -Contrainte et le NSGA-II (I2)

### • Instance I15

L'instance I15 se compose de 85 nœuds : 15 fournisseurs, 15 entrepôts, 15 centres de distribution et 40 clients). Les solutions obtenues sont représentées par les Figures 111 et 112.



**Figure 111.** 3D-front de Pareto (Sc1 : instance I15)



**Figure 112.** 3D-front de Pareto (Sc2 : Instance I15)

La zone colorée en bleu comporte les deux points qui semblent être les meilleures solutions offrant un bon compromis entre les trois objectifs.

Par la suite, nous analysons ce choix par rapport aux solutions mono-objectif obtenues grâce à l'AG (cf. Tableau 68).

Les points sélectionnés offrent un certain compromis entre les trois objectifs de la durabilité. De même que l'optimisation mono-objectif, il est assez clair que le deuxième scénario offre généralement de meilleurs résultats, comparé au premier. Ainsi, les marges entre les solutions mono-objectif obtenus par l'AG et celles multi-objectif obtenus par le NSGA-II sont trop proches, notamment dans le deuxième scénario.

Sc1			
Indicateurs	AG	Point 1 (NSGA-II)	Point 2 (NSGA-II)
Coûts ( $10^7\text{€}$ )	2.97	3.03	3.05
Emissions ( $10^{10}$ g CO <sub>2</sub> )	1.71	1.95	1.94
Taux d'embauche	7280	6250	6260
Sc2			
Indicateurs	AG	Point 1 (NSGA-II)	Point 2 (NSGA-II)
Coûts ( $10^7\text{€}$ )	2.96	2.97	2.98
Emissions ( $10^{10}$ g CO <sub>2</sub> )	1.73	1.83	1.83
Taux d'embauche	7160	6470	6470

**Tableau 68.** Comparaison des solutions sélectionnées de NSGA-II par rapport aux solutions de AG (I15)

## 5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé trois algorithmes méta-heuristiques pour pallier aux limites de la résolution exacte évoqués dans le chapitre 6. Après une analyse de la littérature, nous avons effectué l'optimisation mono-objectif des modèles mathématiques par le biais de l'algorithme génétique et le recuit simulé. À travers des expériences numériques sur un réseau de distribution national, nous avons pu montrer que la collaboration horizontale offre toujours des meilleurs résultats en termes de durabilité par rapport à la non-collaboration. La comparaison entre les algorithmes nous a permis d'identifier que l'algorithme génétique est meilleur au niveau du gap, tandis que le recuit simulé est bien meilleur au niveau du temps de résolution. Dans un deuxième temps, nous avons proposé l'algorithme NSGA-II pour réaliser l'optimisation multi-objectif et trouver un compromis entre la minimisation des coûts, la minimisation des émissions de CO<sub>2</sub> et la maximisation du taux d'embauche.

# Conclusion et perspectives

Parmi les nombreuses questions liées à la collaboration horizontale, ce travail de recherche vise principalement à contribuer à la recherche scientifique portant sur le problème de conception des réseaux de distribution durable et le problème de partage des coûts.

Trois observations clés structurent notre recherche. Premièrement, nous pensons que la conception d'un réseau de distribution en considérant un seul objectif de durabilité n'est pas suffisant et qu'il est indispensable de tenir compte des trois dimensions de durabilité. Deuxièmement, nous pensons qu'il est difficile pour les entreprises de se confronter seules aux défis. D'autre part, la collaboration horizontale est parmi les meilleures solutions qui vont profondément améliorer les performances des réseaux de distribution en termes de durabilité.

Par rapport aux problèmes étudiés dans le cadre de la collaboration horizontale, le problème de conception des réseaux de distribution collaboratifs et durables n'a pas retenu une grande attention. En effet, les études de recherche se sont concentrées particulièrement aux deux niveaux de décision tactique et opérationnelle. En outre, la plupart des études traitant le problème de conception des réseaux de distribution se sont limitées principalement à l'évaluation des indicateurs économiques et dans une moindre mesure aux indicateurs environnementaux. Troisièmement, nous sommes convaincus que l'absence d'une approche juste et équitable pour le partage des coûts est l'un des principaux facteurs qui peuvent bloquer la réussite et la continuité de la collaboration horizontale. Nous pensons également que l'implication de la participation de chaque partenaire à la durabilité lors de l'allocation des coûts est une meilleure stratégie pour le récompenser et garantir la continuité de sa collaboration. Cela met aussi les partenaires en concurrence pour participer au mieux à la durabilité par l'assouplissement de ses conditions de livraison.

Nos contributions sont multiples. Dans le chapitre 2, nous avons effectué une analyse exhaustive de la littérature sur la collaboration horizontale et la conception des réseaux de distribution. Définir et mesurer la performance en termes de durabilité est un prérequis lorsque l'on vise à concevoir un réseau de distribution collaboratif durable. Ainsi, dans le chapitre 3, nous avons présenté les formulations mathématiques d'un ensemble d'indicateurs de durabilité. Au niveau économique, nous avons évalué principalement les coûts logistiques engendrés par le transport, le stockage, l'ouverture des hubs, la pénalité due au retard de livraison et la manutention. Au niveau environnemental, nous avons évalué les émissions de CO<sub>2</sub> dues aux véhicules par leur utilisation et leur amortissement et aux hubs par leur fonctionnement et leur construction. Au niveau social, nous avons évalué le taux d'embauche, le niveau de bruit et le risque accident.

Le chapitre 4 consiste à sélectionner des indicateurs à partir de cette liste pour concevoir un réseau de distribution à deux échelons. Cet objectif est atteint par le biais de l'optimisation mono-objectif et multi-objectif en utilisant la méthode  $\epsilon$ -contrainte.

Dans le chapitre 5, nous avons effectué une étude comparative exhaustive sur les propriétés des approches d'allocation des coûts pour fournir une analyse comparative permettant aux décideurs de choisir la meilleure approche. Nous avons ainsi proposé deux approches durables pour allouer les coûts et les émissions de CO<sub>2</sub>. Ces deux approches consistent à prendre en compte la liste des indicateurs de durabilité et de flexibilité au niveau des conditions de livraison lors du partage des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub>.

Dans le chapitre 6, notre contribution consiste à étendre le premier modèle développé pour concevoir un réseau de distribution collaboratif plus flexible et plus générique, notamment en termes de nombre d'échelons, d'indicateurs évalués, de flotte hétérogène de véhicules, et des capacités des hubs, etc. Par conséquent, les modèles mathématiques proposés présentent plusieurs avantages par rapport aux modèles existants. Nous avons eu recours également à la méthode  $\epsilon$ -contrainte pour trouver un bon compromis entre les trois dimensions de la durabilité par la minimisation des coûts, la minimisation des émissions de CO<sub>2</sub> et la maximisation du taux d'embauche. Dans ce chapitre, deux scénarios collaboratifs ont été comparé à un scénario non-collaboratif par l'intermédiaire d'une étude de cas d'un réseau de distribution national.

Dans le chapitre 7, nous avons développé trois méta-heuristiques pour remédier au problème de temps de résolution rencontrés dans le chapitre 6. L'optimisation mono-objectif est effectuée par l'algorithme génétique et le recuit simulé, tandis que l'optimisation multi-objectif est effectuée par l'algorithme NSGA-II. Les performances des réseaux de distribution collaboratifs sont évaluées par des expérimentations numériques basées sur un réseau de distribution national. Les résultats montrent qu'il est toujours intéressant de recourir à la collaboration horizontale non seulement pour réduire les coûts logistiques, mais aussi pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, le niveau de bruit et le risque accident ainsi que pour maximiser le taux d'embauche. Au niveau des algorithmes, les résultats ont montré la supériorité de l'algorithme génétique en terme de gap, néanmoins le recuit simulé est plus rapide au niveau du temps de résolution. L'algorithme NSGA-II a également permis de trouver de bons compromis entre les trois objectifs de la durabilité dans un temps de résolution minimal.

Enfin, les modèles mathématiques sont bien adaptés pour comparer plusieurs options managériales en termes de performance de durabilité. En effet, les résultats ont montré qu'il est possible d'améliorer davantage la performance de la collaboration horizontale par le biais de l'assouplissement des délais de livraison (cf. Chapitre 4 et 6), par l'augmentation du nombre des véhicules disponibles (cf. Chapitre 6) ou par l'augmentation du nombre des collaborateurs et des détaillants (cf. Chapitre 4 et 6). Nous avons également pu montrer que la prise en considération des coûts d'installations et des émissions dues aux hubs influence considérablement les décisions des partenaires. En effet, plus le nombre de hubs augmente plus le coût de transport et les émissions dues aux véhicules diminuent, néanmoins les coûts d'installation et les émissions de CO<sub>2</sub> augmentent (cf. Chapitre 4 et 6).

En outre, nous avons montré que l'implication de la participation des partenaires au niveau de la durabilité et de la flexibilité permet d'ajuster les coûts et les émissions de CO<sub>2</sub> partagés. Cela permet de garantir qu'aucun partenaire ne peut profiter des autres, ce qui garantit le succès et la continuité de la collaboration. Elle permet également d'encourager les partenaires à assouplir leurs conditions de livraison par le biais de récompense (cf. Chapitre 5).

Nous avons ainsi prouvé que l'amélioration du niveau social/sociétal, notamment la maximisation du taux d'embauche nécessite des sacrifices et des concessions au niveau économique et environnemental. En effet, la création des nouvelles opportunités d'emplois tend à choisir des hubs (entrepôts et centres de distribution) qui nécessitent plusieurs employés. Ainsi, les modèles mathématiques à objectif social favorisent principalement l'établissement

des hubs faiblement et semi automatisés sans prendre en considération les coûts et les émissions engendrés par le transport.

## **Perspectives**

Plusieurs perspectives de recherches peuvent être envisagées :

À court terme, nous envisageons d'ajouter d'autres indicateurs de durabilité pour évaluer précisément la performance de la collaboration horizontale, notamment les indicateurs sociaux. Il est prévu également d'améliorer la formulation du risque accident qui ne prend en considération que la distance parcourue dans cette thèse. Nous envisageons d'améliorer la formulation en prenant en considération la variation de vitesse et quelques autres caractéristiques liés aux conducteurs. Nous pensons aussi à introduire d'autres facteurs dans la formulation des émissions de CO<sub>2</sub>, notamment l'écoconduite. Nous comptons également introduire la multimodalité dans les modèles mathématiques afin de choisir plusieurs modes de transport (ferroviaire, routier et maritime).

À moyen terme, l'introduction de l'incertitude dans les modèles présentés peut être envisagée pour les futures recherches. Les modèles proposés considèrent que la demande et les coûts sont déterministes. Ces hypothèses simples permettent de fournir des informations utiles, mais peuvent être assouplies pour se concentrer sur des situations plus réalistes. Cela peut être réalisé en intégrant l'intelligence artificielle tel que les réseaux de neurones artificiels pour prédire les valeurs des paramètres incertains en se basant sur leur évolution.

À long terme, les approches basées sur la théorie des jeux coopératifs sont des approches plus avancées et efficaces et elles sont appliquées dans plusieurs domaines nécessitant une répartition des gains. Cependant, ces approches sont trop limitées lorsqu'il s'agit des problèmes de grande taille ([Guajardo et Ronnqvist, 2016](#)). Par conséquent, il est intéressant de proposer des méta-heuristiques pour répartir les résultats. En outre, aucune des approches vérifie toutes les propriétés ce qui nous incite à introduire le problème de répartition dans le problème de conception du réseau de distribution sous des contraintes permettant la vérification de ces propriétés.

# Annexe

Taux de durabilité et de flexibilité, coût et émissions de CO<sub>2</sub> des différentes sous-coalitions.

Coalition S	Taux de durabilité et flexibilité TDF			C(S) (€)	E(S) (g CO <sub>2</sub> )
F1	-			650336.25	357626000
F2	-			649286	357853000
F3	-			646114	352994000
F4	-			640311.75	344174000
F5	-			646037	352873000
F6	-			646045.75	351741000
F7	-			650304	358025000
F1,F2	0.32112	0.8205355		680727.25	400189000
F1,F3	0.3210605	0.8205955		676801.25	394104000
F1,F4	0.5709145	0.570747		672559	388040000
F1,F5	0.320854	0.820811		678763.25	397586000
F1,F6	0.654187333	0.487478167		679556.5	397862000
F1,F7	0.57103	0.5706265		682623.3	402018000
F2,F3	0.821098	0.8205575		675962	394703000
F2,F4	0.8209515	0.3207085		672126.75	389361000
F2,F5	0.8208905	0.8207725		676935	396437000
F2,F6	0.8210045	0.320653		677912.25	397041000
F2,F7	0.8210675	0.3205885		680281	399962000
F3,F4	0.82101	0.3206475		738360.75	411410000
F3,F5	0.8209485	0.820711		673786	391619000
F3,F6	0.8210635	0.320593		674915.25	392490000
F3,F7	0.821127	0.3205285		676166	393436000
F4,F5	0.3210955	0.8205605		669337.75	385194000
F4,F6	0.654545833	0.487110667		670338	385836000
F4,F7	0.571277	0.570381		673141.75	389528000
F5,F6	0.8212755	0.3203825		675637.25	393780000
F5,F7	0.821341	0.32032		677166	395218000
F6,F7	0.487889167	0.653767333		679308.25	397879000
F1,F2,F3	0.3255305	0.804163	0.804194	708441.5	438920000
F1,F2,F4	0.575485	0.8040325	0.5541135	703541.25	431690000
F1,F2,F5	0.3254565	0.804134	0.8041735	708114.5	438350000
F1,F2,F6	0.658793833	0.804745	0.471203167	710675.75	441760000
F1,F2,F7	0.5754835	0.8047485	0.554532	712883.3	444350000
F1,F3,F4	0.5754455	0.8043025	0.5542775	700153.25	426450000
F1,F3,F5	0.325423	0.8043085	0.8042825	705125	433750000
F1,F3,F6	0.658798333	0.80431	0.470944667	707381.5	436740000
F1,F3,F7	0.575499	0.8041305	0.554176	709466.2	439160000
F1,F4,F5	0.5753665	0.5543045	0.8042775	701308.25	428510000
F1,F4,F6	0.7004185	0.67916	0.554194	703854.25	431950000
F1,F4,F7	0.658782333	0.637376333	0.637465833	706887.5	435740000

F1,F5,F6	0.658677333	0.8050365	0.471333667		707363.75	436710000
F1,F5,F7	0.5754205	0.804151	0.554191		711299.5	442280000
F1,F6,F7	0.7004645	0.554121	0.679173		713380.55	444970000
F2,F3,F4	0.8254725	0.8043215	0.3042855		697901.75	424510000
F2,F3,F5	0.8254085	0.8049835	0.8046885		703861	433550000
F2,F3,F6	0.825492	0.804322	0.304285		704236.25	433270000
F2,F3,F7	0.825526	0.8041425	0.304185		708343	439160000
F2,F4,F5	0.8254035	0.304158	0.8041935		698843.75	426300000
F2,F4,F6	0.825396	0.638335333	0.471358667		700592	428260000
F2,F4,F7	0.825462	0.5543095	0.5542745		704583.75	434050000
F2,F5,F6	0.8254135	0.8043325	0.3042865		705196.25	434980000
F2,F5,F7	0.82543	0.804473	0.304359		709395	441140000
F2,F6,F7	0.825492	0.470801667	0.637515833		709197.25	439350000
F3,F4,F5	0.825448	0.304155	0.804192		695962.75	421950000
F3,F4,F6	0.8254915	0.637478833	0.470852667		696598	421950000
F3,F4,F7	0.8255055	0.5543255	0.554283		700241.75	427130000
F3,F5,F6	0.8254685	0.8041485	0.304189		700166.765	426840000
F3,F5,F7	0.825494	0.8041325	0.3041835		702205.25	430440000
F3,F6,F7	0.8255345	0.47082767	0.63753033		792761.25	487170000
F4,F5,F6	0.65890083	0.8043355	0.47095517		697622	423780000
F4,F5,F7	0.575603	0.804145	0.55419		700678.75	427910000
F4,F6,F7	0.7006465	0.5541165	0.6791705		703749	432210000
F5,F6,F7	0.8256795	0.47099967	0.63762133		708666.25	439490000
F1,F2,F3,F4	0.5696775	0.8202125	0.820586	0.572574	730775	469500000
F1,F2,F3,F5	0.319645	0.8201885	0.8205545	0.822663	735311.5	476100000
F1,F2,F3,F6	0.65303433	0.8202365	0.82061	0.48916567	738003.3	479590000
F1,F2,F3,F7	0.5697285	0.8202715	0.8206375	0.5724085	741586.2	484850000
F1,F2,F4,F5	0.5695725	0.820117	0.5707735	0.822595	731135.25	470160000
F1,F2,F4,F6	0.6946455	0.820163	0.6958205	0.57243	734561.25	475090000
F1,F2,F4,F7	0.65299283	0.820203	0.65418533	0.65567483	737450	478990000
F1,F2,F5,F6	0.65293233	0.820143	0.820917	0.48906917	738077.75	479890000
F1,F2,F5,F7	0.5696315	0.820175	0.8209485	0.57231	741581.2	484840000
F1,F2,F6,F7	0.6946855	0.820221	0.5707775	0.697366	743802.45	487570000
F1,F3,F4,F5	0.5695575	0.8201885	0.570741	0.8225685	727819.95	465120000
F1,F3,F4,F6	0.6946075	0.8202475	0.6957985	0.572402	729920.5	467700000
F1,F3,F4,F7	0.65296633	0.8202735	0.65415833	0.65565133	733930	473530000
F1,F3,F5,F6	0.65290783	0.820215	0.820892	0.48904267	735162.5	475240000
F1,F3,F5,F7	0.5696185	0.8202415	0.820918	0.5722845	738311.25	479850000
F1,F3,F6,F7	0.6946595	0.8202995	0.5707505	0.697339	739347.75	480480000
F1,F4,F5,F6	0.6945035	0.6954285	0.8208215	0.572307	730881.5	469350000
F1,F4,F5,F7	0.65286733	0.65379233	0.8208515	0.65555083	733815	473290000
F1,F4,F6,F7	0.719587	0.7205195	0.6206795	0.7222695	737231.45	478170000
F1,F5,F6,F7	0.694559	0.8206085	0.570651	0.697242	740789.25	482990000
F2,F3,F4,F5	0.8196025	0.8201665	0.3207265	0.8225525	724948.75	461960000
F2,F3,F4,F6	0.819658	0.8202295	0.65411433	0.48905067	727416.25	464790000
F2,F3,F4,F7	0.8197015	0.8202555	0.570814	0.5722885	730273.75	468850000
F2,F3,F5,F6	0.8196205	0.8202095	0.82087	0.322356	730745	466590000
F2,F3,F5,F7	0.8196575	0.8202215	0.820905	0.3222695	735080	476130000
F2,F3,F6,F7	0.8197235	0.820278	0.48738917	0.65565633	737340.5	479090000

F2,F4,F5,F6	0.8195645	0.65373833	0.820805	0.48895217			729441.25	468590000
F2,F4,F5,F7	0.819596	0.570435	0.8208355	0.572196			731753.75	471800000
F2,F4,F6,F7	0.819658	0.695496	0.570663	0.697245			733495.75	473290000
F2,F5,F6,F7	0.8196275	0.820591	0.48729967	0.65554883			737341.25	478790000
F3,F4,F5,F6	0.819639	0.65371633	0.8207755	0.48892317			723909.2	459690000
F3,F4,F5,F7	0.8196655	0.5704095	0.82081	0.572169			727303.8	464680000
F3,F4,F6,F7	0.819728	0.6954705	0.5706375	0.697218			729670	467640000
F3,F5,F6,F7	0.819695	0.820564	0.48726517	0.65552883			734490.5	474580000
F4,F5,F6,F7	0.694905	0.8204985	0.5705245	0.697124			730639.2	469440000
F1,F2,F3,F4,F5	0.5707045	0.820706	0.820678	0.570884	0.641914		758370	507960000
F1,F2,F3,F4,F6	0.689413	0.8278865	0.8145535	0.6897495	0.629052		760631.25	510870000
F1,F2,F3,F4,F7	0.64776133	0.827898	0.814569	0.64811483	0.6290045		764675.25	516740000
F1,F2,F3,F5,F6	0.64771183	0.8278655	0.8145245	0.8148735	0.6290505		765487.8	518030000
F1,F2,F3,F5,F7	0.564419	0.827876	0.814539	0.8149125	0.62904		768681.2	522480000
F1,F2,F3,F6,F7	0.6894615	0.8278865	0.8145815	0.5648295	0.6292365		770946.7	525170000
F1,F2,F4,F5,F6	0.689337	0.827824	0.6897125	0.814839	0.628982		761561.45	512530000
F1,F2,F4,F5,F7	0.64769383	0.827836	0.64807033	0.814886	0.628936		765097.3	517310000
F1,F2,F4,F6,F7	0.7143935	0.8278745	0.7147915	0.6146455	0.628957		767355.5	520440000
F1,F2,F5,F6,F7	0.689376	0.8278565	0.8148685	0.5646665	0.628921		771049.45	525470000
F1,F3,F4,F5,F6	0.6893555	0.827892	0.689711	0.8147985	0.628956		759396.25	509520000
F1,F3,F4,F5,F7	0.64767133	0.8279075	0.64806783	0.8148245	0.6288885		761280.05	511360000
F1,F3,F4,F6,F7	0.714385	0.827913	0.714761	0.6147935	0.629103		763456.2	514310000
F1,F3,F5,F6,F7	0.6893655	0.8279315	0.8148575	0.564593	0.628824		763039.5	513660000
F1,F4,F5,F6,F7	0.727753	0.7147035	0.814806	0.6146105	0.642289		765251.3	517480000
F2,F3,F4,F5,F6	0.827802	0.814452	0.64801533	0.8147975	0.6424015		754515	502870000
F2,F3,F4,F5,F7	0.8278305	0.8144625	0.564652	0.8147805	0.642277		758463.7	508700000
F2,F3,F4,F6,F7	0.827846	0.814509	0.6897395	0.5646585	0.642382		760455.05	511060000
F2,F3,F5,F6,F7	0.8278345	0.8144785	0.8148375	0.48126167	0.6423675		761782.5	513230000
F2,F4,F5,F6,F7	0.8277895	0.689671	0.814815	0.564598	0.6422695		761440	512820000
F3,F4,F5,F6,F7	0.8278535	0.6896605	0.814804	0.5645865	0.642322		757332	506260000
F1,F2,F3,F4,F5,F6	0.695662	0.8206685	0.8206415	0.6958595	0.8211795	0.571004	789501.45	551620000
F1,F2,F3,F4,F5,F7	0.65400133	0.8206745	0.8206475	0.65419333	0.821185	0.65431133	791345	553640000
F1,F2,F3,F4,F6,F7	0.720697	0.820703	0.8206765	0.720889	0.621038	0.721002	794216.2	557310000
F1,F2,F3,F5,F6,F7	0.695643	0.8206495	0.820623	0.82116	0.5709845	0.695953	798637.45	564020000
F1,F2,F4,F5,F6,F7	0.720608	0.8206095	0.7208015	0.821126	0.62095	0.7209185	794901.25	558730000
F1,F3,F4,F5,F6,F7	0.7206125	0.8205925	0.720806	0.821126	0.62095	0.720923	791095.55	552600000
F2,F3,F4,F5,F6,F7	0.820615	0.8205885	0.6958015	0.821132	0.570951	0.6959195	789310	551810000
F1,F2,F3,F4,F5,F6,F7	0.72075	0.82072	0.8206075	0.7207615	0.8211245	0.620943	782234.38	595890000

# Références

- Abdessalem, A. C. (2014). Vers une organisation globale durable de l'approvisionnement des ménages: Bilans économiques et environnementaux de différentes chaînes de distribution classiques et émergentes depuis l'entrepôt du fournisseur jusqu'au domicile du ménage [Thèse de Doctorat]. Université Lumière Lyon II.
- ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie). (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.
- ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie). (2007). Dossier de presse : Transport routier et développement durable (Signature des premières chartes d'engagements volontaires de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>) de l'Equipement ADEME et Ministère des Transports, du Tourisme et de la Mer. Paris.
- Adenso-Díaz, B., Lozano, S., Garcia-Carbajal, S., & Smith-Miles, K. (2014). Assessing partnership savings in horizontal cooperation by planning linked deliveries. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 66, 268–279. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.05.013>
- Agarwal, R., & Ergun, Ö. (2008). Mechanism design for a multicommodity flow game in service network alliances. *Operations Research Letters*, 36 (5), 520–524. <https://doi.org/10.1016/j.orl.2008.04.007>
- Agarwal, R., & Ergun, Ö. (2010). Network Design and Allocation Mechanisms for Carrier Alliances in Liner Shipping. *Operations Research*, 58 (6), 1726–1742. <https://doi.org/10.1287/opre.1100.0848>
- Agrell, P. J., Lundin, J., & Norrman, A. (2017). Supply Chain Management: Horizontal carrier coordination through cooperative governance structures. *International Journal of Production Economics*, 194, 59–72. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.10.025>
- Akkermans., HA, Bogerd., P, Yucesan E, & van Wassenhove., LN. (2003) The impact of ERP on supply chain management: exploratory findings from a European Delphi study. *Eur J Oper Res* 146:284–301.
- Albers, S., & Klaas-Wissing, T. (2012). Organisation of multilateral LTL alliances. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 15 (3), 181–198. <https://doi.org/10.1080/13675567.2012.709836>
- Algaba, E., Fragnelli, V., Llorca, N., & Sánchez-Soriano, J. (2019). Horizontal cooperation in a multimodal public transport system: The profit allocation problem. *European Journal of Operational Research*, 275 (2), 659–665. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.11.050>
- Allaoui, H., Guo, Y., & Sarkis, J. (2019). Decision support for collaboration planning in sustainable supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 229, 761–774. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.367>
- Allen, J. & Browne, M. (2010). Sustainability strategies for city logistics In: Mckinnon, A., Cullinane, S., Browne, M. & Whiteing, A. (Eds.) *Green Logistics - Improving the environmental sustainability of logistics*. London, UK: Kogan Page Ltd.
- Allen, J., Bektas, T., Cherrett, T., Friday, A., Fraser McLeod, Piecyk, M., Piotrowska, M., & Austwick, M. Z. (2017). Enabling a Freight Traffic Controller for Collaborative Multidrop Urban Logistics: Practical and Theoretical Challenges. 2609 (1), 77–84. <https://doi.org/10.3141/2609-09>

- Aloui, A., Hamani, N., Derrouiche, R., & Delahoche, L. (2021a). 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*, 1–22.
- Aloui, A., Hamani, N., Derrouiche, R., & Delahoche, L. (2021b). Systematic literature review on collaborative sustainable transportation: Overview, analysis and perspectives. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 9, 100291. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100291>
- Altiparmak, F., Gen, M., Lin, L., & Paksoy, T. (2006). A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks. *Computers & Industrial Engineering*, 51 (1), 196–215. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2006.07.011>
- Alumur, S. A., Nickel, S., & Saldanha-da-Gama, F. (2012). Hub location under uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46 (4), 529–543. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.11.006>
- Alumur, S. A., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F., & Seçer, Y. (2016). Multi-period hub network design problems with modular capacities. *Annals of Operations Research*, 246 (1–2), 289–312. <https://doi.org/10.1007/s10479-015-1805-9>
- Amer, L. E., & Eltawil, A. B. (2015). Analysis of quantitative models of horizontal collaboration in supply chain network design: Towards “green collaborative” strategies. *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM)*, 1–10.
- An, Y., Zhang, Y., & Zeng, B. (2015). The reliable hub-and-spoke design problem: Models and algorithms. *Transportation Research Part B: Methodological*, 77, 103–122. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.02.006>
- Anderson, S., Allen, J., & Browne, M. (2005). Urban logistics—how can it meet policy makers’ sustainability objectives? *Journal of Transport Geography*, 13 (1), 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2004.11.002>
- André, M. (2004). The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions. *Science of The Total Environment*, 334–335, 73–84. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.04.070>
- Aravendan, M., & Panneerselvam, R. (2015). Development and Comparison of Hybrid Genetic Algorithms for Network Design Problem in Closed Loop Supply Chain. *Intelligent Information Management*, 07(06), 313–338. <https://doi.org/10.4236/iim.2015.76025>
- Audy, J.-F., D’Amours, S., & 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. <https://doi.org/10.1057/jors.2010.53>
- Aviv, Y. (2001). The effect of collaborative forecasting on supply chain performance. *Manag Sci* 47 : 1326–1343.
- Badraoui, I., Van der Vorst, J. G. A. J., & Boulaksil, Y. (2020). Horizontal logistics collaboration: An exploratory study in Morocco’s agri-food supply chains. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 23 (1), 85–102. <https://doi.org/10.1080/13675567.2019.1604646>
- Bahinipati, B. K., Kanda, A., & Deshmukh, S. G. (2009). Horizontal collaboration in semiconductor manufacturing industry supply chain: An evaluation of collaboration intensity index. *Industrial Engineering*, 16.
- Ballot, E., & 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. <https://doi.org/10.1080/09537287.2010.489276>
- Ballou, R. H. (2001). Unresolved Issues in Supply Chain Network Design. *Inf Syst Front*, 3 (4), 417–426.
- Barratt, M. (2004). Understanding the meaning of collaboration in the supply chain. *Supply Chain Management: An International Journal*, 9 (1), 30–42. <https://doi.org/10.1108/13598540410517566>
- Bartik, A. W., Bertrand, M., Cullen, Z., Glaeser, E. L., Luca, M., & Stanton, C. (2020). The impact of COVID-19 on small business outcomes and expectations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117 (30), 17656–17666. <https://doi.org/10.1073/pnas.2006991117>

- Beamon, BM. (1998). Supply chain design and analysis: models and methods. *Int J Prod Econ*, 55, 281–294.
- Becker, D. (2003). Le développement des implantations logistiques en France et ses enjeux pour les politiques d'aménagement (Rapport Final No. 2001-0104-01; Conseil Général Des Ponts et Chaussées). [http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis-0044673/14472.pdf](http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0044/Temis-0044673/14472.pdf)
- Ben Jouida, S., Krichen, S., & Klibi, W. (2017). Coalition-formation problem for sourcing contract design in supply networks. *European Journal of Operational Research*, 257 (2), 539–558. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.07.040>
- Berger, S., & Bierwirth, C. (2010). Solutions to the request reassignment problem in collaborative carrier networks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46 (5), 627–638. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.12.006>
- Billal, M., & Hossain, M. (2020). Multi-objective Optimization for Multi-product Multi-period Four Echelon Supply Chain Problems under Uncertainty. 13 (1), 1–17. <https://doi.org/10.22094/JOIE.2018.555578.1529>
- Bowersox DJ, Closs DJ, Cooper MB (2002). *Supply chain logistics management*. McGraw-Hill, Boston.
- Bozarth, C., Warsing, D., Flynn, B. and Flynn, J. (2009), “The impact of supply chain complexity on manufacturing plant performance”, *Journal of Operations Management*, Vol.27, pp 78-93.
- Bramham J., & MacCarthy., B. (2004). The demand driven chain. *Manuf Eng*, 83:30–33.
- Browne, M., Allen., J, Nemoto., T, Visser., J, & Wild., D. (2007). City access restrictions and the implications for goods deliveries, in E. Taniguchi and R. G. Thompson (eds.), *City Logistics V*, 15-31, Institute for City Logistics, Crete, Greece.
- Buijs, P., & (“Hans”) Wortmann, J. C. (2014). Joint operational decision-making in collaborative transportation networks: The role of IT. *Supply Chain Management: An International Journal*, 19 (2), 200–210. <https://doi.org/10.1108/SCM-08-2013-0298>
- Burgess, K., Koroglu, R., & Singh, P. J. (2006). Supply chain management: A structured literature review and implications for future research. *International Journal of Operations & Production Management*, 26 (7), 703–729. <https://doi.org/10.1108/01443570610672202>
- Bustinza, O. F., Gomes, E., Vendrell-Herrero, F., & Baines, T. (2019). Product–service innovation and performance: The role of collaborative partnerships and R&D intensity. *R&D Management*, 49 (1), 33–45. <https://doi.org/10.1111/radm.12269>
- Büyüközkan, G., Feyzioglu, O., & Nebol, E. (2008). Selection of the strategic alliance partner in logistics value chain. 113 (1), 148–158.
- Caballini, C., Sacone, S., & Saeednia, M. (2016). Cooperation among truck carriers in seaport containerized transportation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 93, 38–56. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.05.007>
- Cachon, GP. (2002) Supply coordination with contracts. In: De Kok T, Graves S (eds) *Handbooks in operations research and management science*. North-Holland, Amsterdam.
- Cagliano, R., Caniato, F., Golini, R., Kalchschmidt, M., & Spina, G. (2008). Supply chain configurations in a global environment: A longitudinal perspective. *Operations Management Research*, 1 (2), 86–94. <https://doi.org/10.1007/s12063-008-0012-0>
- Camarinha-Matos, L. M. (2014). Collaborative Networks: A Mechanism for Enterprise Agility and Resilience. In K. Mertins, F. Bénaben, R. Poler, & J.-P. Bourrières (Eds.), *Enterprise Interoperability VI* (pp. 3–11). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-04948-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-04948-9_1)
- Cameron, M. H., & Elvik, R. (2008). Nilsson’s Power Model Connecting Speed and Road Trauma: Does It Apply on Urban Roads? 10.

- Campbell, J. F. (1994). Integer programming formulations of discrete hub location problems. *European Journal of Operational Research*, 72 (2), 387–405. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)90318-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)90318-2)
- Campbell, J. F. (1996). Hub Location and the p -Hub Median Problem. *Operations Research*, 44 (6), 923–935. <https://doi.org/10.1287/opre.44.6.923>
- Campbell, J. F. (2013). Modeling Economies of Scale in Transportation Hub Networks. 2013 46th Hawaii International Conference on System Sciences, 1154–1163. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2013.411>
- Campbell, J. F., Ernst, A. T., & Krishnamoorthy, M. (2005). Hub Arc Location Problems: Part I—Introduction and Results. *Management Science*, 17.
- Cao, M., & Zhang, Q. (2011). Supply chain collaboration: Impact on collaborative advantage and firm performance. *Journal of Operations Management*, 29 (3), 163–180. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2010.12.008>
- Caridi., M, Cigolini., R, & De Marco., D. (2005) Improving supply-chain collaboration by linking intelligent agents to CPFR. *Int J Prod Res* 43:4191–4218
- Carlsson, J. G., & Jia, F. (2013). Euclidean Hub-and-Spoke Networks. *Operations Research*, 61 (6), 1360–1382. <https://doi.org/10.1287/opre.2013.1219>
- Carter CR, Rogers DS (2008) A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory. *Int J Phys Distrib Logist Manag* 38(5):360–387.
- CETU (Centre d’\_Etudes des Transports Urbains). (1980). Guide du bruit des transports terrestres. Prévision des niveaux sonores.
- Chabot, T., Bouchard, F., Legault-Michaud, A., Renaud, J., & Coelho, L. C. (2018). Service level, cost and environmental optimization of collaborative transportation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 110, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.11.008>
- Chandra, C., & Grabis, J. (2007). *Supply Chain Configuration Concepts, Solutions, and Applications* (1st ed.). Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-68155-9>
- Chen., JJ, Paulraj., A, & Lado., AA. (2004) Strategic purchasing, supply management, and firm performance. *J Oper Manag* 22:505–523.
- Chen, H. (2016). Combinatorial clock-proxy exchange for carrier collaboration in less than truck load transportation. 91, 152–172. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.04.008>
- Chen, J., Sohal, A. S., & Daniel I, P. (2013). Supply chain operational risk mitigation: A collaborative approach. 51 (7), 2186–2199. <https://doi.org/10.1080/00207543.2012.727490>
- Chen, S. H., Wang, P. W., Chen, C. M., & Lee, H. T. (2010). An analytic hierarchy process approach with linguistic variables for selection of an R&D strategic alliance partner. *Computers & Industrial Engineering*, 58 (2), 278–287. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.10.006>
- Chen, W., & Goh, M. (2019). Mechanism for cooperative partner selection: Dual-factor theory perspective. *Computers & Industrial Engineering*, 128, 254–263. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.040>
- Childerhouse, P. and Towill, D. R. (2002) “Analysis of the factors affecting the realworld value stream performance”, *International Journal of Production Research*, 40(15), 3499–3518.
- Chircop, K., & Zammit-Mangion, D. (2013). On  $\epsilon$ -constraint based methods for the generation of Pareto frontiers. 3, 279–289.
- Chopra, S., & Meindl, P. (2007). *Supply Chain Management strategy, planning, and operation* (3rd edition). Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall.
- Christopher, M. (1998). *Logistics and Supply Chain Management: Strategies for Reducing Cost and Improving Service*.

- [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=365261](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=365261)
- Christopher, M. G. (1992). *Logistics and Supply Chain Management: Strategies for Reducing Costs and Improving Services*, Pitman, London.
- Contreras, I., Cordeau, J.-F., & Laporte, G. (2011). Benders Decomposition for Large-Scale Uncapacitated Hub Location. *Operations Research*, 59 (6), 1477–1490. <https://doi.org/10.1287/opre.1110.0965>
- Contreras, I., Díaz, J. A., & Fernández, E. (2011). Branch and Price for Large-Scale Capacitated Hub Location Problems with Single Assignment. *INFORMS Journal on Computing*, 23 (1), 41–55. <https://doi.org/10.1287/ijoc.1100.0391>
- Cooper, L. (1963). Location-Allocation Problems. *Operations Research*, 11 (3), 331–343. <https://doi.org/10.1287/opre.11.3.331>
- Cooper, M. C., & Ellram, L. M. (1993). Characteristics of Supply Chain Management and the Implications for Purchasing and Logistics Strategy. *The International Journal of Logistics Management*, 4 (2), 13–24. <https://doi.org/10.1108/09574099310804957>
- Cooper, M. C., Lambert, D. M., & Pagh, J. D. (1997). Supply Chain Management: More Than a New Name for Logistics. *The International Journal of Logistics Management*, 8 (1), 1–14. <https://doi.org/10.1108/09574099710805556>
- Corben, B., Senserrick, T., Cameron, M. and Rechnitzer, G., 2004. Development of the visionary research model: application to the car/pedestrian conflict. Monash University Accident Research Centre, Report Number 229. <http://www.monashuniversity.com/muarc/reports/muarc229.pdf>
- Correia, I., Nickel, S., & Saldanha-da-Gama, F. (2010). Single-assignment hub location problems with multiple capacity levels. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44 (8–9), 1047–1066. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2009.12.016>
- Coyle, J.J.; Bardi, E.J. & Langley, J.C. (2003). *The management of Business Logistics: A Supply Chain Perspective*. Canada. Thomson South-Western.
- Creemers, S., Woumans, G., Boute, R., & Beliën, J. (2017). Tri-Vizor Uses an Efficient Algorithm to Identify Collaborative Shipping Opportunities. *Interfaces*, 47 (3), 244–259. <https://doi.org/10.1287/inte.2016.0878>
- Crujssens, F., Cools, M., & Dullaert, W. (2007). Horizontal cooperation in logistics: Opportunities and impediments. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43 (2), 129–142. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2005.09.007>
- Crujssens, F., Dullaert, W., & Fleuren, H. (2007). Horizontal Cooperation in Transport and Logistics: A Literature Review. 46 (3), 22–39.
- Curiel, R.E., Lahesmaa, R., Subleski, J., Cippitelli, M., Kirken, R.A., Young, H.A. and Ghosh, P. (1997), Identification of a Stat-6-responsive element in the promoter of the human interleukin-4 gene. *Eur. J. Immunol.*, 27: 1982-1987. <https://doi.org/10.1002/eji.1830270823>
- Dahl, S., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2011.02.018>
- Dahlberg, J., Göthe-Lundgren, M., & Engevall, S. (2017). A note on the nonuniqueness of the Equal Profit Method. *Applied Mathematics and Computation*, 308, 84–89. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2017.03.018>
- Dai, B., & Chen, H. (2011). A multi-agent and auction-based framework and approach for carrier collaboration. *Logistics Research*, 3 (2–3), 101–120. <https://doi.org/10.1007/s12159-011-0046-9>
- Dai, B., & Chen, H. (2012a). Mathematical model and solution approach for carriers' collaborative transportation planning in less than truckload transportation. *International Journal of Advanced Operations Management*, 62–84.

- Dai, B., & Chen, H. (2012b). Profit allocation mechanisms for carrier collaboration in pickup and delivery service. *Computers & Industrial Engineering*, 62 (2), 633–643. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.11.029>
- Danese P, & Romano, P. (2013). The moderating role of supply network structure on the customer integration-efficiency relationship. *Int J Oper Prod Manag* 33(4):372–393.
- Danloup, N., Allaoui, H., & Goncalves, G. (2013). Literature review on OR tools and methods for collaboration in supply chain. 1–7. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6761483>
- de Almeida, W., Senne, E., & Yanasse, H. (2013). An Exact Solution for the Capacitated Multiple Allocation Hub Location Problem. *Journal of Computational Interdisciplinary Sciences*, 4 (3). <https://doi.org/10.6062/jcis.2013.04.03.0074>
- De Jong, K. A., (1975). An Analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems. (Doctoral dissertation, University of Michigan), 36(10), 5140B (University Microfilms No. 76-9381).
- De Matta R, & Miller T., (2015). Formation of a strategic manufacturing and distribution network with transfer prices. *Eur J Oper Res* 241:435–448.
- De Vos, B., & Raa, B. (2016). Vertical and Horizontal Collaboration in Inventory and Transportation. In *Computational Management Science* (Vol. 682, pp. 99–104). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-20430-7\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-20430-7_13)
- De Vos, B., & Raa, B. (2018). Stability Analysis of Cost Allocation Methods for Inventory Routing. *IFAC-PapersOnLine*, 51 (11), 1682–1688. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.214>
- Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Trans. Evol. Comput.*, 6, 182–197. <https://www.semanticscholar.org/paper/A-fast-and-elitist-multiobjective-genetic-NSGA-II-Deb-Agrawal/6eddc19efa13f7e70301908d98e85a19d6f32a02>
- Defryn, C., Sörensen, K., & Dullaert, W. (2019). Integrating partner objectives in horizontal logistics optimisation models. *Omega*, 82, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.11.008>
- Defryn, Christof & Vanovermeire, Christine & Sörensen, Kenneth & Van Breedam, Alex & Vannieuwenhuyse, Bart & Verstrepen, Sven. (2014). "Gain sharing in horizontal logistic collaboration. A case study in the fresh fruit and vegetables sector," Working Papers 2014004, University of Antwerp, Faculty of Business and Economics.
- Delen D, & Benjamin., PC. (2003). Towards a truly integrated enterprise modeling and analysis environment. *Comput Ind*, 51, 257–268
- Demir, E., Bektaş, T., & Laporte, G. (2014). A review of recent research on green road freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 237 (3), 775–793. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.12.033>
- Desa, M.I. (2014). Genetic algorithms with heuristics rules to solve multi source single product flexible multistage logistics network problems. <https://www.semanticscholar.org/paper/Genetic-algorithms-with-heuristics-rules-to-solve-Desa/32f1425b74e8c0cca19b128208dbb5d6edf43769>
- Destouches, G., & Gaide, F. (2011). Pratiques de logistique collaborative: Quelles opportunités pour les PME/ETI ?
- Ding, J. and Liang, G. (2005) The Choices of Employing Seafarers for the National Ship-Owners in Taiwan: An Empirical Study. *Maritime Policy & Management*, 32, 123-137. <http://dx.doi.org/10.1080/09523980500062643>
- Dukkanci, O., Peker, M., & Kara, B. Y. (2019). Green hub location problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 125, 116–139. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.03.005>
- Ebery, J. (2001). Solving large single allocation p-hub problems with two or three hubs. *European Journal of Operational Research*, 128 (2), 447–458. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00370-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00370-7)

- Ebery, J., Krishnamoorthy, M., Ernst, A., & Boland, N. (2000). The capacitated multiple allocation hub location problem: Formulations and algorithms. *European Journal of Operational Research*, 120 (3), 614–631. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00395-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00395-6)
- Eisenhardt, K.M. and Martin, J.A. (2000). Dynamic capabilities: what are they?. *Strategic Management Journal*, 21 : 1105-1121. [https://doi.org/10.1002/1097-0266\(200010/11\)21:10/11<1105::AID-SMJ133>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/1097-0266(200010/11)21:10/11<1105::AID-SMJ133>3.0.CO;2-E)
- Elhedhli, S., & Wu, H. (2010). A Lagrangean Heuristic for Hub-and-Spoke System Design with Capacity Selection and Congestion. *INFORMS Journal on Computing*, 22 (2), 282–296. <https://doi.org/10.1287/ijoc.1090.0335>
- Ellram, L. M. (1991). Supply-Chain Management: The Industrial Organisation Perspective. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 21 (1), 13–22. <https://doi.org/10.1108/09600039110137082>
- Engvall, S., Göthe-Lundgren, M., & Värbrand, P. (n.d.). The traveling salesman game: An application of cost allocation in a gas and oil company. 19.
- Ergun, O., Kuyzu, G., & Savelsbergh, M. (2007). Reducing Truckload Transportation Costs Through Collaboration. *Transportation Science*, 41 (2), 206–221. <https://doi.org/10.1287/trsc.1060.0169>
- Ergun, Ö., Kuyzu, G., & Savelsbergh, M. (2007). Shipper collaboration. *Computers & Operations Research*, 34 (6), 1551–1560. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.07.026>
- Ernst, A. T., & Krishnamoorthy, M. (1996). Efficient algorithms for the uncapacitated single allocation p-hub median problem. *Location Science*, 4 (3), 139–154. [https://doi.org/10.1016/S0966-8349\(96\)00011-3](https://doi.org/10.1016/S0966-8349(96)00011-3)
- Ernst, A. T., & Krishnamoorthy, M. (1998). Exact and heuristic algorithms for the uncapacitated multiple allocation p-hub median problem. *European Journal of Operational Research*, 104 (1), 100–112. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00340-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00340-2)
- Esmailbeigi, R., Naderi, B., Arshadikhamseh, A., & Loni, P. (2017). An Estimated Formulation for the Capacitated Single Allocation p-hub Median Problem with Fixed Costs of Opening Facilities. 4 (1), 63–72.
- Esper, T. L., & Williams, L. R. (2003). The value of collaborative transportation management (CTM): Its relationship to CPFR and Information Technology. *Transport Journal*, 42(4), 55–65.
- European Commission (2013). Clean Power for Transport: A European alternative fuels strategy. Retrieved from: <http://cor.europa.eu/en/activities/stakeholders/Documents/com2013-17.pdf>.
- Eurostat (2015). Employment (main characteristics and rates) – annual averages. Retrieved from: [http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=lfsl\\_emp\\_a&lang=en](http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=lfsl_emp_a&lang=en).
- Faccio, M., Persona, A., & Zanin, G. (2013). The sustainable routing problem. *International Journal of Services and Operations Management*, 16 (3), 310. <https://doi.org/10.1504/IJSOM.2013.056766>
- Farahani, R. Z., Hekmatfar, M., Arabani, A. B., & Nikbakhsh, E. (2013). Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications. *Computers & Industrial Engineering*, 64 (4), 1096–1109. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.01.012>
- Fawcett, S.E., Magnan, G.M. and McCarter, M.W. (2008). A three-stage implementation model for supply chain collaboration. *Journal of Business Logistics*, 29: 93-112. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2008.tb00070.x>
- Feng, B., Fan, Z.-P., & Ma, J. (2010). A method for partner selection of codevelopment alliances using individual and collaborative utilities. *International Journal of Production Economics*, 124 (1), 159–170. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.10.019>
- Fernández, E., & Sgalambro, A. (2020). On carrier’s collaboration in hub location problems. *European Journal of Operational Research*, 283 (2), 476–490. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.11.038>
- Fernández, E., Fontana, D., & Speranza, M. G. (2016). On the Collaboration Uncapacitated Arc Routing Problem. *Computers & Operations Research*, 67, 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.10.001>

- Fernández, E., Roca-Riu, M., & Speranza, M. G. (2018). The Shared Customer Collaboration Vehicle Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 265 (3), 1078–1093. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.08.051>
- Ferrell, W., Ellis, K., Kaminsky, P., & Rainwater, C. (2019). Horizontal collaboration: Opportunities for improved logistics planning. *International Journal of Production Research*, 58 (14), 4267–4284. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1651457>
- Fiala., P. (2005). Information sharing in supply chains. *Omega*, 33, 419–423.
- Figliozzi, M. A. (2011). The impacts of congestion on time-definitive urban freight distribution networks CO2 emission levels: Results from a case study in Portland, Oregon. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19 (5), 766–778. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.11.002>
- Filser, M., Des Garets, V., & Paché, G. (2001). *La distribution: Organisation et stratégie*. EMS, Éd. Management & société. Colombelles.
- Fisher M, Hammond J, Obermeyer W, Raman A (1997) Configuring a supply chain to reduce the cost of demand uncertainty. *Prod Oper Manag* 6:211–225.
- Fliedner, G. (2003). CPFR: An emerging supply chain tool. *Industrial Management & Data Systems*, 103 (1), 14–21. <https://doi.org/10.1108/02635570310456850>
- Fogel, D. B. (1988). An Evolutionary Approach to the Traveling Salesman Problem, *Biological Cybernetics* 60, 139–144.
- Fogel, D. B. (1990). A Parallel Processing Approach to a Multiple Traveling Salesman Problem Using Evolutionary Programming, In Canter, L. (ed.) *Proceedings on the Fourth Annual Parallel Processing Symposium*, 318–326. Fullerton, CA.
- Frisk, M., Göthe-Lundgren, M., Jörnsten, K., & Rönnqvist, M. (2010). Cost allocation in collaborative forest transportation. *European Journal of Operational Research*, 205 (2), 448–458. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.01.015>
- Frohlich, M. T., & Westbrook, R. (2001). Arcs of integration: An international study of supply chain strategies. *Journal of Operations Management*, 19 (2), 185–200. [https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(00\)00055-3](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(00)00055-3)
- Ganeshan, R. and Harrison, T.P. (1995), *An Introduction to Supply Chain Management*, Department of Management Sciences and Information Systems, Penn State University.
- Gansterer, M., & Hartl, R. F. (2018). Collaborative vehicle routing: A survey. *European Journal of Operational Research*, 268 (1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.10.023>
- Gelareh, S., Neamatian Monemi, R., & Nickel, S. (2015). Multi-period hub location problems in transportation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 75, 67–94. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.12.016>
- Gen, M., Altiparmak, F. & Lin, L. A genetic algorithm for two-stage transportation problem using priority-based encoding. *OR Spectrum* 28, 337–354 (2006). <https://doi.org/10.1007/s00291-005-0029-9>.
- Ghaffari-Nasab, N., Ghazanfari, M., & Teimoury, E. (2016). Hub-and-spoke logistics network design for third party logistics service providers. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 11 (1), 49–61. <https://doi.org/10.1080/17509653.2014.992994>
- Gonzalez-Feliu, J., Morana, J., Grau, J.-M. S., & Ma, T.-Y. (2013). Design and scenario assessment for collaborative logistics and freight transport systems. *International Journal of Transport Economics*, 207–240.
- Gonzalez-Feliu, J., Semet, F., & Routhier, J.-L. (2014). *Sustainable Urban Logistics: Concepts, Methods and Information Systems*. Springer. 10.1007/978-3-642-31788-0

- Groothedde, B., Ruijgrok, C., & Tavasszy, L. (2005). Towards collaborative, intermodal hub networks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 41 (6), 567–583. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2005.06.005>
- Guajardo, M., & Rönnqvist, M. (2016). A review on cost allocation methods in collaborative transportation: M. Guajardo and M. Rönnqvist. *International Transactions in Operational Research*, 23 (3), 371–392. <https://doi.org/10.1111/itor.12205>
- Habib, M. M. (2010). Supply Chain Management: theory and its future perspectives. *International Journal of Business, Management and Social Sciences*, 1(1), 2010, 79-87.
- Habibi, M. K. K., Allaoui, H., & Goncalves, G. (2018). Collaborative hub location problem under cost uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 124, 393–410. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.07.028>
- Haimes, Y., Lasdon, L. & Wismer, D. (1971). On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1:296-297.
- Haworth NL. Alcohol and Risk of Accident. 2000. Comparing the involvement of alcohol in fatal and serious injury single vehicle crashes, in *Series Comparing the involvement of alcohol in fatal and serious injury single vehicle crashes*; pp. 53–58.
- Hernández, S., & Peeta, S. (2011). Centralized Time-Dependent Multiple-Carrier Collaboration Problem for Less-Than-Truckload Carriers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2263 (1), 26–34. <https://doi.org/10.3141/2263-04>
- Hernández, S., & 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. <https://doi.org/10.1080/23249935.2013.766279>
- Hernández, S., Peeta, S., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.03.001>
- Hickman, Hassel, Joumard, Samaras & Sorenson, 1999. Methodology for calculating transport emissions and energy consumption (Report for the Projet MEET). Transport Research Laboratory. Edinburgh
- Hingley, M., Lindgreen, A., Grant, D. B., & Kane, C. (2011). Using fourth-party logistics management to improve horizontal collaboration among grocery retailers. 16 (5), 316–327. <https://doi.org/10.1108/13598541111155839>
- Hlyal, M., Bassou, A., Soulhi, A., Alami, J. E., & Alami, N. E. (2015). Designing a distribution network using a two level capacity location allocation problem: formulation and efficient genetic algorithm resolution with an application to a moroccan retail. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology* 72(2) : 294-306
- Houghtalen, L., Ergun, Ö., & Sokol, J. (2011). Designing Mechanisms for the Management of Carrier Alliances. *Transportation Science*, 45 (4), 465–482. <https://doi.org/10.1287/trsc.1100.0358>
- Holland, J. H. (1992). *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. The MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/1090.001.0001>
- Holland, J. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems : an introductory analysis with application to biology*. Control and artificial intelligence.
- Hu, L., Zhu, J. X., Wang, Y., & Lee, L. H. (2018). Joint design of fleet size, hub locations, and hub capacities for third-party logistics networks with road congestion constraints. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 118, 568–588. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.09.002>
- Huang, G. Q., & Xu, S. X. (2013). Truthful multi-unit transportation procurement auctions for logistics e-marketplaces. *Transportation Research Part B: Methodological*, 47, 127–148. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2012.10.002>

- Hugos, M. (2006). *Essentials of Supply Chain Management*.  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119464495>
- Ivanov, D. (2020). Predicting the impacts of epidemic outbreaks on global supply chains: A simulation-based analysis on the coronavirus outbreak (COVID-19/SARS-CoV-2) case. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 136, 101922. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.101922>
- Jancovici, 2007. Bilan Carbone :Calcul des facteurs d'émissions et sources bibliographiques utilisées. ADEME France. 240
- Jasti, N. V. K., & Kodali, R. (2015). A critical review of lean supply chain management frameworks: Proposed framework. *Production Planning & Control*, 26 (13), 1051–1068.  
<https://doi.org/10.1080/09537287.2015.1004563>
- Javanshir H, Ebrahimnejad S, Nouri S (2012) Bi-objective supplychain problem using MOPSO and NSGA-II. *Int J Ind Eng Comput*3(4):681–694
- Jensen, J. O. (2009). Sustainability Profile for Urban Districts in Copenhagen. Paper presented at Sustainable Cities and Regions: Enabling Vision or Empty Talk?, Örebro University, Sweden, March 11-13 2009., Örebro, Sweden.
- Jesus Gonzalez-Feliu, Joëlle Morana, Josep-Maria Salanova Grau. (2013), Tai-Yu Ma. Design and scenario assessment for collaborative logistics and freight transport systems. *International Journal of Transport Economics*, Fabrizio Serra editore, pp.207-240. halshs-00844705
- Juan, A. A., Faulin, J., Pérez-Bernabeu, E., & Jozefowicz, N. (2014). Horizontal Cooperation in Vehicle Routing Problems with Backhauling and Environmental Criteria. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 111, 1133–1141. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.148>
- Juvien, J. (2011). Club Défis Logistiques en Champagne-Ardenne: La mutualisation logistique. (Club Défis Logistiques En Champagne-Ardenne, pp. 1–8).  
<https://www.yumpu.com/fr/document/view/20148805/article-defis-logistiques-en-champagne-ardenne>
- Rota, K., Thierry, C., & Bel, G. (1998). Supply Chain Management: A Supplier Perspective, *IFAC Proceedings Volumes*, Volume 31, Issue 15, Pages 475-480, [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)40598-2](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)40598-2).
- Kellner, F., & Otto, A. (2012). Allocating CO2 emissions to shipments in road freight transportation. *Journal of Management Control*, 22 (4), 451–479. <https://doi.org/10.1007/s00187-011-0143-6>
- Khalifehzadeh, S., Seifbarghy, M., & Naderi, B. (2015). A four-echelon supply chain network design with shortage: Mathematical modeling and solution methods. *Journal of Manufacturing Systems*, 35, 164–175. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.12.002>
- Kimms, A. (2006). Economies of Scale in Hub & Spoke Network Design Models: We Have It All Wrong. In M. Morlock, C. Schwindt, N. Trautmann, & J. Zimmermann (Eds.), *Perspectives on Operations Research* (pp. 293–317). DUV. [https://doi.org/10.1007/978-3-8350-9064-4\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-8350-9064-4_17)
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 220 (4598), 671–680. <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>
- Klaas-Wissing, T., & Albers, S. (2010). Cooperative versus corporate governance of LTL networks. 13 (6), 493–506. <https://doi.org/10.1080/13675561003776828>
- Kliger C, Reuter B, & Stadler., H. (2015). Collaboration planning. In *Supply chain management and advanced planning*. Springer, New York, pp 257–277.
- Kobayashi., T, Tamaki M, Komoda., N. (2003). Business process integration as a solution to the implementation of supply chain management systems. *Inform Manag* 40:769–780.
- Kopfer, H. W., Schönberger, J., & Kopfer, H. (2014). Reducing greenhouse gas emissions of a heterogeneous vehicle fleet. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 26 (1–2), 221–248.  
<https://doi.org/10.1007/s10696-013-9180-9>

- Krajewska, M. A., Kopfer, H., Laporte, G., Ropke, S., & Zaccour, G. (2008). Horizontal cooperation among freight carriers: Request allocation and profit sharing. *Journal of the Operational Research Society*, 59 (11), 1483–1491. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602489>
- Krajewski, L. J., Ritzman, L. P., and Malhotra, M. K. (2007). *Operations Management - Processes and Value Chains*. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Kumar, H., & Khatod, D. K. (2018). Loss Allocation for Distribution Network Using  $\tau$ -Value Game Theory Approach. 2018 International Conference on Intelligent Circuits and Systems (ICICS), 401–405. <https://doi.org/10.1109/ICICS.2018.00088>
- Kuo, A., & Miller-Hooks, E. (2012). Developing Responsive Rail Services through collaboration. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46 (3), 424–439. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.10.009>
- Kuyzu, G. (2017). Lane covering with partner bounds in collaborative truckload transportation procurement. *Computers & Operations Research*, 77, 32–43. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.07.018>
- L.F. Cheong, M., Bhatnagar, R., C. Graves, S., & Singapore-MIT Alliance, Nanyang Technological University. (2007). Logistics network design with supplier consolidation hubs and multiple shipment options. *Journal of Industrial & Management Optimization*, 3 (1), 51–69. <https://doi.org/10.3934/jimo.2007.3.51>
- La Londe, B. J., & Masters, J. M. (1994). Emerging Logistics Strategies: Blueprints for the Next Century. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 24 (7), 35–47. <https://doi.org/10.1108/09600039410070975>
- Lai, M., Cai, X., & Hu, Q. (2017). An iterative auction for carrier collaboration in truckload pickup and delivery. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 107, 60–80. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.09.006>
- Lambert, D. M., & Cooper, M. C. (2000). Issues in Supply Chain Management. *Industrial Marketing Management*, 29 (1), 65–83. [https://doi.org/10.1016/S0019-8501\(99\)00113-3](https://doi.org/10.1016/S0019-8501(99)00113-3)
- Lambert, D. M., Cooper, M. C., & Pagh, J. D. (1998). Supply Chain Management: Implementation Issues and Research Opportunities. *The International Journal of Logistics Management*, 9 (2), 1–20. <https://doi.org/10.1108/09574099810805807>
- Lau., HCW, & Lee., WB. (2000). On a responsive supply chain information system. *Int J Phys Distrib Logist* 30:598–610.
- Lautso, K., Spiekermann, K., & Wegener, M. (2002). Modelling policies for urban sustainability. ERSA conference papers ersa02p384, European Regional Science Association.
- Larranaga, P., Kuijpers, C. M. H., Murga, R. H., Inza, I., & Dizdarevic, S., (1999). Genetic algorithms for the travelling salesman problem: A review of representations and operators, *Artificial Intelligence Review*, 13, 129–170.
- Lee, H. L., & Billington, C. (1993). Material Management in Decentralized Supply Chains. 41 (5). <https://doi.org/10.1287/opre.41.5.835>
- Leenders, B. P. J., Velázquez-Martínez, J. C., & Fransoo, J. C. (2017). Emissions allocation in transportation routes. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 57, 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.08.016>
- Leitner, R., Meizer, F., Prochazka, M., & Sihm, W. (2011). Structural concepts for horizontal cooperation to increase efficiency in logistics. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 4 (3), 332–337. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2011.01.009>
- LET, Aria Technologies, System Consult (2006), *Méthodologie pour un bilan environnemental physique du transport de marchandises en ville*. (halshs-00113850).
- Lindholm, M. (2013). Urban freight transport from a local authority perspective – a literature review. *European Transport \ Trasporti Europei, ISTIEE, Institute for the Study of Transport within the European Economic Integration*, 54, 1-3.

- Liu, P., Wu, Y., & Xu, N. (2010). Allocating Collaborative Profit in Less-than-Truckload Carrier Alliance. *Journal of Service Science and Management*, 03 (01), 143–149. <https://doi.org/10.4236/jssm.2010.31018>
- Lohtia, R., Xie, “Frank” Tian, & Subramaniam, R. (2004). Efficient consumer response in Japan: Industry concerns, current status, benefits, and barriers to implementation. *Theory and Research*, 57 (3), 306–311. [https://doi.org/10.1016/S0148-2963\(01\)00326-5](https://doi.org/10.1016/S0148-2963(01)00326-5)
- Loske, D. (2020). The impact of COVID-19 on transport volume and freight capacity dynamics: An empirical analysis in German food retail logistics. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 6, 100165. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100165>
- Lozano, S., Moreno, P., Adenso-Díaz, B., & Algaba, E. (2013). Cooperative game theory approach to allocating benefits of horizontal cooperation. *European Journal of Operational Research*, 229 (2), 444–452. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.02.034>
- Lüer-Villagra, A., Eiselt, H. A., & Marianov, V. (2019). A single allocation p-hub median problem with general piecewise-linear costs in arcs. *Computers & Industrial Engineering*, 128, 477–491. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.058>
- Lummus, R. R., & Vokurka, R. J. (1999). Defining supply chain management: A historical perspective and practical guidelines. *Industrial Management & Data Systems*, 99 (1), 11–17. <https://doi.org/10.1108/02635579910243851>
- Lyonnet, B., Senkel, M.-P., & Clamens, S. (2019). Chapitre 1. Évolution de la logistique: Vers le supply chain management. In *Supply chain management* (pp. 1–42). Dunod; Cairn.info. <https://www.cairn.info/supply-chain-management--9782100788668-p-1.htm>
- Hlyal, M., Bassou, A.A., Soulhi, A., El Alami, J., & El Alami, N. (2015). Esigning a distribution network using a two level capacity location allocation problem: formulation and efficient genetic algorithm resolution with an application to a moroccan retail company. *Journal of Theoretical and Applied Information*. 2/20/2015, Vol. 72 Issue 2, p294-306. 13p.
- Makaci, M., Reaidy, P., Evrard-Samuel, K., Botta-Genoulaz, V., & Monteiro, T. (2017). Pooled warehouse management: An empirical study. *Computers & Industrial Engineering*, 112, 526–536. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.03.005>
- Mangiaracina, R., Perego, A., & Song, G. (2015). Distribution network design: A literature review and a research agenda. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 45 (5), 506–531. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-02-2014-0035>
- Marmiroli, B., Venditti, M., Dotelli, G., & Spessa, E. (2020). The transport of goods in the urban environment: A comparative life cycle assessment of electric, compressed natural gas and diesel light-duty vehicles. *Applied Energy*, 260, 114236. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114236>
- Mason, R., Lalwani, C., & Boughton, R. (2007). Combining vertical and horizontal collaboration for transport optimisation. *Supply Chain Management: An International Journal*, 12 (3), 187–199. <https://doi.org/10.1108/13598540710742509>
- Massol, O., & Tchong-Ming, S. (2010). Cooperation among liquefied natural gas suppliers: Is rationalization the sole objective? *Energy Economics*, 32 (4), 933–947. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2010.02.008>
- McKinnon, A., & Edwards, J. (2010). Opportunities for improving vehicle utilization. In *Green Logistics: Improving the Environmental Sustainability of Logistics*. McKinnon, A., Cullinane, S., Browne, M., and Whiteing, A. (eds). Kogan Page Publisher.
- Mehdizadeha, E., & Afrabandpei, F. (2012). Design of a Mathematical Model for Logistic Network in a Multi-Stage Multi-Product Supply Chain Network and Developing a Metaheuristic Algorithm. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 10, 35-43.
- Meier, J. F. (2017). An improved mixed integer program for single allocation hub location problems with stepwise cost function: Xxx. *International Transactions in Operational Research*, 24 (5), 983–991. <https://doi.org/10.1111/itor.12270>

- Melo, T., Nickel, S., & Saldanha-da-Gama, F. (2008). Network design decisions in supply chain planning. <https://www.semanticscholar.org/paper/Network-design-decisions-in-supply-chain-planning-Melo-Nickel/7247334b00de93cf4f2ba614983493167d4f30f4>
- Meng, Q., & Wang, X. (2011). Intermodal hub-and-spoke network design: Incorporating multiple stakeholders and multi-type containers. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45 (4), 724–742. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2010.11.002>
- Mentzer, J. T., DeWitt, W., Keebler, J. S., Min, S., Nix, N. W., Smith, C. D., & Zacharia, Z. G. (2001). DEFINING SUPPLY CHAIN MANAGEMENT. *Journal of Business Logistics*, 22 (2), 1–25. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2001.tb00001.x>
- Michalewicz, Z. (1992). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Moharana, H. S., Senapati, S. K., & Khuntia, K. (2012). Coordination, Collaboration and Integration for Supply Chain Management. 3 (1). <https://doi.org/10.47893/imr.2010.1044>
- Moldan, B., Janoušková, S., & Hák, T. (2012). How to understand and measure environmental sustainability: Indicators and targets. *Ecological Indicators*, 17, 4–13. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.04.033>
- Molenbruch, Y., Braekers, K., & Caris, A. (2017). Benefits of horizontal cooperation in dial-a-ride services. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 107, 97–119. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.09.001>
- Montoya-Torres, J. R., Muñoz-Villamizar, A., & Vega-Mejía, C. A. (2016). On the impact of collaborative strategies for goods delivery in city logistics. *Production Planning & Control*, 27 (6), 443–455. <https://doi.org/10.1080/09537287.2016.1147092>
- Morana, J., & Gonzalez-Feliu, J. (2012). Comment mesurer la performance durable d'un système de mutualisation des livraisons ?. 2ème colloque en logistique urbaine de Nantes, Jun 2012, Nantes, France. pp.1-14. [ffhalshs-00927357](https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00927357)
- Moulin, H. (1988). *Axioms of cooperative decision making*. Econometric society monographs. Press Syndicate of the University of Cambridge
- Moutaoukil, A., Derrouiche, R., & Neubert, G. (2012). Pooling Supply Chain: Literature Review of Collaborative Strategies. In L. M. Camarinha-Matos, L. Xu, & H. Afsarmanesh (Eds.), *Collaborative Networks in the Internet of Services* (Vol. 380, pp. 513–525). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-32775-](https://doi.org/10.1007/978-3-642-32775-642-32775-)
- Moutaoukil, A., Derrouiche, R., & Neubert, G. (2013). Modeling a Logistics Pooling Strategy for Agri-Food SMEs. In *Collaborative Systems for Reindustrialization* (Vol. 408, pp. 621–630). Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-40543-3\\_65](https://doi.org/10.1007/978-3-642-40543-3_65)
- Moutaoukil, A., Derrouiche, R., & Neubert, G. (2014). Minimisation des émissions de CO<sub>2</sub> dans les circuits de distribution avec flotte heterogene. MOSIM 2014, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation, Nov 2014, Nancy, France. hal-01166590.
- Mrabti, N., Hamani, N., & Delahoche, L. (2020). The pooling of sustainable freight transport. *Journal of the Operational Research Society*, 1–16. <https://doi.org/10.1080/01605682.2020.1772022>
- Mrabti, N., Hamani, N., & Delahoche, L. (2021). A new metric for gain sharing assessment in collaborative distribution: The Sustainability and Flexibility Rate. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, Taylor & Francis, 2021. <http://dx.doi.org/10.1080/23302674.2022.2038714>.
- Mrabti, N., Hamani, N., & Delahoche, L. (2021). A sustainable collaborative approach to the distribution network design problem with CO<sub>2</sub> emissions allocation. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 13(6), 1. doi:10.1504/ijstl.2021.10037013.
- Mrabti, N., Hamani, N., & Delahoche, L. (2021). Multi-echelon multi-period collaborative distribution network design and savings allocation under sustainability considerations. En cours de révision.

- Muñoz-Villamizar, A., Montoya-Torres, J. R., & Faulin, J. (2017). Impact of the use of electric vehicles in collaborative urban transport networks: A case study. 50, 40–54. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.10.018>
- Naesens, K., Gelders, L., & Pintelon, L. (2009). A swift response framework for measuring the strategic fit for a horizontal collaborative initiative. *International Journal of Production Economics*, 121 (2), 550–561. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.04.004>
- Nagarajan, M., & Sošić, G. (2008). Game-theoretic analysis of cooperation among supply chain agents: Review and extensions. *European Journal of Operational Research*, 187 (3), 719–745. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.05.045>
- Nataraj, S., Ferone, D., Quintero-Araujo, C., Juan, A. A., & Festa, P. (2019). Consolidation centers in city logistics: A cooperative approach based on the location routing problem. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 393–404. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2019.1.001>
- Ng., CK, & Vechapikul., T. (2002) Evaluation of SCOR and CPFR for supply chain collaboration, *Proceedings of the Seventh International Conference on Manufacturing and Management*, pp 297–304
- Nicolas Durand (2004). Algorithmes Génétiques et autres méthodes d'optimisation appliqués à la gestion de trafic aérien. *Optimisation et contrôle [math.OC]*. INPT, 2004. [fftel-01293722f](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.04.004)
- Nilsson, G., 1981. The effects of speed limits on traffic accidents in Sweden. In: *Proceedings, International symposium on the effects of speed limits on traffic crashes and fuel consumption*, Dublin. OECD, Paris.
- Ntziachristos, L., & Samaras, Z. (2000). COPERT III Computer programme to calculate emissions from road transport. *Methodology and emission factors (Version 2.1)*. [https://www.eea.europa.eu/publications/Technical\\_report\\_No\\_49](https://www.eea.europa.eu/publications/Technical_report_No_49)
- O'Kelly, M. E. (1987). A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities. *European Journal of Operational Research*, 32 (3), 393–404. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(87\)80007-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(87)80007-3)
- O'Kelly, M. E. (1992). Hub facility location with fixed costs. *Papers in Regional Science*, 71 (3), 293–306. <https://doi.org/10.1007/BF01434269>
- OECD (2003) *Delivering the goods - 21st century challenges to urban goods transport*, France, Paris: OECD
- Oliver, R. K and Webber, M. D. (1982) "Supply chain management: logistics catches up with strategy," in Christopher, M. (ed.), *Logistics: The Strategic Issues*, Chapman and Hall, London.
- ONISR (Observatoire national interministériel de la sécurité routière), (2016). <https://www.onisr.securite-routiere.gouv.fr/etat-de-l-insecurite-routiere/bilans-annuels-de-lasecurite-routiere/bilan-2016-de-la-securite-routiere/> Accessed 09 April 2021.
- Ouhader, H., & 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, 1–18. <https://doi.org/10.1155/2017/8687515>
- Ouhader, H., & El Kyal, M. (2020). Assessing the economic and environmental benefits of horizontal cooperation in delivery: Performance and scenario analysis. *Uncertain Supply Chain Management*, 303–320. <https://doi.org/10.5267/j.uscm.2019.12.001>
- Özen, U., Sošić, G., & Slikker, M. (2012). A collaborative decentralized distribution system with demand forecast updates. *European Journal of Operational Research*, 216 (3), 573–583. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.07.055>
- Özener, O. Ö., & Ergun, Ö. (2008). Allocating Costs in a Collaborative Transportation Procurement Network. *Transportation Science*, 42 (2), 146–165. <https://doi.org/10.1287/trsc.1070.0219>
- Özener, O. Ö., Ergun, Ö., & Savelsbergh, M. (2011). Lane-Exchange Mechanisms for Truckload Carrier Collaboration. *Transportation Science*, 45 (1), 1–17. <https://doi.org/10.1287/trsc.1100.0327>

- Palmer, A. (2007). The development of an integrated routing and carbon dioxide emissions model for goods vehicles. PhD thesis. Bedford, United Kingdom: Cranfield University.
- Palmer, A., Mortimer, P., Greening, P., Pieczyk, M., & Dadhich, P. (2018). A cost and CO<sub>2</sub> comparison of using trains and higher capacity trucks when UK FMCG companies collaborate. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 58, 94–107. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.11.009>
- Palšaitis, R., & Petraška, A. (2012). Heavyweight and Oversized Cargo Transportation Risk Management. *Transport and Telecommunication Journal*, 13 (1), 51–56. <https://doi.org/10.2478/v10244-012-0005-9>
- 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. Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure des Mines de Paris. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00566265>
- Pan, S., Ballot, E., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.10.023>
- Pan, S., Ballot, E., Fontane, F., & 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 (1–2), 92–118. <https://doi.org/10.1007/s10696-012-9162-3>
- Pan, S., Trentesaux, D., Ballot, E., & Huang, G. Q. (2019). Horizontal collaborative transport: Survey of solutions and practical implementation issues. *International Journal of Production Research*, 57 (15–16), 5340–5361. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1574040>
- Pathak, D. K., Shankar, R., & Choudhary, A. (2021). Performance assessment framework based on competitive priorities for sustainable freight transportation systems. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 90, 102663. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102663>
- Pareto, V. (1971). *Manuale di Economia Politica*. Piccola Biblioteca Scientifica, Milan. Translated into English by Schwier AS, *Manual of Political Economy*, MacMillan, London, 1906.
- Pels, E. (2020). Optimality of the hub-spoke system: A review of the literature, and directions for future research. *Transport Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.08.002>
- Perboli, G., Rosano, M., & Gobbato, L. (2016). Decision support system for collaborative freight transportation management: A tool for mixing traditional and green logistics. 8.
- Pérez-Bernabeu, E., Juan, A. A., Faulin, J., & 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. <https://doi.org/10.1111/itor.12130>
- PIPAME et CNAM, (2009). *La logistique en France : indicateurs territoriaux*. Paris, Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques et Conservatoire National des Arts et Métiers.
- Pluvinet, P., Gonzalez-Feliu, J., & Ambrosini, C. (2012). GPS Data Analysis for Understanding Urban Goods Movement. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 39, 450–462. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.121>
- Pomponi, F., Fratocchi, L., & Rossi Tafuri, S. (2015). Trust development and horizontal collaboration in logistics: A theory based evolutionary framework. *Supply Chain Management: An International Journal*, 20 (1), 83–97. <https://doi.org/10.1108/SCM-02-2014-0078>
- Pomponi, F., Fratocchi, L., Tafuri, S. R., & Palumbo, M. (2013). Horizontal Collaboration in Logistics: A Comprehensive Framework. *Research in Logistics and Production*, 3 (4), 243–254.
- Quak, H.J. (2008). Sustainability of Urban Freight Transport: Retail Distribution and Local Regulations in Cities (No. EPS-2008-124-LIS). ERIM Ph.D. Series Research in Management. Erasmus Research Institute of Management. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1765/11990>

- Quintero-Araujo, C.L., Gruler, A., Juan, A.A. & Faulin, J. (2019). Using horizontal cooperation concepts in integrated routing and facility-location decisions. *Intl. Trans. in Op. Res.*, 26: 551-576. <https://doi.org/10.1111/itor.12479>.
- Rajak, S., Parthiban, P., & Dhanalakshmi, R. (2016). Sustainable transportation systems performance evaluation using fuzzy logic. *Ecological Indicators*, 71, 503–513. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.07.031>
- Rakotonarivo, D., Gonzalez-Feliu, J., Aoufi, A., & Morana, J. (2009). La mutualisation. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01056188>.
- Ramaekers, K., Verdonck, L., Caris, A., Meers, D., & Macharis, C. (2017). Allocating collaborative costs in multimodal barge networks for freight bundling. *Journal of Transport Geography*, 65, 56–69. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.10.008>
- Richardson, B. C. (2005). Sustainable transport: Analysis frameworks. *Journal of Transport Geography*, 13 (1), 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2004.11.005>
- Riley, D. W., & Jones, T. C. (1985). Using Inventory for Competitive Advantage through Supply Chain Management. *International Journal of Physical Distribution & Materials Management*, 15 (5), 16–26. <https://doi.org/10.1108/eb014615>
- Rodrigues, V. S., Harris, I., & Mason, R. (2015). Horizontal logistics collaboration for enhanced supply chain performance: An international retail perspective. 20 (6), 631–647. <https://doi.org/10.1108/SCM-06-2015-0218>
- Rostami, B., & Buchheim, C. (2015). The Uncapacitated Single Allocation p-Hub Median Problem with Stepwise Cost Function. 18. [http://www.optimizationonline.org/DB\\_HTML/2015/07/5044.html](http://www.optimizationonline.org/DB_HTML/2015/07/5044.html)
- Roy, J., Landry, S., & Beaulieu, M. (2006). Collaborer dans la chaîne logistique: Où en sommes-nous? *Gestion*, 31 (3), 70. <https://doi.org/10.3917/riges.313.0070>
- Salusjärvi, M., 1981. Speed limits and traffic accidents in Finland. In: *Proceedings of the OECD Symposium on the Effects of Speed Limits on Traffic Accidents & Transport Energy Use*.
- Samadi, N. Mehranfar, A. M. Fathollahi Fard & M. Hajiaghahi-Keshteli (2018): Heuristic-based metaheuristics to address a sustainable supply chain network design problem, *Journal of Industrial and Production Engineering*, DOI:10.1080/21681015.2017.1422039 <https://doi.org/10.1080/21681015.2017.1422039>
- Sanchez, M., Pradenas, L., Deschamps, J.-C., & 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. <https://doi.org/10.1007/s11066-015-9099-2>
- Sandberg, E. (2007). Logistics collaboration in supply chains: Practice vs. Theory. *The International Journal of Logistics Management*, 18 (2), 274-293. <https://doi.org/10.1108/09574090710816977>.
- Schmeidler, D. (1969). The Nucleolus of a Characteristic Function Game. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 17 (6), 1163–1170. <https://doi.org/10.1137/0117107>
- Schmoltzi, C., & Wallenburg, C. M. (2012). Operational Governance in Horizontal Cooperations of Logistics Service Providers: Performance Effects and the Moderating Role of Cooperation Complexity. 48 (2). <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.2011.03262.x>
- Schoemaker, M.M., Flapper, B., Verheij, N.P., Wilson, B.N., Reinders-Messelink, H.A. & de Kloet, A. (2006), Evaluation of the Developmental Coordination Disorder Questionnaire as a screening instrument. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 48: 668-673. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2006.tb01337.x>
- Schulz, S. F., & Blecken, A. (2010). Horizontal cooperation in disaster relief logistics: Benefits and impediments. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 40 (8/9), 636–656. <https://doi.org/10.1108/09600031011079300>

- Serper, E. Z., & Alumur, S. A. (2016). The design of capacitated intermodal hub networks with different vehicle types. *Transportation Research Part B: Methodological*, 86, 51–65.  
<https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.01.011>
- Sheffi, Y. (1985). Some analytical problems in logistics research. *Transport Res Gen* 19:402–405.
- Shoja, A., Molla-Alizadeh-Zavaredehi, S., Niroomand, S., Adaptive meta-heuristic algorithms for flexible supply chain network design problem with different delivery modes, *Computers & Industrial Engineering* (2019), doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106107>
- Simchi-Levi, D., Kaminsky, P. & Simchi-Levi, E. (2011). *Designing and managing the supply chain, Concepts, Strategies, and Case Studies*, III Edition, McGraw-Hill, New York.
- Simongáti, G. (2010). Multicriteria decision making support tool for freight integrators: selecting the most sustainable alternative. *Transport*, 25 (1), 89–97. <https://doi.org/10.3846/transport.2010.12>
- Skorin-Kapov, D., Skorin-Kapov, J., & O’Kelly, M. (1996). Tight linear programming relaxations of uncapacitated p-hub median problems. *European Journal of Operational Research*, 94 (3), 582–593.  
[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00100-X](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00100-X)
- Sodhi, M. S., & Tang, S. S. (2012). *Managing Supply Chain Risk* (1st ed.). Springer.  
<https://www.springer.com/gp/book/9781461432371#reviews>
- Soubbotina, Tatyana P.. (2004). *Beyond Economic Growth: An Introduction to Sustainable Development*, Second Edition. Washington, DC: World Bank. © World Bank.  
<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/14865> License: CC BY 3.0 IGO.
- Soysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Haijema, R., & van der Vorst, J. G. A. J. (2018). Modeling a green inventory routing problem for perishable products with horizontal collaboration. *Computers & Operations Research*, 89, 168–182. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.02.003>
- Stadtler, H. (2008). Supply chain management - an overview. In: Stadtler H, Kliger C (eds) *Supply chain management and advanced planning*. Springer, New York, pp 9–36.
- Stanimirovic, Z. (2007). A Genetic Algorithm Approach For The Capacitated Single Allocation P-Hub Median Problem. *Computing and Informatics*, Vol. 29, 2010, 117–132.
- Stellingwerf, H. M., Laporte, G., Cruijssen, F. C. A. M., Kanellopoulos, A., & 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.
- Sun, X., Dai, W., Zhang, Y., & Wandelt, S. (2017). Finding p -Hub Median Locations: An Empirical Study on Problems and Solution Techniques. *Journal of Advanced Transportation*, 2017, 1–23.  
<https://doi.org/10.1155/2017/9387302>
- Sustainable Transportation Performance Indicators (STPI) Project: Report on Phase 3. 2002. \$e Centre for Sustainable Transportation (CST).  
<http://cst.uwinnipeg.ca/documents/STPI%20Phase%203%20report.pdf>.
- Syswerda, G., (1989). Uniform Crossover in Genetic Algorithms, *Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms*, Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, CA, 2-9.
- Syswerda, G. (1991). Schedule Optimization Using Genetic Algorithms. In Davis, L. (ed.) *Handbook of Genetic Algorithms*, 332–349. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Taleizadeh, A. A., Shokr, I., Konstantaras, I., & VafaeiNejad, M. (2020). Stock replenishment policies for a vendor-managed inventory in a retailing system. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 55, 102137.  
<https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2020.102137>
- Tan, K-C., Kannan, V-R., & Handfield, R-B. (1998), *Supply Chain Management: Supplier Performance and Firm Performance*. *International Journal of Purchasing & Materials Management*, 34(3).  
[https://digitalcommons.usu.edu/manage\\_facpub/278/](https://digitalcommons.usu.edu/manage_facpub/278/)

- Tang, X., Lehuédé, F., & Péton, O. (2019). Network design of a multi-period collaborative distribution system. 279–290. <https://doi.org/10.1007/s13042-017-0713-5>
- Themistocleous M, Iran Z., & Love P.E.D. (2004). Evaluating the integration of supply chain information systems: a case study. *Eur J Oper Res* 159:93–405.
- Thomas, H., Christof, D., Jean-Sébastien, T., & Lotte, V. (2020). Balancing partner preferences for logistics costs and carbon footprint in a horizontal cooperation: Maastricht University, Graduate School of Business and Economics. <https://doi.org/10.26481/umagsb.20002>
- Tijs, S. H., & Driessen, T. S. H. (1986). Game Theory and Cost Allocation Problems. *Management Science*, 32 (8), 1015–1028. <https://doi.org/10.1287/mnsc.32.8.1015>
- Tornberg, P., & Odhage, J. (2018). Making transport planning more collaborative? The case of Strategic Choice of Measures in Swedish transport planning. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 118, 416–429. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.09.020>
- Toth, P. & Vigo, D. (2002) *The Vehicle Routing Problem*. Siam, Philadelphia. <http://dx.doi.org/10.1137/1.9780898718515>
- Tuzkaya, U. R., & Önüt, S. (2009). A holonic approach based integration methodology for transportation and warehousing functions of the supply network. *Computers & Industrial Engineering*, 56 (2), 708–723. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.09.003>
- Ubeda, S., Arcelus, F. J., & Faulin, J. (2011). Green logistics at Eroski: A case study. *International Journal of Production Economics*, 131 (1), 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.04.041>
- Ülkü, S. and Schmidt, G.M. (2011), Matching Product Architecture and Supply Chain Configuration. *Production and Operations Management*, 20: 16-31. <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2010.01136.x>
- Valentin, A., & Spangenberg, J. H. (2000). A guide to community sustainability indicators. *Environmental Impact Assessment Review*, 20 (3), 381–392. [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(00\)00049-4](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(00)00049-4)
- Van Binsbergen, A. J., & Visser, J. G. S. N. (2001). Innovation steps towards efficient goods distribution systems for urban areas: Efficiency improvement of goods distribution in urban areas. DUP Science.
- van Lier, T., Caris, A., & Macharis, C. (2016). Sustainability SI: Bundling of Outbound Freight Flows: Analyzing the Potential of Internal Horizontal Collaboration to Improve Sustainability. *Networks and Spatial Economics*, 16 (1), 277–302. <https://doi.org/10.1007/s11067-014-9226-x>
- Vanovermeire, C., & Sörensen, K. (2014). Measuring and rewarding flexibility in collaborative distribution, including two-partner coalitions. *European Journal of Operational Research*, 239 (1), 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.04.015>
- Vanovermeire, C., Sörensen, K., Van Breedam, A., Vannieuwenhuysse, B., & Verstrepen, S. (2014). Horizontal logistics collaboration: Decreasing costs through flexibility and an adequate cost allocation strategy. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 17 (4), 339–355.
- Verdonck, L., Beullens, P., Caris, A., Ramaekers, K., & 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. <https://doi.org/10.1057/jors.2015.106>
- Verdonck, L., Caris, A., Ramaekers, K., & Janssens, G. K. (2013). Collaborative Logistics from the Perspective of Road Transportation Companies. 33 (6), 700–719. <https://doi.org/10.1080/01441647.2013.853706>
- Verma, P., & Raghubanshi, A. S. (2018). Urban sustainability indicators: Challenges and opportunities. *Ecological Indicators*, 93, 282–291. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.007>
- Verstrepen, S., Cools, M., Cruijssen, F., & Dullaert, W. (2009). A dynamic framework for managing horizontal cooperation in logistics. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 5 (3/4), 228. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2009.022497>

- Verwijmeren., M. (2004). Software component architecture in supply chain management. *Comput Ind* 53:165–178.
- Wallenburg, C. M., & Raue, J. S. (2011). Conflict and its governance in horizontal cooperations of logistics service providers. 41 (4), 385–400. <https://doi.org/10.1108/09600031111131940>
- Waller, M., & Johnson, M. E. (1999). Vendor managed inventory in the retail supply chain. 20 (1), 183–203.
- Wang, H., Unnikrishnan, A., Hernández, S., & Cheu, R. (Kelvin). (2014). Capacitated Centralized Carrier Collaboration Multihub Location Problem: Tabu Search Approach. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2466 (1), 22–30. <https://doi.org/10.3141/2466-03>
- Wang, H.F., & Hsu, H.W. (2010). A closed-loop logistic model with a spanning-tree based genetic algorithm. *Computer and Operations Research*, 37, 376–389.
- Wang, X., & Kopfer, H. (2014). Collaborative transportation planning of less-than-truckload freight: A route-based request exchange mechanism. *OR Spectrum*, 36 (2), 357–380. <https://doi.org/10.1007/s00291-013-0331-x>
- Wang, X., & 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. <https://doi.org/10.1007/s10696-015-9212-8>
- Wang, X., Kopfer, H., & Gendreau, M. (2014). Operational transportation planning of freight forwarding companies in horizontal coalitions. *European Journal of Operational Research*, 237 (3), 1133–1141. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.02.056>
- Wang, Y., Rodrigues, V. S., & Evans, L. (2015). The use of ICT in road freight transport for CO2 reduction – an exploratory study of UK’s grocery retail industry. 26 (1), 2–29. <https://doi.org/10.1108/IJLM-02-2013-0021>
- WCED, 1987. *Our Common Future*. World Commission on Environment and Development. Oxford, Oxford University Press.
- Weraikat, D., Zanjani, M. K., & Lehoux, N. (2019). Improving sustainability in a two-level pharmaceutical supply chain through Vendor-Managed Inventory system. *Operations Research for Health Care*, 21, 44–55. <https://doi.org/10.1016/j.orhc.2019.04.004>
- Wick, C., Klumpp, M., Kandel, C. (2011). Shapley value simulation for allocating GHG emission savings due to logistics pooling within ECR cooperation. *Proceedings of the European Simulation and Modelling Conference*, University of Mino, Guimaraes, Portugal, 240–244.
- Wilhelm, M. M. (2011). Managing coepetition through horizontal supply chain relations: Linking dyadic and network levels of analysis. *Journal of Operations Management*, 29 (7–8), 663–676. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2011.03.003>
- Wisner, J. D., Tan, K.-C., & Leong, G. K. (2012). *Principles of Supply chain management: A Balanced Approach* (3. ed., int. ed). South-Western Cengage Learning.
- Wong, H., Oudheusden, D. V., & Cattrysse, D. (2007). Cost allocation in spare parts inventory pooling. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43 (4), 370–386. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2006.01.001>
- Wright, L. A., Kemp, S., & Williams, I. (2011). ‘Carbon footprinting’: Towards a universally accepted definition. *Carbon Management*, 2 (1), 61–72. <https://doi.org/10.4155/cmt.10.39>
- Xu, S. X., & Huang, G. Q. (2013). Transportation service procurement in periodic sealed double auctions with stochastic demand and supply. *Transportation Research Part B: Methodological*, 56, 136–160. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2013.07.015>
- Xu, S. X., & Huang, G. Q. (2014). Efficient auctions for distributed transportation procurement. *Transportation Research Part B: Methodological*, 65, 47–64. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.03.005>

- Xu, S., Huang, G. Q., & Cheng, M. (2016). Truthful, budget-balanced bundle double auctions for carrier collaboration. 51 (4), 1365–1386. <https://doi.org/10.1287/trsc.2016.0694>
- Xu, Xiaozhou., Pan, Shenle., & Ballot, Eric. (2012). Allocation of Transportation Cost & CO2 Emission in Pooled Supply Chains Using Cooperative Game Theory. IFAC Proceedings Volumes, 45 (6), 547–553. <https://doi.org/10.3182/20120523-3-RO-2023.00078>
- Yaman, H. (2009). The hierarchical hub median problem with single assignment. Transportation Research Part B: Methodological, 43 (6), 643–658. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2009.01.005>
- Young, H. (Ed.). (1985). Fair Allocation (Vol. 33). American Mathematical Society. <https://doi.org/10.1090/psapm/033>
- Yu, V. F., Jewpanya, P., & Kachitvichyanukul, V. (2016). Particle swarm optimization for the multi-period cross-docking distribution problem with time windows. International Journal of Production Research, 54 (2), 509–525. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1037933>
- Z. Firoozi, S. H. Tang, M. K. M. A. Ariffin (2011). Developing a hybrid algorithm for distribution network design problem. Proceedings of the 2011 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management.
- Zetina, C. A., Contreras, I., Cordeau, J.-F., & Nikbakhsh, E. (2017). Robust uncapacitated hub location. Transportation Research Part B: Methodological, 106, 393–410. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.06.008>.
- Zhang, M., Pratap, S., Huang, G. Q., & Zhao, Z. (2017). Optimal collaborative transportation service trading in B2B e-commerce logistics. 5485–5501.
- Zhou, G., Hui, Y. V., & Liang, L. (2011). Strategic alliance in freight consolidation. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 47 (1), 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2010.07.002>
- Zhu, L., & Hu, D. (2017). Sustainable Logistics Network Modeling for Enterprise Supply Chain. Mathematical Problems in Engineering, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2017/9897850>
- Zineldin, M., & Bredenl w, T. (2003). Strategic alliance: Synergies and challenges: A case of strategic outsourcing relationship “SOUR”. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 33 (5), 449–464. <https://doi.org/10.1108/09600030310482004>

# Références Web

Economics, H., (2020). Economic costs of unemployment. <https://www.economicshelp.org/macroeconomics/unemployment/costs/> Accès 09 April 2021.

Guide 1. <https://travaux.mondevis.com/construction-entrepot/guide/> Accès 09 April 2021.

Guide 2. <https://www.rachatducredit.com/credit-bail-avec-bail-a-construction-543769.html/> Accès 09 April 2021.

INSEE (2021). <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2015759/> Accès 12/07/2021

OEET(Observatory Energy Environment of Transport), (2012). [http://www.bilansges.ademe.fr/documentation/UPLOAD\\_DOC\\_FR/index.htm?transport\\_routier\\_de\\_marchandi.html/](http://www.bilansges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?transport_routier_de_marchandi.html/) Accès 09 April 2021.

Rapport sur l'état de l'environnement (2021) <https://ree.developpement-durable.gouv.fr/themes/defis-environnementaux/changement-climatique/emissions-de-gaz-a-effet-de-serre/article/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-du-secteur-des-transport> : Accès 12/07/2021

Project SCALE (2012). <http://www.effp.com/project-scale/>

UK Round Table on Sustainable Development (1996). <https://journals.openedition.org/developpementdurable/3305>

# Résumé

Les préoccupations liées au développement durable influencent de plus en plus le comportement des clients ainsi que les stratégies des entreprises. Ainsi, l'optimisation des réseaux de distribution par la collaboration horizontale devient une nécessité. Après une analyse exhaustive de la littérature, nous avons constaté que la plupart des travaux proposant des approches quantitatives abordent le niveau de décision opérationnelle par le biais de l'optimisation de la planification du transport. Par conséquent, nous traitons dans cette thèse les deux niveaux de décision : stratégique et tactique. Le premier niveau est étudié à travers le problème de conception des réseaux de distribution collaboratifs, tandis que le deuxième niveau s'intéresse au problème de répartition des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub>. En outre, nous suggérons que réduire tous les aspects de la durabilité en un seul objectif n'est pas recommandé. Dans ce contexte, nous abordons les deux problèmes en tenant compte de la durabilité économique, environnementale et sociale. Nous proposons des modèles mathématiques pour concevoir des réseaux de distribution à deux et à trois échelons. Par ailleurs, l'implication des indicateurs de durabilité lors du partage des bénéfices permet de récompenser les partenaires qui participent au mieux à la durabilité. Dans ce contexte, nous avons développé deux approches qui utilisent les niveaux de durabilité et de flexibilité de chaque partenaire dans le but de répartir d'une manière équitable les bénéfices de la collaboration. D'autre part, plusieurs scénarios sont comparés sur la base des indicateurs proposés. Au niveau de la résolution des modèles mathématiques, l'optimisation mono-objectif est effectuée d'une façon exacte et en utilisant l'algorithme génétique et le recuit simulé, tandis que l'optimisation multi-objectif est réalisée par la méthode  $\epsilon$ -contrainte et le NSGA-II. Les résultats et les analyses obtenus montrent que la collaboration offre toujours une meilleure performance par rapport à la non-collaboration sur tous les niveaux de durabilité. Plusieurs décisions managériales sont présentées pour appliquer correctement la collaboration horizontale et améliorer davantage sa performance en termes de durabilité.

**Mots clés :** Collaboration horizontale, Mutualisation, Problème de conception des réseaux de distribution, Durabilité, Modèles mathématiques, MILP (*Mixed Integer Linear Programming*), Partage de gains, Optimisation multi-objectif, Algorithme génétique, Recuit simulé, NSGA-II (*Non Dominated Sorting Genetic Algorithm-II*).

# Abstract

Sustainability issues are increasingly influencing customer behavior and corporate strategy. Consequently, the optimization of distribution networks through horizontal collaboration is becoming a necessity. After a comprehensive review of the literature, we found that most studies proposing quantitative approaches address the operational decision level through the optimization of transport planning. Therefore, in this thesis we deal with both strategic and tactical decision levels. The first level is studied by the collaborative distribution network design problem, while the second level is studied by the cost and CO<sub>2</sub> emission allocation problem. Furthermore, we believe that reducing all sustainability dimensions to a single objective is not desirable. In this context, we address both problems by taking into account economic, environmental and social sustainability. We have developed mathematical models to design two- and three-echelon distribution networks. In addition, the inclusion of sustainability indicators in the profit-sharing process makes it possible to reward partners who best contribute to sustainability. In this context, we have developed two approaches that use the levels of sustainability and flexibility of each partner in order to distribute the benefits of the collaboration in a fair way. Furthermore, several scenarios are compared on the basis of the proposed indicators. Regarding the resolution of the mathematical models, the single-objective optimization is carried out in an exact way and by using the genetic algorithm and the simulated annealing, while the multi-objective optimization is carried out by the  $\epsilon$ -constraint method and the NSGA-II. The results and analyses obtained show that collaboration always provides better performance compared to non-collaboration on all sustainability levels. Several managerial decisions are presented to properly apply horizontal collaboration and further improve its sustainability performance.

**Keywords:** Horizontal collaboration, Pooling, Distribution network design Problem, Sustainability, Mathematical models, MILP (*Mixed Integer Linear Programming*), Gain sharing, Multi-objective optimization, Genetic algorithm, Simulated annealing, NSGA-II (*Non Dominated Sorting Genetic Algorithm-II*).