RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté Égalité Fraternité

Université de Toulouse

Doctorat de l'Université de Toulouse

préparé à Toulouse INP

Optimisation de l'orchestration de commandes en ligne pour réduire l'impact environnemental de la logistique du e-commerce

Thèse présentée et soutenue, le 12 octobre 2026 par

Théo LE BRUN

École doctorale
SYSTEMES

Spécialité
Informatique et Génie Industriel

Unité de recherche
LAAS - Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes

Thèse dirigée par
Sandra Ulrich NGUEVEU et Marie-josé HUGUET

Composition du jury
M. Nicolas JOZEFOWIEZ, Président, Université de Lorraine
M. Hervé MANIER, Rapporteur, Université de technologie de Belfort Montbéliard
M. Olivier PÉTON, Rapporteur, IMT Atlantique
Mme Sonja ROHMER, Examinatrice, HEC Montréal
M. Jesus GONZALEZ-FELIU, Examinateur, Excelia Business School
Mme Sandra Ulrich NGUEVEU, Directrice de thèse, Toulouse INP
Mme Marie-José HUGUET, Co-directrice de thèse, INSA Toulouse

Membres invités
M. Romulus GRIGORAS, Encadrant industriel, OneStock

Remerciements

Habituellement, les remerciements tiennent sur une page, exceptionnellement sur deux. Pour moi ce sera quatre. Je m'en fiche, c'est ma thèse, je fais ce que je veux.

En premier lieu je tiens à remercier les membres du jury pour le temps consacré à mes travaux. En particulier, je remercie Hervé Manier et Olivier Péton d'avoir rapporté cette thèse et d'avoir partagé leurs retours de qualité ayant permis d'améliorer ce manuscrit. Merci à Jesus Gonzalez-Feliu, Nicolas Jozefowiez et Sonja Rohmer pour leur participation à ce jury et pour leurs questions qui ont continué d'alimenter les réflexions autour de ce sujet de thèse.

J'adresse ensuite mes plus sincères remerciements aux membres de mon encadrement, Romulus, Sandra et Marie-Jo. J'ai été extrêmement chanceux d'évoluer dans un climat avec une telle liberté, une telle confiance et une telle bienveillance. Au bout d'un an et quatre mois de thèse, je vous annonçais que je ne trouvais plus de sens dans mes travaux, mais que je tenais à aller jusqu'au bout. Si j'ai tenu à aller jusqu'au bout, c'est en grande partie grâce à l'estime et le respect que j'avais pour vous, et le refus de vous laisser en plan comme ça.
Romulus, merci d'avoir porté le sujet écologique au sein de OneStock dans des temps où le sujet était moins prioritaire. Merci pour ta simplicité et ton accessibilité, la liberté et la confiance que tu m'as accordé dans mes recherches, ainsi que pour l'enthousiasme dont tu as fait preuve à des instants où j'ai pu être dubitatif quant à l'intérêt de ces travaux.
Sandra, Marie-Jo, c'est un privilège pour un doctorant d'être encadré par vous deux. Vous êtes d'une justesse et d'une complémentarité sans égales tant sur l'aspect scientifique qu'humain.
Sandra, tu m'as fait passer un entretien pour un stage à l'automne 2021. Cinq ans plus tard, je soutiens ma thèse sous ta direction. Entre temps, tu m'as accordé ta confiance pour ce stage, pour lancer les recherches sur la chaire, pour les enseignements, pour la thèse. J'ai découvert le monde de la recherche à tes côtés et je te dois une bonne partie de ce que j'y ai appris. Tout cela, dans une ambiance humaine et conviviale que j'ai ressentie dès le premier jour. Merci, ces presque cinq ans d'aventure n'auraient jamais eu lieu sans toi.
Marie-Jo, tu as rejoins l'aventure en cours de route, d'abord pour un intérim de quelques mois puis pour un CDI, et j'en suis très heureux. Ton implication dans la thèse, ton engouement et nos échanges quotidiens m'ont été très précieux, ils m'ont permis de rester mobilisé pour avancer tant bien que mal pendant près de deux ans. Merci, je ne serais probablement pas arrivé au bout sans toi.

Je termine par remercier toutes les personnes que j'ai côtoyé pendant ces trois années de doctorat. L'avantage d'une thèse Cifre c'est qu'on rencontre deux fois plus de monde. L'inconvénient, c'est qu'on passe deux fois moins de temps avec

tout le monde.
J'ai été très bien accueilli à OneStock où l'atmosphère est chaleureuse et sympathique. J'y ai rencontré des collègues qui sont devenus des ami.e.s, parmi les meilleur.e.s pour certain.e.s.
Amel, Dimitri, Thibault, un grand merci pour tous les moments formidables que nous avons passé ensemble, au bureau mais aussi (souvent) en dehors. Malgré nos efforts pour partager des moments sportifs (foot, course, ski, randonnée, travaux, ...), je pense que nous sommes encore loin de compenser tous nos moments conviviaux et festifs. Amel, les pauses café à entendre les dernières nouvelles de Chardo vont me manquer (un grand merci encore pour la supervision de ce pot de thèse mémorable !). Dimitri, les pauses café à faire genre qu'Amel est plus gaga que toi alors que c'est faux vont me manquer. Thibault, les pauses café à organiser une sortie que tu annules trente minutes plus tard parce que tu as oublié que tu avais un truc ne vont pas me manquer.
Je remercie également mon équipe de cœur, l'équipe marketing, Seb, Bertrand et Flo. Vous m'avez tout de suite fait sentir à l'aise dans notre petit open space alors que j'étais encore tout jeunot, et je suis ravi d'avoir pu intégrer le markelunch et d'avoir passé tous ces moments avec vous (et d'avoir troqué le Black Lion pour le Saint Honest, ouf). Flo, merci pour notre guerre des restos, qui va être mise en pause quelques temps, mais qu'il sera nécessaire de reprendre puisque tous les restos de Toulouse n'ont pas encore été évalués. Je tiens aussi à remercier Benoît pour tous les moments partagés (#run&BonResto,#loveBourgogne,#teamPhD), Xiao qui a été une stagiaire géniale et que je suis heureux de voir s'épanouir aujourd'hui à OneStock. Je ne citerai pas tout le monde par peur d'en oublier, mais sachez que si nous avons un jour partagé une bière, un café, un footing, un terrain de foot, un terrain de badminton, une discussion ou juste un instant, vous avez contribué à rendre mon quotidien à OneStock agréable.

Côté labo, j'ai passé quatre ans et demi incroyables dans une équipe à l'ambiance unique. L'esprit de ROC est formidable et doit être préservé à l'image des pauses café et des pauses repas communes, où stagiaires, doctorants et permanents se mélangent et sont égaux dans les discussions. Je repars de cette équipe avec un nombre incalculable de souvenirs, d'échanges marquants, de moments conviviaux partagés : ROADEF Rennes, Amiens, Paris et Tours, Workshop DO Albi et Carcassonne, Séminaires d'équipe à La Franqui et à Germ, journées stagiaires (cf. "oh ça va c'est pas du Bourgogne"...), d'innombrables footing le long du canal et ailleurs, j'irai manger chez ROC, les footROC, le KaraROCké, les apéROC, les pots de thèse, les fêtes du rugby, les fêtes du LAAS, les soirées au bar, à domicile, à l'extérieur, en boîte, dans les bureaux, les lendemain compliqués qui ont parfois suivis, les débriefs à la pause de 10h les vendredi, et tant d'autres.
Tous ces moments n'auraient pas eu la même résonance sans les gens qui composent cette équipe : ceux qui n'ont pas bougé, les permanent.e.s, sachez que vous êtes au top (mention spéciale à Mo et Christian pour le festif, à Emmanuel pour les échanges et à Cyrille pour son amicalité) ; ceux dont le passage est plus éphémère mais qui

apportent vie et dynamisme, les stagiaires (mention spéciale à Hannes, Micka et Pierre) et les post-doc (mention spéciale à Valentin et Fredo le fou) ; et évidemment sans mes comparses doctorants. De l'ancienne génération (mention très spéciale à Julien F. et à Carla pour tous les beaux moments que nous avons partagé), à la nouvelle (mention spéciale à Tess, Damien, Titouan, Kéa et Riccardo, le futur de ROC est entre vos mains !), en passant évidemment à mes compagnons de galère.
Les gars, j'ai été extrêmement heureux de partager ces moments avec vous et ça a été une vraie chance de se retrouver tous ensemble. Julien, mon co-bureau pendant trois ans et demi, nous sommes passés de petits stagiaires dans le bureau en face des toilettes qu'on oubliait de venir chercher pour la pause, à docteurs. Je suis très heureux d'avoir franchi toutes les étapes et d'avoir effectué cette aventure avec toi. On aura chacun eu droits à nos périodes de hauts et nos périodes de bas, et notre soutien mutuel aura été essentiel pour moi, merci.
Louis, dès le premier jour je t'ai annoncé que j'allais devoir te détester étant donné que tu as eu une thèse sur lequel un ami avait candidaté. Tu auras vite compris que c'était faux et que je suis en définitive très heureux d'avoir passé ces trois années de thèse avec toi. Et merci pour ces sessions rédactions et cette "compétition" ultra saine pour fournir les derniers efforts jusqu'au bout.
Tanguy, on a commencé la thèse le même jour et on la fini le même j... Ah non, c'est vrai que je t'ai mis une vitesse. Dès ce premier jour je t'ai dit "mec, on commence notre thèse le même jour, on est liés à vie", et cela sans te connaître. Trois ans plus tard, je sais qu'on n'avait même pas besoin de commencer le même jour pour être liés à vie. Dix jours de rando à deux sans même songer à se foutre sur la gueule, y a que dans les films mal écrits que ça existe. Et pourtant.
Matthieu, plus de quatre ans passés en commun. De manière totalement égoïste, j'étais très content d'apprendre que tu allais devoir signer pour une année supplémentaire. Tu as fait preuve d'une résilience incroyable, juste bravo. Merci d'avoir été là quand il a fallu, pour notre année de badminton professionnel, pour ton auto-dérision incomparable et toutes les demi-heures de 9h à 9h30 qu'on perdait chaque semaine à nous raconter nos nouvelles.
Cyrille, résumer ces trois ans à un triathlon vallonné sans préparation adéquate et finalement épique serait bien trop réducteur. Évidemment que les tours de cuisine en combinaison néoprène de la veille resteront dans ma mémoire, mais ce serait oublier toutes les discussions engagées, les excursions nocturnes, les fracs en côte, les soirées et les fins de soirées, tous tes compte-rendus de l'évolution d'un enfant. Bref, quand je disais que réussir à combiner tout cela était inspirant, j'étais sérieux.
Enfin Elouan, avec ta foutue idée de rester vivre à Paris tu es celui que l'on aura le moins côtoyé. Et pourtant, tu te seras intégré à ce groupe à merveille, par ton énergie, ton auto-dérision et ta bonne humeur à toute épreuve. J'étais très content d'apprendre qu'après le départ de Julien tu allais être mon nouveau co-bureau. Finalement je ne t'y ai pas vu tant que ça, mais vu ma productivité quand tu étais là et qu'on partait dans nos conneries c'est peut-être pas plus mal, ou j'y serais encore. Tu m'as dit que tu allais relire cette thèse régulièrement dans les prochains mois, alors courage mon ami, tu approches de la fin, accroche toi, ça vaut le coup tu verras !

Enfin, je remercie tous mes proches qui m'ont accompagné durant ces années et qui ont rendu mon quotidien si agréable. Mes amis du lycée pour toutes ces années d'amitié (Ben, Jeannot, Pierre, Alice et Fouiny), mes potes de prépa (Matisse et Flo) que j'ai retrouvé à Toulouse, tous mes potes que je me suis fait à Toulouse, que ce soit en école d'ingé (mention spéciale à Vénu d'être descendu de Paris pour la soutenance), via le labo (mention spéciale à Seb, Naya et Julie) ou via OneStock (merci les chibros : Ludo, Lulu, Rémi et Maxime pour tous nos moments et vos cadeaux pour me rattacher à Toulouse, j'y reviendrai !).
Je remercie Agathe pour le soutien et ce qu'elle m'apporte au quotidien, pour avoir su m'assister dans les moments les plus difficiles, m'écouter quand j'avais besoin de parler, me rassurer quand tout semblait si compliqué. Tu sais que ta présence a été essentielle sur cette période, merci d'avoir été là, et tu peux être sûr que je saurai te rendre tout ce que tu m'as apporté lorsque tu auras besoin de moi.
Comme aime à le dire une personne préalablement citée mais dont je tairai le nom pour cause de "boomerite aigüe", *last but not least*, je termine par ma famille. Merci à Pascal et Stéphanie pour nos entrevues durant ces sept années à Toulouse, j'ai toujours apprécié ces moments. Bisous à mes grands-parents, à mes tatas, tontons, cousins ainsi qu'à Pietra, même si elle en aura rien à faire. Un merci spécial à Sophie pour tes différents séjours à Toulouse, y compris celui de la soutenance. À mon frère, ma sœur, mon papa et ma maman : merci pour tout ce que vous m'avez apporté durant ces vingt-six années, merci pour le support dans tous mes projets qu'ils soient scolaires-professionnels-sportifs ou personnels, merci pour ce cadre familial chaleureux, merci pour cette dévotion exemplaire, merci pour cet amour si pudique mais si présent lorsqu'on sait le déceler.

Résumé

Résumé : L'essor du e-commerce s'accompagne d'une multiplication des flux logistiques et des impacts environnementaux associés. Afin de participer à la lutte contre le dérèglement climatique, chaque secteur économique se doit de rendre ses activités plus vertueuses, et la logistique du e-commerce ne fait pas exception. Alors qu'à l'origine du e-commerce, les commandes en ligne étaient satisfaites uniquement depuis un entrepôt dédié, le e-commerce est aujourd'hui omnicanal, ce qui implique qu'une commande en ligne peut être expédiée depuis le ou les entrepôts ainsi que depuis n'importe quel magasin du réseau de distribution. Dans ce contexte, le rôle d'un logiciel de gestion de commandes est d'effectuer l'orchestration des commandes en ligne, c'est à dire de déterminer le point de stock en charge de satisfaire chaque commande.

Dans cette thèse, nous cherchons à optimiser les flux logistiques du e-commerce de manière à en réduire l'empreinte environnementale, en adoptant le point de vue de notre partenaire industriel, un éditeur de logiciel de gestion de commandes.

Dans une première partie, nous modélisons le problème d'orchestration écologique de commandes en introduisant un critère environnemental d'optimisation et différentes contraintes d'empaquetage des articles d'une commande. Pour évaluer nos modèles, nous utilisons deux jeux de données. Le premier est constitué de données industrielles et confidentielles, obtenues via notre partenaire industriel. Le second est un jeu de données réaliste partageable à la communauté scientifique, généré à partir de nos instances industrielles.

Dans une seconde partie, nous cherchons à rendre l'orchestration écologique de commandes déployable chez les e-commerçants. Nous évaluons tout d'abord l'intérêt de nos modèles basés sur une orchestration par lots de commandes, intéressante d'un point de vue optimisation mais contraignante en application, par rapport à une orchestration standard se faisant commande par commande. Ensuite, nous comparons les résultats de nos modèles avec les performances écologiques de l'orchestration de commandes basée sur des règles métier actuellement utilisée dans des contextes industriels réels. Puis, nous cherchons à approcher notre critère d'optimisation environnemental qui requiert de nombreuses données par un critère plus accessible et plus facilement applicable au contexte métier des e-commerçants. Enfin, nous proposons des règles d'orchestration écologiques basées sur ce qu'il est actuellement possible de faire au sein d'un système de gestion de commandes.

Mots clés : Recherche opérationnelle, E-commerce, Logistique, Développement durable, Système de gestion de commandes

Abstract

Optimisation of online order orchestration to reduce the environmental impact of e-commerce logistics

Abstract : The rise of e-commerce has led to an increase in logistics flows and their associated environmental impacts. To play its part in the fight against climate change, every economic sector must make its operations more sustainable, and e-commerce logistics is no exception. Whereas in the early days of e-commerce, online orders were fulfilled solely from a dedicated warehouse, commerce is now omnichannel, meaning that an online order can be dispatched from any warehouse or any store within the distribution network. In this context, the role of an order management system is to orchestrate online orders, i.e. to determine which stock location is responsible for fulfilling each order.
In this thesis, we seek to optimise e-commerce logistics flows in order to reduce their environmental footprint, adopting the perspective of our industrial partner, which provides an order management software.
First, we model the problem of eco-friendly order orchestration by introducing an environmental optimisation criterion and several constraints to pack items into shipping boxes. To test our models, we use two datasets. The first consists of industrial and confidential data obtained via our partner. The second is a realistic dataset generated from our industrial instances and therefore can be shared with the scientific community
Second, we aim to make eco-friendly orchestration of orders easy to be rolled out to e-retailers. We first evaluate the benefits of our models based on batch order orchestration, which is advantageous from an optimisation perspective but restrictive in practice, compared to the standard order-by-order approach. Then we compare the results of our models with the environmental performance of the order orchestration currently used in the industrial context. Next, we aim to approach our comprehensive environmental optimisation criterion, which requires extensive data, with a criterion that is more accessible to the business context of e-retailers. Finally, we propose eco-friendly orchestration rules based on current practices in order management systems.

Keywords : Operational research, E-commerce, Logistic, Sustainable development, Order management system

Table des matières

Table des figures xiv

Liste des tableaux xvi

Liste d'acronymes xvii

Introduction 1

1 Orchestration de commandes : définition, état de l'art et enjeux environnementaux 11
- 1.1 Formulation générique du problème d'orchestration de commandes . 12
- 1.2 Revue de littérature de l'orchestration de commandes 13
  - 1.2.1 Les débuts de l'orchestration de commandes dans la littérature 13
  - 1.2.2 Intégration de la prédiction de la demande 15
  - 1.2.3 Combinaison de l'orchestration avec d'autres problèmes d'optimisation 16
  - 1.2.4 D'autres applications de l'orchestration de commandes 16
  - 1.2.5 Un manque de considération des enjeux environnementaux . 17
- 1.3 Le problème académique de transport et ses variantes applicables à l'orchestration 18
  - 1.3.1 Le problème de transport (TP) 18
  - 1.3.2 Les problèmes de transport multi-indices 20
  - 1.3.3 Le problème de transport avec coûts fixes (FCTP) 21
  - 1.3.4 Le problème de transport et les problèmes de remplissage . . 22
- 1.4 La prise en compte des enjeux environnementaux dans les chaînes logistiques 23
  - 1.4.1 Les problèmes de conception des chaînes logistiques avec considérations environnementales 23
  - 1.4.2 Des études comparant les impacts environnementaux du e-commerce et du commerce traditionnel 24
  - 1.4.3 D'autres mesures environnementales liées à la partie transport 26
  - 1.4.4 Les variantes multi-objectifs du TP à portée environnementale 27
- 1.5 Synthèse 29

I Orchestration écologique de commandes : modélisation mathématique, données et analyses 31

2 Modélisations du problème d'orchestration écologique de commandes 33
- 2.1 Introduction 33

2.2 Construction du critère environnemental pour l'orchestration de commandes . . . 34
2.2.1 Détail des coûts environnementaux de l'orchestration de commandes . . . 34
2.2.2 Synthèse des coûts environnementaux de l'orchestration de commandes . . . 39
2.3 Modélisation des contraintes d'empaquetage . . . 40
2.4 Modélisations du problème . . . 42
2.4.1 UGTPED : Unbreakable Green Transportation Problem for E-commerce Deliveries . . . 42
2.4.2 GTPED : Green Transportation Problem for E-commerce Deliveries . . . 44
2.4.3 RGTPED : Recomputed Green Transportation Problem for E-commerce Deliveries . . . 45
2.5 Complexité des modèles d'optimisation écologique de l'orchestration de commandes . . . 46
2.5.1 Complexité du GTPED et du RGTPED . . . 46
2.5.2 Complexité de l'UGTPED . . . 47
2.6 Synthèse . . . 47

3 Génération d'instances réalistes grâce à des indicateurs de caractérisation 49
3.1 Introduction . . . 49
3.2 Des indicateurs pour caractériser les instances de l'OP . . . 50
3.2.1 Indicateurs pour caractériser la demande . . . 50
3.2.2 Indicateurs pour caractériser les stocks . . . 52
3.3 Amélioration de la décomposition des instances en composantes connexes indépendantes . . . 54
3.4 Les indicateurs de caractérisation à travers des données industrielles 55
3.4.1 Taille des instances industrielles . . . 55
3.4.2 Typologie de la demande des données industrielles . . . 57
3.4.3 Réseau de distribution et stocks des données industrielles . . . 60
3.5 Génération d'instances réalistes à partir des indicateurs de caractérisation et des données industrielles . . . 62
3.5.1 Création des commandes et des stocks . . . 63
3.5.2 Génération des données propres à l'orchestration écologique de commandes . . . 64
3.6 Synthèse . . . 65

4 Évaluation comparative des performances calculatoires et environnementales des modèles d'orchestration écologique 67
4.1 Introduction et configuration expérimentale . . . 67
4.2 Les performances de calcul des modèles d'orchestration écologique . 68

4.2.1 Performances calculatoires des modèles sur les instances industrielles . . . 68
4.2.2 Performances calculatoires des modèles sur les instances réalistes générées . . . 70
4.3 Les performances environnementales des modèles d'orchestration écologique . . . 73
4.3.1 Performances environnementales des modèles sur les instances industrielles . . . 73
4.3.2 Performances environnementales des modèles sur les instances réalistes générées . . . 76
4.4 Synthèse . . . 81

II Orchestration écologique de commandes dans le contexte opérationnel d'un *Order Management System* 83

5 Apports de l'optimisation de l'orchestration de commandes pour un *OMS* 85
5.1 Introduction . . . 85
5.2 Comparaison de l'optimisation de l'orchestration par lots de commandes et de l'optimisation séquentielle de l'orchestration . . . 86
5.2.1 Comparaison des performances de calcul des deux méthodes d'optimisation . . . 87
5.2.2 Comparaison des performances environnementales des deux méthodes d'optimisation . . . 89
5.3 Comparaison de l'orchestration historique d'un *OMS* et de l'optimisation . . . 92
5.3.1 Les apports de l'optimisation pour l'orchestration de commandes actuelle . . . 92
5.3.2 Comparaison des coûts environnementaux de l'orchestration de commandes effectuée par l'optimisation séquentielle et celle effectuée par l'*OMS* . . . 92
5.3.3 Une première évaluation économique de l'optimisation écologique de l'orchestration de commandes . . . 94
5.4 Synthèse . . . 95

6 Des méthodes alternatives d'orchestration écologique de commandes pour en faciliter le déploiement opérationnel 97
6.1 Introduction . . . 97
6.2 Optimisation écologique alternative de l'orchestration de commandes à l'aide de critères d'optimisation alternatifs . . . 98
6.2.1 Classification de l'accessibilité aux données pour définir des critères d'optimisation écologiques alternatifs . . . 98
6.2.2 Les critères d'optimisation écologiques alternatifs . . . 100

6.2.3 Des modèles alternatifs d'optimisation écologique pour l'orchestration de commandes . . . 101
6.2.4 Analyse des performances environnementales des modèles alternatifs d'optimisation écologique de l'orchestration de commandes . . . 104
6.3 Orchestration écologique de commandes à partir des règles d'orchestration d'un *OMS* . . . 109
6.3.1 Règles d'orchestration pour une orchestration écologique . . . 110
6.3.2 Performances environnementales des règles d'orchestration écologiques . . . 111
6.4 Synthèse . . . 114

Conclusions générale et perspectives **117**

Annexes **123**

A Détail des composantes connexes de commandes des instances industrielles **125**
A.1 Composantes connexes des instances de `dataR` . . . 125

B Programme de génération d'instances **129**
B.1 Création du réseau . . . 129
B.2 Création de la demande . . . 129
B.3 Création des stocks . . . 131
B.4 Caractéristiques des boîtes utilisées . . . 131

C Figures complémentaires au chapitre 4 **133**
C.1 Evolution du pourcentage d'instances résolues en fonction du temps et des indicateurs de références pour le `GTPED` et le `RGTPED` pour les instances réalistes générées . . . 133
C.2 Répartition des coûts environnementaux des solutions de l'`UGTPED`, du `GTPED` et du `RGTPED` pour les instances réalistes générées . . . 136

Bibliographie **139**

Table des figures

1 Exemple d'une orchestration de commandes. 3
2 Périmètre des émissions carbone de la chaîne logistique du e-commerce accessible aux *OMS*. Image d'après [CPV Associés et al., 2023]. . . . 5

1.1 Illustration de la décomposition des instances proposée par [Xu et al., 2009]. 14

2.1 Sources d'émissions de GES d'une commande en ligne. Les coûts sont des coûts environnementaux mesurés en geqCO_2. 35

3.1 Illustration de l'amélioration de la décomposition des instances. Ici, le produit p_2 a été exclu du graphe "commandes-produits" initial car l'on suppose que la demande totale en p_2 est inférieure au stock minimal de p_2. 54
3.2 Répartition des composantes connexes pour toutes les instances de $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$. 56
3.3 Nombre de produits en fonction du nombre de commandes pour les instances de `dataR`. 57
3.4 Nombre de produits en fonction du nombre de commandes pour la plus grande composante connexe des instances de `dataR`. 57
3.5 Nombre moyen de commandes par produit en fonction du nombre de commandes pour les instances de `dataR`. 58
3.6 Nombre moyen de commandes par produit en fonction du nombre de commandes pour la plus grande composante connexe des instances de `dataR`. 58
3.7 Nombre moyen d'articles par commandes en fonction du nombre de commandes pour les instances de `dataR`. 59
3.8 Nombre moyen d'articles par commandes en fonction du nombre de commandes pour la plus grande composante connexe des instances de `dataR`. 59

4.1 Pourcentage d'instances résolues à l'optimum en fonction du temps de calcul pour $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$. 69
4.2 Pourcentage de commandes orchestrées optimalement en fonction du temps de calcul pour $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$. 69
4.3 Pourcentage d'instances résolues à l'optimum en fonction du temps de calcul pour `dataG`. 70
4.4 Pourcentage de commandes orchestrées à l'optimum en fonction du temps de calcul pour `dataG`. 70
4.5 Pourcentage d'instances résolues à l'optimum en fonction du temps de calcul par l'`UGTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de $|\mathcal{C}|$. 71

4.6 Pourcentage d'instances résolues à l'optimum en fonction du temps de calcul par l'UGTPED pour les instances de dataG en fonction de #a/c. 71
4.7 Pourcentage d'instances résolues à l'optimum en fonction du temps de calcul par l'UGTPED pour les instances de dataG en fonction de $|\mathcal{B}|$. 72
4.8 Pourcentage d'instances résolues à l'optimum en fonction du temps de calcul par l'UGTPED pour les instances de dataG en fonction de %CkC. 72
4.9 Pourcentage d'instances résolues à l'optimum en fonction du temps de calcul par l'UGTPED pour les instances de dataG en fonction de $|\mathcal{E}|$. 72
4.10 Pourcentage d'instances résolues à l'optimum en fonction du temps de calcul par l'UGTPED pour les instances de dataG en fonction de %d/q. 72
4.11 Répartition des coûts environnementaux et du nombre de colis par commande des solutions de UGTPED, GTPED et RGTPED pour les instances de dataR. 75
4.12 Répartition des coûts environnementaux et du nombre de colis par commande des solutions de UGTPED, GTPED et RGTPED pour les instances de dataG. 77
4.13 Répartition des coûts environnementaux et du nombre de colis par commande des solutions de l'UGTPED pour les instances de dataG en fonction de $|\mathcal{C}|$. 78
4.14 Répartition des coûts environnementaux et du nombre de colis par commande des solutions de l'UGTPED pour les instances de dataG en fonction de #a/c. 78
4.15 Répartition des coûts environnementaux et du nombre de colis par commande des solutions de l'UGTPED pour les instances de dataG en fonction de $|\mathcal{B}|$. 79
4.16 Répartition des coûts environnementaux et du nombre de colis par commande des solutions de l'UGTPED pour les instances de dataG en fonction de %CkC. 80
4.17 Répartition des coûts environnementaux et du nombre de colis par commande des solutions de l'UGTPED pour les instances de dataG en fonction de $|\mathcal{E}|$. 80
4.18 Répartition des coûts environnementaux et du nombre de colis par commande des solutions de l'UGTPED pour les instances de dataG en fonction de %d/q. 81

5.1 Répartition des coûts environnementaux et du nombre de colis par commande des solutions de $\text{UGTPED}_{\text{seq}}$ et *OMS* pour les instances de dataR. 93

6.1 Distribution des écarts de coûts environnementaux entre les solutions de l'$\text{UGTPED}_{\text{seq}}$ et les solutions des modèles alternatifs d'optimisation écologique pour les instances dataR_{cc}-LD. 105

6.2 Distribution des écarts de coûts environnementaux entre les solutions de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ et les solutions des modèles alternatifs d'optimisation écologique pour les instances `dataG-LD`. 107
6.3 Distribution des écarts de coûts environnementaux entre les solutions de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ et les solutions des modèles alternatifs d'optimisation écologique pour les instances `dataG-LD` en fonction de $|\mathcal{B}|$. 108
6.4 Distribution des écarts de coûts environnementaux entre les solutions de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ et les solutions des modèles alternatifs d'optimisation écologique pour les instances `dataG-LD` en fonction de `#a/c`. 108
6.5 Distribution des écarts de coûts environnementaux entre les solutions de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ et les solutions des modèles alternatifs d'optimisation écologique pour les instances `dataG-LD` en fonction de $|\mathcal{E}|$. 108
6.6 Distribution des écarts de coûts environnementaux entre les solutions de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ et les solutions des modèles alternatifs d'optimisation écologique pour les instances `dataG-LD` en fonction de `%d/q`. 108
6.7 Règles d'orchestration écologiques `R-ORCH` basées sur les possibilités techniques actuelles des *OMS*. 111
6.8 Pourcentage de commandes orchestrées par `R-ORCH`(50) en fonction de la distance seuil pour les instances $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$`-LD` et `dataG-LD`. . . . 112
6.9 Répartition des coûts environnementaux et nombre de colis par commande des solutions de $\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$, `R-ORCH`(50), `R-ORCH`(100), `R-ORCH`(150), `R-ORCH`(200) et de l'*OMS* pour les instances de $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$`-LD`. 113
6.10 Répartition des coûts environnementaux et nombre de colis par commande des solutions de $\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$, `R-ORCH`(50), `R-ORCH`(100), `R-ORCH`(150) et `R-ORCH`(200) pour les instances de `dataG-LD`. 114

C.1 % d'instances résolues à l'optimalité en fonction du temps de calcul par le `GTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de $|\mathcal{C}|$. 133
C.2 % d'instances résolues à l'optimalité en fonction du temps de calcul par le `RGTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de $|\mathcal{C}|$. 133
C.3 % d'instances résolues à l'optimalité en fonction du temps de calcul par le `GTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de `#a/c`. 133
C.4 % d'instances résolues à l'optimalité en fonction du temps de calcul par le `RGTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de `#a/c`. . . . 133
C.5 % d'instances résolues à l'optimalité en fonction du temps de calcul par le `GTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de $|\mathcal{B}|$. 134
C.6 % d'instances résolues à l'optimalité en fonction du temps de calcul par le `RGTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de $|\mathcal{B}|$. 134
C.7 % d'instances résolues à l'optimalité en fonction du temps de calcul par le `GTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de `%CkC`. 134
C.8 % d'instances résolues à l'optimalité en fonction du temps de calcul par le `RGTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de `%CkC`. . . . 134
C.9 % d'instances résolues à l'optimalité en fonction du temps de calcul par le `GTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de $|\mathcal{E}|$. 134

C.10 % d'instances résolues à l'optimalité en fonction du temps de calcul par le RGTPED pour les instances de dataG en fonction de $|\mathcal{E}|$. 134
C.11 % d'instances résolues à l'optimalité en fonction du temps de calcul par le GTPED pour les instances de dataG en fonction de %d/q. 135
C.12 % d'instances résolues à l'optimalité en fonction du temps de calcul par le RGTPED pour les instances de dataG en fonction de %d/q. . . . 135

Liste des tableaux

2.1 Notations utilisées pour la modélisation. 42

3.1 Nombre de commandes des instances de dataR. 56
3.2 Nombre de commandes de la plus grande composante connexe du graphe "commandes-produits" des instances de dataR, sans|avec l'amélioration proposée en Section 3.3. 56
3.3 Proportion de *Click* & *Collect* pour chaque instance de dataR. . . . 59
3.4 Proportion de *Click* & *Collect* pour la plus grande composante connexe des instances de dataR. 59
3.5 Nombre de points de stock et d'entrepôts des enseignes de $\mathcal{R}$. 60
3.6 Proportion des stocks des entrepôts dans les stocks totaux pour les instances de dataR. 60
3.7 Proportion des points de stock avec des stocks non vides pour les instances de dataR (en %). 61
3.8 Stock maximal parmi les magasins|les entrepôts pour chaque instance de dataR. 61
3.9 Part de la demande par rapport aux stocks pour les instances de dataR (en %). 62
3.10 Valeurs des indicateurs de caractérisation des instances de problèmes d'orchestration de commandes dans la littérature, dans les instances réelles et dans les instances générées. 63
3.11 Génération des caractéristiques des boîtes et des produits pour nos modèles d'orchestration écologique de commandes. 65
3.12 Génération des coûts environnementaux pour nos modèles d'orchestration écologique de commandes. 66

4.1 Performances calculatoires de l'UGTPED, GTPED et RGTPED sur les instances de $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$. 69
4.2 Performances calculatoires de l'UGTPED,GTPED et RGTPED sur les instances de dataG. 70
4.3 Comparaison des coûts environnementaux (en gCO_2eq) pour UGTPED,GTPED et RGTPED pour dataR. 74
4.4 Comparaison des coûts environnementaux (en gCO_2eq) pour UGTPED,GTPED et RGTPED sur les instances de dataG. 76

5.1 Performances calculatoires de l'UGTPED et de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ sur les commandes de $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$. 88
5.2 Performances calculatoires de l'UGTPED et de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ sur les commandes de dataG. 88

5.3 Comparaison des coûts environnementaux (en gCO_2eq) par commande et des différences d'orchestration (en %) des solutions de l'UGTPED et de l'$\text{UGTPED}_{\text{seq}}$ sur les instances de dataR_{cc}. 89
5.4 Comparaison des coûts environnementaux (en gCO_2eq) par commande et des différences d'orchestration (en %) des solutions de l'UGTPED et de l'$\text{UGTPED}_{\text{seq}}$ sur les instances de dataG. 91
5.5 Comparaison des coûts environnementaux (en gCO_2eq) des solutions de l'$\text{UGTPED}_{\text{seq}}$ et de l'*OMS* pour les instances industrielles dataR. . 92
5.6 Comparaison du nombre de colis expédiés dans les solutions de l'$\text{UGTPED}_{\text{seq}}$ et de l'*OMS* pour les instances industrielles dataR. 94

6.1 Évaluation de l'accessibilité des données relatives aux boîtes et aux produits. 99
6.2 Évaluation de l'accessibilité des données relatives aux coûts environnementaux. 99
6.3 Moyenne - écart type - proportion de valeurs à 0 % - proportion de valeurs ≥ 50 % pour la distribution des écarts de coûts environnementaux entre l'$\text{UGTPED}_{\text{seq}}$ et les neuf modèles alternatifs d'optimisation écologique pour dataR_{cc}-LD. 106
6.4 Moyenne - écart type - proportion de valeurs à 0 % - proportion de valeurs ≥ 50 % pour la distribution des écarts de coûts environnementaux entre l'$\text{UGTPED}_{\text{seq}}$ et les neuf modèles alternatifs d'optimisation écologique pour dataG-LD. 107
6.5 Coût environnemental par commande de l'UGTPED, le RGTPED, l'$\text{UGTPED}_{\text{seq}}$, l'*OMS*, l'UGTPED-C-D et R-ORCH(50) sur les instances dataR_{cc}-LD et dataG-LD. 115

A.1 Répartition des composantes connexes des instances de l'enseigne r_1 125
A.2 Répartition des composantes connexes des instances de l'enseigne r_2 126
A.3 Répartition des composantes connexes des instances de l'enseigne r_3 126
A.4 Répartition des composantes connexes des instances de l'enseigne r_4 127
A.5 Répartition des composantes connexes des instances de l'enseigne r_5 127

B.1 Caractéristiques des boîtes utilisées. 131

C.1 Répartition des coûts environnementaux pour l'UGTPED sur les instances dataG en fonction des indicateurs. 136
C.2 Répartition des coûts environnementaux pour l'GTPED sur les instances dataG en fonction des indicateurs. 137
C.3 Répartition des coûts environnementaux pour l'RGTPED sur les instances dataG en fonction des indicateurs. 138

Liste d'acronymes

CA : Coûts d'approvisionnement
CE : Coûts d'emballage
CM : Coûts de manutention
CN : Coûts numériques
CP : Coûts de production
CS : Coûts de stockage
CT : Coûts de transport
DC : Coûts liés au déplacement du consommateur
ECEL : Empreinte commerce en ligne
FCTP : *Fixed-Charge Transportation Problem*
GES : Gaz à effet de serre
GTPED : *Green Transportation Problem for E-commerce Deliveries*
NPTVPR : *Number Parcels Then Volume Package Recomputing*
OMS : *Order Management System*
OP : *Orchestration Problem*
OPR : *Optimal Package Recomputing*
PGI : : Programme de génération d'instances
PLNE : Programmation Linéaire en Nombres Entiers
PRP : *Pollution Routing Problem*
R-ORCH : : Règles d'orchestration
RGTPED : *Recomputed Green Transportation Problem for E-commerce Deliveries*
STP : *Solid Transportation Problem*
TP : *Transportation Problem*
UGTPED : *Unbreakable Green Transportation Problem for E-commerce Deliveries*
$\text{UGTPED}_{\text{seq}}$: *Unbreakable Green Transportation Problem for E-commerce Deliveries* séquentiel
UGTPED-C : UGTPED - Colis
UGTPED-C-D : UGTPED - Colis - Distance
UGTPED-C-DA : UGTPED - Colis - Distance par article
UGTPED-C-DM : UGTPED - Colis - Distance masse
UGTPED-C-DV : UGTPED - Colis - Distance volume
UGTPED-D : UGTPED - Distance
UGTPED-DA : UGTPED - Distance par article
UGTPED-DM : UGTPED - Distance masse
UGTPED-DV : UGTPED - Distance volume

Introduction

Les travaux de cette thèse visent à réduire l'empreinte environnementale de la logistique du e-commerce à l'aide des outils de la recherche opérationnelle. Nous considérons cette problématique du point de vue de notre partenaire industriel, une société éditrice d'un logiciel de gestion de commandes, qui se place comme un intermédiaire entre les enseignes de e-commerce et les consommateurs et les consommatrices. Nous nous focalisons plus particulièrement sur le processus d'orchestration de commandes qui permet aux enseignes de satisfaire les commandes de leur clientèle tout en assurant une gestion efficace de leurs stocks et de leurs coûts logistiques.

L'essor du e-commerce

Nonobstant quelques transactions en ligne antérieures mais très ponctuelles, le e-commerce naît dans les années 1990 en s'appuyant sur la démocratisation d'internet. À la fin de la décennie, on compte en France à peine plus de cinq millions d'internautes [Le Nouvel Obs, 2000] et le commerce en ligne génère un chiffre d'affaires de cent cinquante millions d'euros représentant à peine 0.1% du commerce de détail [Larribeau and Pénard, 2002]. Vingt-cinq ans plus tard, boosté par une digitalisation de la société toujours plus profonde et la crise du Covid-19, le marché du e-commerce français compte plus de quarante millions d'adeptes et génère plus de cent soixante-quinze milliards d'euros de chiffre d'affaires, ce qui représente 11% du commerce de détail [FEVAD, 2025]. En à peine plus de deux décennies, le e-commerce est passé d'un marché de niche à un véritable éco-système structuré et implanté au cœur de la société française.

Cet avènement du numérique a vu émerger de nouveaux acteurs dont les ventes s'effectuent exclusivement en ligne, à l'image de Zalando dans la mode, Oscaro dans les pièces automobiles ou encore Cdiscount, qui lançait ses activités dans le CD et le DVD avant de devenir le géant au catalogue multi-sectoriel d'aujourd'hui. En parallèle, l'impact sur les enseignes de commerce traditionnel a été majeur. Nombreuses sont celles qui s'approprient cette nouvelle technologie et assurent une présence à la fois physique et dématérialisée, à l'image d'Intersport dans le sport, Darty dans l'électroménager ou Gibert Joseph dans la culture. C'est ainsi que le commerce devient omnicanal, c'est-à-dire que les achats peuvent être réalisés via des canaux différents et satisfaits depuis des canaux de distribution différents. Les modes de livraison se diversifient également, puisqu'en plus de la livraison à domicile, les commandes peuvent être retirées en magasin (on parle alors de *Click & Collect*), en point de retrait ou en consigne. Si l'ère omnicanale a permis aux enseignes d'agrandir leur zone de chalandise, cette mutation a aussi parfois été une question de survie afin de faire face à la nouvelle concurrence du commerce en ligne [Le Brun et al., 2023b].

Néanmoins, pour des personnes formées initialement à la seule vente physique,

cette transformation n'est pas innée. En effet, cela requiert une vraie polyvalence puisqu'il faut être en mesure de créer un site web, référencer ses articles en ligne, gérer ses stocks pour les ventes en ligne qui sont désormais fragmentés, collecter les commandes depuis les différents canaux de ventes, préparer les commandes, gérer leur expédition et leur suivi, etc... C'est donc une multitude de nouvelles activités qui accompagne la digitalisation du commerce, et ce, souvent sans un accroissement substantiel des revenus, puisque les grandes enseignes normalisent la livraison à faible coût, voire gratuite [Bon-Maury et al., 2021].

C'est pour pallier ce manque de polyvalence des commerçants de détail que naissent de nombreux acteurs du e-commerce, parmi lesquels : les logiciels de gestion des informations sur les produits, qui centralisent les caractéristiques produits, les logiciels de gestion d'entrepôts, qui aident à gérer les opérations quotidiennes dans les entrepôts logistiques, ou encore les logiciels de gestion de commandes, qui centralisent stocks et commandes afin de satisfaire au mieux ces dernières.

Les logiciels de gestion de commandes

Un logiciel de gestion de commandes (ou *OMS*, pour Order Management System) est un logiciel utilisé par un e-commerçant avec deux objectifs principaux : l'unification des stocks et l'orchestration de commandes. Nous précisons ici pour la compréhension de ce qui suit qu'une commande est composée d'un ou plusieurs articles qui doivent être acheminés à une même destination donnée.

Unification des stocks : afin de maximiser la disponibilité des produits en ligne, les enseignes considèrent qu'une commande en ligne peut être satisfaite à partir de tout point de stock, dont les entrepôts mais aussi les magasins. L'*OMS* centralise l'intégralité des stocks du réseau de distribution de l'enseigne et renseigne ainsi sur le site web la disponibilité de chaque produit. On parle de stock unifié. Cette considération est un vrai avantage économique pour les enseignes qui s'ouvrent à de nouvelles ventes qui auraient pu être manquées en dédiant seulement leurs entrepôts aux ventes en ligne. Néanmoins, l'actualisation des stocks, bien que fréquente, ne se fait pas en direct et ce double emploi des stocks des magasins peut causer des problèmes opérationnels. Dans de rares cas, il peut arriver qu'une commande en ligne soit passée sur la base d'un article qui est vendu au même moment au sein d'un magasin. C'est une des raisons qui incite à satisfaire chaque commande en ligne dans des délais restreints.

Orchestration de commandes : la multiplicité des sources candidates pour satisfaire chaque commande en ligne appelle désormais un choix : quels points de stock utiliser pour satisfaire chaque commande ? C'est à cette question que cherche à répondre le processus d'orchestration de commandes, cœur de métier de l'*OMS*. La communauté de la recherche opérationnelle s'intéresse au sujet depuis une quinzaine d'année (voir revue de littérature en Section 1.2), proposant des méthodes

algorithmiques visant à réduire les coûts opérationnels des marchands. Mais à notre connaissance, ce sont toujours des règles heuristiques ad-hoc qui sont utilisées dans le monde industriel.
Chaque réseau d'enseignes conçoit un jeu de règles, dites règles d'orchestration, qui sont suivies dans un ordre donné pour attribuer chaque article de chaque commande à un point de stock candidat. Si la première règle ne permet pas de trouver de candidats pour prendre en charge la commande, c'est la deuxième règle qui s'applique etc. Les règles d'orchestration sont définies par des combinaisons logiques de postulats simples parmi lesquels : le point de stock doit être de type entrepôt, le point de stock doit être capable de traiter la commande en intégralité, le point de stock doit être à moins de 200km de la destination, etc...
Le ou les points de stock sélectionnés disposent ensuite d'un temps imparti pour accepter d'expédier le ou les articles qui leur ont été attribués, sous peine que ce(s) dernier(s) reparte(nt) en phase d'orchestration. On parle de captation. En attendant que la commande soit captée, le stock unifié est décrémenté, afin d'empêcher des commandes en ligne d'être passées sur la base de stocks qui ont été commandés précédemment.
Il est également possible de proposer tout ou partie d'une commande à plusieurs points de stock candidats. Dans ce cas, c'est le point de stock le plus prompt à accepter la proposition qui s'en chargera, annulant ainsi la proposition aux autres points de stock. On parle d'allocation compétitive.
Enfin, à notre connaissance, l'orchestration pour le e-commerce se fait en continu. Les commandes arrivent au fur et à mesure et sont orchestrées, une par une, dès que possible. Tant qu'une commande n'est pas captée, elle est périodiquement réorchestrée de manière à s'adapter en cas d'évolution des stocks.

La Figure 1 représente un exemple sur lequel nous allons détailler le fonctionnement d'un processus d'orchestration. Nous considérons trois règles d'orchestration, trois types d'articles (cercle bleu, triangle vert, croix rouge), trois commandes (c_1, c_2, c_3) et trois points de stock (s_1, s_2, s_3), dont s_1 est un entrepôt. Nous supposons pour l'exemple que la captation est directe et donc que le stock disparaît une fois la commande orchestrée.

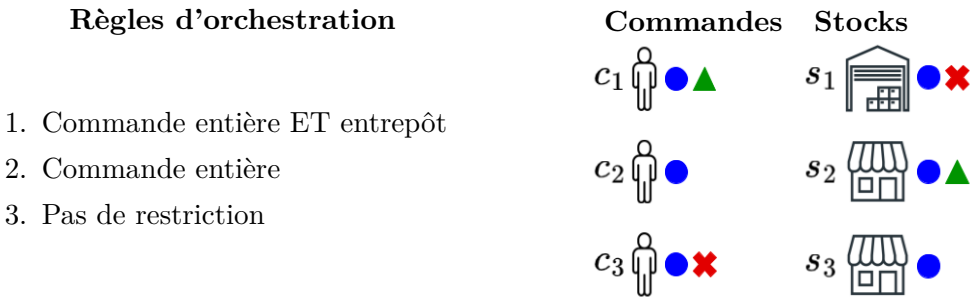

FIGURE 1 – Exemple d'une orchestration de commandes.

L'orchestration sur cet exemple est la suivante :

— La commande c_1 arrive. La première règle n'est pas vérifiée puisque l'entrepôt s_1 n'a pas la commande en entière. La seconde règle s'applique et les stocks de s_2 sont maintenant vides.

— La commande c_2 arrive. La première règle s'applique puisque l'entrepôt s_1 est capable de servir la commande en entier. s_1 n'a donc plus qu'une croix rouge en stock.

— La commande c_3 arrive. La première et la deuxième règle ne s'appliquent pas puisque aucun point de stock ne possède la commande en entière. La troisième règle s'applique, la commande est donc séparée en deux, s_1 expédie la croix rouge et s_3 expédie le cercle bleu.

Une fois la commande orchestrée et captée, elle doit être préparée pour acheminement au client. Lorsqu'une commande est captée par un entrepôt, un agent s'occupe de la préparer et de l'emballer pour former un colis qui sera remis ultérieurement à un transporteur externe en charge de la livraison jusqu'à la destination finale. Lorsqu'une commande est captée par un magasin, la préparation et l'emballage varient selon le mode de retrait souhaité. En cas de livraison à domicile ou en point relais, c'est également un colis qui est préparé pour être remis ultérieurement à un transporteur externe. En cas de *Click & Collect*, la commande est préparée et directement récupérée par le consommateur qui fait le déplacement en magasin par ses propres moyens.

E-commerce et empreinte environnementale

Du fait de son implantation dans des secteurs hyper concurrentiels (mode, high-tech...), le e-commerce a connu une expansion spectaculaire qui s'est faite en priorisant l'innovation ou la satisfaction client devant les enjeux environnementaux ou sociaux. Néanmoins, afin de répondre à la mobilisation générale impliquant l'ensemble de l'économie mondiale pour lutter contre le dérèglement climatique et conserver une planète vivable, le e-commerce se doit de décarboner ses activités [1].

Les émissions carbone d'un produit proviennent de différentes sources au cours de son cycle de vie : les matières premières, l'approvisionnement, la mise en forme, l'assemblage, la distribution, l'utilisation et la fin de vie. La prépondérance de chaque source d'émissions diffère selon les produits considérés : une télévision ou un jeans émettront majoritairement durant leur phase de production tandis qu'une gazinière induira l'essentiel de ses émissions durant sa phase d'utilisation [Lhotellier et al., 2018]. Dans tous les cas, c'est bien chaque étape du cycle vie qui doit tendre vers la décarbonation.

1. À la remarque, pertinente, qui évoquerait la disparition du e-commerce comme option la plus simple pour le décarboner, nous répondrons que nous imaginons difficilement une société sans flux de marchandises, et que la question "Le commerce traditionnel est-il systématiquement plus éco-responsable que le e-commerce ?" ne semblant pas trouver consensus [Ministère de la Transition Ecologique, 2021], nous considérons qu'il est pertinent de garder les deux modes de distribution (physique et en ligne) et d'utiliser chacun au mieux.

En leur qualité d'intermédiaire, les *OMS* se positionnent uniquement sur l'étape de distribution, entre les points de stock et les lieux de livraison. La Figure 2 illustre le périmètre des émissions de la chaîne logistique du e-commerce sur lequel les *OMS* ont un moyen d'action. La partie ① autour de la production et la partie ② d'acheminement vers un entrepôt de stockage continental ou national sont indépendantes des décisions que peuvent prendre les *OMS*. En revanche, en orientant le choix des sources de stock pour satisfaire chaque commande, ils influent sur les flux logistiques représentés en partie ③ et les impacts environnementaux associés.

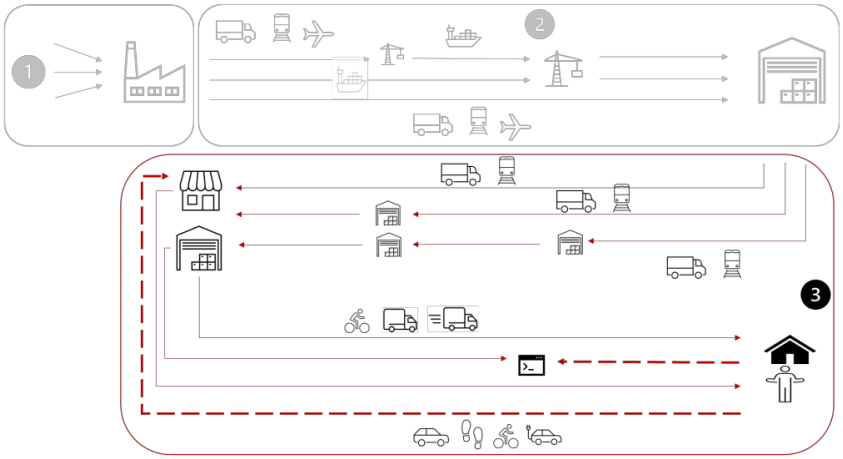

FIGURE 2 – Périmètre des émissions carbone de la chaîne logistique du e-commerce accessible aux *OMS*. Image d'après [CPV Associés et al., 2023].

Durant cette phase de distribution, les impacts environnementaux identifiés dans l'étude proviennent de différentes sources :

- la consommation numérique lors de la prise de commande en ligne, nécessitant de l'énergie et des ressources ;
- le transport d'acheminement du produit depuis l'entrepôt continental jusqu'au lieu de stockage, consommant de l'énergie et des ressources ;
- les lieux logistiques de stockage des produits, nécessitant de l' énergie et de l'espace ;
- l'emballage pour empaqueter le ou les produits sous forme de colis postaux, consommant des ressources ;
- le transport final pour acheminer les colis depuis le lieu de stockage jusqu'à l'adresse de livraison, entraînant une consommation d'énergie et de ressources ;
- les lieux logistiques de manutention des transporteurs pour trier les colis, entraînant une consommation d'énergie et d'espace ;
- le déplacement du consommateur lorsque le consommateur doit se rendre en magasin ou en point de retrait pour récupérer son colis, produisant une consommation d'énergie et de ressources.

S'il semble consensuel que l'impact du numérique est faible par rapport aux autres sources d'impacts environnementaux, l'impact relatif des autres sources d'émissions dépend principalement du scénario de livraison. C'est ce qu'illustre le rapport de [CPV Associés et al., 2023], montrant par exemple que l'impact de l'emballage peut être majoritaire dans le cadre d'une livraison à domicile réussie, tandis que ce seront les émissions liées au déplacement du consommateur qui seront prépondérantes en cas de livraison en point de retrait et déplacement en voiture thermique.
Ce rapport estimait qu'en 2021, autour d'un milliard de colis liés au e-commerce avaient circulé en France, et que les émissions associées étaient de l'ordre d'1 Mt d'équivalent CO_2 ($eqCO_2$)[2], soit environ 1kg d'$eqCO_2$ par colis [CPV Associés et al., 2023]. L'étude [Le Brun et al., 2023a], que nous avons menée avant cette thèse, détaille les enjeux auxquels fait face le e-commerce français pour réduire ses émissions de gaz à effet de serre (GES) puis liste différentes solutions envisageables. Sans être aussi efficace que le report modal ou l'électrification des véhicules, le recours à la recherche opérationnelle et à l'optimisation fait partie des solutions pour décarboner le secteur.

Cette thèse vise donc, à notre échelle, à aider à diminuer les émissions de GES liées à la chaîne logistique du e-commerce. Nous n'oublions pas que les enjeux environnementaux ne se réfèrent pas uniquement à la contribution au changement climatique, mais comprennent aussi l'épuisement des ressources, la destruction des éco-systèmes, les diverses pollutions, l'acidification des océans etc... Néanmoins, nous restreignons notre étude à la diminution des émissions de GES, mesurées en ($eqCO_2$). Nous appuyons cette décision avec les études de [Van Loon et al., 2015] et [CPV Associés et al., 2023] visant toutes deux à quantifier les impacts environnementaux du e-commerce, et présentées en Section 1.4. En effet, ces études montrent que dans la plupart des cas, les différents types d'impacts environnementaux causés par le e-commerce sont corrélés. Par ailleurs, le e-commerce ayant bouleversé la société, le secteur fait également face à de nombreuses externalités sociales, positives comme négatives, à l'image des reports d'emploi et des changements d'habitudes de consommation. L'étude de [Le Brun et al., 2023b] met en lumière les enjeux sociaux du e-commerce français pour les e-consommateurs, les commerçants traditionnels, les travailleurs du e-commerce et les populations riveraines des activités du e-commerce.

Cadre de la thèse

Dans cette thèse nous visons à réduire l'empreinte environnementale de la logistique du e-commerce. Nous nous intéressons plus particulièrement au champ d'action d'un logiciel de gestion de commandes en lien avec notre partenaire industriel. Ainsi, ce dernier n'a pas d'impact sur les prises de commandes ni sur la

2. L'équivalent dioxyde de carbone ($eqCO_2$) est une métrique utilisée pour comparer les émissions de divers gaz à effet de serre sur la base de leur potentiel de réchauffement global, en convertissant les quantités des divers gaz émis en quantité équivalente de dioxyde de carbone ayant le même potentiel de réchauffement planétaire.[Eurostat, 2026]

répartition des stocks dans les magasins et les entrepôts. Nous exploitons des données de commandes qui ont été passées par des consommateurs et de stocks qui ont été préalablement positionnés par les e-commerçants. De plus, la livraison des colis étant effectuée par un transporteur externe, le choix du trajet effectivement emprunté par les colis ne fait pas non plus partie de notre champ d'action. Les décisions que nous pouvons aiguiller dans cette thèse portent uniquement sur les points de stock à utiliser pour satisfaire chaque commande.

Ces travaux se sont déroulés dans le cadre de la chaire de formation et de recherche « retail responsable » [Toulouse INP, 2026] qui vise à mettre les outils de la recherche opérationnelle au service d'un e-commerce plus responsable. Il s'agit d'un partenariat entre l'entreprise mécène OneStock, l'établissement porteur Toulouse INP et le CNRS via son laboratoire de recherche LAAS-CNRS. Côté recherche, la première phase, qui a consisté à définir et clarifier les enjeux et périmètre d'étude de la suite de la chaire, a conduit à la rédaction de deux rapports techniques sur les enjeux environnementaux et sociaux du e-commerce en France [Le Brun et al., 2023a],[Le Brun et al., 2023b]. Ces rapports servent de ligne directrice pour le reste des travaux répartis en deux axes : une partie dite recherche ouverte, et une partie dite recherche finalisée, en lien plus étroit avec l'entreprise et concrétisée par cette thèse CIFRE. Dans le chapitre de conclusion nous mentionnerons brièvement certains travaux réalisés dans le cadre de la recherche ouverte, qui sont complémentaires aux travaux de cette thèse. Les travaux de cette thèse faisant partie de la recherche finalisée, ils ont été orientés vers des contributions assez applicatives. Toutefois, pour justifier la pertinence de nos travaux applicatifs, nous nous sommes appuyés sur de premiers travaux plus théoriques.

Par un choix délibéré, ces travaux de recherche, et en particulier la rédaction de ce manuscrit, ont été intégralement réalisés sans recours à des outils d'intelligence artificielle générative.

Organisation du manuscrit

Ce manuscrit est composé d'un premier chapitre de revue de la littérature, de deux parties de contributions théoriques et applicatives, composées respectivement de trois et deux chapitres, ainsi que d'une conclusion générale ouvrant sur les perspectives. Nous proposons ici un court résumé de chaque chapitre.

Le **Chapitre** 1 concentre la revue de l'état de l'art effectuée pour cette thèse. Nous nous intéressons en premier lieu au problème d'orchestration de commandes, que l'on identifie comme une variante du problème de transport, un problème bien connu de la recherche opérationnelle. Une revue des littératures du problème d'orchestration de commandes et du problème de transport est proposée. Pour conclure ce chapitre, nous nous intéressons à la prise en compte des enjeux environnemen-

taux dans les chaînes logistiques dans l'idée d'en transférer les enseignements à notre problème spécifique d'orchestration de commandes.

La **Partie** I comporte trois chapitres. Elle formule le problème d'optimisation écologique de l'orchestration de commandes, présente la génération des instances considérées pour la suite du manuscrit et propose une évaluation des modèles proposés.

Dans cette partie, le **Chapitre** 2 présente la modélisation du problème. Dans un premier temps, nous construisons un critère écologique permettant de mesurer le coût environnemental d'une orchestration de commandes. Afin d'intégrer ce critère au sein du modèle d'optimisation de l'orchestration, des contraintes d'empaquetage sont introduites. Enfin, nous présentons les trois modèles résultants d'optimisation écologique de l'orchestration de commandes.

Le **Chapitre** 3 présente les instances utilisées pour tester nos modèles. L'étude de la littérature n'ayant pas permis d'obtenir des instances satisfaisantes pour notre étude, nous nous sommes appuyés sur des instances industrielles collectées auprès de notre partenaire afin de générer des instances réalistes, partageables avec la communauté scientifique. Des indicateurs de référence ont été établis afin d'analyser les instances industrielles et de les reproduire le plus fidèlement possible sans briser la confidentialité des données initiales.

Le **Chapitre** 4 compare les performances de calcul et les performances environnementales des trois modèles d'optimisation écologique définis précédemment. Les comparaisons sont proposées sur les instances industrielles et les instances réalistes que nous avons générées.

La **Partie** II comporte deux chapitres et présente des contributions applicatives, dont l'objectif est de faciliter un déploiement industriel de l'orchestration écologique de commandes.

Le **Chapitre** 5 vise à faciliter l'acceptation technique de l'optimisation écologique de l'orchestration de commandes. D'une part, nous proposons une méthode de résolution de nos modèles d'optimisation ne permettant pas de garantir l'optimalité mais qui s'accorde techniquement au contexte opérationnel. Plus précisément, nous proposons une optimisation séquentielle commande par commande plutôt qu'une optimisation par lots de commandes. Une comparaison des performances de calcul et des performances environnementales des deux méthodes de résolution est ensuite effectuée. D'autre part, nous comparons les résultats de l'optimisation écologique de l'orchestration de commandes avec les résultats retournés par l'*OMS* afin de mettre en lumière les gains atteignables par l'optimisation et de motiver son déploiement.

Le **Chapitre** 6 cherche également à simplifier l'orchestration écologique de commandes afin d'en faciliter le déploiement industriel. Tout d'abord, nous rendons plus accessible l'optimisation écologique de l'orchestration de commandes en introduisant des critères alternatifs d'optimisation. Ces critères alternatifs reposent sur des données bien plus accessibles que celles requises par le critère environnemental initial. Les performances environnementales des modèles d'optimisation alternatifs

associés sont ensuite comparées aux performances environnementales du modèle d'optimisation écologique initial. Ensuite, à partir des résultats précédents, nous établissons des règles d'orchestration écologiques sur la base de ce qui existe dans un *OMS*. Les performances environnementales de ces règles d'orchestration sont finalement comparées aux performances environnementales de l'optimisation écologique de l'orchestration de commandes.

Le manuscrit se termine par une conclusion générale et des perspectives de nos travaux.

Chapitre 1

Orchestration de commandes : définition, état de l'art et enjeux environnementaux

Sommaire

1.1 Formulation générique du problème d'orchestration de commandes . . . 12
1.2 Revue de littérature de l'orchestration de commandes . . . 13
1.2.1 Les débuts de l'orchestration de commandes dans la littérature 13
1.2.2 Intégration de la prédiction de la demande . . . 15
1.2.3 Combinaison de l'orchestration avec d'autres problèmes d'optimisation . . . 16
1.2.4 D'autres applications de l'orchestration de commandes . . . 16
1.2.5 Un manque de considération des enjeux environnementaux . 17
1.3 Le problème académique de transport et ses variantes applicables à l'orchestration . . . 18
1.3.1 Le problème de transport (TP) . . . 18
1.3.2 Les problèmes de transport multi-indices . . . 20
1.3.3 Le problème de transport avec coûts fixes (FCTP) . . . 21
1.3.4 Le problème de transport et les problèmes de remplissage . . 22
1.4 La prise en compte des enjeux environnementaux dans les chaînes logistiques . . . 23
1.4.1 Les problèmes de conception des chaînes logistiques avec considérations environnementales . . . 23
1.4.2 Des études comparant les impacts environnementaux du e-commerce et du commerce traditionnel . . . 24
1.4.3 D'autres mesures environnementales liées à la partie transport 26
1.4.4 Les variantes multi-objectifs du TP à portée environnementale 27
1.5 Synthèse . . . 29

Dans cette thèse, nous cherchons à résoudre un problème d'orchestration de commandes tout en minimisant l'impact environnemental associé. Ce chapitre présente une formalisation générique du problème d'orchestration de commandes en Section 1.1 puis la littérature scientifique associée en Section 1.2. Nous proposons ensuite une revue de littérature du problème de transport en Section 1.3, dont

notre problème peut être vu comme une variante. Enfin, nous passons en revue les manières de prendre en compte les enjeux environnementaux au sein des chaînes logistiques en Section 1.4, dont nous pourrons nous inspirer pour définir l'orchestration écologique de commandes.

1.1 Formulation générique du problème d'orchestration de commandes

Commençons par formaliser le problème d'orchestration de commandes en ligne. Soit $\mathcal{C}$ un ensemble de commandes, $\mathcal{P}$ un ensemble de produits et $\mathcal{S}$ un ensemble de points de stock. Soit d_{pc} le nombre d'articles du produit p de la commande c et q_{ps} le nombre d'articles du produit p en stock dans le point de stock s. Soit f un critère d'optimisation quelconque. Le problème générique d'orchestration de commandes en ligne, dénoté simplement `OP` pour *Orchestration Problem*, est donné ci-dessous.

$$\texttt{(OP)} \quad \min \sum_{p\in\mathcal{P}} \sum_{s\in\mathcal{S}} \sum_{c\in\mathcal{C}} f(x_{psc}) \tag{1.1}$$

$$\text{s.c.} \sum_{s\in\mathcal{S}} x_{psc} = d_{pc} \qquad \forall p \in \mathcal{P}, \forall c \in \mathcal{C} \tag{1.2}$$

$$\sum_{c\in\mathcal{C}} x_{psc} \leq q_{ps} \qquad \forall p \in \mathcal{P}, \forall s \in \mathcal{S} \tag{1.3}$$

$$x_{psc} \in \mathbb{N} \qquad \forall p \in \mathcal{P}, \forall s \in \mathcal{S}, \forall c \in \mathcal{C} \tag{1.4}$$

Les variables x_{psc} définies en (1.4) indiquent le nombre d'articles du produit p assignés au point de stock s pour la commande c. Les contraintes (1.2) assurent que chaque commande soit satisfaite et les contraintes (1.3) assurent que les stocks de chaque point de stock soient respectés. La fonction objectif (1.1) est ici considérée générique et varie selon les applications, à l'inverse des contraintes de stock et de demande qui sont fondamentales à l'`OP`. Ces deux types de contraintes, structurants pour notre problème, permettent de se rapprocher d'un problème bien connu de recherche opérationnelle, le problème de transport, qui sera présenté en Section 1.3. Par ailleurs, nous pouvons noter que la matrice des contraintes est totalement unimodulaire, ce qui implique qu'une solution optimale de la relaxation linéaire de l'`OP` attribue des valeurs entières aux variables [Rebman, 1974]. Selon les variantes considérées et les contraintes ajoutées, la totale-unimodularité n'est pas toujours conservée, complexifiant ainsi la résolution.

Le modèle de l'`OP` présenté ici est plus général que l'orchestration opérée actuellement par les logiciels de gestion de commandes en ligne puisqu'on cherche ici à orchestrer de manière optimale un lot de commandes. Pour se ramener à la réalité industrielle qui est la nôtre et orchestrer une commande à la fois, on peut utiliser successivement l'`OP` en restreignant $\mathcal{C}$ à une unique commande.

Afin de faciliter la compréhension de la suite de ce chapitre, nous précisons ici

l'utilisation de quelques termes.

— Nous utilisons le terme *produit* pour désigner une référence p qui peut être achetée en plusieurs exemplaires et le terme *article* pour parler d'une unité d'un produit p.
— Nous utilisons indifféremment les termes *commande* et *client* pour désigner un ensemble d'articles de différents produits p faisant l'objet d'une commande groupée c. Le terme *destination* correspond au lieu de livraison ou de retrait d'une commande.
— Nous utilisons indifféremment les termes *point de stock* et *source* pour désigner un lieu rassemblant et expédiant des articles vers des destinations.
— Nous utilisons le terme *chemin* pour parler de la route entre une source et une destination indépendamment du parcours réellement emprunté. Si plusieurs parcours sont possibles pour un même chemin source-destination, on parle de *trajet* pour désigner un parcours particulier.

1.2 Revue de littérature de l'orchestration de commandes

Nous introduisons deux termes de caractérisation des algorithmes d'orchestration de commandes que nous utilisons dans cette section.

Nous appelons algorithme *omniscient* un algorithme qui connaît l'intégralité des commandes sur l'horizon temporel considéré et les orchestre relativement les unes par rapport aux autres en se servant de cette connaissance.

Nous appelons algorithme *myope* un algorithme qui orchestre chaque commande une par une sans chercher à anticiper les futures commandes.

1.2.1 Les débuts de l'orchestration de commandes dans la littérature

Le problème d'orchestration de commandes commence à intéresser la communauté scientifique à la fin des années 2000. Il est communément admis que les premiers travaux qui proposent un modèle d'optimisation pour ce problème sont ceux de [Xu et al., 2009]. Dans cet article, les auteurs proposent de ré-évaluer périodiquement l'orchestration des commandes qui n'ont pas encore été captées de manière à minimiser le nombre de colis expédiés. En minimisant le nombre de colis expédiés, ce sont les coûts d'expédition qui sont ainsi minimisés. Les auteurs proposent un modèle de Programmation Linéaire en Nombres Entiers (PLNE) constitué des contraintes structurantes de respect de la demande et des stocks (1.2)-(1.3) de l'`OP`, enrichi de variables binaires et de contraintes permettant de spécifier si une expédition a lieu entre une source et une destination. Ce modèle de PLNE est implémenté avec le solveur `CPLEX` qui échoue à résoudre les instances industrielles considérées. Ces instances correspondent à 5 jours de commandes d'un grand commerçant de détail américain, soit plusieurs centaines de milliers de commandes. Pour passer à l'échelle, les auteurs développent une heuristique partant d'une solution courante d'orchestration et essayent de l'améliorer par itérations successives. Les résultats

montrent que sur les instances réelles considérées, contenant plusieurs dizaines de milliers de commandes par semaine, ce sont plusieurs millions de dollars qui peuvent être économisés chaque année.
Dans cet article, les auteurs proposent également une décomposition des instances qui permet d'orchestrer en parallèle des sous-ensembles de commandes sans perte d'optimalité. Pour cela, ils construisent un graphe dit "commandes-produits" $\mathcal{G} = (\mathcal{S}, \mathcal{A})$ dont chaque nœud de $\mathcal{S}$ est une commande c et une arête de $\mathcal{A}$ est présente entre deux nœuds (c,$c^{'}$) s'il existe un produit p demandé par chacune des deux commandes c et $c^{'}$ (i.e. $d_{pc} \geq 1$ et $d_{p^{'}c} \geq 1$) [1]. Une fois le graphe ainsi construit, chacune des composantes connexes de ce graphe peut être orchestrée indépendamment des autres.

Exemple : la Figure 1.1 présente une illustration de cette décomposition, avec 5 commandes $c_1 - c_5$ et 4 produits $p_1 - p_4$. Ici, c_1, c_2 et c_3 font partie d'une même composante connexe car c_1 et c_2 ont chacune commandé p_1 et c_2 et c_3 ont chacune commandé p_2. Ainsi, les commandes c_1, c_2 et c_3 doivent être orchestrées ensemble. De même, les commandes c_4 et c_5 doivent être orchestrées ensemble puisqu'elles ont chacune commandé le produit p_4. Le produit p_3 ne fait pas partie du graphe $\mathcal{G}$ et l'arête correspondante est représentée en pointillés pour indiquer qu'il a été commandé par la commande c_3.

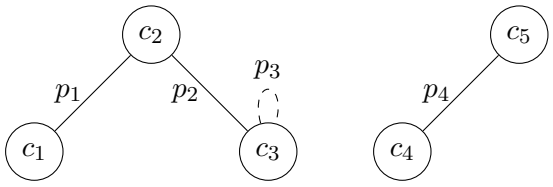

FIGURE 1.1 – Illustration de la décomposition des instances proposée par [Xu et al., 2009].

Les auteurs illustrent l'impact de cette décomposition sur l'un de leur jeu de données et montrent une réduction significative de la taille initiale, sans pour autant permettre la résolution optimale du PLNE avec un solveur.

Ensuite, [Mahar and Wright, 2009] s'intéressent au problème d'orchestration de commandes à travers une problématique plus large : en plus de l'affectation des commandes aux points de stock, l'optimisation doit également décider du réapprovisionnement de chaque point de stock depuis un entrepôt central qui doit lui même se réapprovisionner auprès de ses fournisseurs. Par ailleurs, la notion de stock est prise différemment en compte. En effet, si un point de stock doit expédier une commande et ne dispose pas du stock nécessaire, il attend le réapprovisionnement et des pénalités de retard sont payées. Enfin, chaque produit est commandé au plus une fois par commande et chaque commande est traitée par un unique point de stock. Ainsi, le modèle de PLNE étudié dans cet article est assez éloigné du modèle

1. [Xu et al., 2009] considèrent un graphe "produits-commandes", correspondant au graphe dual de celui que nous présentons. Les deux formulations sont équivalentes.

générique de l'OP présenté en Section 1.1.
Dans ces travaux, les auteurs mettent en lumière les lacunes des politiques d'orchestration utilisées couramment dans le monde industriel consistant alors à affecter chaque commande au point de stock le plus proche. Pour cela, ils proposent une méthode qui permet d'accumuler les commandes en ligne sur une période donnée avant de déclencher une orchestration qui tient compte de l'état courant des stocks et qui minimise les coûts estimés liés au transport, au réapprovisionnement et au retard de livraison. Cette méthode diffère de l'algorithme *omniscient* par le fait que ce sont plusieurs lots de commandes qui sont orchestrés successivement et non pas l'intégralité des commandes. La résolution est faite par un solveur de PLNE et l'orchestration par lots de commandes permet une réduction des coûts totaux de l'ordre de 7% par rapport à un algorithme *myope*. Notons qu'il n'est pas fait état de difficultés liées à la résolution par lots comme l'a fait [Xu et al., 2009], mais les modèles de PLNE considérés dans ces deux articles sont différents. Par ailleurs, la taille des instances résolues n'est pas mentionnée dans [Mahar and Wright, 2009].

1.2.2 Intégration de la prédiction de la demande

Afin d'améliorer l'orchestration *myope* sans avoir à passer par l'algorithme *omniscient* dont la résolution est complexe, de nombreux articles s'intéressent à une vision intermédiaire consistant à intégrer des prédictions de commandes. C'est le cas de [Acimovic and Graves, 2015], qui proposent une orchestration commande par commande visant à minimiser les coûts de livraison immédiats et une estimation des coûts futurs. L'estimation des futurs coûts de livraison exploite le fait que la demande est supposée suivre une loi probabiliste connue (loi de Poisson par exemple). Ils se comparent ensuite avec un algorithme pseudo-omniscient qui pratique l'orchestration produit par produit et utilise des pénalités pour inciter les commandes avec plusieurs produits à être expédiées depuis un unique point de stock, ainsi qu'avec un algorithme *myope*. Les résultats montrent que la méthode pseudo-omnisciente permet une réduction des coûts de 3% par rapport à la méthode *myope*, tandis que l'heuristique proposée avec estimation des coûts futurs permet une réduction des coûts de 1%.

Les travaux de [Jasin and Sinha, 2015] considèrent une orchestration commande par commande et une demande stochastique. Ils proposent une stratégie d'affectation probabiliste reposant sur la relaxation linéaire de l'OP. Leurs résultats montrent une amélioration de 5% par rapport à une orchestration *myope*.

Une étude applicative est proposée par [Chen et al., 2024] qui évaluent plusieurs méthodes pour améliorer l'orchestration de commandes d'un industriel, en faisant l'hypothèse que chaque commande doit être satisfaite par un unique point de stock. L'orchestration intégrant la prédiction de demandes obtient les meilleurs résultats, avec un écart de 20% par rapport à l'*omniscient*, tandis que l'orchestration *myope* entraîne un surcoût de 45% par rapport à la méthode *omniscient*.

Dans leurs travaux, [Andrews et al., 2019] revendiquent pouvoir se passer de la prédiction de la demande pour proposer un algorithme d'affectation commande

par commande qui soit compétitif. Ils considèrent un adversaire qui peut choisir n'importe quelle séquence de commandes et les présenter à l'orchestration dans cet ordre et proposent une règle d'orchestration basée sur un schéma primal-dual. Pour cela, ils calculent des coûts réduits correspondant aux coûts pour satisfaire une commande c depuis le point de stock s à l'instant t, coûts qu'ils mettent à jour itérativement. Les résultats montrent une réduction des coûts de 10% par rapport à une orchestration *myope*.

1.2.3 Combinaison de l'orchestration avec d'autres problèmes d'optimisation

De nombreux travaux traitent de problèmes combinant l'orchestration de commandes avec d'autres problèmes de décision. C'est le cas de ceux de [Rivière et al., 2021] qui intègrent la résolution du problème de tournées de véhicules au modèle de l'`OP`. Le PLNE résultant ne pouvant pas être résolu efficacement par un solveur classique sur les instances considérées (comptant jusqu'à 100 commandes, 10 points de stock et 10 articles différents), trois heuristiques sont développées, dont un algorithme génétique qui démontre les meilleures performances.

Les travaux de [Lei et al., 2018] proposent un problème comprenant orchestration de commandes et détermination des prix des produits avec des demandes stochastiques. Les prix doivent être fixés en début de saison puis l'affectation des commandes faite en temps réel, sans possibilité de retarder l'orchestration. L'objectif est de maximiser le revenu dû aux ventes, moins les coûts liés aux expéditions. Les auteurs développent une heuristique qui résout dans un premier temps une version déterministe du problème sur l'ensemble de la saison, en supposant que chaque demande va prendre sa valeur moyenne. Puis, ces résultats sont utilisés pour orienter l'algorithme qui orchestre en temps réel les commandes arrivant stochastiquement au cours de la saison.

Les travaux présentés dans [Alishah et al., 2017] étudient un problème à trois niveaux de décision de manière à minimiser les coûts logistiques globaux : la première étape est de déterminer les points de stock qui peuvent être utilisés pour satisfaire les ventes en ligne, la seconde étape consiste à répartir les stocks entre les différents points de stock et la dernière étape permet de décider le point de stock à utiliser pour chaque commande. Pour la troisième partie, correspondant à l'orchestration de commandes, les auteurs définissent un seuil de stock qui détermine si l'on doit utiliser les stocks des magasins ou des entrepôts pour satisfaire chaque commande. Les résultats montrent que la prise en compte de la politique d'orchestration peut impacter significativement les stratégies de réapprovisionnement et le choix du réseau sollicité pour satisfaire les commandes en ligne.

1.2.4 D'autres applications de l'orchestration de commandes

En parallèle du commerce de détail, on trouve d'autres applications du problème d'orchestration de commandes. De nombreuses applications considèrent en particu-

lier que chaque commande est constituée d'un unique article et qu'elle ne peut être satisfaite que par une seule source. C'est le cas par exemple pour la livraison de repas à domicile, où l'on cherche à affecter chaque livraison à un unique livreur. [Liu et al., 2018b] proposent un modèle permettant d'estimer le temps de trajet mis par chaque livreur en fonction de son expérience et de sa connaissance du quartier de manière à faire les affectations minimisant les retards de livraison. Leurs résultats montrent que leur méthode permet de réduire jusqu'à 74% les retards de livraison par rapport à un algorithme *myope*.

Enfin, [Li et al., 2023] explorent un problème combinant planification de production et affectation de commandes de manière à honorer les commandes rapidement et à moindre coût. Le problème est formulé comme un programme linéaire stochastique à deux niveaux, puis simplifié à l'aide d'une méthode d'approximation de la moyenne des échantillons, avant d'être résolu à l'aide d'une méthode de Benders logique.

1.2.5 Un manque de considération des enjeux environnementaux

En moins de vingt ans, la littérature de l'orchestration de commandes s'est donc considérablement enrichie. Cependant, l'intégralité des études mentionnées dans cette section cherchent à minimiser des coûts économiques, comprenant très souvent les coûts d'expédition, parfois complétés par des coûts liés au réapprovisionnement ou aux ventes manquées. Ce manque de diversification dans les enjeux considérés est confirmé par les propos de [Castro et al., 2025], une revue de littérature sur les problèmes d'orchestration de commandes pour le commerce de détail. En effet, les auteurs rapportent que la quasi totalité des travaux à leur connaissance considèrent des objectifs plus ou moins proches des coûts économiques de satisfaction des commandes, incluant coûts de préparation et d'expédition de la commande. Quelques travaux considèrent d'autres objectifs financiers ou liés à la satisfaction client, mais un seul article inclut une dimension environnementale : celui de [Das et al., 2023] qui intègre la minimisation du volume de carton expédié. Plus précisément, l'article propose un modèle bi-objectif visant à minimiser les dépenses en carburant et le volume de carton expédié. En parallèle de l'orchestration, le problème proposé cherche à sélectionner N tailles de boîtes en carton parmi un ensemble de M tailles de boîtes disponibles, de manière à pouvoir emballer l'ensemble des commandes en utilisant le moins de volume de carton. Pour la résolution, un algorithme combinant apprentissage profond et méthode de colonie de fourmis a été développé. L'apprentissage est utilisé pour déterminer l'ensemble des boîtes à sélectionner et la méthode de colonie de fourmis exploite ces résultats pour trouver la solution au problème global. Les auteurs se comparent à des méthodes combinant algorithme de colonie de fourmis et d'autres méthodes d'apprentissage, et montrent que leur méthode est la plus performante, permettant notamment d'obtenir le meilleur compromis entre coûts de transport et volume de carton expédié. Ce seul article n'est toutefois pas suffisant pour faire oublier le manque de considération des enjeux environnementaux dans les recherches sur l'orchestration de commandes.

Notons que l'OP ne représente qu'une partie de la problématique plus large qu'est la gestion des chaînes logistiques et que son modèle est très proche de celui du problème de transport, un problème étudié depuis plus de quatre-vingts ans et à la littérature autrement plus riche, auquel nous allons nous intéresser dans la section suivante.

1.3 Le problème académique de transport et ses variantes applicables à l'orchestration

1.3.1 Le problème de transport (TP)

Le *Hitchcock Distribution Problem* a été introduit par [Hitchcock, 1941], formalisé par [Flood, 1953] et par la suite renommé problème de transport (ou *Transportation Problem*, dénoté par TP). On cherche dans ce problème à répartir la production de plusieurs usines entre plusieurs villes tout en minimisant les coûts de distribution. Le modèle du TP est donné ci-après, où l'ensemble I correspond aux usines et l'ensemble J correspond aux villes, d_j représente la demande de la ville j, q_i l'offre de l'usine i et A_{ij} représente le coût d'expédition d'une unité de l'usine i vers la ville j.

$$\textbf{(TP)} \quad \min \sum_{i\in I}\sum_{j\in J} A_{ij}x_{ij} \tag{1.5}$$

$$\text{s.c.} \sum_{i\in I} x_{ij} = d_j \qquad \forall j \in J \tag{1.6}$$

$$\sum_{j\in J} x_{ij} = q_i \qquad \forall i \in I \tag{1.7}$$

$$x_{ij} \geq 0 \qquad \forall i \in I, j \in J \tag{1.8}$$

On remarque que la structure du TP est très proche de celle de l'OP que nous avons défini en Section 1.1. En effet, nous retrouvons des variables qui déterminent les sources utilisées pour chaque commande ((1.4) pour l'OP et (1.8) pour le TP), des contraintes qui assurent la réalisation des demandes ((1.2) pour l'OP et (1.6) pour le TP) et des contraintes qui assurent le respect des stocks ((1.3) pour l'OP et (1.7) pour le TP).

Nous relevons trois différences entre les deux modèles. Premièrement, le TP est un problème dit "équilibré", où il y a autant de demandes que de stocks ($\sum_j d_j = \sum_i q_i$) et pour lequel la contrainte de stocks (1.7) impose une égalité. À l'inverse, l'OP est un problème "déséquilibré" avec plus de stocks que de demandes ($\sum_j d_j \leq \sum_i q_i$) et la contrainte de stocks (1.3) est une inégalité. Néanmoins, cette différence n'en est pas vraiment une. En effet, il est possible d'équilibrer un problème déséquilibré en ajoutant une commande fictive dont la demande est égale à l'excès de stocks.
Deuxièmement, les variables du TP sont continues, à l'inverse de l'OP pour lequel nous requérons l'intégrité des variables. Dans le cas standard, cette différence n'en

est pas forcément une car la matrice des contraintes du TP est totalement unimodulaire, ce qui implique que la solution optimale sera de toute façon entière si toutes les données sont entières. Cependant, lorsque des contraintes additionnelles sont requises comme pour le *Fixed-Charge Transportation Problem* (voir Section 1.3.3), il n'y a plus d'unimodularité des contraintes. Dans la littérature du TP et de ses variantes, les quantités considérées sont généralement très grandes. Ainsi, l'approximation induite par la relaxation linéaire des variables a souvent un impact négligeable sur la solution totale. Dans le cas de l'OP, les quantités considérées sont souvent faibles et réfèrent à des produits insécables, à l'image d'un vêtement ou d'un livre. L'approximation par relaxation linéaire des variables n'est donc pas envisageable.
Troisièmement, le TP considère un seul produit à distribuer, tandis que ce sont plusieurs produits qui constituent les commandes de l'OP. Toutefois, selon la fonction objectif considérée pour l'OP, une décomposition du problème par produit peut être effectuée. Considérons un objectif affine tel que donné par l'équation (1.9)

$$\min \sum_{p\in\mathcal{P}} \sum_{s\in\mathcal{S}} \sum_{c\in\mathcal{C}} A_{psc} x_{psc} \tag{1.9}$$

où A_{psc} correspond au coût d'expédition d'une unité du produit p depuis s vers c. Dans ce cas, le modèle de l'OP résultant :

$$\begin{aligned} &\min(1.9) \\ &\text{s.c.}(1.2) - (1.4) \end{aligned}$$

peut être décomposé par produit p, et résoudre l'OP revient à résoudre une succession de TP pour chaque produit p.

En termes de champ d'application, le problème de transport est souvent utilisé dans la littérature pour répartir des volumes importants de produits entre des manufacturiers et des marchands, tandis que l'orchestration de commandes met généralement en relation des marchands et des clients particuliers, avec des commandes composées seulement de quelques unités de produits. Néanmoins, nous avons vu que, dans sa forme simple, l'OP est équivalent au TP. Nous proposons ainsi dans la suite de cette section une revue de littérature de trois variantes du TP pertinentes pour notre cadre d'étude.

En termes de résolution, le TP est un problème de complexité polynomiale pour lequel plusieurs algorithmes ont été proposés, s'avérant plus ou moins performants selon le nombre de sources et de destinations. Notons que le TP peut être vu comme un problème de flot à coût minimum sur un graphe biparti [2]. Le graphe biparti du TP est obtenu en considérant les N sources comme le premier ensemble de sommets et les M destinations comme le second ensemble de sommets [Brenner, 2008]. Ainsi,

2. Nous ne développerons pas ici le problème de flot à coût minimum et référons les lecteurs et lectrices aux chapitres 9,10 et 11 du livre de [Ahuja et al., 1994] pour une présentation détaillée.

les algorithmes polynomiaux développés pour le problème de flot à coût minimum peuvent être utilisés pour la résolution du TP, à l'image de celui proposé par [Orlin, 1988] reposant sur la résolution successive de problèmes du plus court chemin et de complexité $O(N^2 logN(M+logN))$. Cependant, la nature particulière du graphe du TP permet le développement d'algorithmes spécifiques. C'est le cas de l'algorithme proposé par [Brenner, 2008] qui propose un algorithme en $O(NM^2(logN+MlogM))$ et résolvant plusieurs problèmes de flot à coût minimum sur des sous-graphes. Enfin, [Matsui and Scheifele, 2016] propose un algorithme récursif, de complexité polynomiale en fonction du nombre de destinations, s'exécutant en $O(M(N!)^2)$.

1.3.2 Les problèmes de transport multi-indices

Le TP standard considère des variables à seulement 2 indices, comptant pour les sources et les destinations. Rapidement, la littérature a introduit davantage d'indices pour enrichir les possibilités de modélisation. Le *Solid Transportation Problem* (dénoté par STP) présenté par [Haley, 1962] considère un troisième indice k aux variables. Les auteurs ne donnent pas de signification à cet indice mais il est essentiellement utilisé dans la littérature pour modéliser différents produits, différents types de véhicules ou différents trajets empruntables sur chaque chemin source-destination (ij). Le modèle du STP est donné ci-dessous. Nous supposons pour faciliter l'illustration que P représente différents produits, et ainsi d_{jp} correspond à la quantité de produit p demandée dans la commande j et q_{ip} correspond à la quantité du produit p en stock dans le point de stock i.

$$\textbf{(STP)} \quad \min \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{p\in P} A_{ijp}x_{ijp} \tag{1.10}$$

$$\text{s.c.} \sum_{i\in I} x_{ijp} = d_{jp} \qquad \forall j \in J, \forall p \in P \tag{1.11}$$

$$\sum_{j\in J} x_{ijp} = q_{ip} \qquad \forall i \in I, \forall p \in P \tag{1.12}$$

$$\sum_{p\in P} x_{ijp} = e_{ij} \qquad \forall i \in I, \forall j \in J \tag{1.13}$$

$$x_{ijp} \geq 0 \qquad \forall i \in I, j \in J, p \in P \tag{1.14}$$

Les variables de décision (1.14) déterminent la quantité de produit p expédiée depuis la source i vers la destination j. Les contraintes (1.11) et (1.12) assurent le respect des demandes et des stocks pour chaque produit p. L'objectif (1.10) minimise les coûts d'expéditions. Le modèle original du STP comprend également les contraintes (1.13), permettant d'obtenir un modèle générique avec trois ensembles de contraintes où pour chaque ensemble la somme des variables x sur une dimension doit être égale à un coefficient indexé avec les deux autres dimensions. Dans notre illustration, le coefficient e_{ij} pourrait représenter une quantité tous produits confondu à expédier depuis i vers j. En pratique, ces contraintes (1.13) sont davantage utilisées sous la forme d'une inéquation, de manière à modéliser une capacité

maximale de transport entre la source i et la destination j.

Par la suite, des travaux ont même considéré davantage d'indices, comme [Aktar et al., 2021] et [Bind et al., 2024] qui intègrent quatre indices. Le troisième indice permet de modéliser les différents produits disponibles et le quatrième la multiplicité des trajets pour chaque chemin source-destination. Pour finir, de manière plus générale, [Junginger, 1993] étudie le TP multi-indices où le nombre d'indices peut être n'importe quel nombre. Dans cette variante, les contraintes peuvent contenir des sommes multiples de variables et les paramètres avoir un nombre multiple d'indices. Les travaux de l'article proposent une matrice permettant une représentation simple et standardisée des problèmes de TP multi-indices ainsi qu'une manière de rapporter les problèmes avec des sommes multiples à des sommes simples.

1.3.3 Le problème de transport avec coûts fixes (FCTP)

Parmi les variantes du TP notables se trouve le *Fixed-Charge Transportation Problem*, dénoté par FCTP. Ce problème est basé sur le TP et intègre un coût fixe sur chaque chemin emprunté, pour modéliser par exemple le coût de mobilisation d'un véhicule. Ce problème a été introduit par [Balinski, 1961] et le modèle est donné ci-après, où B_{ij} est un coût fixe d'expédition sur un chemin de i vers j et $M_{ij} = \min(q_i, d_j)$:

$$\textbf{(FCTP)} \quad \min \sum_{i\in I}\sum_{j\in J} A_{ij}x_{ij} + B_{ij}y_{ij} \tag{1.15}$$

$$\text{s.c.} \sum_{i\in I} x_{ij} = d_j \qquad \forall j \in J \tag{1.16}$$

$$\sum_{j\in J} x_{ij} = q_i \qquad \forall i \in I \tag{1.17}$$

$$x_{ij} \leq y_{ij}M_{ij} \qquad \forall i \in I, j \in J \tag{1.18}$$

$$x_{ij} \geq 0 \qquad \forall i \in I, j \in J \tag{1.19}$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \qquad \forall i \in I, j \in J \tag{1.20}$$

Les variables binaires y_{ij} (1.20) valent 1 si un coût fixe doit être payé sur le chemin de i vers j, 0 sinon. Un coût fixe doit être pris en compte dès qu'une quantité non nulle transite de i vers j, et ce sont les contraintes "bigM" définies en (1.18) qui s'en assurent. Enfin, l'objectif (1.15) intègre désormais des coûts fixes en plus des coûts variables.

Les travaux de [Klose, 2008] prouvent qu'une variante du FCTP ne considérant qu'une seule destination est NP-difficile, impliquant que le FCTP lui-même est NP-difficile.

Des méthodes avancées ont été développées pour résoudre exactement le FCTP, à l'image des travaux de [Roberti et al., 2015] puis [Mingozzi and Roberti, 2018] qui proposent une méthode de *Branch & Price*. Cela leur permet de résoudre à l'optimalité des instances jusqu'à 120 sources et 120 destinations, alors que les

solveurs de PLNE plafonnaient à 30 sources et 30 destinations.
L'introduction de cette variante du TP complexifie donc grandement la résolution mais permet de modéliser des critères d'optimisation plus variés. En particulier, nous verrons en Section 1.4 que les littératures du TP et du FCTP contiennent de nombreux articles intégrant les critères environnementaux.

1.3.4 Le problème de transport et les problèmes de remplissage

Nous trouvons dans la littérature des problèmes combinant FCTP et problème de remplissage. En plus de décider des chemins empruntés, ces problèmes visent à prendre des décisions sur la manière d'acheminer les marchandises tout en respectant la capacité des véhicules disponibles. [Liu et al., 2018a] considère un *Fixed Charge Multi-Item Solid Transportation Problem* avec plusieurs produits et plusieurs moyens de transport d'une capacité donnée et pouvant être utilisés sur chaque chemin. Le but est de déterminer, d'une part, le nombre de véhicules de chaque moyen de transport circulant sur chaque chemin, et, d'autre part, la quantité de chaque produit transportée sur chaque chemin par chaque véhicule, afin de minimiser les coûts de transport. Un ensemble de contraintes assure que la quantité affectée à chaque véhicule ne dépasse pas leur capacité. Les coûts à minimiser comprennent deux termes. D'un côté, on trouve des coûts variables proportionnels à la quantité de produit circulant sur chaque chemin et fonction du produit, du véhicule et de la paire source-destination considérés. D'un autre côté, on trouve des coûts fixes s'activant pour chaque véhicule utilisé sur un chemin donné, fonctions du véhicule et du chemin. Dans cet article, après formalisation du problème déterministe, les demandes, stocks, capacités des véhicules et coûts sont supposés incertains et un modèle de programmation sous contraintes de probabilités est proposé. Les auteurs montrent un exemple d'application de leur modèle sur une instance test mais ne fournissent pas de vrais résultats expérimentaux.

Plus récemment, [Flamand et al., 2023] a introduit le *Transportation Problem With Packing Constraints*. Le modèle est très proche de celui de [Liu et al., 2018a], mais les coûts variables correspondent à des coûts d'achats des produits auprès de chaque source. Les solveurs de PLNE CPLEX et GUROBI ayant du mal à résoudre des instances supérieures à 10 sources et 10 destinations, les auteurs proposent une recherche à voisinage variable. Ils introduisent un jeu d'instances générées aléatoirement comportant jusqu'à 25 sources et 60 destinations. Leur heuristique retourne en quelques minutes des solutions avec un gap inférieur à 5%.

Enfin, dans cette section, un large pan de la littérature du TP a été passé sous silence car trop éloigné du cadre de nos travaux, à l'image du *Bottleneck Transportation Problem* [Garfinkel and Rao, 1971], du *Step Fixed Charge Transportation Problem* [Kowalski and Lev, 2008] ou encore des TP avec paramètres incertains [Chanas et al., 1984]. Nous redirigeons les lecteurs et lectrices vers les articles de [Kacher and Singh, 2021] et [Malacký and Madleňák, 2023] pour une revue de littérature plus détaillée.

1.4 La prise en compte des enjeux environnementaux dans les chaînes logistiques

Cette thèse vise à intégrer les enjeux environnementaux au processus d'orchestration de commandes pour le commerce en ligne de détail, afin de répondre à une limite identifiée en Section 1.2. Pour cela, nous nous sommes inspirés de travaux ayant une dimension environnementale, issus du secteur plus large des chaînes logistiques. La revue de littérature que nous proposons ici ne se veut pas être exhaustive mais propose quelques travaux nous ayant permis d'appréhender la manière dont sont traités les enjeux environnementaux dans les études considérant tout ou partie d'une chaîne logistique. Notons que nous ne mentionnerons que brièvement les méthodologies et résultats des articles cités pour nous focaliser sur les critères environnementaux étudiés.

1.4.1 Les problèmes de conception des chaînes logistiques avec considérations environnementales

Plusieurs articles s'interrogent sur la manière de concevoir des chaînes logistiques tout en contrôlant les impacts environnementaux. Néanmoins, la prise en compte des enjeux environnementaux n'est pas universelle et différentes méthodes sont proposées. Tout d'abord, plusieurs travaux utilisent l'Eco-indicateur 99 introduit par [Goedkoop, 1999]. Cette méthode générale a été conçue pour évaluer les impacts environnementaux d'un produit sur l'ensemble de son cycle de vie. Pour cela, les auteurs introduisent une métrique nommée "Eco Indicator Points" et qui englobe trois enjeux : la santé humaine, la qualité des écosystèmes et la consommation des ressources. Un score est ensuite donné à chaque étape du cycle de vie d'un produit, avec par exemple la production d'un kilogramme de plastique valant 0.380 Eco-Points, ou le transport d'une tonne de marchandise sur un km par un poids lourd valant 0.034 Eco-Points. Comme le rapport le mentionne lui-même, cette unité n'a pas de sens en valeur absolue et permet seulement de faire des comparaisons entre différents modèles de production et de distribution. De plus, les tableaux de valeurs, bien que couvrant des domaines variés, sont peu détaillés. Pour la partie transport par exemple, on ne trouve le score associé qu'à un faible nombre de véhicules et pour un taux de remplissage donné.

[Pishvaee and Razmi, 2012] fait partie des articles utilisant l'Eco-indicateur 99 pour prendre en compte les enjeux environnementaux lors de la conception de chaînes logistiques, appliquée ici à une chaîne logistique d'aiguilles et seringues à usage unique. Les auteurs cherchent à positionner des centres de production d'aiguilles et de seringues de manière à minimiser les coûts économiques et environnementaux du système, ces derniers comprenant les impacts liés à la production, au transport et à la fin de vie. Ainsi, les travaux de [Goedkoop, 1999] servent à quantifier l'impact environnemental de la production d'une seringue, de son transport

depuis l'usine au client ou encore de l'incinération des produits non recyclables.

[Wang et al., 2011] considère un problème de conception de chaîne logistique multi-objectif. Les autrices cherchent à déterminer le nombre d'usines à ouvrir, leur localisation, leur type et leur capacité, de manière à répondre à la demande de clients, et ce, en considérant des coûts financiers et environnementaux. Les coûts environnementaux englobent les coûts liés à la production et au transport. D'une part, les coûts liés à la production dépendent de la quantité produite et des investissements financiers effectués pour rendre chaque usine plus vertueuse. D'autre part, les coûts liés au transport sont des coûts variables proportionnels à la distance et à la quantité expédiée sur chaque chemin usine-client, pondérés par un coefficient généré aléatoirement, dont la nature n'est pas précisée mais correspondant probablement à un facteur d'émission. Le modèle proposé est résolu à l'aide de `CPLEX` sur deux instances de tests et des fronts de Pareto sont tracés, mettant bien en valeur l'incompatibilité entre les deux objectifs considérés.

Enfin, [Sundarakani et al., 2010] modélise l'empreinte carbone d'une chaîne logistique en analysant les flux entrant et sortant de matière et d'énergie au niveau de chaque maillon de la chaîne (fournisseurs, usines, logistique, entrepôts). Les émissions carbone sont calculées à l'aide des équations d'Euler-Lagrange, provenant du domaine de la physique, et la résolution se fait par la résolution d'équations différentielles. La méthode est testée sur un exemple d'application d'une chaîne d'approvisionnement d'automobiles en Chine, et illustre que la majorité des émissions a lieu lors de la phase de production.

1.4.2 Des études comparant les impacts environnementaux du e-commerce et du commerce traditionnel

De nombreux travaux se sont attelés à déterminer quelle chaîne logistique était la plus vertueuse entre celle du e-commerce et celle du commerce traditionnel. À nouveau, la manière de mesurer l'empreinte carbone des deux systèmes diffère selon les études. Tout d'abord, [Van Loon et al., 2015] cherche à identifier les facteurs clés influençant l'empreinte environnementale du e-commerce. Pour cela, les auteurs réalisent une analyse de cycle de vie de plusieurs réseaux de distribution de biens de grande consommation au Royaume-Uni. Parmi les réseaux de distribution considérés se trouvent des commerçants uniquement présents en ligne, des commerçants traditionnels et différents commerçants omnicanaux. Un vaste périmètre de sources d'impacts environnementaux est établi : activités liées à la production, acheminement vers les lieux de stockage, fonctionnement et opérations des lieux de stockage, emballage, transport et manutention pour la livraison finale, déplacement du consommateur ou encore empreinte numérique.
Pour effectuer les calculs, le logiciel d'analyse de cycle de vie industriel SimaPro a été utilisé. Les résultats sont ensuite détaillés par mode de distribution et source d'impacts. Premièrement, d'après les scénarios considérés, on ne peut pas conclure à la supériorité d'un réseau de distribution par rapport aux autres d'un point de vue environnemental. Deuxièmement, l'importance relative des sources d'impacts

varie selon les scénarios, mais la partie transport est la source majoritaire dans la plupart des cas, suivie de l'emballage pour la livraison à domicile et des opérations en magasin pour le commerce traditionnel. Troisièmement, l'empreinte carbone par article diminue significativement quand la taille de la commande augmente grâce à des économies d'échelle, puis décroît plus lentement à partir de six ou sept articles dans le panier.

L'étude commandée par l'ADEME et le Ministère de la Transition Ecologique [CPV Associés et al., 2023] s'intéresse également à l'empreinte carbone des différents modes de distribution : e-commerce, commerce omnicanal et commerce traditionnel. De ce rapport a découlé le calculateur ECEL (Empreinte Commerce En Ligne) [3] permettant de calculer l'empreinte carbone d'une commande en ligne . Le périmètre des enjeux environnementaux considérés est le même que celui de [Van Loon et al., 2015], et la quantification de chaque source d'impacts se fait grâce à des formules simples et personnalisables, pour lesquelles des valeurs par défaut peuvent également être fournies. Les données numériques s'appuient sur la base Empreinte [4]. Cette base de donnée est la base publique officielle regroupant les valeurs de facteurs d'émissions de GES utilisés pour la comptabilité carbone des entreprises en France. Dans le rapport, différents scénarios pour chaque mode de distribution sont étudiés et évalués avec le calculateur. À nouveau, les conclusions ne permettent pas de trancher sur la domination écologique d'un mode de distribution par rapport aux autres, les résultats étant très dépendant des hypothèses considérées. En revanche, il semble ressortir une nouvelle fois que le transport et l'emballage sont les sources majoritaires d'impacts environnementaux du e-commerce.
Une version simplifiée du calculateur ECEL a finalement été proposée au grand public, disponible en ligne [5]. Cet outil permet de comparer les émissions de GES induites par différents modes de retrait des colis tout en personnalisant la distance et le moyen de transport jusqu'au point de retrait. Cela permet ainsi aux consommateurs et consommatrices de préférer le mode de retrait le moins émissif de GES.

Enfin, nous pouvons mentionner d'autres études plus anciennes qui cherchent à comparer les empreintes environnementales du e-commerce et du commerce traditionnel. Par exemple, les travaux de [Jaller and Pahwa, 2020] visent à analyser l'impact du e-commerce sur le comportement des consommateurs et consommatrices et à estimer leur impact sur l'environnement par rapport au commerce traditionnel. Pour cela, les auteurs estiment les distances parcourues par les véhicules de livraison du e-commerce ainsi que les distances parcourues par les véhicules des particuliers. En se basant sur les données de deux villes américaines, les résultats indiquent que le commerce purement en ligne permettrait une réduction d'un facteur 10 des kilomètres parcourus par rapport au commerce purement traditionnel. Ces résultats, se justifieraient par la massification des moyens de transport utilisés.

3. Le calculateur n'est pas accessible publiquement mais peut être obtenu sur demande.
4. https://base-empreinte.ademe.fr/
5. https://agirpourlatransition.ademe.fr/particuliers/evaluer-son-impact/calculer-impact-achats/calculez-impact-livraison-colis

Par ailleurs, [Borggren et al., 2011] cherche à comparer l'impact environnemental entre un livre distribué via le commerce traditionnel et un livre distribué via le commerce en ligne. Pour cela, les autrices effectuent une analyse de cycle de vie et les deux modes de commerce sont comparés sur la phase de distribution. Pour le commerce traditionnel, les coûts carbone correspondent aux : émissions du camion utilisé pour la livraison depuis le bureau d'impression vers la librairie ; émissions du véhicule utilisé par les consommateurs et consommatrices pour se rendre à la librairie ; émissions liées à la consommation d'énergie de la librairie, attribuées au livre proportionnellement à son prix par rapport au revenu de la librairie. Pour le e-commerce, les coûts carbone correspondent aux : émissions du camion utilisé pour la livraison depuis l'imprimerie vers l'entrepôt dédié au e-commerce ; émissions liées à la consommation d'énergie requise pour passer la commande en ligne, incluant un amortissement écologique des équipements utilisés. Dans le scénario étudié, l'impact carbone du livre distribué via le e-commerce serait environ 15% plus faible que le livre distribué via le commerce traditionnel.

1.4.3 D'autres mesures environnementales liées à la partie transport

Les émissions liées au transport sont celles qui suscitent le plus grand intérêt dans la littérature des chaînes logistiques. Les études essayant d'évaluer les performances environnementales du réseau de distribution du e-commerce semblent confirmer que c'est l'un des, voire le, pôle d'émissions majeur. Ainsi, nous proposons dans ce paragraphe un court focus sur la modélisation des émissions liées à la phase de transport.

Pour commencer, le transporteur français Colissimo décrit dans une notice méthodologique [Colissimo, 2023] la manière dont l'entreprise estime le coût carbone de chaque colis transitant sur son réseau. Pour cela, le chemin d'un colis est découpé en plusieurs tronçons : collecte et concentration des colis depuis le magasin vers le centre de tri ; transfert inter-centres de tri ; dispersion depuis le centre de tri vers un centre intermédiaire ; livraison depuis le centre intermédiaire vers la destination finale. En fonction des codes postaux d'entrée et de sortie du colis, le chemin emprunté est connu et unique. Ensuite, une formule générique issue de la norme européenne EN 17837 [Comité Européen de Normalisation, 2023] sert de référence pour calculer les émissions associées au colis sur chaque tronçon. Cette formule, donnée par l'équation (1.21), est fonction du volume du colis V et de la masse du colis m, ainsi que de différentes caractéristiques du tronçon, obtenues à partir de moyennes effectuées sur l'année passée : la distance parcourue D, un facteur d'émission du véhicule à vide E_v, un facteur d'émission du véhicule à plein E_p, le volume de colis transporté V_t et la capacité d'emport C.

$$E_{CO2_\text{tronçon}}(V, m) = D \times \left(\frac{E_v \times V}{V_t} + (E_p - E_v) \times \frac{m}{C_t}\right) \tag{1.21}$$

La formule (1.21) est construite de telle manière que les émissions à vide du véhicule sont réparties proportionnellement au volume du colis et que le surplus d'émissions

liées à la masse du colis lui soit directement affectée. En pratique, cette formule ne peut pas être appliquée sur chaque tronçon par manque de données et est donc simplifiée. Sur les tronçons de concentration et de livraison finale, la formule utilisée est donnée par l'équation (1.22), où E_{CO2m} est l'empreinte carbone moyenne d'un colis sur ces tronçons et V_tm le volume moyen d'un colis sur ce tronçon. Sur le tronçon de dispersion, la formule utilisée est donnée par l'équation (1.23) où D est la distance parcourue par le colis et D_tm la distance moyenne parcourue par un colis en phase de dispersion.

$$E_{CO2_\text{concentration/livraison}}(V) = E_{CO2m} \times \frac{V}{V_{tm}} \tag{1.22}$$

$$E_{CO2_\text{dispersion}}(V) = E_{CO2m} \times \frac{V}{V_{tm}} \times \frac{D}{D_{tm}} \tag{1.23}$$

En définitive, la formule résultante retourne la quantité d'eqCO_2 émise par un colis en fonction de son volume, son poids et ses codes postaux d'entrée et de sortie. De plus, un coût unitaire par colis est ajouté pour prendre en compte les émissions des autres activités se rapportant à la gestion des colis : les émissions liées à l'exploitation des infrastructures du transporteur, les émissions liées à l'utilisation des centres de données et les émissions liées aux trajets professionnels. Pour cela, les émissions annuelles de ces différentes sources ont été regroupées puis divisées par le nombre de colis annuel.

Le modèle de [Barth et al., 2005] propose une autre formule permettant de calculer les émissions de GES d'un véhicule. Ce modèle s'appuie sur un bilan des forces qui s'appliquent sur le véhicule, et la formule résultante dépend notamment de la distance, de la vitesse, de la masse transportée, des caractéristiques du véhicule ou encore de la pente de la route. Cette formule est utilisée dans le *Pollution Routing Problem* (PRP) introduit par [Bektaş and Laporte, 2011], une variante du bien connu problème de tournées de véhicules, dans lequel on cherche à déterminer les trajets que doivent emprunter une flotte de véhicules de manière à livrer un ensemble de clients tout en minimisant un coût donné. Dans le PRP, l'objectif est de minimiser conjointement la durée des trajets et les émissions carbone des véhicules, calculées donc à partir du modèle de [Barth et al., 2005]. Néanmoins, le PRP n'en reste pas moins un problème mono-objectif puisque les deux objectifs sont traduits en termes financiers : la durée des tournées est pondérée par le salaire des chauffeurs et les émissions carbone sont pondérées par le coût économique d'une tonne de CO_2.

1.4.4 Les variantes multi-objectifs du TP à portée environnementale

La riche littérature du TP fournit plusieurs articles intégrant les enjeux environnementaux. Une majorité de ces articles traite des problèmes multi-objectifs, intégrant un ou plusieurs critères économiques. Dans leurs travaux, [Shojaie and Raoofpanah, 2018] considèrent un modèle de TP bi-objectif cherchant à minimiser les coûts fixes et variables de transport d'une part, et les émissions polluantes liées au transport d'autre part. Les émissions sont modélisées sous la forme de coûts fixes

sur chaque chemin et dépendent du type de véhicule sélectionné pour effectuer la livraison. Les demandes et les stocks sont supposés incertains, et deux méthodes heuristiques sont proposées pour la résolution, un recuit simulé et un algorithme génétique. Les fronts de Pareto issus de leurs expérimentations montrent que les critères environnementaux et économiques considérés évoluent dans des directions opposées.

L'article de [Midya et al., 2021] s'intéresse à un problème multi-objectif multi-échelons de `FCTP` avec demandes, stocks et coûts incertains. La chaîne d'approvisionnement intègre trois échelons : des usines qui expédient leurs stocks aux entrepôts, des entrepôts qui expédient aux magasins, puis les magasins qui expédient aux clients. Il s'agit de déterminer les flux de produits sur les trois niveaux ainsi que les véhicules devant circuler sur chaque chemin emprunté. La fonction objectif est une minimisation pondérée de trois sous-objectifs : les coûts de transport, les délais de livraison et les émissions CO_2 liées aux trajets des véhicules. Les émissions carbone sont cette fois-ci modélisées sous forme de coûts variables sur chaque chemin, dépendantes du véhicule et proportionnelles à la quantité de produit transportée sur ce chemin. Ce problème multi-objectif est transformé en problème mono-objectif de deux manières différentes et il est ensuite résolu à l'aide d'un solveur de PLNE. Un exemple applicatif est proposé sur une instance réelle d'un producteur d'engrais indien avec deux usines, trois entrepôts, trois magasins et quatre clients.

[Das et al., 2018] étudie un problème similaire à celui de [Midya et al., 2021], mais avec seulement deux échelons et deux objectifs : le profit et les émissions CO_2. Le premier échelon consiste à envoyer des véhicules vides depuis un dépôt vers des entrepôts et le deuxième échelon consiste à livrer les clients depuis les entrepôts avec les véhicules chargés. Les émissions CO_2 sont cette fois modélisées comme une combinaison de coûts fixes et de coûts variables. Les coûts fixes correspondent aux émissions à vide des véhicules circulant entre le dépôt et les entrepôts tandis que les coûts variables sont proportionnels aux quantités transportées sur chaque chemin entre les entrepôts et les clients. Enfin, les stocks, demandes et coûts sont supposés incertains. Les auteurs proposent deux méthodes pour contourner l'incertitude, combinées à un algorithme génétique pour l'optimisation multi-objectif. Les deux méthodes sont testées sur un cas applicatif et des résultats différents sont retournés : l'une favorise l'objectif environnemental et l'autre l'objectif économique. Le choix est donc laissé à l'opérateur de sélectionner l'une ou l'autre méthode en fonction de la priorité donnée à chaque objectif.

Ensuite, [Aktar et al., 2021] propose un `TP` multi-objectif pour des produits fragiles et parfois incompatibles entre eux. Sur chaque chemin, il faut choisir la quantité de produits à transporter, le véhicule utilisé et le trajet qui sera emprunté pour chaque chemin. Les objectifs considérés sont les coûts de transport, les délais de livraison et les émissions carbone liées au transport. Les émissions carbone sont modélisées comme dans l'article de [Das et al., 2018] avec des coûts fixes pour les émissions à vide et des coûts variables proportionnels à la quantité transportée. En revanche, l'article de [Aktar et al., 2021] détaille la formule utilisée pour obtenir les coefficients de la fonction objectif, consistant à calculer la consommation de

carburant en fonction du trajet et du véhicule puis à la convertir en émissions carbone. Des tests sont effectués sur un exemple réel provenant d'une application avec des marchés d'alimentation indiens. Des fronts de Pareto entre les trois objectifs sont tracés et montrent l'incompatibilité entre les différents objectifs. Notamment, la solution la plus économique induit une hausse d'environ 100% des émissions carbone, et à l'inverse, la solution la plus écologique entraîne une hausse de près de 100% des coûts économiques.

Enfin, le TP multi-objectif avec choix du véhicule et du trajet avec environnement incertain proposé par [Bind et al., 2024] cherche à minimiser trois objectifs : les coûts de transports, le temps de trajet et les émissions carbone. Le critère de minimisation des émissions carbone est modélisé par des coûts variables proportionnels à la quantité de produits transportée sur le trajet et est calculé à partir de la consommation de carburant de chaque véhicule, dépendant de l'efficacité moteur du véhicule et du trajet. Différentes méthodes sont utilisées pour la résolution multi-objectif et la prise en compte des incertitudes, et des résultats sont fournis sur un exemple applicatif.

En définitive, pour ces problèmes de TP multi-objectifs, les enjeux environnementaux sont considérés comme un critère secondaire, devant systématiquement être mis en regard avec les enjeux économiques ou de satisfaction client. Par ailleurs, bien que différentes fonctions de coûts environnementaux soient proposées, celles-ci sont centrées sur les émissions carbone des véhicules, un pôle d'émissions certes important, mais qui ne capte pas à lui seul l'ensemble des enjeux environnementaux de la logistique du e-commerce.

1.5 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons introduit le problème d'orchestration de commandes en ligne. Puis, une revue de littérature a été proposée, permettant de rendre compte des travaux qui ont été menés autour de cette problématique, mais également de constater qu'il existe un manque de considération des enjeux environnementaux pour l'orchestration de commandes. Nous avons ensuite fait le parallèle entre le problème d'orchestration de commandes et le problème académique de transport, avant de procéder à une revue de littérature des travaux dérivant du problème de transport qui se rapprochent de notre étude. Enfin, nous avons élargi notre champ de recherches pour recenser des méthodes de mesure des enjeux environnementaux à travers les chaînes logistiques, dans l'idée de les appliquer à notre problème d'orchestration. Les modélisations de mesures proposées sont variées et sont les résultats de choix, parfois dictés par la problématique étudiée, par les leviers d'actions à disposition ou encore par les données disponibles.
Désormais, nous allons présenter comment, à partir de ces recherches préliminaires, nous avons pu modéliser un problème d'orchestration de commandes qui intègre pleinement les enjeux environnementaux.

Première partie

Orchestration écologique de commandes : modélisation mathématique, données et analyses

Chapitre 2

Modélisations du problème d'orchestration écologique de commandes

Sommaire

2.1 Introduction . . . 33
2.2 Construction du critère environnemental pour l'orchestration de commandes . . . 34
2.2.1 Détail des coûts environnementaux de l'orchestration de commandes . . . 34
2.2.2 Synthèse des coûts environnementaux de l'orchestration de commandes . . . 39
2.3 Modélisation des contraintes d'empaquetage . . . 40
2.4 Modélisations du problème . . . 42
2.4.1 `UGTPED` : Unbreakable Green Transportation Problem for E-commerce Deliveries . . . 42
2.4.2 `GTPED` : Green Transportation Problem for E-commerce Deliveries . . . 44
2.4.3 `RGTPED` : Recomputed Green Transportation Problem for E-commerce Deliveries . . . 45
2.5 Complexité des modèles d'optimisation écologique de l'orchestration de commandes . . . 46
2.5.1 Complexité du `GTPED` et du `RGTPED` . . . 46
2.5.2 Complexité de l'`UGTPED` . . . 47
2.6 Synthèse . . . 47

2.1 Introduction

Les travaux de cette thèse visent à réduire l'impact environnemental du processus d'orchestration de commandes en ligne. La revue de littérature effectuée dans le Chapitre 1 nous a révélé que cette problématique n'avait pas encore été étudiée. Ainsi, nous proposons dans ce chapitre le premier modèle d'orchestration de commandes intégrant les enjeux environnementaux. Pour cela, nous construisons un critère permettant de mesurer la performance environnementale d'une orchestration. La définition de ce critère est présentée en Section 2.2 et s'appuie sur les

recherches présentées en Section 1.4. Plus précisément, nous commençons par décomposer l'impact environnemental d'une commande en ligne en différentes sources d'émissions. Puis, nous conservons pour notre étude celles sur lesquelles l'orchestration de commandes a un levier d'action. Ensuite, nous introduisons en Section 2.3 des contraintes d'empaquetage, nécessaires à l'intégration de notre critère environnemental au modèle d'orchestration de commandes. Les différents modèles d'orchestration écologique de commandes résultants sont exposés en Section 2.4. Enfin, la Section 2.5 présente les preuves de complexité des modèles exposés.

2.2 Construction du critère environnemental pour l'orchestration de commandes

Afin de proposer une orchestration de commandes respectueuse de l'environnement, nous cherchons à substituer l'objectif (1.1) du `TP` par une fonction traduisant le coût environnemental d'une orchestration de commandes. Dans notre étude, ce coût environnemental correspond aux émissions de GES, mesurées en eqCO_2. La Figure 2.1 synthétise les sources d'émissions de GES à prendre en compte sur le cycle de vie d'une commande en ligne d'après les recherches bibliographiques présentées en Section 1.4.

D'un côté, nous retrouvons les émissions liées au flux physique de marchandises induit par la commande. Ce flux est considéré à l'échelle de l'article depuis l'usine jusqu'au point de stock. Puis, lorsque un ou des articles sont expédiés pour une commande, ceux-ci sont rassemblés sous forme de colis et le flux est désormais considéré à l'échelle du colis. D'un autre côté, nous retrouvons les émissions liées aux activités numériques lors de la prise et la gestion de la commande.
Avant de détailler l'ensemble des coûts représentés sur le schéma, nous rappelons que les travaux de cette thèse sont menés en adoptant la posture et les moyens d'action d'un *OMS*. L'*OMS* sélectionne des sources d'expédition qui ont déjà été approvisionnées, pour expédier des produits finis vers des destinations qui ont déjà été choisies par les consommateurs et consommatrices, tout en se servant d'un transporteur extérieur. Ainsi, de nombreuses étapes du cycle de vie d'une commande sont indépendantes des décisions de l'*OMS*. Nous présentons toutefois chaque source de coûts environnementaux, et motivons celles qui seront gardées pour la définition du critère environnemental de l'orchestration de commandes. À la fin de chaque paragraphe, nous indiquons la manière dont sont modélisés ces coûts dans notre étude. Les valeurs utilisées pour calculer les coûts sont données en Section 3.5.

2.2.1 Détail des coûts environnementaux de l'orchestration de commandes

2.2.1.1 Coûts de production (CP)

Avant même de sortir de l'usine, chaque produit a déjà induit une part conséquente des émissions de GES dont il sera responsable sur l'ensemble de son cycle

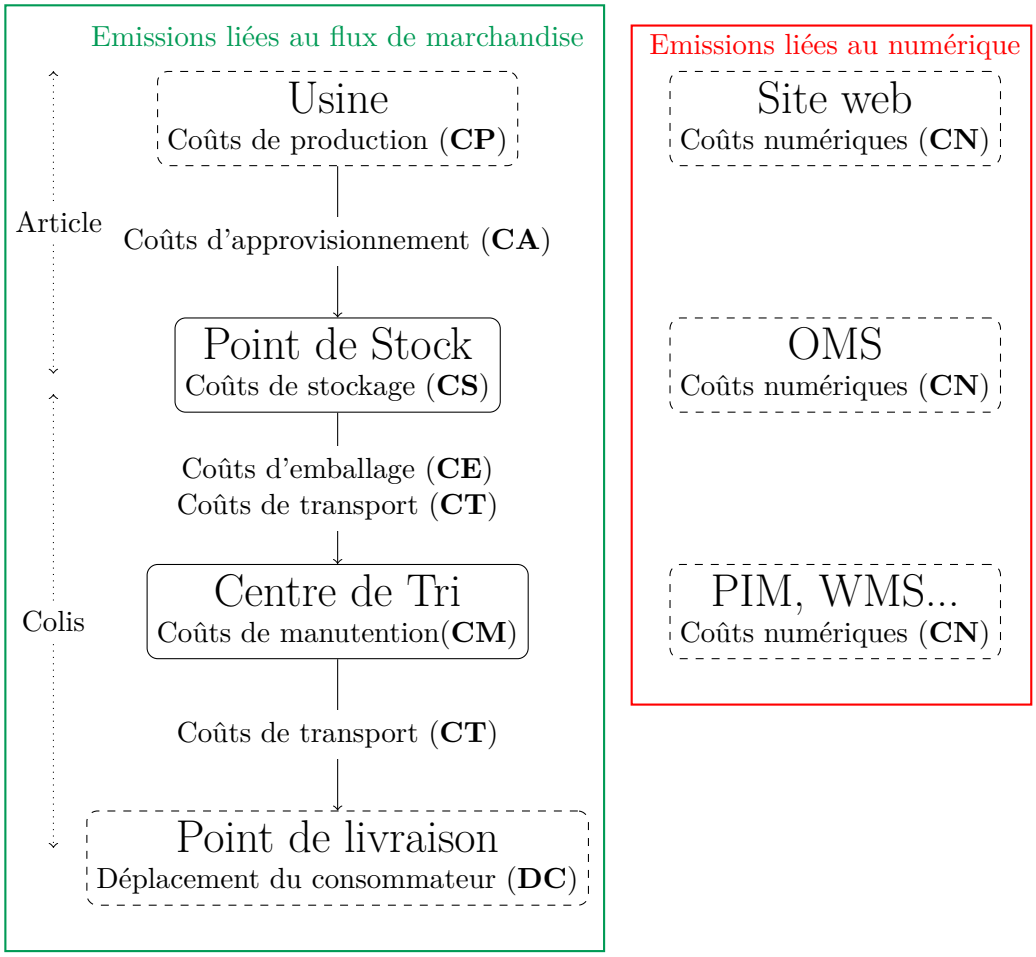

FIGURE 2.1 – Sources d'émissions de GES d'une commande en ligne. Les coûts sont des coûts environnementaux mesurés en geqCO_2.

de vie. Entre obtention et acheminement des matières premières, mise en forme ou encore assemblage, ce sont autant d'étapes émettrices nécessaires pour obtenir un produit fini. Les coûts de production peuvent également inclure les émissions qui seront induites par la gestion de sa fin de vie, parfois négative en cas de recyclage ou de valorisation. D'après l'étude de [Lhotellier et al., 2018], la production concentre une large majorité des émissions pour de nombreux produits : les équipements à forte composante électronique (télévisions, smartphones ou liseuse), l'habillement (jeans, manteau ou chaussures), le mobilier (canapé, matelas ou table) ou bien les équipements de sport (ballon, raquette de tennis ou sac de randonnée). La tendance est moins nette pour les équipements à faible composante électronique (par exemple lave-linge, congélateur ou lave-vaisselle) du fait de la forte contribution des émissions spécifiques à leur phase d'utilisation.
De par la posture qui est la notre, en tant qu'intermédiaires de produits finis, nous considérons que chaque exemplaire d'un même produit est identique et possède la même empreinte carbone. Ainsi, nous ne cherchons pas à modéliser plus en détail les émissions liées à la production.

Dans notre étude : Les CP ne sont pas intégrés au modèle d'optimisation.

2.2.1.2 Coûts d'approvisionnement (CA)

Lorsqu'un produit sort de l'usine, il doit être acheminé vers un point de stockage du commerçant. La stratégie de réapprovisionnement et de positionnement des stocks est une problématique complexe pour laquelle des études et des solutions logicielles dédiées ont été proposées. Avant d'atteindre son point de stock désigné, chaque produit transite à travers un réseau de transport et des lieux de stockage intermédiaires. Les émissions associées à l'approvisionnement sont ainsi propres à chaque produit et à chaque lieu de stockage final. Dans le cas de notre étude, nous considérons que tous les produits transitent via un entrepôt continental donné. Ce sont les émissions depuis cet entrepôt continental vers le point de stock de positionnement qui sont prises en compte.
Notons que l'orchestration de commandes n'impacte pas directement les émissions liées à l'approvisionnement. Néanmoins, en favorisant les points de stock pour lesquels le réapprovisionnement est le moins émetteur de GES, cela peut influencer les futures campagnes de réapprovisionnement et favoriser les points de stock les moins émetteurs sur la phase d'approvisionnement.

Dans notre étude : CA_{ps} représente le coût d'approvisionnement d'une unité de produit p se trouvant dans le point de stock s.

2.2.1.3 Coûts de stockage (CS)

Une fois arrivés dans un point de stock, les produits sont stockés en attendant d'être vendus. Ils induisent ainsi des consommations d'espace et d'énergie, émettrices de GES. A l'image de ce qu'a proposé [Borggren et al., 2011], une méthode classiquement utilisée pour calculer les coûts de stockage d'un article consiste à répartir les émissions du point de stock entre tous les articles stockés. La répartition peut se faire de différentes manières, sur une base financière par exemple, mais aussi sur une base spatiale ou temporelle. Dans le cadre de notre étude, nous considérons que les coûts de stockage sont propres à chaque produit et à chaque point de stock. Notons qu'à l'instar des coûts d'approvisionnement, l'orchestration de commandes n'a pas d'influence directe sur les coûts de stockage, mais peut influencer les futures campagnes de positionnement des stocks.

Dans notre étude : CS_{ps} représente le coût de stockage d'une unité de produit p au sein du point de stock s.

2.2.1.4 Coûts d'emballage (CE)

Afin de rassembler les articles d'une même commande sous forme de colis, les points de stock disposent d'un ensemble de types de boîtes $\mathcal{B}$ de dimensions et de

matériaux différents. Ce surplus d'emballage nécessaire à l'expédition des articles induit des émissions de par sa fabrication, son acheminement et son stockage, exactement de la même manière que les produits. Les émissions liées aux emballages sont majoritairement influencées par les dimensions et le matériau de chaque boîte. Ainsi, nous considérons dans notre étude que les coûts d'emballage dépendent du type de boîte $b \in \mathcal{B}$ utilisé. Notons qu'en cas de retrait de commande en magasin, si la commande est satisfaite avec le stock du magasin de retrait, le surplus d'emballage pour l'expédition n'est pas nécessaire et le coût d'emballage est supposé nul.

Dans notre étude : CE_b représente le coût de sélectionner une boîte de type b.

2.2.1.5 Coûts de transport (CT)

Lorsqu'une commande est prête à l'expédition, le colis est remis à un transporteur externe en charge de l'acheminement jusqu'à la destination finale. Le transport associé est générateur d'émissions de GES de par la circulation des véhicules. Comme exposé dans [Barth et al., 2005], les émissions dépendent du trajet emprunté, du véhicule utilisé, du chargement ou encore de la vitesse adoptée. L'*OMS* n'ayant pas la main sur le transport, une granularité fine pour modéliser ces coûts n'est pas indispensable dans le cadre de nos travaux. Puisque cette phase d'acheminement des colis est opérée par un transporteur, il nous a paru pertinent d'utiliser un modèle de calcul des émissions proposé par l'un d'eux. En l'occurrence, nous avons opté pour le modèle du transporteur Colissimo [Colissimo, 2023], présenté en Section 1.4.

Les émissions CO_2 dues au transport d'un colis de volume V et de masse m sur un chemin (sc) sont notées $E_{CO2}(s, c, V, m)$ et sont obtenues en agrégeant les formules utilisées pour chaque tronçon et données par l'équation (2.1). EV_{sc} est un facteur d'émission lié au volume du colis et détaillé par l'équation (2.2) ; EM_{sc} est un facteur d'émissions lié à la masse du colis et détaillé par l'équation (2.3). Les notations sont celles introduites pour la présentation de l'équation (1.21).

$$E_{CO2}(s, c, V, m) = EV_{sc} \times V + EM_{sc} \times m \tag{2.1}$$

$$\begin{aligned} EV_{sc} = & \frac{E_{CO2m_concentration_sc}}{V_{t_concentration_sc}} + D_{inter-hub_sc} \times \left(\frac{E_{v_sc}}{V_{t_inter-hub_sc}}\right) \\ & + \frac{E_{CO2m_dispersion_sc}}{V_{tm_dispersion_sc}} \times \frac{D_{dispersion_sc}}{D_{tm_dispersion_sc}} + \frac{E_{CO2m_livraison_sc}}{V_{t_livraison_sc}} \end{aligned} \tag{2.2}$$

$$EM_{sc} = D_{sc} \times \frac{(E_{p_sc} - E_{v_sc})}{C_{t_sc}} \tag{2.3}$$

Le volume V du colis est fixé par le choix de la boîte b, tandis que la masse dépend de la masse de la boîte et des produits p transportés. Ainsi, sur chaque chemin (sc), les coûts de transport peuvent être séparés en coûts de transport liés

au choix de la boîte (CTB_{bsc}) et en coûts de transport liés au choix des produits (CTP_{psc}). Notons qu'à l'instar des coûts d'emballage, les coûts de transport sont nuls pour une commande avec retrait en magasin satisfaite par le magasin de retrait.

Dans notre étude : $CT = CTP_{psc} + CTB_{bsc}$ où CTP_{psc} représente les coûts de transport d'un produit p expédié de s vers c et CTB_{bsc} représente les coûts de transport d'une boîte de type b expédiée de s vers c.

2.2.1.6 Coûts de manutention (CM)

Durant son transport, le colis transite par différentes plateformes de tri. Ces plateformes induisent des consommations d'espace et d'énergie, émettrices de GES. Dans le rapport de [Colissimo, 2023], l'impact des centres de tri est compris dans un coût unitaire regroupant d'autres sources d'émissions et affecté indifféremment du colis et du chemin emprunté. En pratique, selon le chemin que suivra le colis, ce sont différents centres de tri qui seront utilisés. Les coûts de manutention sont donc affectés à chaque colis et varient selon la paire source-destination.

Dans notre étude : CM_{sc} représente les coûts de manutention d'une boîte expédiée de s vers c.

2.2.1.7 Coûts liés au déplacement du consommateur (DC)

Lorsque la livraison s'effectue en point de retrait (retrait en magasin, point de retrait ou consigne), cela induit un déplacement des consommateurs et consommatrices. Le coût du déplacement dépend du moyen de transport utilisé et de la distance parcourue notamment. A l'image du calculateur en ligne ECEL faisant suite aux travaux de [CPV Associés et al., 2023] et mentionné en Section 1.4, demander aux consommateurs et consommatrices de préciser le mode de transport utilisé et la distance parcourue permet d'avoir une estimation des émissions liées au déplacement. Autrement, il serait possible de s'appuyer sur des statistiques exposant les habitudes de déplacement des consommateurs et consommatrices selon leur situation géographique, comme celles que l'on peut trouver dans le rapport de [Ministère de la Transition Ecologique, 2021].
L'*OMS* n'a pas le pouvoir de décider du lieu de livraison. Néanmoins, il serait envisageable d'intégrer le déplacement du consommateur afin de faire un retour aux consommateurs et consommatrices sur l'estimation du coût environnemental de chaque mode de livraison au moment de la sélection du mode de livraison, de manière à aiguiller vers un choix à moindre empreinte environnementale.

Dans notre étude : Les DC ne sont pas intégrés au modèle d'optimisation.

2.2.1.8 Coûts numériques (CN)

Les émissions du numérique imputables à une commande en ligne englobent toutes les émissions liées aux divers logiciels et serveurs utilisés pour assurer la prise de commande puis son acheminement jusqu'au client. Nous pouvons citer le site web du commerçant, l'*OMS*, les logiciels de gestion d'entrepôts et les systèmes de gestion des informations sur les produits par exemple. Certaines études essayent d'estimer le coût carbone de la commande en ligne à partir du temps de connexion moyen et de la quantité d'énergie ainsi sollicitée. A l'exception des émissions directes de l'*OMS*, l'orchestration de commandes n'a pas de levier d'actions significatif sur l'empreinte numérique des autres composants. Nous commenterons brièvement l'impact environnemental de différentes stratégies d'orchestration en Section 5.2 (page 86), mais nous ne cherchons pas à modéliser ces coûts numériques et à les intégrer à notre modèle d'orchestration.

Dans notre étude : Les CN ne sont pas intégrés au modèle d'optimisation.

2.2.2 Synthèse des coûts environnementaux de l'orchestration de commandes

Nous avons décrit les différentes sources d'émissions de GES durant une commande en ligne. Nous avons également identifié les sources d'émissions qu'il nous semble pertinent de considérer pour construire un critère environnemental pour l'orchestration de commandes. Le coût environnemental que nous intégrerons à nos modèles d'orchestration de commandes est donné par l'équation (2.4).

$$\sum_{s\in\mathcal{S}}\sum_{c\in\mathcal{C}}(\sum_{p\in\mathcal{P}}(\mathrm{CA}_{ps}+\mathrm{CS}_{ps}+\mathrm{CT}_{psc})+\sum_{b\in\mathcal{B}}(\mathrm{CE}_{b}+\mathrm{CT}_{bsc}+\mathrm{CM}_{sc})) \tag{2.4}$$

On observe tout d'abord que le coût total est une somme des coûts sur chaque chemin (sc). On remarque ensuite que la formule est composée de deux parties. L'une est liée à l'affectation des articles p aux points de stock s et contient les coûts d'approvisionnement, les coûts de stockage et une partie des coûts liés au transport. L'autre est liée à la sélection des boîtes b sur chaque chemin (sc) et contient les coûts d'emballage, les coûts de manutention et une partie des coûts de transport. En posant $P_{psc} = \mathrm{CA}_{ps} + \mathrm{CS}_{ps} + \mathrm{CTP}_{psc}$ les coûts relatifs aux produits et $B_{bsc} = \mathrm{CE}_{b} + \mathrm{CTB}_{bsc} + \mathrm{CM}_{sc}$ les coûts relatifs aux boîtes, l'équation (2.4) devient :

$$\sum_{s\in\mathcal{S}}\sum_{c\in\mathcal{C}}(\sum_{p\in\mathcal{P}}P_{psc}+\sum_{b\in\mathcal{B}}B_{bsc}) \tag{2.5}$$

Pour construire cette formule, nous avons introduit un ensemble de boîtes b. Cependant, cela pose une nouvelle problématique puisqu'il faut désormais lier la sélection des boîtes à la sélection des articles.

2.3 Modélisation des contraintes d'empaquetage

Le critère environnemental (2.5) que nous souhaitons intégrer au modèle de l'OP introduit une nouvelle prise de décision. En plus de sélectionner les sources qui expédient chaque article de chaque commande, il est nécessaire de déterminer les boîtes qui sont utilisées pour contenir les articles et former les colis, tout en minimisant le critère environnemental global. De plus, les boîtes sélectionnées sur chaque chemin doivent être de capacité suffisante pour contenir les articles expédiés. [Angelini and Carricato, 2026] étudie spécifiquement dans le cadre du e-commerce, comment organiser un ensemble d'articles pour les ranger dans une boîte de taille donnée. Le problème proposé est une variante du problème de *Bin-Packing* 3D, un problème connu pour être fortement NP-difficile [Martello et al., 2000]. Pour obtenir des solutions en un temps raisonnable, les auteurs développent une heuristique combinant un algorithme glouton et un réseau de neurones.

Dans notre cas, en plus d'assurer le rangement des articles dans les boîtes, il faut choisir la ou les boîtes à utiliser pour chaque commande, ce qui complexifie le problème par rapport à celui abordé par [Angelini and Carricato, 2026]. Dans nos travaux, nous choisissons de pallier la difficulté introduite par la sélection des boîtes en introduisant une simplification que nous justifions par deux arguments. Premièrement, la phase d'empaquetage est gérée par les agents en points de stock, hors du champ de compétences de l'*OMS*. Deuxièmement, nombre des commerçants clients de l'*OMS* que nous considérons sont du domaine de la mode, et vendent des produits souples (T-shirt, robes, pantalons...) pour lesquels l'arrangement précis au sein de la boîte n'est pas nécessaire. Par conséquent, nous nous contentons d'approcher le problème d'empaquetage en nous assurant que la capacité totale d'emport des boîtes sélectionnées est suffisante pour contenir les articles à expédier. La suite de cette section présente les deux modélisations retenues. Notons que, dans notre étude, nous supposons que la quantité de boîtes disponibles n'est pas une ressource limitante.

Contraintes d'empaquetage explicites par boîte

Dans un premier temps, nous proposons des contraintes d'empaquetage à l'échelle des boîtes. Plus précisément, nous identifions individuellement chaque boîte et les articles qui lui sont affectés pour assurer qu'il n'y a pas de dépassement de capacité. Pour cela, nous introduisons les ensembles $\mathcal{N}_{bsc}$ correspondant à l'ensemble des boîtes de type b disponibles sur le chemin (sc).
Soit V_b le volume d'une boîte b et v_p le volume d'un produit p. Pour éviter le bourrage des articles dans les boîtes, nous introduisons un coefficient de sécurité $\alpha \geq 1$ et nous limitons le volume disponible d'une boîte b à $\frac{V_b}{\alpha}$. Les contraintes d'empaquetage par boîtes sont données par l'équation (2.6), où n_p représente le nombre de produits p expédiés sur le chemin (sc), et $\mathcal{P}_{scbn}$ représente l'ensemble des produits p expédiés sur le chemin (sc) et affectés à la boîte numéro n de type b.

$$V_b \geq \alpha \sum_{p \in \mathcal{P}_{scbn}} n_p \times v_p \qquad \forall s \in \mathcal{S}, c \in \mathcal{C}, b \in \mathcal{B}, n \in \mathcal{N} \tag{2.6}$$

Pour chaque boîte de chaque type b, les contraintes (2.6) assurent bien que la capacité d'emport est suffisante pour les articles à transporter. Ces contraintes prennent en compte de manière simple le respect des volumes pour la composition des colis, et sont facilement intégrables au modèle de l'OP. Cependant, cette formulation introduit deux nouvelles dimensions au modèle de l'OP. En effet, pour chaque article de chaque commande affecté à un point de stock, il faut également préciser le type et le numéro de la boîte dans laquelle cet article va être transporté. Nous proposons dans la section suivante une relaxation consistant à considérer les contraintes d'empaquetage à l'échelle des chemins et non plus des boîtes.

Contraintes d'empaquetage agrégées par chemin

Le principe des contraintes d'empaquetage agrégées à l'échelle des chemins est d'assurer que sur chaque chemin (sc), le volume des boîtes sélectionnées est supérieur au volume des articles expédiés. Soit N_{bsc} le nombre de boîtes de type b sélectionnées sur le chemin (sc) et $\mathcal{P}_{sc}$ l'ensemble des produits p expédiés sur le chemin (sc). Les contraintes d'empaquetage par chemin sont données par l'équation (2.7).

$$\sum_{b \in \mathcal{B}} N_{bsc} \times V_b \geq \alpha \sum_{p \in \mathcal{P}_{sc}} n_p \times v_p \qquad \forall s \in \mathcal{S}, c \in \mathcal{C} \tag{2.7}$$

Cette formulation est une relaxation de (2.6) qui présente l'avantage d'introduire une dimension de moins au modèle. Cependant, les contraintes (2.7) utilisent une hypothèse forte, puisqu'elles peuvent entraîner le découpage d'objets entre différentes boîtes. Prenons un exemple simple pour illustrer ce problème de découpage d'articles.

Exemple : Considérons un seul type de boîte disponible, de volume $V_b = 3\text{L}$, un coefficient $\alpha = 1$ et une commande c de trois articles p de volume $v_p = 2\text{L}$. Les contraintes (2.7) autoriseraient une solution séparant les trois articles dans deux boîtes puisque $2 \times V_b \geq \alpha \times 3 \times v_p$. Si cette approximation peut avoir du sens pour certains produits comme le sable ou le ciment, la plupart des produits p sont insécables dans le commerce de détail. En effet, il n'est pas possible de séparer un pantalon entre deux colis différents, pas plus qu'un livre ou un ordinateur.

En définitive, les contraintes (2.6) sont plus proches du contexte opérationnel que les contraintes (2.7) mais complexifient davantage le modèle de l'OP. Par la suite, nous proposons un modèle d'orchestration pour chacune des deux contraintes d'empaquetage (contraintes (2.6) et (2.7)). Un troisième modèle est proposé, s'appuyant d'abord sur les contraintes d'empaquetage par chemin pour obtenir une première solution, pour laquelle une procédure de calcul d'empaquetage optimal est appliquée afin d'obtenir une solution respectant les contraintes par boîte.

2.4 Modélisations du problème

Nous avions vu en Section 1.1 comment modéliser le problème d'orchestration de commandes. Désormais, nous ajoutons le critère d'optimisation et les contraintes d'empaquetage présentés en Sections 2.2 et 2.3 respectivement, afin d'obtenir un modèle d'orchestration de commandes qui intègre la minimisation des coûts environnementaux. Le Tableau 2.1 synthétise les notations utilisées pour la présentation des modèles.

Notation	Signification
$\mathcal{C}$	Ensemble des commandes
$\mathcal{S}$	Ensemble des points de stock
$\mathcal{P}$	Ensemble des produits
$\mathcal{B}$	Ensemble des types de boîtes
$\mathcal{N}_{bsc}$	Ensemble des boîtes de type b disponibles au point de stock s pour la commande c
d_{pc}	Nombre d'articles p demandé par la commande c
q_{ps}	Stock en article p au point de stock s
v_p	Volume d'un article p
V_b	Volume d'une boîte de type b
α	Coefficient de sécurité sur le volume des articles
P_{psc}	Coûts liés aux articles pour un article p expédié depuis le point de stock s vers la destination de la commande c
B_{bsc}	Coûts liés aux colis pour une boîte de type b expédiée depuis le point de stock s vers la destination de la commande c

Tableau 2.1 – Notations utilisées pour la modélisation.

2.4.1 `UGTPED` : Unbreakable Green Transportation Problem for E-commerce Deliveries

Tout d'abord, nous présentons le modèle d'orchestration écologique de commandes basé sur les contraintes d'empaquetage par boîtes (contraintes (2.6)) et supposant des produits insécables. Ce modèle est appelé *Unbreakable Green Transportation Problem for E-commerce Deliveries*, dénoté par `UGTPED`, et est donné ci dessous, où x_{pscbn} est une variable entière (contraintes (2.12)) indiquant le nombre d'articles p envoyés depuis le point de stock s à la commande c dans la boîte de type b numéro n et y_{bnsc} est une variable binaire (contraintes (2.13)) indiquant si la boîte de type b numéro n a été sélectionnée sur le chemin (sc).

$$\textbf{(UGTPED)} \quad \min \; F_G = \sum_{s\in\mathcal{S}}\sum_{c\in\mathcal{C}}\sum_{b\in\mathcal{B}}\sum_{n\in\mathcal{N}bsc}\Big(\sum_{p\in\mathcal{P}} P_{psc}x_{pscbn} + B_{bsc}y_{bnsc}\Big) \tag{2.8}$$

$$\text{s.c.} \quad \sum_{s\in\mathcal{S}}\sum_{b\in\mathcal{B}}\sum_{n\in\mathcal{N}_{bsc}} x_{pscbn} = d_{pc} \qquad \forall p\in\mathcal{P}, c\in\mathcal{C} \tag{2.9}$$

$$\sum_{c\in\mathcal{C}}\sum_{b\in\mathcal{B}}\sum_{n\in\mathcal{N}_{bsc}} x_{pscbn} \le q_{ps} \qquad \forall p\in\mathcal{P}, \forall s\in\mathcal{S} \tag{2.10}$$

$$y_{bnsc}V_b - \alpha\sum_{p\in\mathcal{P}} x_{pscbn}v_p \ge 0 \qquad \forall s\in\mathcal{S}, c\in\mathcal{C}, b\in\mathcal{B}, n\in\mathcal{N}_{bsc} \tag{2.11}$$

$$x_{pscbn} \in \mathbb{N} \qquad \forall p\in\mathcal{P}, s\in\mathcal{S}, c\in\mathcal{C}, b\in\mathcal{B}, n\in\mathcal{N}_{bsc} \tag{2.12}$$

$$y_{bnsc} \in \{0,1\} \qquad \forall b\in\mathcal{B}, n\in\mathcal{N}_{bsc}, s\in\mathcal{S}, c\in\mathcal{C} \tag{2.13}$$

Les contraintes (2.9) assurent que chaque article p de chaque commande c est bien affecté à un point de stock et à une boîte. Les contraintes (2.10) assurent que l'orchestration n'entraîne pas de dépassement de stock pour chaque produit et chaque point de stock. Les contraintes (2.11) traduisent les contraintes d'empaquetage par boîtes et assurent que sur chaque chemin (sc), chaque boîte sélectionnée a un volume suffisant pour transporter les articles qui lui ont été affectés. L'objectif (2.8) minimise F_G, la fonction traduisant les coûts environnementaux de l'orchestration, décomposés en coûts liés à l'affectation des produits aux points de stock et en coûts liés au choix des boîtes.
Les variables x et y peuvent être bornées supérieurement. Premièrement, il ne peut pas y avoir plus d'articles p expédiés sur un chemin (sc) que ce qu'il y en a en stock chez s ni que ce qui a été commandé par c. Donc

$$\forall p,s,c,b,n, \qquad x_{pscbn} \le \min(q_{ps}, d_{pc}) \tag{2.14}$$

Deuxièmement, pour chaque chemin (sc), nous pouvons majorer la numérotation de chaque type de boîte b. En effet, on ne peut pas utiliser davantage de boîtes de type b que le nombre d'articles qui peuvent être expédiés par ce type de boîte sur ce chemin, que ce soit pour des raisons de demande, de stock ou de capacité. Donc,

$$\forall p,s,c,b,n, \quad n > \sum_{p'/\alpha v'_p \le V_b} \min(q_{p's}, d_{p'c}) \Rightarrow x_{pscbn} = 0 \tag{2.15}$$

Finalement, une boîte b numéro n n'a pas besoin d'être expédiée sur un chemin (sc) si aucun article ne peut lui être affecté. Donc, en notant $\overline{x}$ la borne supérieure d'une variable x,

$$\forall b,n,s,c, \quad \sum_{p\in\mathcal{P}} \overline{x}_{pscbn} = 0 \Rightarrow y_{bnsc} = 0 \tag{2.16}$$

Considérer les enjeux environnementaux dans l'orchestration de commandes modifie conséquemment le modèle original de l'OP. D'une part, deux indices, le type de boîte b et le numéro de la boîte n, viennent s'ajouter aux variables x pour spécifier

l'affectation aux boîtes. D'autre part, un nouvel ensemble de variables y est nécessaire pour modéliser la sélection des boîtes. Par ailleurs, un nouvel ensemble de contraintes est requis pour lier les variables x et y. Le modèle résultant de l'`UGTPED` se retrouve ainsi plus proche du `FCTP`, une variante NP-difficile de l'`OP`. Plus précisément, nous prouvons dans la Section 2.5 que le `FCTP` est un cas particulier de l'`UGTPED`, et que ce dernier est donc NP-difficile.
Par conséquent, l'intégration des enjeux environnementaux au problème d'orchestration de commandes complexifie grandement le modèle initial de l'`OP`. Nous proposons maintenant un modèle alternatif reposant sur la seconde contrainte d'empaquetage et pour lequel la complexification du modèle est moindre.

2.4.2 `GTPED` : Green Transportation Problem for E-commerce Deliveries

Nous supposons désormais que les produits dont nous disposons sont sécables et peuvent être répartis dans plusieurs boîtes (ex :café en vrac). Le modèle d'orchestration écologique de commandes basé sur les contraintes d'empaquetage par chemins (contraintes (2.7)) est appelé *Green Transportation Problem for E-commerce Deliveries*, dénoté par `GTPED`, et est donné ci dessous, où x_{psc} est une variable entière (contraintes (2.21)) indiquant le nombre d'articles p envoyés depuis le point de stock s à la commande c et y_{bnsc} est une variable entière (contraintes (2.22)) indiquant le nombre de boîtes de type b sélectionnées sur le chemin (sc).

$$\textbf{(GTPED)} \quad \min \ \hat{F_G} = \sum_{s\in\mathcal{S}}\sum_{c\in\mathcal{C}}(\sum_{p\in\mathcal{P}} P_{psc}x_{psc} + \sum_{b\in\mathcal{B}} B_{bsc}y_{bsc}) \tag{2.17}$$

$$\text{s.c.} \quad \sum_{s\in\mathcal{S}} x_{psc} = d_{pc} \qquad \forall p \in \mathcal{P}, c \in \mathcal{C} \tag{2.18}$$

$$\sum_{c\in\mathcal{C}} x_{pscbn} \leq q_{ps} \qquad \forall p \in \mathcal{P}, \forall s \in \mathcal{S} \tag{2.19}$$

$$\sum_{b\in\mathcal{B}} y_{bsc}V_b - \alpha \sum_{p\in\mathcal{P}} x_{psc}v_p \geq 0 \qquad \forall s \in \mathcal{S}, c \in \mathcal{C} \tag{2.20}$$

$$x_{psc} \in \mathbb{N} \qquad \forall p \in \mathcal{P}, s \in \mathcal{S}, c \in \mathcal{C} \tag{2.21}$$

$$y_{bsc} \in \mathbb{N} \qquad \forall b \in \mathcal{B}, s \in \mathcal{S}, c \in \mathcal{C} \tag{2.22}$$

Les contraintes (2.18) et (2.19) assurent le respect des demandes et des stocks. Les contraintes (2.20) traduisent les contraintes d'empaquetage par chemin et assurent que sur chaque chemin (sc), le volume total des boîtes sélectionnées est suffisant pour transporter les articles à expédier sur le chemin. L'objectif (2.17) minimise $\hat{F_G}$, la fonction traduisant les coûts environnementaux de l'orchestration et supposant les produits sécables, décomposés en coûts liés à l'affectation des produits aux points de stock et en coûts liés au choix des boîtes.
Des bornes supérieures peuvent être pré-calculées pour les variables x et y. Comme précédemment, il ne peut pas y avoir plus d'articles p expédiés sur un chemin (sc)

que ce qu'il y en a en stock chez s ni que ce qui a été commandé par c. Donc

$$\forall p, s, c, \quad x_{psc} \leq \min(q_{ps}, d_{pc}) \tag{2.23}$$

Ensuite, pour chaque chemin (sc), nous avons besoin d'au plus le volume de boîtes suffisant pour contenir l'ensemble des articles expédiables sur ce chemin. Ainsi nous pouvons définir un nombre maximum de chaque type de boîte b sur chaque chemin.

$$\forall s, c, b, n, \quad y_{bsc} \leq \lceil \frac{\alpha \sum_{p \in \mathcal{P}} \min(d_{pc}, q_{ps}) \cdot v_p}{V_b} \rceil \tag{2.24}$$

Comme pour l'`UGTPED`, de nouveaux ensembles de variables et de contraintes sont introduits, mais l'on ne compte cette fois qu'un seul indice ajouté aux variables x. De même, le `GTPED` est un cas particulier du `FCTP` et se trouve donc être NP-difficile (preuve à venir dans la Section 2.5). Néanmoins, avec un modèle plus souple et plus compact que l'`UGTPED`, la résolution devrait s'en trouver simplifiée. Par ailleurs, nous proposons un processus de re-calcul des boîtes optimales post-orchestration pour corriger le problème de sécabilité des produits.

2.4.3 `RGTPED` : Recomputed Green Transportation Problem for E-commerce Deliveries

Le modèle du `GTPED` permet d'obtenir une affectation valide de chaque article de chaque commande à un point de stock, mais pour la sélection des boîtes il autorise un même article à être séparé entre plusieurs boîtes. Pour pallier ce défaut sans complexifier le modèle, nous proposons le *Recomputed Green Transportation Problem for E-commerce Deliveries*, dénoté `RGTPED`. C'est une méthode à 2 phases qui consiste à résoudre le `GTPED` en supposant les produits sécables pour affecter les articles aux points de stock, puis à re-calculer les boîtes à utiliser étant donné cette affectation initiale en supposant les produits insécables. Cette deuxième phase est appelée *Optimal Package Recomputing* (`OPR`) et est effectuée pour chaque chemin (sc). En notant x^* la solution optimale retournée par le `GTPED` (avec x^*_{psc} le nombre de produits p expédiés depuis s vers c dans cette solution), le modèle mathématique de l'`OPR` sur un chemin (sc) est donné ci-après,

$$(\texttt{OPR}_{sc}(x^*)) \quad \min \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{n \in \mathcal{N}_{bsc}} B_{bsc} y_{bn} \tag{2.25}$$

$$\text{s.c} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{n \in \mathcal{N}_{bsc}} x_{pbn} = x^*_{psc} \qquad \forall p \in \mathcal{P} \tag{2.26}$$

$$y_{bn} V_b - \alpha \sum_{p \in \mathcal{P}} x_{pbn} v_p \geq 0 \qquad \forall b \in \mathcal{B}, n \in \mathcal{N} \tag{2.27}$$

$$x_{pbn} \in \mathbb{N} \qquad \forall p \in \mathcal{P}, b \in \mathcal{B}, n \in \mathcal{N} \tag{2.28}$$

$$y_{bn} \in \{0, 1\} \qquad \forall b \in \mathcal{B}, n \in \mathcal{N} \tag{2.29}$$

où x_{pbn} est une variable entière (contraintes (2.28)) correspondant au nombre d'articles p affectés à la boîte numéro n de type b et y_{bn} est une variable binaire indiquant si la boîte numéro n de type b est sélectionnée ou non. Les contraintes (2.26) assurent que chaque article p de la commande c expédié depuis le point de stock s a bien été affecté à une boîte. Les contraintes (2.27) s'assurent que le volume de chaque boîte n'est pas dépassé, et l'objectif (2.25) minimise les coûts environnementaux liés à la sélection des boîtes.
Le `RGTPED` se veut être un intermédiaire entre le `GTPED` et l'`UGTPED`. La solution retournée suppose l'insécabilité des articles, de même que l'`UGTPED`, mais s'appuie sur le modèle plus compact du `GTPED` combiné avec une méthode d'empaquetage post-orchestration dont le modèle est également relativement compact.

2.5 Complexité des modèles d'optimisation écologique de l'orchestration de commandes

Cette section présente les preuves de complexité du `GTPED`, du `RGTPED` et de l'`UGTPED`. Nous montrons que le `FCTP` peut être vu comme un cas particulier du `GTPED` ou de l'`UGTPED`. Puisque le `FCTP` est NP-difficile, l'`UGTPED`, le `GTPED` et le `RGTPED` sont également NP-difficiles.

2.5.1 Complexité du `GTPED` et du `RGTPED`

Montrons d'abord que le `GTPED` et le `RGTPED` sont NP-difficiles.

Théorème 1. *Le `GTPED` est NP-difficile. Ainsi, le `RGTPED` est NP-difficile également.*

Démonstration. Nous avons introduit le `FCTP` et son modèle en Section 1.3 et avons vu que ce problème était NP-difficile. Nous allons montrer que le `FCTP` peut être vu comme un cas particulier du `GTPED`, induisant ainsi la NP-difficulté de ce dernier.
Supposons que notre `GTPED` ne dispose que d'un seul type boîte $b^{'}$ et d'un seul produit $p^{'}$, soit $\mathcal{H}_1 : |\mathcal{B}| = 1$ et $\mathcal{H}_2 : |\mathcal{P}| = 1$. Dans ce cas, les contraintes de respect des demandes et des stocks du `GTPED` (contraintes (2.18) et (2.19)) deviennent équivalentes aux contraintes du `FCTP` (contraintes (1.16) et (1.17)).
Ensuite, supposons que la taille de la boîte $b^{'}$ soit de capacité $V_{b'}$ suffisante pour contenir chaque commande, soit $\mathcal{H}_3 : \forall c \in \mathcal{C}, V_{b'} \geq \alpha d_{p'c} v_{p'}$. Dans ce cas là, nous nous assurons que les variables y du `GTPED` sont inférieures ou égales à 1, autrement dit $y_{b'sc} \in \{0, 1\}$. Dans ce cas, l'objectif (2.17) du `GTPED` devient équivalent à l'objectif (1.15), avec les coûts relatifs aux produits $P_{p'sc}$ correspondant aux coûts variables c_{ij} et les coûts relatifs aux boîtes $B_{b'sc}$ correspondant aux coûts fixes f_{ij}.
De plus, en posant $\mathcal{H}_4 : M_{sc} = \frac{V_b^{'}}{\alpha v_p^{'} \min(d_{p'c}, q_{p's})}$, les contraintes d'empaquetage du `GTPED` (contraintes (2.20)) deviennent équivalentes aux contraintes "big M" du `FCTP` (contraintes (1.18)).
En conclusion, sous les hypothèses $\mathcal{H}_1, \mathcal{H}_2$, $\mathcal{H}_3$ et $\mathcal{H}_4$, le `GTPED` devient un `FCTP` avec

des variables x entières. Ainsi, le FCTP peut bien être vu comme un cas particulier du GTPED, rendant ce dernier NP-difficile.
Par ailleurs, de manière assez évidente, le RGTPED est aussi NP-difficile puisqu'il repose sur la résolution du GTPED. □

2.5.2 Complexité de l'UGTPED

En nous appuyant sur les résultats de la section précédente, nous pouvons maintenant montrer la complexité de l'UGTPED.

Théorème 2. *L'UGTPED est NP-difficile.*

Démonstration. La preuve repose sur un raisonnement similaire à celle exposée en Section 2.5.1 pour prouver que le GTPED était NP-difficile. Nous reprenons les hypothèses $\mathcal{H}_1 : |\mathcal{B}| = 1$, $\mathcal{H}_2 : |\mathcal{P}| = 1$, $\mathcal{H}_3 : \forall c \in \mathcal{C}, V_{b'} \geq \alpha d_{p'c} v_{p'}$ et $\mathcal{H}_4 : M_{sc} = \frac{V_b^{'}}{\alpha v_p^{'} \min(d_{p'c}, q_{p's})}$. L'hypothèse $\mathcal{H}_3$, signifiant que chaque commande peut être contenue dans la boite de type $b^{'}$, implique que $|\mathcal{N}_{b'sc}| = 1$. Ainsi, les contraintes et l'objectif de l'UGTPED deviennent équivalentes à celles du FCTP. En conclusion, sous les hypothèses $\mathcal{H}_1, \mathcal{H}_2$, $\mathcal{H}_3$ et $\mathcal{H}_4$, l'UGTPED devient un FCTP avec des variables x entières, et se retrouve donc être NP-difficile. □

2.6 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons détaillé la construction de trois modèles d'orchestration de commandes en ligne intégrant les enjeux environnementaux. Nous avons commencé par établir la fonction de mesure de la performance environnementale d'une orchestration de commandes. Pour cela nous avons introduit un ensemble de boîtes utilisables pour rassembler les articles sous forme de colis. Pour réaliser l'empaquetage et lier les décisions sur les articles aux décisions sur les boîtes, nous avons introduit deux contraintes d'empaquetage. L'une est à l'échelle de chaque boîte tandis que l'autre est à l'échelle de chaque chemin source-destination et suppose des produits sécables. Nous avons ensuite combiné notre critère environnemental et les contraintes d'empaquetage pour arriver à deux modèles d'orchestration écologique de commandes, l'UGTPED et le GTPED. Enfin, nous avons proposé un troisième modèle d'orchestration écologique, le RGTPED, s'appuyant sur le GTPED et une procédure de re-calcul des boîtes supposant l'insécabilité des produits.
Chacun de ces trois modèles permet ainsi d'orchestrer des commandes tout en minimisant les émissions de GES associées. Cependant, ils s'appuient sur des hypothèses différentes et peuvent mener à des solutions différentes. Puisque le GTPED est une relaxation de l'UGTPED et que le RGTPED fournit une solution de l'UGTPED sans garantie d'optimalité, nous avons la relation :

$$\hat{F}_G(\texttt{GTPED}) \leq F_G(\texttt{UGTPED}) \leq F_G(\texttt{RGTPED})$$

Par la suite, nous allons chercher à éprouver les performances de nos trois modèles, tant sur le plan des performances numériques que sur la qualité des solutions retournées. Pour cela, nous nous appuierons sur des instances réelles ainsi que des instances réalistes dont nous détaillons la génération dans le prochain chapitre.

Chapitre 3

Génération d'instances réalistes grâce à des indicateurs de caractérisation

Sommaire

3.1 Introduction . . . 49
3.2 Des indicateurs pour caractériser les instances de l'OP . . . 50
3.2.1 Indicateurs pour caractériser la demande . . . 50
3.2.2 Indicateurs pour caractériser les stocks . . . 52
3.3 Amélioration de la décomposition des instances en composantes connexes indépendantes . . . 54
3.4 Les indicateurs de caractérisation à travers des données industrielles . . . 55
3.4.1 Taille des instances industrielles . . . 55
3.4.2 Typologie de la demande des données industrielles . . . 57
3.4.3 Réseau de distribution et stocks des données industrielles . . . 60
3.5 Génération d'instances réalistes à partir des indicateurs de caractérisation et des données industrielles . . . 62
3.5.1 Création des commandes et des stocks . . . 63
3.5.2 Génération des données propres à l'orchestration écologique de commandes . . . 64
3.6 Synthèse . . . 65

3.1 Introduction

Ce chapitre vise à présenter les jeux de données que nous utiliserons pour évaluer les modèles de l'UGTPED, du GTPED et du RGTPED.
D'une part, nous devons générer les produits disponibles, les lieux de stock et les lieux de livraison ainsi que les demandes et les stocks associés. Ces données sont des données standard que l'on retrouve dans l'OP et ses variantes. Néanmoins, les jeux de données de la littérature de l'OP proviennent majoritairement de partenaires industriels et ne sont pas partagés pour des raisons de confidentialité. Parmi les travaux que nous avons mentionnés en Section 1.2, c'est le cas de [Xu et al., 2009], [Mahar and Wright, 2009], [Acimovic and Graves, 2015], [Chen et al., 2024] et [Andrews et al., 2019]. En parallèle, certains travaux détaillent la génération de leurs propres instances mais sans s'appuyer sur des données industrielles.

Dans notre cas, nous avons accès à des données industrielles de demandes et de stocks via notre partenaire industriel. Toutefois, plutôt que de nous contenter de ces instances industrielles, nous choisissons de générer un ensemble d'instances réalistes, partageables à la communauté scientifique. Pour assurer le réalisme de nos instances, nous relevons dans la littérature un ensemble d'indicateurs permettant de caractériser des instances de l'OP. Ensuite, nous analysons nos données industrielles à travers ces indicateurs de caractérisation afin d'identifier ce qui définit une instance industrielle. Finalement, nous nous appuyons sur ces indicateurs pour générer un ensemble d'instances aux caractéristiques similaires à celles de nos instances industrielles. Ces deux jeux d'instances serviront ensuite à l'évaluation de nos modèles d'orchestration écologique en Chapitre 4.
D'autre part, nos modèles d'orchestration écologique de commandes requièrent des données qui leurs sont propres : boîtes, caractéristiques des produits et coûts environnementaux. Pour leur génération, nous nous appuyons largement sur le calculateur ECEL et les données numériques de la base Empreinte que nous avons présentés en Section 1.4 (page 23).

La suite de ce chapitre est organisée de la manière suivante : la Section 3.2 présente les indicateurs utilisés pour caractériser une instance d'OP. La Section 3.3 expose une amélioration de la décomposition des instances proposée par [Xu et al., 2009]. La Section 3.4 présente les instances industrielles à notre disposition et leurs caractéristiques. Enfin, la Section 3.5 présente la génération d'instances réalistes à partir des travaux des Sections 3.2, 3.3 et 3.4.

3.2 Des indicateurs pour caractériser les instances de l'OP

Pour identifier des indicateurs de caractérisation d'instances de l'OP, nous nous sommes appuyés sur la littérature. D'une part, des indicateurs sont utilisés par les études disposant de données industrielles afin d'en décrire les principales spécificités. D'autre part, des indicateurs sont utilisés par les études ne disposant pas de données industrielles afin de guider le processus de génération de leurs instances. En plus de la littérature de l'OP, nous avons également consulté une partie de la littérature du FCTP. En effet, nous avons établi en Section 2.4 la proximité des modèles du GTPED, de l'UGTPED et du FCTP. Nous avions certes noté des champs d'application différents, mais certains indicateurs peuvent être transférés à notre étude.
Dans la suite de cette section, nous présentons les indicateurs retenus.

3.2.1 Indicateurs pour caractériser la demande

Le nombre de commandes ($|\mathcal{C}|$)

Le nombre de commandes à orchestrer est l'une des informations essentielles pour caractériser une instance de l'OP. Pour les travaux disposant de données in-

dustrielles, les commandes sont souvent récupérées sur quelques jours, ce qui peut représenter des milliers voire des millions de commandes. Pour les travaux générant leurs propres données, c'est un paramètre qui permet de définir la taille des instances que l'on cherche à générer.

Le nombre de produits ($|\mathcal{P}|$)

Pour les travaux disposant de données industrielles, le nombre de produits découle des commandes qui ont été passées. Pour les travaux générant leurs propres données, c'est un paramètre à fixer.

Le nombre de commandes par produit (`#c/p`)

Cet indicateur intéresse particulièrement les travaux disposant de données industrielles, comme [Acimovic and Graves, 2015], [Chen et al., 2024] ou [Andrews et al., 2019]. Cela permet d'identifier les produits qui se vendent le mieux, mais aussi de jauger le risque d'avoir des conflits entre plusieurs commandes pour la distribution d'un même produit. Le nombre de commandes pour un produit p est défini par l'équation ci-après.

$$\texttt{\#c/p}_p = \sum_{c/d_{pc} \geq 1} 1$$

Nous définissons à l'échelle de l'instance le nombre moyen de commandes par produit `#c/p` :

$$\texttt{\#c/p} = \sum_{\mathcal{P}} \frac{\texttt{\#c/p}_p}{|\mathcal{P}|}$$

Le nombre d'articles par commandes (`#a/c`)

Cet indicateur est utilisé par [Jasin and Sinha, 2015] pour générer ses demandes. D'après les connaissances métiers de notre partenaire, c'est également une information qui intéresse les industriels. Le nombre d'articles pour une commande c est défini par l'équation ci-après.

$$\texttt{\#a/c}_c = \sum_{\mathcal{P}} d_{pc}$$

Nous définissons à l'échelle de l'instance le nombre moyen d'articles par commandes `#a/c` :

$$\texttt{\#a/c} = \sum_{\mathcal{C}} \frac{\texttt{\#a/c}_c}{|\mathcal{C}|}$$

Proportion de *Click & Collect* (%CkC)

Plusieurs travaux de la littérature (notamment [Mahar and Wright, 2009] ou [Alishah et al., 2017]) considèrent à la fois des commandes en ligne et des achats en magasin. Toutefois, à notre connaissance, il n'y a pas de distinction faite entre livraison à domicile et commandes en *Click & Collect*. Ainsi, nous introduisons l'indicateur %CkC qui traduit la proportion de commandes en *Click & Collect*.

3.2.2 Indicateurs pour caractériser les stocks

Le nombre de points de stock ($|\mathcal{S}|$)

À l'image du nombre de commandes, le nombre de points de stocks est un indicateur essentiel pour caractériser une instance de l'OP. Les travaux disposant de données industrielles utilisent le réseau de distribution de leur partenaire, avec un nombre de points de stock fixés. La plupart des réseaux de distribution contiennent de l'ordre de la dizaine de points de stock, à l'exception de [Andrews et al., 2019] qui en contient une centaine. Pour [Jasin and Sinha, 2015] ou [Flamand et al., 2023] qui génèrent leurs propres instances, le nombre de points de stock est un paramètre d'entrée qui peut varier.

Le nombre d'entrepôts ($|\mathcal{E}|$)

À l'exception de l'article de [Alishah et al., 2017], les travaux de la littérature ne considèrent qu'un type de points de stock. Or, nous verrons que les instances réelles à notre disposition distinguent les magasins des entrepôts. Nous introduisons donc l'ensemble $\mathcal{E}$ correspondant à un sous-ensemble de points de stock de type entrepôts.

La part de stock des entrepôts (%s-e)

Les entrepôts sont des points de stock spéciaux puisqu'ils ont une part de stocks plus élevée que celle des magasins. Nous introduisons donc un indicateur qui mesure la part des stocks des entrepôts par rapport aux stocks totaux. Cet indicateur pour un produit p est donné ci après :

$$\%\text{s-e}_p = \frac{\sum_{s \in \mathcal{E}} d_{ps}}{\sum_{\mathcal{S}} d_{ps}} \times 100$$

Nous pouvons définir à l'échelle de l'instance la proportion moyenne des stocks des entrepôts %s-e :

$$\%\text{s-e} = \sum_{\mathcal{P}} \frac{\%\text{s-e}_p}{|\mathcal{P}|}$$

La proportion de stocks non vides (%s-nv)

L'article de [Chen et al., 2024] regarde dans ses données industrielles la disponibilité de ses articles les plus vendus, mentionnant que c'est une grandeur qui influe

sur le processus d'orchestration. De plus, la proportion de stocks non vides est un paramètre d'entrée du programme *Netgen*, introduit par [Klingman et al., 1974]. Ce programme est utilisé pour générer des instances de problèmes de graphe, dont le TP fait partie. Ainsi, *Netgen* est à l'origine des instances de plusieurs articles du FCTP (notamment [Roberti et al., 2015], [Agarwal and Aneja, 2012] ou [Buson et al., 2014]). La proportion de stocks non vides pour un produit p est donnée ci après :

$$\texttt{\%s-nv}_p = \frac{\sum_{s/q_{ps} \geq 1} 1}{|\mathcal{S}|} \times 100$$

Nous pouvons définir à l'échelle de l'instance la proportion de stocks non vides moyenne %s-nv :

$$\texttt{\%s-nv} = \frac{\sum_{\mathcal{P}} \texttt{\%s-nv}_p}{|\mathcal{P}|}$$

Le majorant des stocks ($\overline{\texttt{stock}}$)

Dans le programme *Netgen*, la quantité maximale de stock d'un même produit dans un même point de stock fait partie des paramètres personnalisables en entrée. [Agarwal and Aneja, 2012] proposent des instances pour lesquelles les stocks sont générés aléatoirement d'après une loi uniforme $\mathcal{U}(1, B)$, où B est fixé. Les résultats révèlent que la valeur de B influe sur la difficulté de résolution de leurs instances de FCTP. Pour [Flamand et al., 2023], les stocks sont générés d'après une loi uniforme dont les bornes sont proportionnelles au nombre de commandes et inversement proportionnelles au nombre de points de stock.
Le majorant des stocks se définit comme suit :

$$\overline{\texttt{stock}} = \max_{\mathcal{P},\mathcal{S}} d_{ps}$$

La part de la demande par rapport aux stocks (%d/q)

Dans la littérature du TP et du FCTP, il est standard de rencontrer des problèmes équilibrés, où les stocks sont égaux à la demande. Pour la construction de ses instances d'OP, [Jasin and Sinha, 2015] génère également des stocks qui visent à être proches de la demande. [Klose, 2008] en revanche décide de générer sa demande de manière à ce que la demande totale représente une part donnée des stocks totaux. La part des articles commandés par rapport aux stocks pour un produit p est donnée ci-après :

$$\texttt{\%d/q}_p = \frac{\sum_{\mathcal{C}} d_{pc}}{\sum_{\mathcal{S}} q_{ps}} \times 100$$

Nous définissons à l'échelle de l'instance la part de stocks non vides moyenne %d/q :

$$\texttt{\%d/q} = \frac{\sum_{\mathcal{P}} \texttt{\%d/q}_p}{|\mathcal{P}|}$$

3.3 Amélioration de la décomposition des instances en composantes connexes indépendantes

La décomposition proposée par [Xu et al., 2009], exposée en Section 1.2.1 (page 13), permet de considérer une instance de l'OP comme un assemblage de sous-instances indépendantes. Nous nous appuierons sur ce constat pour la génération de nos instances et chaque instance que nous générerons représentera un groupe de commandes connexes du graphe "commandes-produits". De plus, nous proposons une amélioration de cette décomposition.
Pour cela, nous reprenons le graphe "commandes-produits" $\mathcal{G}$ dont nous retirons toutes les arêtes correspondant aux produits pour lesquels la demande totale est inférieure à la quantité de stock minimale non nulle. Mathématiquement parlant, nous définissons donc le graphe $\mathcal{G}^{'} = (\mathcal{S}^{'}, \mathcal{A}^{'})$ dont chaque nœud de $\mathcal{S}^{'}$ est une commande c et une arête de $\mathcal{A}^{'}$ est présente entre deux nœuds $(c,c^{'})$ s'il existe un produit p commandé par les deux commandes c et $c^{'}$ tel que $\sum_{c \in \mathcal{C}} d_{pc} > \min_{s \in \mathcal{S}/q_{ps} \geq 1} q_{ps}$. Autrement dit, si tous les points de stock ayant un stock non nul ont suffisamment de stock pour satisfaire l'intégralité de la demande, il n'y a plus de tension sur ce produit, et les décisions pour chaque commande peuvent se prendre indépendamment.

Exemple illustratif : reprenons l'exemple proposé en Figure 1.1 et supposons désormais que la demande pour l'article p_2 est de 1 pour la commande c_2, de 1 pour la commande c_3, et que le stock minimal de p_2 soit 4. Ainsi, le produit p_2 n'appartient pas à $\mathcal{A}^{'}$ et le graphe résultant est proposé en Figure 3.1 (b).

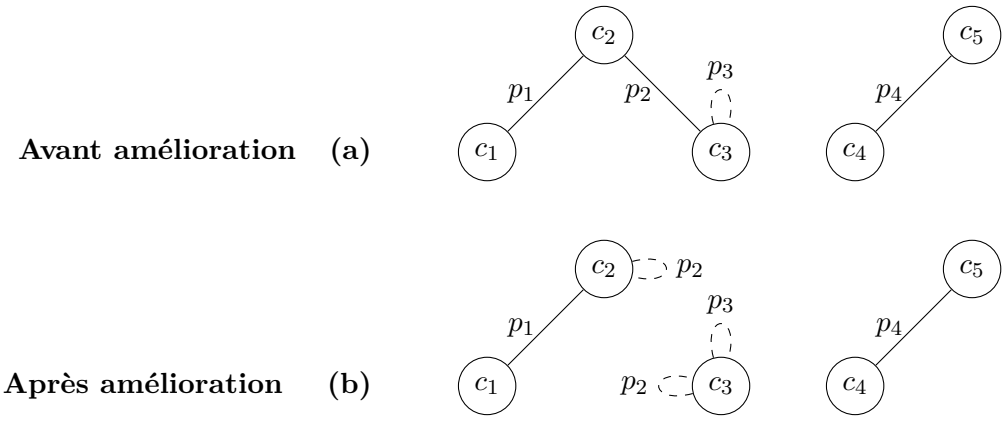

FIGURE 3.1 – Illustration de l'amélioration de la décomposition des instances. Ici, le produit p_2 a été exclu du graphe "commandes-produits" initial car l'on suppose que la demande totale en p_2 est inférieure au stock minimal de p_2.

Suite à l'amélioration de la décomposition, nous obtenons trois composantes connexes indépendantes : c_1-c_2, c_4-c_5 et c_3, qui forme une composante connexe de taille 1 et peut être orchestrée seule. Les arêtes en pointillés ne font pas partie du graphe $\mathcal{G}$ car les produits associés ne créent pas de conflits inter-commandes. Nous les représen-

tons pour rappeler qu'ils ont été commandés par les commandes des nœuds associés. Nous verrons dans la section suivante l'impact de cette amélioration à travers des instances industrielles (Tableau 3.2).

3.4 Les indicateurs de caractérisation à travers des données industrielles

Grâce à notre partenaire industriel, nous avons accès à des données que nous pouvons utiliser pour créer des instances d'`OP`. Plus précisément, nous avons accès à des données de commandes et de stocks pour divers commerçants de détail. À défaut de pouvoir les partager pour des raisons de confidentialité, nous les analysons à l'aide des indicateurs que nous avons présentés dans la Section 3.2 afin d'en retirer les caractéristiques essentielles. À partir de cette analyse, nous créerons des instances génériques, partageables et aussi réalistes que possible.
En nous appuyant sur les connaissances métiers des équipes de notre partenaire industriel, nous avons identifié cinq enseignes françaises de commerce spécialisé [1] non-alimentaire offrant une bonne représentativité des acteurs du secteur. Ces cinq enseignes sont dénotées par $\mathcal{R} = \{r_1, r_2, r_3, r_4, r_5\}$. Pour chacune de ces cinq enseignes, nous avons collecté quatre jours standards de commandes répartis entre septembre et novembre 2025. Nous obtenons ainsi un ensemble de 20 instances industrielles, dénoté `dataR`. Pour chacune des instances, nous avons également collecté en fin de journée les stocks des produits commandés. Enfin, afin de renforcer l'anonymat des enseignes, nous avons lissé quelques données, comme le nombre exact de commandes ou de points de stock.

3.4.1 Taille des instances industrielles

Le nombre de commandes des instances industrielles est donné dans le Tableau 3.1 tandis que le nombre de commandes de la plus grande composante connexe du graphe "commandes-produits" de ces mêmes instances est donné dans le Tableau 3.2.

Ces deux tableaux mettent en avant l'intérêt de la décomposition des instances et de l'amélioration que nous avons proposée. L'ampleur de l'impact est variable selon les jours et les enseignes mais dans une majorité des cas, les instances passent de plusieurs centaines de commandes à plusieurs sous-instances de quelques dizaines ou d'une centaine de commandes. Pour ce qui est de l'amélioration que nous avons proposée, l'impact varie également mais permet une réduction de la taille de la plus grande composante connexe pour 16 des 20 instances.

Pour comprendre plus en détails la composition des instances industrielles, la Figure 3.2 présente la répartition des tailles des composantes connexes pour l'ensemble des instances de `dataR`, toutes enseignes et tous jours confondus.

1. Le commerce spécialisé inclut des secteurs tels que l'habillement, la chaussure ou encore les biens culturels.

$\mathcal{R}$	jour 1	jour 2	jour 3	jour 4
r_1	130	100	60	100
r_2	1200	900	800	1000
r_3	600	500	500	900
r_4	150	500	500	800
r_5	500	500	450	600

TABLEAU 3.1 – Nombre de commandes des instances de `dataR`.

$\mathcal{R}$	jour 1	jour 2	jour 3	jour 4
r_1	9|8	11|10	4|4	7|4
r_2	158|144	94|37	28|21	85|82
r_3	186|178	156|155	176|168	420|418
r_4	3|3	5|5	5|5	29|26
r_5	108|97	125|123	59|37	235|232

TABLEAU 3.2 – Nombre de commandes de la plus grande composante connexe du graphe "commandes-produits" des instances de `dataR`, sans|avec l'amélioration proposée en Section 3.3.

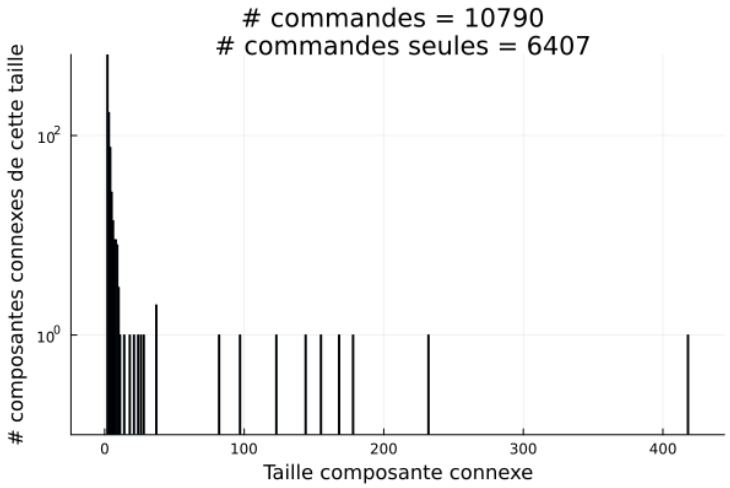

FIGURE 3.2 – Répartition des composantes connexes pour toutes les instances de $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$.

Tout d'abord, sur les 10790 commandes de nos instances, près de 60% d'entre elles sont seules dans leur composante connexe et peuvent être orchestrées individuellement. Ensuite, nous observons que des centaines de composantes connexes sont d'une taille inférieure à la dizaine de commandes. Enfin, nous retrouvons quelques composantes connexes de l'ordre d'une dizaine à une trentaine de commandes, et quelques composantes connexes de l'ordre d'une ou plusieurs centaines de commandes. L'Annexe A.1 fournit la répartition détaillée des composantes connexes pour chaque enseigne et pour chaque jour.
Ces graphiques synthétisent ce qu'avait montré [Xu et al., 2009] : une instance est composée d'un grand nombre de composantes connexes de petite taille voire unitaire et d'une composante connexe de grande voire très grande taille. Cette répartition est particulièrement marquée pour les enseignes r_2, r_3 et r_5, où l'on observe des composantes connexes comportant jusqu'à plusieurs centaines de commandes.

3.4.2 Typologie de la demande des données industrielles

Nombre de commandes ($|\mathcal{C}|$) et nombre de produits ($|\mathcal{P}|$)

Tout d'abord, les Figures 3.3 et 3.4 affichent le nombre de commandes et le nombre de produits pour chaque instance de `dataR` et pour leur plus grande composante connexe.

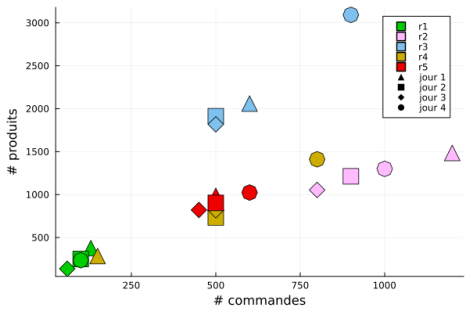

FIGURE 3.3 – Nombre de produits en fonction du nombre de commandes pour les instances de `dataR`.

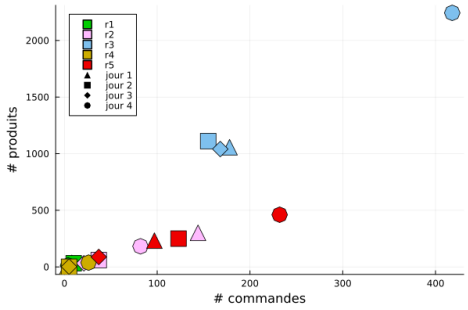

FIGURE 3.4 – Nombre de produits en fonction du nombre de commandes pour la plus grande composante connexe des instances de `dataR`.

Ces figures mettent en lumière des premières différences entre enseignes. Les instances de r_1 comptent une centaine de commandes, les instances de r_3, r_4 et r_5 plusieurs centaines de commandes tandis que les instances de r_2 comptent plutôt de l'ordre du millier de commandes. La variabilité du nombre de commandes par jour est plus ou moins marquée, faible chez r_5 et forte chez r_4 notamment. Pour chaque enseigne, nous constatons une proportionnalité entre le nombre de produits différents commandés et le nombre de commandes. Nous avons 3 à 4 fois plus de produits différents que de commandes pour r_3, 2 à 3 fois plus pour r_1 entre 1 à 2 fois plus pour r_2, r_4 ou r_5. On observe un comportement similaire à l'échelle de la plus grande composante connexe, si ce n'est que pour l'enseigne r_3 le nombre de produits est cette fois 5 à 6 fois plus important que le nombre de commandes.

Nombre de commandes par produit (`#c/p`)

Le nombre moyen de commandes par produit est représenté en Figure 3.5 pour les instances de `dataR` et en Figure 3.6 pour leur plus grande composante connexe [2]. Tout d'abord, nous observons une tendance d'augmentation du nombre de commandes par produit lorsque le nombre de commandes augmente. Plus il y a de commandes, plus il est probable qu'un produit ait été commandé plusieurs fois. Nous observons également qu'à nombre de commandes comparable, certaines enseignes ont un nombre de commandes par produit plus élevé que d'autres, à l'image

2. Nous avons retiré les jour 2 et 3 de l'enseigne r_4 pour garder un graphique lisible. Leur nombre de commandes par produit est 5 et 4 respectivement. Ce sont deux composantes connexes composées de 5 et 4 commandes qui n'ont commandé qu'un seul produit, commun à chacune.

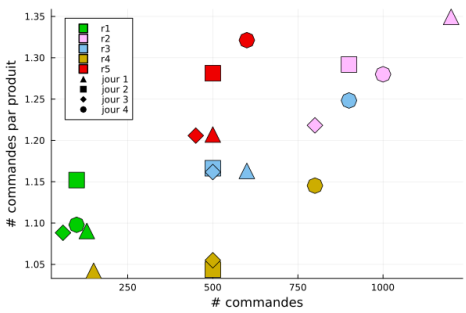

FIGURE 3.5 – Nombre moyen de commandes par produit en fonction du nombre de commandes pour les instances de `dataR`.

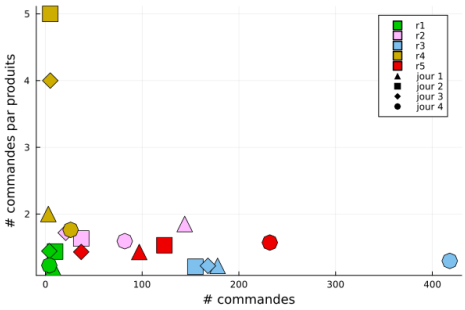

FIGURE 3.6 – Nombre moyen de commandes par produit en fonction du nombre de commandes pour la plus grande composante connexe des instances de `dataR`.

de r_5 par rapport à r_3 et r_4. A l'échelle de la plus grande composante connexe, `#c/p` augmente par rapport à l'instance entière. Ce comportement semble logique puisque c'est justement l'achat d'un même produit par plusieurs commandes qui crée la connexité. En termes d'interprétation, cet indicateur est un premier outil mesurant une tension inter-commandes. Par exemple, si chaque produit apparaît dans 100 commandes, le nombre moyen de commandes par produit sera de 100, et un arbitrage devra déterminer comment répartir les produits en stocks. En revanche, si chaque produit n'a été demandé que par une commande, le nombre moyen de commandes par produit est de 1, et il n'y a pas d'arbitrage à effectuer, donc pas de tension inter-commandes. En particulier, dans ce dernier cas, d'après la décomposition des instances introduite par [Xu et al., 2009] (présentée en Section 1.2.1), chaque composante connexe du graphe "commandes-produits" ne contient qu'une commande, et chaque commande peut donc être orchestrée indépendamment des autres sans perte d'optimalité.

Nombre d'articles par commande (`#a/c`)

Les Figures 3.7 et 3.8 représentent le nombre d'articles par commande en fonction du nombre de commandes pour les instances de `dataR` et pour leur plus grande composante connexe.
Nous observons que chaque enseigne occupe une zone bien définie du graphique. A l'échelle de l'instance complète (Figure 3.7), les enseignes r_2, r_4 et r_5 ont un nombre d'article par commande proche de 2, l'enseigne r_1 a un nombre d'article par commandes proche de 3 tandis que l'enseigne r_3 a un nombre d'articles par commande supérieur à 4. Pour la majorité des instances, `#a/c` augmente significativement entre l'instance complète et sa plus grande composante connexe (Figure 3.8). Assez naturellement, plus une commande a d'article et plus elle a de chance d'avoir un produit en commun avec d'autres commandes et donc de se lier à plusieurs commandes et former une grande composante connexe.

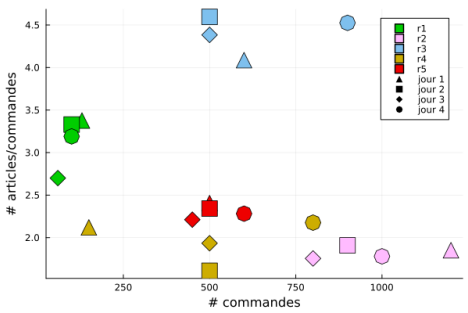

FIGURE 3.7 – Nombre moyen d'articles par commandes en fonction du nombre de commandes pour les instances de `dataR`.

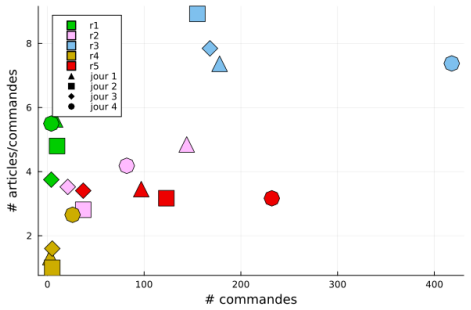

FIGURE 3.8 – Nombre moyen d'articles par commandes en fonction du nombre de commandes pour la plus grande composante connexe des instances de `dataR`.

Proportion de *Click & Collect* (`%CkC`)

Les Tableaux 3.3 et 3.4 présentent la proportion de commandes en *Click & Collect* parmi les commandes des instances de `dataR` et parmi leur plus grande composante connexe.

$\mathcal{R}$	jour 1	jour 2	jour 3	jour 4
r_1	33.8	33.0	26.7	36.0
r_2	64.6	63.0	62.7	58.2
r_3	60.3	55.6	55.2	58.6
r_4	12.7	76.8	55.0	0.0
r_5	36.6	24.4	33.1	29.7

TABLEAU 3.3 – Proportion de *Click & Collect* pour chaque instance de `dataR`.

$\mathcal{R}$	jour 1	jour 2	jour 3	jour 4
r_1	11.1	9.1	0.0	0.0
r_2	52.5	46.8	32.1	47.1
r_3	61.8	59.0	53.4	61.9
r_4	0.0	100.0	0.0	0.0
r_5	18.5	13.6	13.6	19.1

TABLEAU 3.4 – Proportion de *Click & Collect* pour la plus grande composante connexe des instances de `dataR`.

L'enseigne r_4 mise à part, `%CkC` est relativement stable selon les jours et le *Click & Collect* représente une part importante des commandes, autour d'un tiers pour r_1 et r_5 et même près de 60 % pour r_2 et r_3. En revanche, les valeurs de `%CkC` pour l'enseigne r_4 sont beaucoup plus fluctuantes. Le jour 4 sans une seule commande en *Click & Collect* correspond à un jour où les magasins de l'enseigne étaient fermés. Nous n'avons pas d'explication quant à la fluctuation sur les autres jours. À l'échelle de la plus grande composante connexe, à l'exception de r_3, `%CkC` diminue et parfois significativement. Il s'avère que les commandes en *Click & Collect* ont un nombre d'article par commande plus bas que la moyenne, ce qui expliquerait leur plus faible tendance à se trouver dans la plus grande composante connexe de leur instance.

3.4.3 Réseau de distribution et stocks des données industrielles

Dans cette section nous ne distinguons plus les résultats entre les instances complètes et leur plus grande composante connexe puisque nous n'avons pas relevé de différences significatives.

Nombre de points de stock ($|\mathcal{S}|$) et nombre d'entrepôts ($|\mathcal{E}|$)

Le Tableau 3.5 regroupe le nombre de points de stock et d'entrepôts de nos cinq enseignes.

$\mathcal{R}$	# points de stock ($\|\mathcal{S}\|$)	dont entrepôts ($\|\mathcal{E}\|$)
r_1	270	1
r_2	515	2
r_3	350	2
r_4	120	1
r_5	275	1

TABLEAU 3.5 – Nombre de points de stock et d'entrepôts des enseignes de $\mathcal{R}$.

Nous remarquons tout d'abord que l'ordre de grandeur du nombre de points de stock semble être la centaine pour les instances industrielles alors que la littérature considère souvent de l'ordre d'une dizaine de points de stock. Par ailleurs, alors qu'une majorité des travaux de la littérature ne différencie pas les types de points de stock, nous relevons que nos instances industrielles contiennent systématiquement un ou deux entrepôts.

Proportion de stocks des entrepôts (`%s-e`)

Le Tableau 3.6 affiche la proportion des stocks se trouvant dans les entrepôts pour les enseignes de $\mathcal{R}$. Nous avons calculé $\texttt{\%s-e}_p$ pour chaque produit p et présentons ici la moyenne (μ) et l'écart type (σ) pour chaque enseigne et chaque jour.

	jour 1		jour 2		jour 3		jour 4	
$\mathcal{R}$	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
r_1	25.5	27.0	34.1	29.1	36.5	26.4	33.4	26.9
r_2	64.6	33.3	50.2	35.3	48.2	36.7	62.8	34.0
r_3	32.2	26.7	33.7	26.5	33.1	27.6	33.9	28.3
r_4	17.8	29.0	22.2	30.7	17.5	28.5	15.8	27.5
r_5	34.4	30.7	32.2	28.8	31.4	30.4	30.2	29.3

TABLEAU 3.6 – Proportion des stocks des entrepôts dans les stocks totaux pour les instances de `dataR`.

La part des entrepôts dans les stocks totaux est élevée et représente près d'un cinquième des stocks pour r_4, près d'un tiers des stocks pour r_1, r_3, r_5, et plus de la moitié des stocks pour r_2. Nous observons une forte fluctuation selon les produits

puisque les écarts types sont relativement élevés. En revanche, la part des entrepôts est relativement constante en fonction des dates.

Proportion de stocks non vides (`%s-nv`)

Le Tableau 3.7 présente la proportion de stocks non vides pour les enseignes de $\mathcal{R}$ en reprenant la structure du Tableau 3.6.

	jour 1		jour 2		jour 3		jour 4	
$\mathcal{R}$	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
r_1	54.5	29.8	59.1	33.6	66.0	30.7	62.9	32.7
r_2	12.8	9.9	27.0	21.4	25.7	21.0	14.3	10.8
r_3	38.2	26.3	41.6	25.1	39.9	25.0	32.1	26.5
r_4	58.3	34.9	44.3	36.2	57.2	35.4	61.8	35.1
r_5	34.1	32.2	42.4	29.9	38.0	30.6	38.9	30.2

TABLEAU 3.7 – Proportion des points de stock avec des stocks non vides pour les instances de `dataR` (en %).

Globalement, nous observons que les produits ne sont présents que dans un nombre restreint de points de stock. Si pour r_1 et r_4 les produits sont présents dans environ la moitié des points de stock en moyenne, ce n'est pas le cas pour les autres enseignes, et particulièrement pour r_2, chez qui les produits ne sont présents que dans 12 à 25% des points de stock en moyenne. Cette dernière observation est cohérente avec l'observation faite précédemment indiquant que r_2 concentrait une grande partie de ses stocks dans ses entrepôts. À nouveau, nous notons des variations importantes de notre indicateur selon les produits et des variations faibles de la moyenne journalière.

Majorant des stocks ($\overline{\texttt{stock}}$)

Le Tableau 3.8 présente pour chaque instance le majorant des stocks parmi les magasins d'une part et parmi les entrepôts d'autre part. La structure est la même que celle du Tableau 3.6.

$\mathcal{R}$	jour 1	jour 2	jour 3	jour 4
r_1	33|6977	49|4055	13|4681	16|3997
r_2	30|9599	18|7098	32|7002	23|8808
r_3	100|8458	112|7182	234|7651	94|8942
r_4	359|576	579|607	1319|1948	1536|1901
r_5	8|1917	8|1720	22|2847	22|2870

TABLEAU 3.8 – Stock maximal parmi les magasins|les entrepôts pour chaque instance de `dataR`.

Comme attendu, les stocks maximaux dans les entrepôts sont largement supérieurs aux stocks maximaux dans les magasins. Pour rappel, les travaux de [Agarwal and Aneja, 2012] mentionnaient que plus cette valeur maximale de stock était élevée,

plus la résolution était difficile. Les valeurs considérées étaient alors 20 et 50. Pour nos instances industrielles, l'ordre de grandeur des stocks maximaux, ne se restreint pas à la dizaine, mais peut atteindre le millier.

Part de la demande par rapport aux stocks (`%d/q`)

Le Tableau 3.9 présente pour chaque instance la part de la demande sur les stocks totaux. La structure est la même que celle du Tableau 3.6.

	jour 1		jour 2		jour 3		jour 4	
$\mathcal{R}$	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
r_1	1.3	3.4	1.4	3.5	1.3	5.5	2.5	8.9
r_2	4.1	15.1	2.0	7.8	2.5	10.7	4.0	15.2
r_3	2.6	9.2	1.6	6.4	1.6	6.9	4.9	14.0
r_4	5.2	15.4	9.8	22.0	7.3	19.7	6.2	18.2
r_5	8.0	17.0	4.4	12.5	3.7	13.2	3.1	8.8

TABLEAU 3.9 – Part de la demande par rapport aux stocks pour les instances de `dataR` (en %).

Pour une instance équilibrée, que l'on trouve très majoritairement dans la littérature, la demande représenterait 100% des stocks. Or, nous voyons que les instances industrielles sont très loin de cet idéal. En effet, les demandes de nos instances ne représentent qu'1 à 10% des stocks totaux. Cela s'explique principalement par le fait que les demandes que nous considérons ne représentent qu'une journée de commandes, alors que les stocks sont utilisés pour satisfaire les commandes sur plusieurs mois. De plus, les stocks ne servent pas qu'à satisfaire les commandes en ligne que nous considérons, mais aussi les ventes physiques qui ont lieu en magasin. Cette réalité explique également que les quantités maximales de stock obtenues dans le Tableau 3.8 soient particulièrement élevées.

Maintenant que nous avons exposé les principales caractéristiques de nos instances industrielles, nous présentons la génération d'instances réalistes.

3.5 Génération d'instances réalistes à partir des indicateurs de caractérisation et des données industrielles

Nous présentons dans cette section les instances que nous avons générées pour évaluer nos modèles d'orchestration écologiques. Ces instances sont dénotées `dataG`. En Section 3.5.1, nous présentons la génération des données de commandes et de stocks, guidée par les indicateurs relevés en Section 3.2 et dont les valeurs sont basées sur la réalité industrielle. Un programme de génération d'instances, nommé `PGI`, a été développé et est détaillé en annexe B. Nous présentons en Section 3.5.2 la génération des données relatives aux boîtes, aux caractéristiques produits et coûts environnementaux, propres à nos modèles de `UGTPED`, `GTPED` et `RGTPED`.

3.5.1 Création des commandes et des stocks

Le Tableau 3.10 présente les plages de valeurs des indicateurs de caractérisation que nous avons sélectionnées afin de générer les commandes et les stocks de nos instances.

Indicateur	**Littérature**	**Instances industrielles - `dataR`**	**Instances générées - `dataG`**
$\|\mathcal{C}\|$ # commandes	118k [Andrews et al., 2019] c.c.[3] : {1,2,3,4,5-43,274k} [Xu et al., 2009] [200-800] [Chen et al., 2024]	[≈ 100 - ≈ 1000] c.c. : [1-≈100]	c.c. : {2,5,10, 50,100}
$\|\mathcal{P}\|$ # produits	129 [Andrews et al., 2019] ≈100k [Xu et al., 2009] [10-50] [Jasin and Sinha, 2015]	[≈100 - ≈1000]	non fixé. max 1800
$\|\mathcal{S}\|$ # points de stock	7 [Xu et al., 2009] 12 [Acimovic and Graves, 2015] 134 [Andrews et al., 2019]	{120,270,275, 350,515}	150
$\|\mathcal{E}\|$ # entrepôts	/	{1,2}	{0,1,2}
`#c/p` # commandes/produit	576 [Acimovic and Graves, 2015] 913 [Andrews et al., 2019]	[1,2]	non fixé
`#a/c` # articles/commandes	[1,7] [Jasin and Sinha, 2015]	[1.5,4.5] plus grandes c.c. : [2,8]	{2,4,6,8}
`%CkC` % de *Click & Collect*	/	[30,65]%	{0,33,66} %
`%s-e` % des stocks entrepôts	/	[15,65] %	30%
`%s-nv` % de stocks non vides	/	[14,63] %	non fixé
`stock` majorant des stocks	/	magasins : ≈ 10 entrepôts : ≈ 10000	non fixé
`%d/q` % demande par rapport aux stocks	≈ 100% [Jasin and Sinha, 2015]	[1,10]%	{1,10,50,100} %

TABLEAU 3.10 – Valeurs des indicateurs de caractérisation des instances de problèmes d'orchestration de commandes dans la littérature, dans les instances réelles et dans les instances générées.

Chaque ligne du tableau correspond à l'un des indicateurs de caractérisation.

— La colonne "Littérature" présente quelques valeurs que l'on peut trouver dans la littérature de l'`OP`. Nous ne donnons pas de valeurs d'indicateurs d'instances de `FCTP` puisque les champs d'applications sont différents de ceux de l'`OP`.

3. "c.c." est l'abréviation de composante(s) connexe(s).

— La colonne "Instances industrielles - `dataR`" affiche les valeurs des instances industrielles collectées.
— La colonne "Instances générées - `dataG`" expose les choix de valeurs que nous avons effectués pour les instances générées. Ces choix ont été motivés par les travaux de la littérature, l'analyse des données industrielles `dataR`, une volonté de se limiter à un nombre d'instances raisonnable et une volonté de conserver une part d'aléatoire dans la génération des instances.

Chaque instance générée est composée d'un groupe de commandes connexes du graphe "commandes-produits". Ainsi, la taille de nos instances a été fixée de manière à représenter les tailles de composantes connexes que l'on rencontre dans `dataR`. Ensuite, nous avons choisi de représenter différents types de commerçants, en faisant varier d'une part le nombre moyen d'articles par commandes `#a/c` entre 2 et 8, et d'autre part en faisant varier la proportion de *Click & Collect* entre 0, 33 et 66%. Le nombre de produits $|\mathcal{P}|$ et le nombre moyen de commandes par produits `#c/p` n'ont pas été fixés et découlent de la sélection aléatoire des produits effectuée par le `PGI`. Notons que pour la sélection aléatoire des produits, le nombre de produits disponibles a été limité à 1800 suite à des tests préliminaires.

Pour ce qui est du réseau de distribution, nous avons choisi de prendre un nombre de points de stock fixe égal à 150 et de faire varier le nombre d'entrepôts. Les instances peuvent avoir 0, 1 ou 2 entrepôts. Bien que les instances de `dataR` ont chacune 1 ou 2 entrepôts, nous avons choisi de générer des instances sans entrepôt pour en mesurer l'impact. Concernant la génération des stocks, c'est la part de la demande sur les stocks qui est l'indicateur clé. `%d/q` peut valoir 1 ou 10 % comme dans les instances réelles, 100% comme beaucoup d'instances de la littérature du `FCTP` notamment. Nous avons choisi d'ajouter `%d/q` = 50% afin d'avoir un intermédiaire entre 10 et 100%. A partir de la valeur de `%d/q`, le `PGI` effectue un tirage aléatoire pour la répartition des stocks, dans lequel les entrepôts, s'il y en a, ont un poids de 30%. La proportion de stocks non vides et le majorant des stocks ne sont pas fixés et sont déterminés par le `PGI`.

En définitive, nous avons 5 indicateurs dont nous fixons la valeur parmi plusieurs possibles et que nous considérons comme nos indicateurs de référence. Avec toutes les combinaisons possibles, nous obtenons 720 configurations d'instances. Pour chacune de ces 720 combinaisons d'indicateurs, nous générons 10 instances.

3.5.2 Génération des données propres à l'orchestration écologique de commandes

En plus des données de demandes et de stocks, nos modèles d'orchestration `UGTPED`, `GTPED` et `RGTPED` requièrent des données permettant la prise en compte des enjeux environnementaux : caractéristiques des boîtes, caractéristiques des produits et les différents coûts environnementaux. Le Tableau 3.11 regroupe la génération des caractéristiques des boîtes et des produits. Les données liées aux boîtes proviennent du transporteur français Colissimo. La génération du volume et de la masse des

produits a été faite aléatoirement de manière à ce que les produits aient les caractéristiques des produits du secteur de l'habillement.

Donnée	**Notation**	**Collecte / Calcul**
Types boîtes	$\mathcal{B}$	6 types de boîtes, les dimensions sont en annexe B
Volume boîte (m^3)	V_b	$V_b = \text{longueur}_b \cdot \text{largeur}_b \cdot \text{hauteur}_b$
Masse boîte (kg)	M_b	$M_b = 1.45 S_b \cdot 0.084/1000$ avec • S_b la surface d'une boîte b en cm^2 • $0.084\text{g}/cm^2$ la masse surfacique du carton ondulé
Volume produit (m^3)	v_p	$v_p \sim \mathcal{U}(10^{-4}, 10^{-2})$
Masse produit (kg)	m_p	$m_p = v_p \cdot \rho_p$ avec $\rho_p \sim \mathcal{U}(50, 200)$
Coefficient de sécurité	α	$\alpha = 1.05$

TABLEAU 3.11 – Génération des caractéristiques des boîtes et des produits pour nos modèles d'orchestration écologique de commandes.

Dans nos instances, l'ensemble de types de boîtes $\mathcal{B}$ contient 6 types de boîtes différents. Afin de pouvoir analyser l'influence du nombre de boîtes sur nos modèles, nous créons deux sous-ensembles $\mathcal{B}_2$ et $\mathcal{B}_4$ contenant respectivement 2 et 4 boîtes tels que $\mathcal{B}_2 \subset \mathcal{B}_4 \subset \mathcal{B}$. En définitive, nous obtenons un ensemble de 21600 instances, et le nombre de types de boîtes disponibles $|\mathcal{B}|$ est notre sixième indicateur de référence pour la définition des instances dont nous pouvons faire varier la valeur.

Le Tableau 3.12 regroupe le calcul des coûts environnementaux requis pour nos modèles d'orchestration écologique. Les formules et les valeurs utilisées pour le calcul des différents coûts environnementaux proviennent du calculateur ECEL, découlant des travaux de [CPV Associés et al., 2023] et présentés en Section 1.4.2 (page 24). Nous introduisons de l'aléatoire dans la génération des coûts environnementaux afin de rendre compte du fait que les valeurs issues de la littérature sont des valeurs moyennes. Enfin, notons qu'avec les valeurs considérées, les coefficients des coûts relatifs aux produits P_{psc} sont en moyenne environ 100 fois plus faibles que les coefficients des coûts relatifs aux boîtes B_{bsc} .

3.6 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons détaillé comment nous avons obtenu un ensemble d'instances réalistes pour le problème d'orchestration écologique de commandes.

Plutôt que de se contenter d'utiliser les instances industrielles à notre disposition sans pouvoir les partager par la suite, comme le font beaucoup de travaux de la littérature, nous avons généré des instances partageables s'appuyant sur une

4. La distance de Haversine permet de calculer la distance entre deux points sur une sphère à partir de leur latitude et leur longitude

5. Pour les instances sans entrepôt, nous considérons un entrepôt fictif à une localisation aléatoire qui permet d'approvisionner les magasins.

Donnée	**Notation**	**Collecte / Calcul**
Coûts d'approvisionnement (gCO_2eq)	CA_{ps}	$CA_{ps} = 3.9 \cdot dist_{es} \cdot m_p \cdot \delta_1$ avec • 3.9 gCO_2/t.km le coefficient d'émission d'un poids lourd 26t • $dist_{es}$ la distance de Haversine [4] entre s et l'entrepôt le plus proche [5] • $\delta_1 \sim \mathcal{N}(1, 0.1) \geq 0.05$
Coûts de stockage (gCO_2eq)	CS_{ps}	$CS_{ps} = v_p \cdot \delta_2$ avec $\delta_2 \sim \mathcal{N}(200, 50) \geq 5$ si s est un entrepôt, $\delta_2 \sim \mathcal{N}(350, 50) \geq 5$ sinon
Coûts d'emballage (gCO_2eq)	CE_b	$CE_b = M_b \cdot 390$ avec 390 gCO_2eq/kg le coefficient d'émission du carton ondulé
Coûts de manutention (gCO_2eq)	CM_{sc}	$CM_{sc} \sim \mathcal{N}(4, 1) \geq 1$
Coûts de transport liés aux produits (gCO_2eq)	CTP_{psc}	$CTP_{psc} = 1.40 \cdot dist_{sc} \cdot m_p \cdot (0.392 - 0.293) \cdot \frac{2670}{40000} \cdot \delta_3$ avec • 1.4 un facteur pour passer d'une distance à vol d'oiseau à une distance routière • $dist_{sc}$ la distance de Haversine entre s et la destination de c • 0.392 L/km et 0.293 L/km les consommations à plein et à vide d'un poids-lourd de 40t • 2670 gCO_2eq/L le facteur d'émission d'1L de gasoil • 40000 kg la capacité d'emport du poids lourd • $\delta_3 \sim \mathcal{N}(1, 0.2) \geq 0.3$
Coûts de transport liés aux boîtes (gCO_2eq)	CTB_{bsc}	$CTB_{bsc} = 1.40 \cdot dist_{sc} \cdot \delta_3((0.392 - 0.293) \cdot \frac{2670}{40000} \cdot M_b + 0.293 \cdot \frac{2670}{90} \cdot V_b)$ avec • les mêmes valeurs que pour CTP_{psc} • 90m^3 le volume d'emport d'un poids lourd de 40t

TABLEAU 3.12 – Génération des coûts environnementaux pour nos modèles d'orchestration écologique de commandes.

connaissance industrielle. [6] Pour que nos instances générées soient aussi réalistes que possible, nous avons analysé les instances industrielles à l'aide d'indicateurs de caractérisation que nous avons relevés dans la littérature. En définitive, nous faisons varier les valeurs de 6 indicateurs de référence pour générer 21600 instances, correspondant à 2160 combinaisons de ces indicateurs. Ces indicateurs sont le nombre de commandes ($|\mathcal{C}|$), le nombre d'entrepôts ($|\mathcal{E}|$), le nombre moyen d'articles par commandes (`#a/c`), la proportion de *Click* & *Collect* (`%CkC`), le ratio de la demande sur les stocks (`%d/q`) et le nombre de types de boîtes ($|\mathcal{B}|$). Nous pouvons désormais mener des campagnes de test afin d'évaluer comment se comportent nos modèles de `UGTPED`, `GTPED` et `RGTPED` sur les instances ainsi générées et les instances industrielles.

6. Les travaux sont en cours pour transférer les instances générées vers un format facilement exploitable et partageable. Une fois cette tâche accomplie et une notice d'utilisation rédigée, les instances `dataG` seront rendues disponibles en ligne.

Chapitre 4

Évaluation comparative des performances calculatoires et environnementales des modèles d'orchestration écologique

Sommaire

4.1 Introduction et configuration expérimentale 67
4.2 Les performances de calcul des modèles d'orchestration écologique 68
4.2.1 Performances calculatoires des modèles sur les instances industrielles 68
4.2.2 Performances calculatoires des modèles sur les instances réalistes générées 70
4.3 Les performances environnementales des modèles d'orchestration écologique 73
4.3.1 Performances environnementales des modèles sur les instances industrielles 73
4.3.2 Performances environnementales des modèles sur les instances réalistes générées 76
4.4 Synthèse 81

4.1 Introduction et configuration expérimentale

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des expériences que nous avons menées pour évaluer les performances de nos modèles de l'`UGTPED`, du `GTPED` et du `RGTPED`, présentés dans le Chapitre 2. Les expérimentations ont été menées sur les instances industrielles `dataR` ainsi que sur les instances générées `dataG` présentées au Chapitre 3. Les instances industrielles de `dataR` ont été décomposées par composantes connexes de commandes afin de prendre en compte le fait que certains sous-ensembles de commandes peuvent être traités indépendamment. L'ensemble des composantes obtenues forme un jeu de données dénoté $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$. Pour ces instances, nous avons généré les valeurs des données liées aux coûts environnementaux de la même manière que pour `dataG`, en utilisant les coordonnées géographiques

réelles des magasins, entrepôts et lieux de livraison, ainsi que les caractéristiques réelles des produits lorsque celles-ci étaient disponibles.
Les modèles testés ont été implémentés avec Julia 1.11 et le solveur d'optimisation `CPLEX` 22.1 a été utilisé pour la résolution. Les expériences numériques ont été exécutées sur une plateforme de calcul avec des processeurs de différentes générations. Étant donné la quantité de calculs à effectuer, nous n'avons pas pu nous restreindre à un seul type de processeur. Nous estimons raisonnable de penser qu'au vu de la quantité d'instances, les variations de performances des processeurs n'ont pas un impact majeur sur l'interprétation des résultats. Une RAM de 16GB et un temps de calcul de 1h ont été accordés à chaque instance. Dans la suite de ce chapitre, la Section 4.2 présente les performances de calcul de nos modèles puis la Section 4.3 en présente les performances environnementales. La Section 4.4 propose une synthèse et une mise en regard des analyses faites précédemment.

4.2 Les performances de calcul des modèles d'orchestration écologique

Dans cette section, nous nous intéressons aux performances de calcul des modèles d'orchestration écologique de commandes que nous avons proposés. Les temps de calcul pour l'`UGTPED` et le `GTPED` correspondent aux temps de résolution de leur PLNE respectif par le solveur. Pour le `RGTPED`, comportant deux phases, nous considérons que la deuxième phase de re-calcul de l'empaquetage optimal (`OPR`) peut être effectuée en parallèle pour chaque chemin où la première phase a affecté au moins un article. Ainsi, $\text{CPU}(\texttt{RGTPED}) = \text{CPU}(\texttt{GTPED}) + \max_{\mathcal{S},\mathcal{C}} \text{CPU}(\texttt{OPR}_{s,c})$.

4.2.1 Performances calculatoires des modèles sur les instances industrielles

Commençons par une analyse générale des performances calculatoires des modèles sur les instances industrielles. La Figure 4.1 indique pour nos trois modèles le pourcentage d'instances de $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$ résolues à l'optimum en fonction du temps de calcul. Chaque instance étant composée d'un nombre variable de commandes, nous représentons en Figure 4.2 le pourcentage de commandes orchestrées optimalement en fonction du temps de calcul. Le Tableau 4.1 apporte des informations chiffrées complémentaires.
Premièrement, nous observons qu'en seulement quelques secondes, une très large majorité des instances est résolue et une large majorité des commandes est orchestrée. Puisque plus de 99.9% des instances sont résolues à l'optimalité au bout d'une heure mais que près de 20% des commandes ne sont pas orchestrées optimalement au bout de cette durée, nous en déduisons que les instances non résolues sont majoritairement des instances contenant beaucoup de commandes. En nous focalisant sur les instances non résolues à l'optimalité au bout d'une heure, nous y retrouvons également quelques instances contenant peu de commandes mais au moins une com-

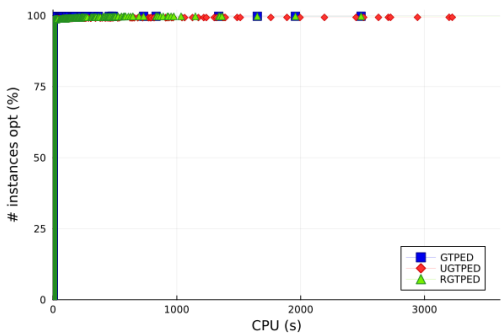

FIGURE 4.1 – Pourcentage d'instances résolues à l'optimum en fonction du temps de calcul pour $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$.

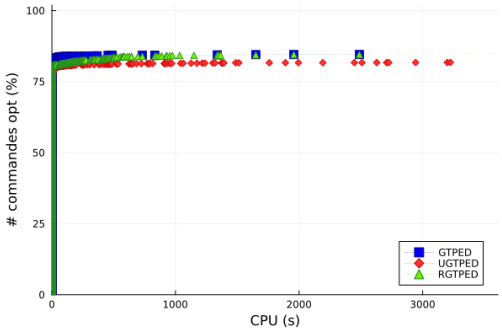

FIGURE 4.2 – Pourcentage de commandes orchestrées optimalement en fonction du temps de calcul pour $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$.

	UGTPED	GTPED	RGTPED
% instances *Out Of Memory*	0.14	0.04	0.04
% instances résolues à l'optimum en $\leq$ 1s	95.3	98.7	95.6
% instances résolues à l'optimum en $\leq$ 10s	98.2	99.5	98.6
% instances résolues à l'optimum en $\leq$ 1h	99.4	99.8	99.8
% commandes orchestrées optimalement en $\leq$ 1s	75.0	80.7	75.6
% commandes orchestrées optimalement en $\leq$ 10s	79.2	82.7	80.7
% commandes orchestrées optimalement en $\leq$ 1h	81.8	84.6	84.6
Gap maximal parmi les instances non résolues à l'optimum en $\leq$ 1h (%)	$\geq$ 100 [1]	19.5	- [2]
Gap moyen des instances non résolues à l'optimum en $\leq$ 1h (%)	$\geq$ 12.4	2.9	-

TABLEAU 4.1 – Performances calculatoires de l'UGTPED, GTPED et RGTPED sur les instances de $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$.

mande ayant un grand nombre d'articles (souvent supérieur à 15).

Deuxièmement, le pourcentage d'instances et de commandes orchestrées optimalement augmente légèrement plus rapidement pour le GTPED et le RGTPED que pour l'UGTPED. De plus, pour les quelques instances non résolues à l'optimum, le gap d'optimalité de l'UGTPED est significativement plus élevé que pour le GTPED. Bien que le gap d'optimalité soit seulement de quelques pourcents en moyenne, certaines instances de l'UGTPED sont encore très loin de l'optimum.

Troisièmement, les temps de résolution du GTPED et du RGTPED sont pratiquement identiques. En effet, à l'échelle d'une commande, la deuxième phase de re-calcul de l'empaquetage optimal du RGTPED est extrêmement rapide, inférieure à 0.3 secondes en moyenne sur les instances de dataR.

1. Le solveur retourne un gap compris entre 0 et 100% même lorsque celui-ci est supérieur à 100%. Nous avons relevé 1 instance dans ce cas pour $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$.
2. Nous ne définissons pas de gap pour le RGTPED qui est un problème résolu en deux phases.

4.2.2 Performances calculatoires des modèles sur les instances réalistes générées

Nous nous intéressons dans cette section aux performances de calcul des modèles sur les instances réalistes générées. Les Figures 4.3 et 4.4 et le Tableau 4.2 indiquent pour les instances générées `dataG` le pourcentage d'instances résolues optimalement et le nombre de commandes orchestrées optimalement en fonction du temps de calcul.

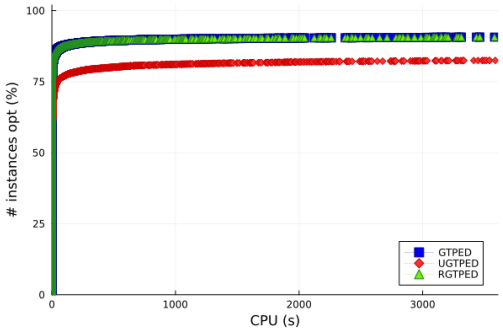

FIGURE 4.3 – Pourcentage d'instances résolues à l'optimum en fonction du temps de calcul pour `dataG`.

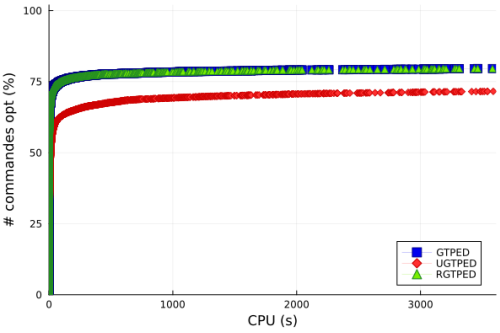

FIGURE 4.4 – Pourcentage de commandes orchestrées à l'optimum en fonction du temps de calcul pour `dataG`.

	UGTPED	GTPED	RGTPED
% instances *Out Of Memory*	1.6	0.2	0.2
% instances résolues à l'optimum en $\leq$ 1s	49.6	69.2	59.7
% instances résolues à l'optimum en $\leq$ 10s	68.4	82.6	82.5
% instances résolues à l'optimum en $\leq$ 1h	82.5	90.7	90.7
% commandes orchestrées optimalement en $\leq$ 1s	15.5	43.8	22.4
% commandes orchestrées optimalement en $\leq$ 10s	47.5	67.0	66.9
% commandes orchestrées optimalement en $\leq$ 1h	71.6	79.6	79.6
Gap maximal parmi les instances non résolues à l'optimum en $\leq$ 1h (%)	$\geq$ 100[3]	7.4	-
Gap moyen des instances non résolues à l'optimum en $\leq$ 1h (%)	$\geq$ 13.6	1.9	-

TABLEAU 4.2 – Performances calculatoires de l'`UGTPED`,`GTPED` et `RGTPED` sur les instances de `dataG`.

Nous y constatons que les remarques faites pour $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$ sont également valables pour les instances de `dataG` : il existe des instances de grande taille difficiles à résoudre, le modèle de l'`UGTPED` est légèrement plus difficile à résoudre que les autres et enfin les temps de calcul entre le `GTPED` et le `RGTPED` sont similaires.

3. Nous avons relevé 4 instances avec un gap supérieur à 100% pour `dataG`.

Alors que plus de 99% des instances de $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$ sont résolues à l'optimum au bout d'une heure par les trois modèles, seulement 82.5 % des instances de `dataG` sont résolues à l'optimum par l'`UGTPED` et 90.7% pour le `GTPED` et le `RGTPED`. Cette différence s'explique principalement par la proportion beaucoup plus importante d'instances de grande taille pour `dataG` que pour `dataR`.

Les Figures 4.5 à 4.10 montrent l'influence des six indicateurs de référence sur la résolution à l'optimum des instances de `dataG` pour l'`UGTPED`. Des figures similaires pour le `GTPED` et le `RGTPED` sont disponibles en Annexe C.1. Nous y constatons que l'influence globale des indicateurs est identique pour les trois modèles. La suite de cette section résume les constatations effectuées.

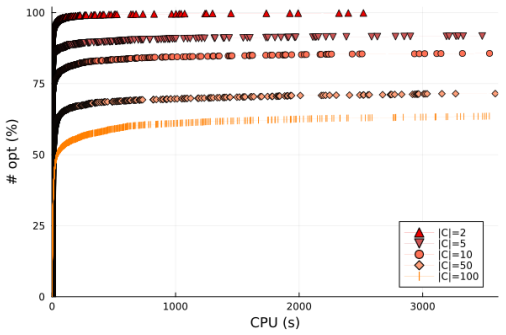

FIGURE 4.5 – Pourcentage d'instances résolues à l'optimum en fonction du temps de calcul par l'`UGTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de $|\mathcal{C}|$.

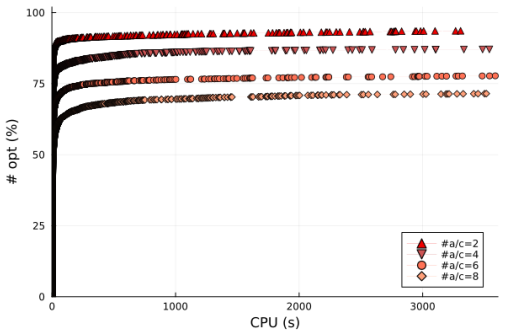

FIGURE 4.6 – Pourcentage d'instances résolues à l'optimum en fonction du temps de calcul par l'`UGTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de `#a/c`.

Nombre de commandes ($|\mathcal{C}|$) : la difficulté de résolution augmente avec le nombre de commandes (Figure 4.5). Cela explique bien les différences de pourcentage d'instances résolues à l'optimum au bout d'une heure entre les instances de $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$ et les instances de `dataG`.

Nombre d'articles par commandes (`#a/c`) : la difficulté de résolution augmente aussi avec le nombre d'articles par commandes (Figure 4.6) qui constitue, à l'instar de $|\mathcal{C}|$, un facteur déterminant de la taille de l'instance.

Nombre de types de boîtes ($|\mathcal{B}|$) : l'impact du nombre de types de boîtes sur les performances calculatoires de l'`UGTPED` semble très faible voire négligeable (Figure 4.7), alors qu'on aurait pu s'attendre à ce qu'augmenter le nombre de boîtes disponibles complexifie la résolution du fait de l'augmentation de la taille du modèle.

Pourcentage de commandes en *Click & Collect* (`%CkC`) : l'influence du pourcentage de commandes en *Click & Collect* est faible, mais révèle une tendance : plus cet indicateur est élevé, plus la résolution est aisée (Figure 4.8). Intuitivement, les commandes en *Click & Collect* sont légèrement plus faciles à orchestrer car lorsque

le stock nécessaire est disponible au point de retrait, cette affectation constitue l'option la moins coûteuse.

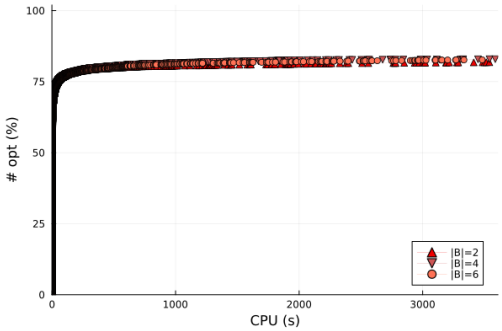

FIGURE 4.7 – Pourcentage d'instances résolues à l'optimum en fonction du temps de calcul par l'`UGTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de $|\mathcal{B}|$.

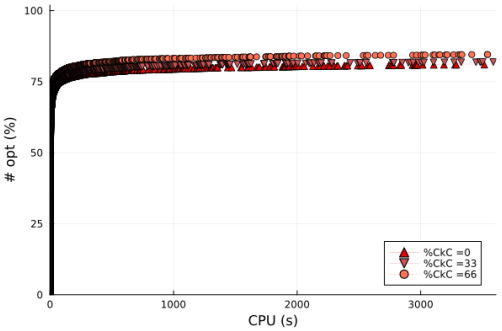

FIGURE 4.8 – Pourcentage d'instances résolues à l'optimum en fonction du temps de calcul par l'`UGTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de `%CkC`.

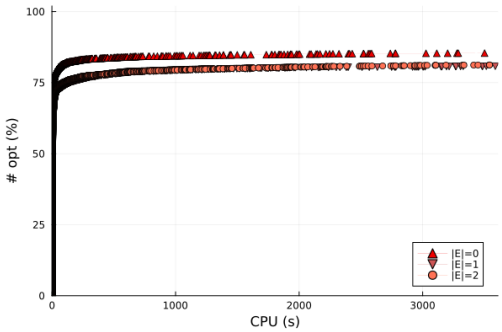

FIGURE 4.9 – Pourcentage d'instances résolues à l'optimum en fonction du temps de calcul par l'`UGTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de $|\mathcal{E}|$.

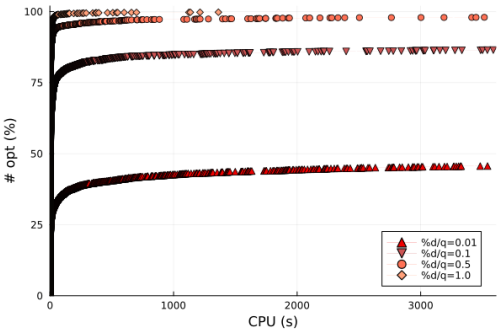

FIGURE 4.10 – Pourcentage d'instances résolues à l'optimum en fonction du temps de calcul par l'`UGTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de `%d/q`.

Nombre d'entrepôts ($|\mathcal{E}|$) : le nombre d'entrepôts a lui aussi un impact faible sur les temps de résolution (Figure 4.9). Pour l'`UGTPED`, ne pas avoir d'entrepôt semble légèrement faciliter la résolution à l'optimum. Pour le `GTPED`, le nombre d'entrepôts n'influe pas sur les temps de résolution.

Ratio demande sur stock (`%d/q`) : la Figure 4.10 met en lumière des baisses de performances calculatoires significatives lorsque le rapport entre la quantité commandée et la quantité disponible en stock des produits est faible. En effet, les instances ayant une valeur de ratio `%d/q`=0.01, sont majoritairement celles qui ne sont pas résolues à l'optimum au bout du temps imparti. À l'inverse, les instances

équilibrées de la littérature, avec %d/q=1, s'avèrent nécessiter moins de temps de calcul pour leur résolution. Ces différences s'expliquent par l'élargissement de l'espace des solutions lorsque %d/q diminue.

Les résultats que nous venons de présenter concernent des instances allant jusqu'à 150 points de stock et 100 commandes résolues à l'optimum par un solveur d'optimisation. Or, dans la littérature, les solveurs d'optimisation peinaient à résoudre des instances d'OP avec 30 sources et 30 destinations (*cf.* Section 1.3.3 page 21). Si l'amélioration des solveurs d'optimisation explique sûrement pour partie les différences de performances, cela montre aussi qu'il est plus facile de satisfaire des commandes ayant peu de produits en commun, comme dans les problèmes d'OP, plutôt que de satisfaire les commandes d'un unique produit, comme pour le FCTP.

4.3 Les performances environnementales des modèles d'orchestration écologique

Dans cette section, nous nous intéressons aux performances environnementales des trois modèles d'orchestration écologique proposés : UGTPED, GTPED et RGTPED. Nous comparons ainsi les valeurs obtenues par chacun de ces modèles pour la fonction objectif de coût environnemental traduisant la quantité totale de CO_2 émise. Les coûts environnementaux de l'UGTPED et du RGTPED sont calculés avec la fonction F_G (Équation (2.8) page 43) tandis que les coûts environnementaux du GTPED sont calculés avec la fonction $\hat{F}_G$ (Équation (2.17) page 44), supposant des produits sécables. De par l'hypothèse de sécabilité des produits qui lui est propre, le GTPED a la fonction objectif à la valeur la plus basse. De par son processus d'optimisation en deux phases, le RGTPED a la fonction objectif à la valeur la plus haute. Afin de pouvoir comparer des instances avec un nombre de commandes variable et des caractéristiques différentes, nous nous intéressons à la quantité de CO_2 émise par commande. Pour que la comparaison entre nos modèles soit équitable, nous ne conservons que les instances résolues à l'optimum par chacun des trois modèles.

4.3.1 Performances environnementales des modèles sur les instances industrielles

Le Tableau 4.3 indique le coût environnemental moyen par commande des solutions de l'UGTPED, du GTPED et du RGTPED pour les instances de dataR. Nous indiquons entre parenthèses pour le GTPED et le RGTPED l'écart relatif par rapport à l'UGTPED, qui est le modèle de référence. Nous détaillons également les coûts par enseigne et selon le type de commandes : livraison à domicile (LD) ou *Click & Collect* (CkC).

D'une part, nous observons que les solutions du GTPED présentent un écart moyen de 8% avec les solutions de l'UGTPED considérant des produits insécables. Cet écart est particulièrement faible pour l'enseigne r_1. Cela s'explique par une spécificité des

$\mathcal{R}$	F_G(UGTPED)	$\hat{F}_G$(GTPED)	F_G(RGTPED)
Total	128.4	118.0 (-8.1%)	130.1 (+1.3%)
Total - LD	160.6	149.8 (-6.8%)	163.3 (+1.6%)
Total - CkC	96.8	86.8 (-10.4%)	97.6 (+0.8%)
r_1	54.6	54.4 (-0.4%)	54.8 (+0.3%)
r_1 - LD	64.1	63.8 (-0.4%)	64.3 (+0.4%)
r_1 - CkC	36.7	36.6 (-0.3%)	36.8 (+0.1%)
r_2	113.5	101.6 (-10.5%)	114.7 (+1.0%)
r_2 - LD	147.9	134.4 (-9.1%)	150.2 (+1.5%)
r_2 - CkC	93.8	82.9 (-11.6%)	94.3 (+0.6%)
r_3	120.2	116.5 (-3.1%)	121.0 (+0.7%)
r_3 - LD	158.1	153.7 (-2.8%)	158.8 (+0.4%)
r_3 - CkC	92.3	89.2 (-3.4%)	93.2 (+1.0%)
r_4	154.2	141.1 (-8.5%)	157.1 (+1.9%)
r_4 - LD	179.9	167.6 (-6.8%)	184.0 (+2.3%)
r_4 - CkC	107.0	92.5 (-13.6%)	107.9 (+0.8%)
r_5	157.4	144.4 (-8.3%)	160.0 (+1.7%)
r_5 - LD	178.3	166.0 (-6.9%)	181.5 (+1.8%)
r_5 - CkC	118.6	104.3 (-12.1%)	120.3 (+1.4%)

TABLEAU 4.3 – Comparaison des coûts environnementaux (en gCO_2eq) pour UGTPED,GTPED et RGTPED pour dataR.

produits vendus par cette enseigne, qui sont de petite taille et permettent à une large majorité des commandes d'être expédiée dans une unique boîte de la plus petite taille disponible. Par conséquent, le GTPED n'utilise que peu l'hypothèse de sécabilité des produits qui le différencie de l'UGTPED. Pour l'enseigne r_3, qui possède des produits moins volumineux que les enseignes r_2, r_4 et r_5, l'écart relatif de coûts environnementaux entre les solutions du GTPED et de l'UGTPED est également plus faible que la valeur moyenne.
D'autre part, les coûts environnementaux des solutions du RGTPED sont en moyenne 1% plus élevés que les coûts des solutions de l'UGTPED. A nouveau nous notons que l'écart entre les coûts environnementaux des solutions des deux modèles s'atténue pour les enseignes r_1 et r_3, possédant des produits moins volumineux que les enseignes r_2, r_4 et r_5.

La différence de coûts environnementaux entre les commandes livrées à domicile et les commandes en *Click & Collect* est importante. Pour les trois modèles, nous observons un coût plus élevé d'environ 70% pour les commandes livrées à domicile. La Figure 4.11 permet de mieux comprendre l'origine de cet écart. La répartition moyenne des différents coûts environnementaux et du nombre moyen de colis [4] par commande y sont représentés pour nos trois modèles.

Cette Figure 4.11 met en avant la prépondérance des coûts d'emballage et de

4. Nous rappelons qu'un colis correspond à une boîte contenant un ou plusieurs article et expédiée depuis un point de stock vers le lieu de destination d'une commande.

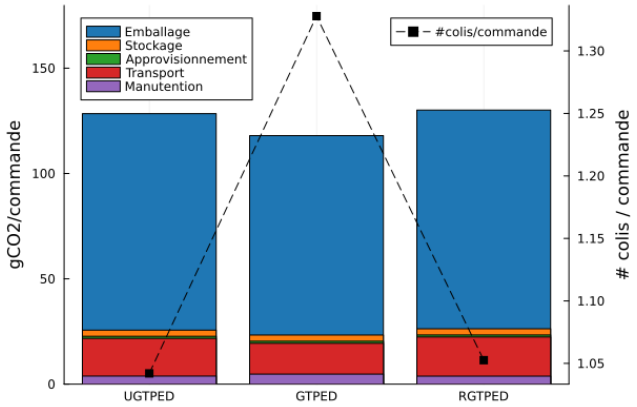

FIGURE 4.11 – Répartition des coûts environnementaux et du nombre de colis par commande des solutions de `UGTPED`, `GTPED` et `RGTPED` pour les instances de `dataR`.

transport dans les coûts environnementaux globaux. Cela explique le fait que les commandes en *Click & Collect* aient des coûts environnementaux moyens significativement plus faibles que les commandes livrées à domicile, comme observé dans le Tableau 4.3 : elles bénéficient du fait que les commandes retirées directement en magasin par les clients ont des coûts d'emballage et de transport nuls [5].

Nous relevons que le nombre de colis par commande de l'`UGTPED` et du `RGTPED` est proche de 1, tandis qu'il est supérieur à 1.3 pour le `GTPED`. Puisque le `RGTPED`, basé sur l'affectation des articles aux points de stock du `GTPED`, a un nombre de colis par commandes proche de 1, cela signifie que le `GTPED` tend à affecter les articles d'une même commande à un même point de stock. En revanche, le `GTPED` utilise parfois l'hypothèse de sécabilité des produits pour répartir les articles au sein de plusieurs boîtes de petite taille plutôt que d'utiliser une unique boîte de grande taille.

Les valeurs absolues des coûts environnementaux par commande du Tableau 4.3, de l'ordre de 130g de CO_2eq par commande, sont relativement faibles par rapport à ce que l'on a pu trouver dans la littérature. Dans les travaux de [CPV Associés et al., 2023], présentés en Section 1.4.2 (page 24), la logistique compte pour environ 300 à 400g de CO_2eq par commande. Dans cette étude de 2023, les emballages et l'approvisionnement ont une part plus importante que ce que nous avons considéré. Nous ne savons pas comment les emballages sont sélectionnés pour chaque commande. Toutefois, nous relevons que le taux de chargement des véhicules utilisés pour le transport est de 15 %, une valeur assez faible.
Dans les travaux de [Van Loon et al., 2015], également présentés en Section 1.4.2, les coûts environnementaux sont donnés par article et se situent entre 200 et 500g de CO_2eq. Les différences majeures par rapport à notre étude proviennent des lieux logistiques et de l'approvisionnement qui ont pour eux une part plus importante.

5. Les coûts de transports liés à la livraison finale sont nuls. En revanche il y a bien des coûts d'approvisionnement non nuls pour le transport entre l'entrepôt et le magasin. Dans notre étude, ceux-ci ont peut-être été sous évalués.

4.3.2 Performances environnementales des modèles sur les instances réalistes générées

Le Tableau 4.4 indique le coût environnemental moyen par commande des solutions de l'UGTPED, du GTPED et du RGTPED pour les instances de dataG. Nous indiquons entre parenthèses pour le GTPED et le RGTPED l'écart relatif par rapport à l'UGTPED. Nous détaillons également les coûts selon les valeurs des six indicateurs de référence.

Instances considérées	F_G(UGTPED)	$\hat{F}_G$(GTPED)	F_G(RGTPED)
Total	593.8	510.4 (-14.1%)	604.8 (+1.8%)
$\|\mathcal{C}\|$=2	498.9	437.1 (-12.4%)	506.0 (+1.4%)
$\|\mathcal{C}\|$=5	552.1	482.5 (-12.6%)	560.6 (+1.5%)
$\|\mathcal{C}\|$=10	567.9	495.1 (-12.8%)	576.8 (+1.6%)
$\|\mathcal{C}\|$=50	597.7	514.1 (-14.0%)	608.1 (+1.7%)
$\|\mathcal{C}\|$=100	601.2	514.6 (-14.4%)	612.9 (+2.0%)
#a/c=2	267.7	232.8 (-13.0%)	273.1 (+2.0%)
#a/c=4	507.6	438.2 (-13.7%)	517.7 (+2.0%)
#a/c=6	769.5	658.2 (-14.5%)	783.4 (+1.8%)
#a/c=8	1025.3	877.7 (-14.4%)	1042.4 (+1.7%)
$\|\mathcal{B}\|$=2	747.4	575.3 (-23.0%)	765.6 (+2.4%)
$\|\mathcal{B}\|$=4	531.2	484.9 (-8.7%)	539.4 (+1.5%)
$\|\mathcal{B}\|$=6	507.1	472.6 (-6.8%)	513.6 (+1.3%)
%CkC=0	607.7	522.3 (-14.1%)	618.9 (+1.8%)
%CkC=33	599.1	515.0 (-14.0%)	610.0 (+1.8%)
%CkC=66	575.5	494.5 (-14.1%)	586.2 (+1.9%)
$\|\mathcal{E}\|$=0	644.9	548.8 (-14.9%)	653.9 (+1.4%)
$\|\mathcal{E}\|$=1	544.8	473.0 (-13.2%)	557.0 (+2.2%)
$\|\mathcal{E}\|$=2	581.2	501.4 (-13.7%)	593.2 (+2.1%)
%d/q=0.01	161.8	154.4 (-4.6%)	164.6 (+1.7%)
%d/q=0.1	379.0	357.6 (-5.7%)	395.5 (+4.3%)
%d/q=0.5	619.1	535.3 (-13.5%)	632.9 (+2.2%)
%d/q=1.0	771.2	635.9 (-17.5%)	776.5 (+0.7%)

TABLEAU 4.4 – Comparaison des coûts environnementaux (en gCO_2eq) pour UGTPED,GTPED et RGTPED sur les instances de dataG.

Pour les instances de dataG, nous observons un écart moyen entre les coûts environnementaux des solutions de l'UGTPED et les solutions du GTPED de 14 %. Cette valeur varie fortement selon le nombre de types de boîtes disponibles ($|\mathcal{B}|$) et la valeur du ratio %d/q mais varie peu selon la valeur des autres indicateurs. L'augmentation du nombre de boîtes disponibles atténue les différences entre les solutions des deux modèles. La granularité accrue des types de boîtes disponibles permet en effet d'approcher plus finement les volumes nécessaires, limitant ainsi l'impact de l'hypothèse de sécabilité des produits. De même, un ratio %d/q faible atténue l'écart entre les solutions des deux modèles, car cela facilite le regroupement des articles

d'une même commande, ce qui implique un plus petit nombre de boîtes utilisé, et donc une atténuation des différences entre les solutions de l'UGTPED et du GTPED. L'écart relatif entre les coûts environnementaux des solutions de l'UGTPED et du RGTPED est modéré, inférieur à 2%. L'impact des six indicateurs de référence sur cet écart s'avère faible. Toutefois, nous observons que l'augmentation du nombre de boîtes disponible ($|\mathcal{B}|$) atténue les différences entre les solutions des deux modèles.

A présent, nous nous focalisons sur la répartition des coûts environnementaux pour comprendre l'impact de chaque composant. La Figure 4.12 présente la répartition des coûts environnementaux et le nombre moyen de colis par commande dans les solutions de l'UGTPED, du GTPED et du RGTPED pour les instances de dataG.

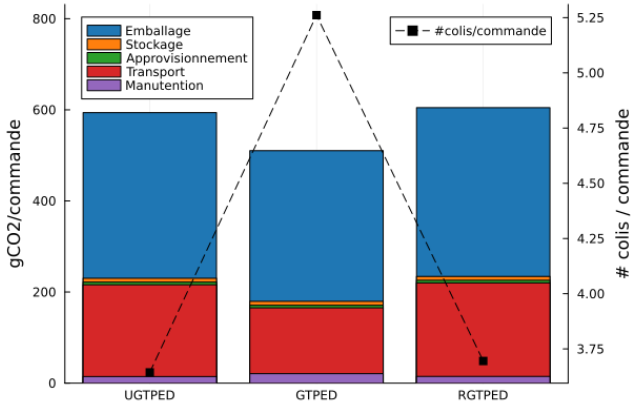

FIGURE 4.12 – Répartition des coûts environnementaux et du nombre de colis par commande des solutions de UGTPED, GTPED et RGTPED pour les instances de dataG.

Nous y observons qu'à l'instar des instances de dataR, le GTPED génère davantage de colis par commandes que les autres modèles. A nouveau, l'emballage et le transport dominent les coûts environnementaux. Cependant, le coût environnemental moyen par commande est plus de 4 fois supérieur pour dataG par rapport à dataR. Ce résultat n'est pas incohérent, car une partie des instances de dataG correspond à des cas peu fréquents en pratique et présentant des coûts environnementaux particulièrement élevés (ex : %d/q=1).

La suite de cette section analyse la répartition des coûts environnementaux en fonction des valeurs des indicateurs de référence. Les résultats étant similaires pour les trois modèles, nous présentons et commentons uniquement les courbes relatives à l'UGTPED. Les tableaux avec les valeurs détaillées des trois modèles sont disponibles en Annexe C.2.

Nombre de commandes

La Figure 4.13 montre que, pour les instances dataG, le coût environnemental et le nombre de colis par commande de l'UGTPED augmente avec le nombre de com-

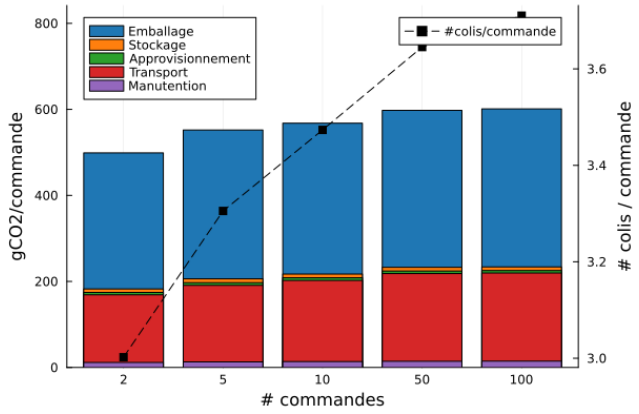

FIGURE 4.13 – Répartition des coûts environnementaux et du nombre de colis par commande des solutions de l'UGTPED pour les instances de dataG en fonction de $|\mathcal{C}|$.

mandes $|\mathcal{C}|$. Cela peut s'expliquer par l'augmentation de la difficulté à affecter tous les articles d'une même commande à un même point de stock : un volume plus élevé de commandes intensifie la concurrence pour les stocks disponibles, augmentant ainsi les risques de conflits d'affectation.

Nombre d'articles par commande

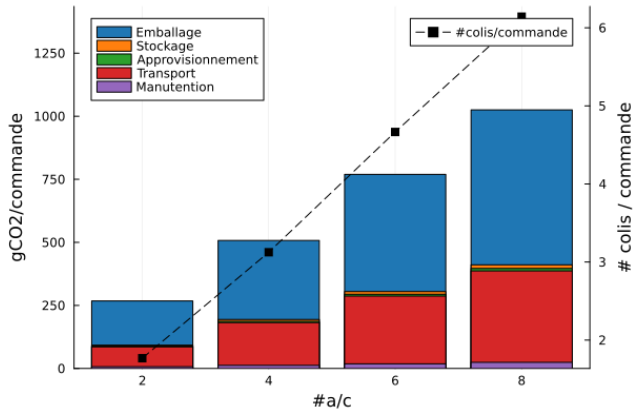

FIGURE 4.14 – Répartition des coûts environnementaux et du nombre de colis par commande des solutions de l'UGTPED pour les instances de dataG en fonction de #a/c.

La Figure 4.14 présente la répartition des coûts environnementaux et le nombre de colis par commande des solutions de l'UGTPED pour les instances de dataG en fonction du nombre d'articles par commandes #a/c. Nous y observons que l'impact de #a/c est particulièrement marqué. Les coûts environnementaux évoluent proportionnellement à la valeur de #a/c. Pourtant, le nombre de colis par commande n'évolue pas proportionnellement à #a/c. De plus, nous relevons que lorsque #a/c

augmente, la part des coûts d'emballage diminue tandis que la part des coûts liés au transport augmente (voir Tableau C.1 en annexe). Cela révèle que deux phénomènes s'opposent lorsque `#a/c` augmente. D'une part, si l'augmentation de `#a/c` requiert davantage de boîtes, elle permet également un meilleur remplissage, permettant une réduction de la part des emballages dans les coûts environnementaux totaux. D'autre part, à l'image de l'augmentation de $|\mathcal{C}|$, l'augmentation de `#a/c` accroît les risques de conflits entre les commandes et diminue les chances pour une commande d'être affectée à son point de stock préférentiel, augmentant la part des coûts liés au transport.

Nombre de boîtes

La Figure 4.15 présente la répartition des coûts environnementaux et le nombre de colis par commande des solutions de l'`UGTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de $|\mathcal{B}|$. Nous y observons que disposer d'un plus grand nombre de types de boîtes permet de mieux ajuster le volume des boîtes aux articles, minimisant ainsi les coûts associés à l'emballage et au transport.

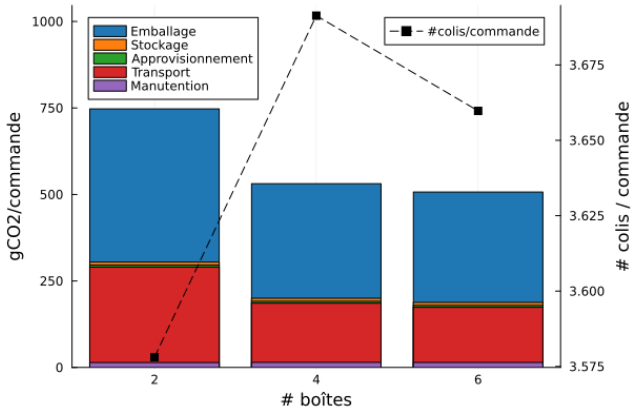

FIGURE 4.15 – Répartition des coûts environnementaux et du nombre de colis par commande des solutions de l'`UGTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de $|\mathcal{B}|$.

Proportion de *Click & Collect*

La Figure 4.16 présente la répartition des coûts environnementaux et le nombre de colis par commande des solutions de l'`UGTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de `%CkC`. Lorsque la proportion de *Click & Collect* `%CkC` augmente, davantage de commandes peuvent être satisfaites directement depuis leur magasin de retrait et le nombre de colis par commande diminue. Cela implique une diminution des coûts de transport, de manutention et d'emballage que nous observons sur la figure.

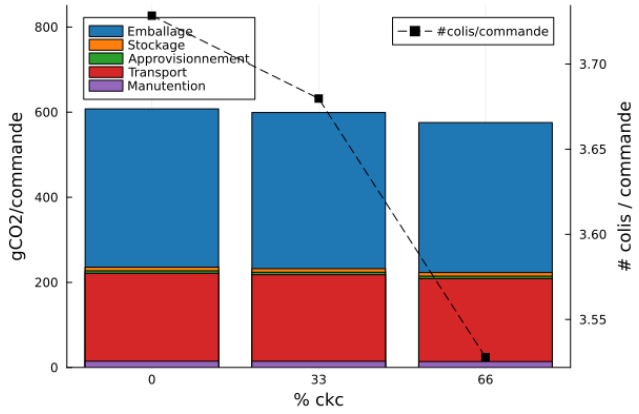

FIGURE 4.16 – Répartition des coûts environnementaux et du nombre de colis par commande des solutions de l'UGTPED pour les instances de dataG en fonction de %CkC.

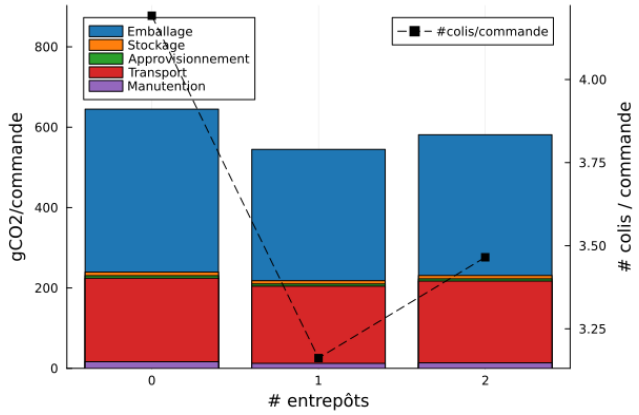

FIGURE 4.17 – Répartition des coûts environnementaux et du nombre de colis par commande des solutions de l'UGTPED pour les instances de dataG en fonction de $|\mathcal{E}|$.

Nombre d'entrepôts

La Figure 4.17 présente la répartition des coûts environnementaux et le nombre de colis par commande des solutions de l'UGTPED pour les instances de dataG en fonction de $|\mathcal{E}|$. Nous y observons qu'introduire un entrepôt dans le réseau de distribution permet de réduire de près de 25% le nombre de colis par commandes et donc de diminuer les coûts liés à l'emballage, au transport et à la manutention (Figure 4.17).

L'introduction d'un second entrepôt permet également une réduction du nombre de colis par commandes et de coûts environnementaux par rapport à un réseau de distribution sans entrepôt, mais les gains sont moins importants que pour un réseau de distribution avec un seul entrepôt. Puisque les entrepôts se répartissent 30% du stock, cela montre l'intérêt de concentrer une grande partie des stocks dans un unique entrepôt ($|\mathcal{E}| = 1$) plutôt que de se répartir ces stocks dans davantage d'entrepôts ($|\mathcal{E}| = 2$).

Ratio demande sur stock

La Figure 4.18 montre que pour les instances `dataG`, le ratio `%d/q` joue un rôle majeur dans le nombre moyen de colis par commande et les coûts environnementaux de nos modèles d'orchestration. Lorsque ce ratio passe de 0.1 à 0.01, le nombre de colis par commande et les coûts environnementaux associés sont divisés par 2.
En plus de faciliter le regroupement des commandes en un minimum de colis, une haute couverture de stocks, i.e. une faible valeur de `%d/q`, permet de sélectionner pour chaque commande un point de stock avec des faibles coûts de transport jusqu'à la destination. Notons que ce graphique explique en bonne partie la différence de coûts environnementaux par commande constatés entre les instances de `dataR` et celles de `dataG`, respectivement proches de 600 et 140 gCO_2eq pour l'`UGTPED`. En effet, parmi les instances de `dataG`, celles avec `%d/q`=0.01 sont les plus proches des instances industrielles de `dataR` et leur coût environnemental par commande est d'environ 155 gCO_2eq.

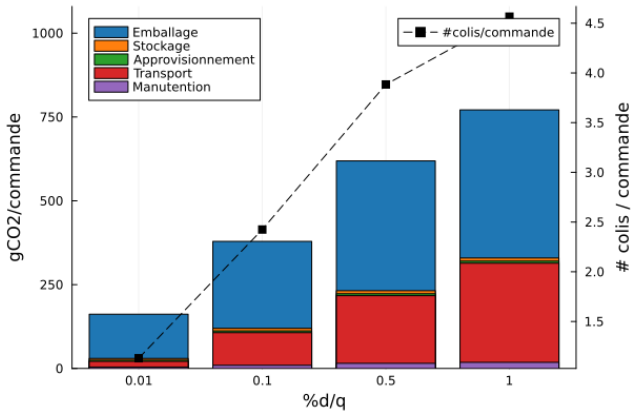

FIGURE 4.18 – Répartition des coûts environnementaux et du nombre de colis par commande des solutions de l'`UGTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de `%d/q`.

4.4 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'évaluation des trois modèles d'orchestration écologique de commandes que nous avons proposés.
D'une part, nous nous sommes intéressés à leurs performances de calcul. Les trois modèles résolvent à l'optimum en quelques secondes les instances avec un petit nombre de commandes, qui représentent une très large majorité des instances. En revanche, les instances à 100 commandes et plus sont difficiles à résoudre et certaines ne sont pas résolues à l'optimum au bout d'une heure. De plus, les solutions retournées à l'issue du temps limite ne sont pas toujours de très bonne qualité, avec des gaps d'optimalité qui peuvent être très élevés, notamment pour l'`UGTPED`.
L'analyse des performances calculatoires de nos modèles en fonction des indicateurs

de caractérisation des instances a mis en lumière l'influence du ratio %d/q sur la résolution. Les instances avec une valeur de %d/q telle que l'on trouve dans les instances industrielles (i.e. proche de 0.01) sont significativement plus difficiles à résoudre que des instances avec une valeur de ratio %d/q standard de la littérature (égale à 1).
D'autre part, nous nous sommes intéressés aux performances environnementales des trois modèles. Si l'on considère des produits sécables et que l'on utilise la modélisation du GTPED, les solutions retournées ont un coût environnemental environ 10% plus faible que les solutions de l'UGTPED considérant des produits insécables. A l'inverse, l'optimisation en deux phases propre au RGTPED induit une augmentation modérée des coûts environnementaux par rapport à l'UGTPED, d'environ 1%.
L'analyse par indicateur des coûts environnementaux a montré l'influence de certains indicateurs sur les coûts environnementaux totaux. Nous avons notamment vu que lorsque la taille des instances augmente, l'augmentation des conflits entre les commandes entraîne une hausse des coûts environnementaux. Nous avons également observé l'impact majeur du ratio %d/q sur les coûts environnementaux, une haute couverture de stocks permettant une réduction importante du nombre de colis par commandes et une meilleure sélection des points d'expédition, soit des coûts environnementaux plus faibles.

En définitive, afin d'orchestrer écologiquement un ensemble de commandes, le choix du modèle à utiliser entre l'UGTPED, le GTPED et le RGTPED dépend du contexte opérationnel. Si les produits commandés sont sécables, le GTPED est à favoriser puisqu'il offre à la fois les meilleures performances calculatoires et environnementales. Cependant, la majorité des produits du e-commerce ne peuvent pas être considérés sécables. Dans ce cadre, l'UGTPED est à privilégier puisque ses solutions sont de meilleure qualité que le RGTPED. De plus, pour les instances de quelques commandes, la résolution ne dépasse pas quelques secondes. Toutefois, lorsque la taille des instances augmente et selon le nombre d'articles par commandes #a/c ou le ratio %d/q, l'UGTPED peut être difficile à résoudre. Le RGTPED se positionne comme une alternative plus simple à résoudre et retournant des solutions de bonne qualité. Néanmoins, même le RGTPED ne parvient pas à résoudre la totalité des instances à l'optimum au bout d'une heure. Il est donc nécessaire de développer des méthodes de résolution avancées ou des méthodes approchées afin d'obtenir des solutions de bonne qualité en un temps limité.

Deuxième partie

Orchestration écologique de commandes dans le contexte opérationnel d'un *Order Management System*

Chapitre 5

Apports de l'optimisation de l'orchestration de commandes pour un *OMS*

Sommaire

5.1 Introduction 85

5.2 Comparaison de l'optimisation de l'orchestration par lots de commandes et de l'optimisation séquentielle de l'orchestration 86

5.2.1 Comparaison des performances de calcul des deux méthodes d'optimisation 87

5.2.2 Comparaison des performances environnementales des deux méthodes d'optimisation 89

5.3 Comparaison de l'orchestration historique d'un *OMS* et de l'optimisation 92

5.3.1 Les apports de l'optimisation pour l'orchestration de commandes actuelle 92

5.3.2 Comparaison des coûts environnementaux de l'orchestration de commandes effectuée par l'optimisation séquentielle et celle effectuée par l'*OMS* 92

5.3.3 Une première évaluation économique de l'optimisation écologique de l'orchestration de commandes 94

5.4 Synthèse 95

5.1 Introduction

Dans la première partie de cette thèse, nous avons présenté trois modèles d'optimisation du problème d'orchestration écologique de commandes. Leurs performances calculatoires et environnementales ont ensuite été analysées à travers des instances industrielles et des instances réalistes que nous avons générées. Ces travaux exploratoires se sont déroulés dans un cadre théorique dans lequel nous nous sommes affranchis des contraintes opérationnelles auxquelles est soumis notre partenaire industriel (délai d'orchestration, accès aux données, coût du solveur d'optimisation, réticence au changement ...). Toutefois, ces contraintes opérationnelles viennent compliquer l'intégration de l'optimisation écologique au logiciel de gestion de commandes actuel.

Dans la seconde partie de cette thèse, nous explorons plusieurs pistes visant à rendre nos travaux déployables dans le contexte opérationnel d'un *OMS*. Parmi les trois modèles d'optimisation écologique de l'orchestration de commandes que nous avons proposés, deux raisons nous poussent à concentrer nos efforts sur le modèle de l'`UGTPED`. Premièrement, la majorité des produits rencontrés dans le commerce de détail sont insécables, excluant de fait le `GTPED`. Deuxièmement, nous cherchons à orchestrer l'intégralité des commandes. Or, les tests menés dans le Chapitre 4 montrent que, malgré des performances de calcul légèrement meilleures pour le `RGTPED` que pour l'`UGTPED`, des instances sont non résolues pour l'un comme pour l'autre. Afin de respecter les besoins opérationnels d'un *OMS*, une amélioration de la résolution serait donc nécessaire pour chacun des modèles. Ainsi, nous nous concentrons sur le modèle le plus performant d'un point de vue environnemental, l'`UGTPED`.

L'`UGTPED` considère une orchestration par lots de commandes. Intégrer ce modèle dans un *OMS* constituerait un bouleversement majeur tant technique que conceptuel puisque, actuellement, les commandes sont orchestrées séquentiellement en fonction de la date de commande. Les règles d'orchestration implémentées dans le logiciel ont été conçues pour orchestrer une unique commande à la fois, en utilisant les stocks actuels mais sans intégrer d'informations sur les autres commandes en attente d'orchestration. L'architecture logicielle est ainsi intégralement pensée pour une orchestration séquentielle commande par commande.
De plus, bien qu'une orchestration par lots de commandes permette des prises de décisions éclairées et une diminution théorique du coût global, elle présente au moins deux inconvénients pour sa mise en pratique. D'une part, constituer un lot de plusieurs dizaines ou centaines de commandes peut être chronophage et donc retarder la préparation et la livraison des commandes. D'autre part, la résolution à l'optimum de l'orchestration de commandes par lots peut être particulièrement difficile et donc gourmande en temps de calcul.

Dans ce chapitre, nous cherchons à rendre l'optimisation écologique de l'orchestration de commandes techniquement acceptable. Dans la Section 5.2 nous introduisons un modèle séquentiel d'orchestration écologique de commandes et comparons ses performances calculatoires et environnementales avec l'optimisation par lots de commandes. Dans la Section 5.3 nous comparons les résultats de l'optimisation aux coûts de l'orchestration historique d'un *OMS* pour montrer les gains que pourraient apporter l'optimisation d'un point de vue environnemental. Enfin, la Section 5.4 propose une synthèse du chapitre.

5.2 Comparaison de l'optimisation de l'orchestration par lots de commandes et de l'optimisation séquentielle de l'orchestration

Théoriquement, orchestrer simultanément un lot de commandes permet une réduction des coûts par rapport à une orchestration séquentielle en contrepartie

d'un temps de calcul potentiellement plus long. Dans notre contexte industriel, des résultats pratiques sont attendus afin de justifier un déploiement de l'orchestration par lots de commandes. Ainsi, nous questionnons dans cette section l'intérêt de l'orchestration par lots de commandes par rapport à une orchestration séquentielle. Pour cela, nous introduisons un algorithme d'orchestration écologique de commandes qui réalise une séquence d'orchestrations unitaires, c'est à dire commande par commande. Cet algorithme simple résout successivement, à l'aide d'un solveur d'optimisation, un problème d'UGTPED pour chaque commande d'une instance, tout en mettant à jour les stocks entre chaque résolution. Cet algorithme est dénoté $\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ et le pseudo-code est donné par l'Algorithme 1.

Algorithme 1 $\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$

Input : ListeCommandes, Stocks, Coûts
Output : ListeSolutions
ListeSolutions $\leftarrow \emptyset$
for commande $\in$ ListeCommandes **do**
    $x^*, y^* \leftarrow$ UGTPED(commande,Stocks,Coûts) ▷ *résolution de l'UGTPED pour cette commande*
    Stocks $\leftarrow$ MetAJourStocks(Stocks,x^*) ▷ *décrémentation des stocks d'après l'affectation de la commande*
    ListeSolutions $\leftarrow$ ListeSolutions $\cup\{(x^*, y^*)\}$
end for
return ListeSolutions

Dans la suite de cette section, nous présentons les performances de calcul de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ puis comparons les coûts environnementaux des solutions de l'UGTPED et de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$.

5.2.1 Comparaison des performances de calcul des deux méthodes d'optimisation

Instances industrielles

Le Tableau 5.1 compare le pourcentage de commandes orchestrées optimalement compte tenu d'un budget de temps de calcul, du modèle d'orchestration séquentiel $\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ et du modèle d'orchestration par lots de commandes UGTPED, pour chaque composante connexe de commandes des instances industrielles de $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$.

Les performances calculatoires de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ sont largement meilleures que les performances calculatoires de l' UGTPED : l'optimisation séquentielle permet d'orchestrer plus de 99% des commandes de $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$ en moins de 10 secondes, alors qu'environ 20% des commandes ne sont toujours pas orchestrées optimalement au bout d'1 heure par l'UGTPED. Certaines commandes restent difficiles à orchestrer pour l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$, puisque toutes ne sont pas résolues à l'optimalité au bout d'1 heure, bien que le gap d'optimalité de ces instances non résolues reste modéré puisqu'en dessous de 10%. Toutes ces commandes contiennent au moins 15 articles mais restent toutefois extrêmement rares.

	UGTPED	$\text{UGTPED}_{\text{seq}}$
% commandes orchestrées optimalement en $\leq$ 1s	75.0	97.9
% commandes orchestrées optimalement en $\leq$ 10s	79.2	99.5
% commandes orchestrées optimalement en $\leq$ 1h	81.8	99.99
Gap maximal parmi les instances non résolues à l'optimal en $\leq$ 1h (%)	$\geq$ 100 [1]	8.5
Gap moyen des instances non résolues à l'optimal en $\leq$ 1h (%)	$\geq$ 12.4	5.2

TABLEAU 5.1 – Performances calculatoires de l'UGTPED et de l'$\text{UGTPED}_{\text{seq}}$ sur les commandes de dataR_{cc}.

Instances réalistes générées

Les performances calculatoires de l'$\text{UGTPED}_{\text{seq}}$ et de l'UGTPED sur les instances générées dataG sont données dans le Tableau 5.2.

	UGTPED	$\text{UGTPED}_{\text{seq}}$
% commandes orchestrées optimalement en $\leq$ 1s	15.5	98.4
% commandes orchestrées optimalement en $\leq$ 10s	47.5	99.9
% commandes orchestrées optimalement en $\leq$ 1h	71.6	100
Gap maximal parmi les instances non résolues à l'optimal en $\leq$ 1h (%)	$\geq$ 100 [2]	0
Gap moyen des instances non résolues à l'optimal en $\leq$ 1h (%)	$\geq$ 13.6	0

TABLEAU 5.2 – Performances calculatoires de l'UGTPED et de l'$\text{UGTPED}_{\text{seq}}$ sur les commandes de dataG.

À nouveau, nous relevons que l'approche séquentielle $\text{UGTPED}_{\text{seq}}$ orchestre optimalement la quasi totalité des commandes en moins de 10 secondes alors que près de 30 % des commandes n'ont pas été orchestrées optimalement par l'approche par lots UGTPED au bout du temps limite d'1 heure. Notons que l'intégralité des commandes de dataG a été orchestrée optimalement par l'$\text{UGTPED}_{\text{seq}}$ en moins d'1 heure.

Observer de meilleures performances de calcul pour l'$\text{UGTPED}_{\text{seq}}$ que pour l'UGTPED était attendu puisque la difficulté de résolution de l'UGTPED augmente avec la taille de l'instance. Sur les données industrielles que nous possédons, plus de 99% des commandes sont orchestrées en moins de 10 secondes, un temps de réponse convenable d'un point de vue opérationnel. Un très petit nombre de commandes avec un nombre d'articles élevé n'est pas résolu à l'optimal par l'$\text{UGTPED}_{\text{seq}}$. Pour ces cas

1. Le solveur retourne un gap compris entre 0 et 100% même lorsque celui-ci est supérieur à 100%. Nous avons relevé 1 instance dans ce cas pour dataR_{cc}.
2. Nous avons relevé 4 instances avec un gap supérieur à 100% pour dataG.

particuliers, une solution sous-optimale mais de bonne qualité est systématiquement retournée au bout d'1 heure.

En conclusion, l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ s'avère très intéressant d'un point de vue des performances calculatoires. De plus, mentionnons que les coûts environnementaux liés au numérique seront d'autant plus faibles pour l'orchestration séquentielle que pour l'orchestration par lots de commandes. Au total, en ne considérant que les instances chargeables en mémoire, l'UGTPED aura passé 2.4 fois plus de temps que l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ à orchestrer les commandes des instances industrielles $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$, et plus de 200 fois plus de temps pour les instances générées dataG. Avec un temps de calcul moindre, les serveurs sont sollicités moins longtemps et les quantités de ressources et d'énergie nécessaires sont donc plus faibles. Néanmoins, ce gain n'est intéressant que s'il ne se fait pas au détriment de la qualité environnementale des solutions retournées, ce que nous abordons dans la section suivante.

5.2.2 Comparaison des performances environnementales des deux méthodes d'optimisation

Instances industrielles

Le Tableau 5.3 indique le coût environnemental moyen par commande des solutions de l'UGTPED et de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ pour les instances de $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$. Nous indiquons entre parenthèses pour l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ l'écart relatif par rapport à l'UGTPED. La quatrième colonne (%CSD) indique la part des commandes satisfaites différemment par les deux modèles UGTPED et $\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$, c'est à dire avec au moins un article satisfait depuis un point de stock différent. La cinquième et la sixième colonnes indiquent, parmi les commandes satisfaites différemment, la différence de coût environnemental moyenne ($\Delta_{\mathrm{CO_2}}\mathrm{CSD}_\mu$) et maximale ($\Delta_{\mathrm{CO_2}}\mathrm{CSD}_\mathrm{m}$) entre les solutions des deux modèles. Pour une comparaison équitable, nous ne comparons que les solutions des instances qui ont été résolues à l'optimalité par les deux modèles.

$\mathcal{R}$	$F_G(\texttt{UGTPED})$	$F_G(\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}})$	%CSD	$\Delta_{\mathrm{CO_2}}\mathrm{CSD}_\mu$	$\Delta_{\mathrm{CO_2}}\mathrm{CSD}_\mathrm{m}$
Total	128.4	128.5 ($+ \varepsilon \leq 0.1\%$)	0.4	1.9	14.5
r_1	54.6	54.6 (+0%)	0	0	0
r_2	113.5	113.5 ($+ \varepsilon \leq 0.1\%$)	0.4	0.6	2.1
r_3	120.2	120.4 ($+ \varepsilon \leq 0.1\%$	0.7	6.2	14.5
r_4	154.2	154.2 ($+ \varepsilon \leq 0.1\%$)	0.4	1.1	2.3
r_5	157.4	157.4 ($+ \varepsilon \leq 0.1\%$)	0.4	2.6	7.0

TABLEAU 5.3 – Comparaison des coûts environnementaux (en $\mathrm{gCO_2eq}$) par commande et des différences d'orchestration (en %) des solutions de l'UGTPED et de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ sur les instances de $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$.

Les résultats montrent que les solutions de l'UGTPED et de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ sont très proches. Déjà, moins d'1 % des commandes sont satisfaites différemment par les

deux modèles. Ensuite, l'écart entre les coûts environnementaux des solutions de l'UGTPED et les coûts environnementaux des solutions de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ est inférieur à 0.1% pour les cinq enseignes. Parmi les quelques commandes orchestrées différemment par les deux modèles, l'écart de coût environnemental pour une orchestration par l'UGTPED ou par l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ n'est que de quelques pourcents en moyenne, et ne dépasse pas 14% dans le pire des cas. Ainsi, même si une commande ne peut pas être expédiée depuis son point de stock préférentiel, il existe d'autres points de stock candidats permettant d'obtenir un coût environnemental relativement proche.

Instances réalistes générées

Nous comparons maintenant les coûts environnementaux de l'UGTPED et de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ sur les instances générées. Le Tableau 5.4 présente pour les instances de dataG le coût environnemental moyen par commande des solutions de l'UGTPED et de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$. Les quatrième, cinquième, et sixième colonnes indiquent la part de commandes orchestrées différemment par les deux modèles ainsi que les différences moyennes et maximales de coûts environnementaux parmi les commandes satisfaites différemment, comme pour le Tableau 5.3. Les résultats sont détaillés selon les valeurs des indicateurs de référence.

À nouveau, nous relevons que les gains environnementaux permis par l'orchestration de commandes en lots par rapport à l'orchestration séquentielle sont très faibles. Pour les instances ayant un ratio %d/q=0.01, correspondant à ce que l'on trouve dans les instances industrielles, moins d'1 % des commandes sont orchestrées différemment par les deux modèles tandis que le surcoût environnemental de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ reste inférieur à 0.1%.
Pour les instances avec un ratio %d/q=1, la tension sur les stocks est beaucoup plus élevée. Il est donc plus probable de rencontrer des commandes en compétition pour un même article dans un même point de stock et ainsi observer des différences entre l'orchestration séquentielle et l'orchestration par lots de commandes. Cela se confirme par la part des commandes orchestrées différemment par les deux modèles, qui comptent pour la moitié des commandes. Toutefois, le surcoût environnemental moyen de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ par rapport à l'UGTPED ne dépasse pas 2%. Cela confirme l'idée qu'il existe pour chaque commande plusieurs orchestrations possibles avec un coût environnemental proche. Nous relevons cependant une minorité de commandes pour lesquelles l'orchestration séquentielle retourne une solution avec un coût environnemental plus de 50% supérieur à la solution de l'orchestration par lots.
Notons enfin que l'augmentation de la taille des lots de commandes (i.e. la valeur $|\mathcal{C}|$ augmente) entraîne l'augmentation de la part des commandes orchestrées différemment par les deux modèles ainsi que l'augmentation du surcoût environnemental de l'orchestration séquentielle par rapport à l'orchestration par lots de commandes. Cette observation était attendue puisque lorsque la taille des lots de commandes augmente, la quantité d'information prise en compte augmente également, permettant de prendre de meilleures décisions. Néanmoins, même en considérant des lots de 100 commandes, qui correspondent à l'ordre de grandeur de nos plus grandes

Indicateur	F_G(UGTPED)	F_G(UGTPED$_{\texttt{seq}}$)	%CSD	$\Delta_{CO_2}CSD_\mu$	$\Delta_{CO_2}CSD_m$
Total	593.7	601.5 (+1.3%)	29.4	2.0	62.6
$\|\mathcal{C}\|$=2	498.9	500.9 (+0.4%)	10.9	0.4	48.9
$\|\mathcal{C}\|$=5	552.1	556.4 (+0.8%)	17.9	1.4	62.6
$\|\mathcal{C}\|$=10	567.9	572.2 (+0.8%)	20.7	1.7	39.6
$\|\mathcal{C}\|$=50	597.7	604.4 (+1.1%)	27.3	3.3	40.5
$\|\mathcal{C}\|$=100	600.9	610.2 (+1.6%)	33.1	4.1	46.2
#a/c=2	267.6	272.2 (+1.7%)	22.0	3.0	62.6
#a/c=4	507.6	513.8 (+1.2%)	25.2	1.9	48.9
#a/c=6	769.5	778.3 (+1.1%)	33.3	1.5	22.2
#a/c=8	1025.3	1039.1 (+1.3%)	42.4	1.3	12.8
$\|\mathcal{B}\|$=2	747.4	759.7 (+1.6%)	30.5	2.4	57.9
$\|\mathcal{B}\|$=4	531.2	537.1 (+1.1%)	29.0	1.8	62.6
$\|\mathcal{B}\|$=6	506.7	512.1 (+1.1%)	28.5	1.7	62.6
%CkC=0	607.7	615.7 (+1.3%)	30.1	1.9	48.9
%CkC=33	599.1	607.0 (+1.3%)	29.6	2.0	62.6
%CkC=66	575.1	582.6 (+1.3%)	28.4	2.1	46.2
$\|\mathcal{E}\|$=0	644.9	650.7 (+0.9%)	28.0	1.6	43.4
$\|\mathcal{E}\|$=1	544.4	553.0 (+1.6%)	28.8	2.1	62.6
$\|\mathcal{E}\|$=2	581.2	590.7 (+1.6%)	31.5	2.2	46.2
%d/q=0.01	161.8	161.9 (+0.0%)	0.4	0.1	46.2
%d/q=0.1	378.7	379.3 (+0.2%)	4.1	1.1	40.6
%d/q=0.5	619.1	625.7 (+1.1%)	29.4	2.4	43.4
%d/q=1.0	771.2	786.1 (+1.9%)	50.3	3.1	62.6

TABLEAU 5.4 – Comparaison des coûts environnementaux (en gCO_2eq) par commande et des différences d'orchestration (en %) des solutions de l'UGTPED et de l'UGTPED$_{\texttt{seq}}$ sur les instances de dataG.

instances industrielles, l'écart de coûts environnementaux entre les deux modèles reste inférieur à 2%.

En conclusion, si l'intérêt de l'orchestration par lots de commandes par rapport à une orchestration séquentielle existe en théorie, les écarts sont très faibles en pratique dans notre cas d'étude industriel. Or, la Section 5.2.1 nous a montré que l'amélioration des performances de calcul de l'orchestration séquentielle par rapport à l'orchestration par lots de commandes est majeure. Par conséquent, il nous semble tout à fait pertinent de déployer une optimisation séquentielle de l'orchestration plutôt que par lots de commandes. En plus de proposer des performances calculatoires et environnementales très compétitives, l'orchestration séquentielle est compatible avec l'architecture logicielle que l'on trouve couramment chez les *OMS*, ce qui facilitera son déploiement industriel. Maintenant que nous disposons d'une méthode d'optimisation exploitable techniquement, nous devons toutefois prouver son intérêt par rapport aux pratiques actuelles. C'est l'objet de la section suivante.

5.3 Comparaison de l'orchestration historique d'un *OMS* et de l'optimisation

5.3.1 Les apports de l'optimisation pour l'orchestration de commandes actuelle

Pour remplacer le processus d'orchestration actuel d'un *OMS* par un solveur d'optimisation mathématique, nous devons montrer l'intérêt d'un tel changement. Actuellement, l'orchestration repose sur des règles heuristiques propres à chaque e-commerçant. Bien qu'aucun modèle mathématique ne soit explicitement formulé, ces règles répondent au besoin de minimiser un critère donné : réduire les invendus en priorisant les magasins avec les stocks les plus élevés ; réduire les délais de livraison en favorisant les points de stock les plus réactifs à la captation des commandes ; réduire la charge des vendeurs et vendeuses en priorisant l'entrepôt...
Un solveur d'optimisation mathématique assure de retourner la meilleure orchestration par rapport au critère choisi. Cependant, il faut s'assurer que des gains substantiels sont possibles avant de déployer un tel outil pour remplacer les règles d'orchestration utilisées actuellement. Pour cela, nous comparons les coûts des solutions retournées par notre modèle d'orchestration séquentiel $\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ et les coûts de l'orchestration réalisée par l'*OMS* sur des données historiques réelles que nous avons collectées, `dataR`. Pour calculer les coûts de l'*OMS*, nous récupérons l'affectation réelle des articles aux points de stock qui avait été proposée par l'*OMS* sur les instances industrielles `dataR`. Puisque l'*OMS* ne renseigne pas les emballages utilisés pour l'expédition, nous appliquons la procédure de re-calcul de l'empaquetage optimal `OPR` (présentée en Section 2.4.3 page 45). Les coûts environnementaux de l'orchestration historique de l'*OMS* peuvent ainsi être calculés avec la fonction F_G.

5.3.2 Comparaison des coûts environnementaux de l'orchestration de commandes effectuée par l'optimisation séquentielle et celle effectuée par l'*OMS*

Le Tableau 5.5 présente pour les instances industrielles `dataR` les coûts environnementaux des solutions retournées par l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ et par l'orchestration réalisée par l'*OMS*. Les coûts sont détaillés par type de livraison (livraison à domicile (LD) ou *Click* & *Collect* (CkC)).

	$F_G(\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}})$	$F_G(OMS)$
Total	126.8	176.9 (+39.4%)
LD	159.3	207.0 (+30.0%)
CkC	96.8	149.0 (+53.9%)

TABLEAU 5.5 – Comparaison des coûts environnementaux (en gCO_2eq) des solutions de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ et de l'*OMS* pour les instances industrielles `dataR`.

Le coût environnemental moyen d'une commande orchestrée par l'*OMS* est en

moyenne 40% plus élevé qu'une commande orchestrée par le modèle d'optimisation séquentielle $\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$. Cet écart de performances environnementales est significativement plus marqué pour les commandes en *Click & Collect* que pour les commandes livrées à domicile. La Figure 5.1 permet d'éclairer ces observations en détaillant la répartition des différents coûts environnementaux des solutions de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ et de l'*OMS* sur les instances industrielles `dataR`.

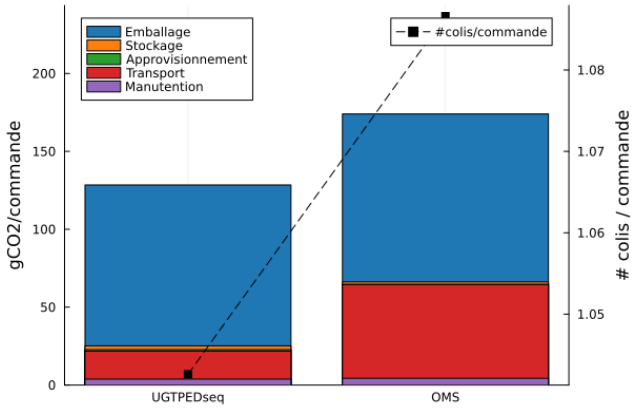

FIGURE 5.1 – Répartition des coûts environnementaux et du nombre de colis par commande des solutions de $\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ et *OMS* pour les instances de `dataR`.

Nous relevons que le surcoût environnemental de l'*OMS* par rapport à l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ est principalement porté par l'augmentation des coûts liés au transport, qui sont 3.3 fois plus élevés pour l'orchestration de l'*OMS* que pour les solutions de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$. À l'inverse, les coûts de stockage et d'approvisionnement sont respectivement 1.6 et 6.5 fois plus élevés pour l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ que pour l'*OMS*. Ces différences témoignent d'une stratégie de priorisation des entrepôts pour satisfaire les commandes en ligne puisque les coûts environnementaux d'approvisionnement et de stockage sont plus faibles pour les entrepôts que pour les magasins. Cela explique également que l'écart de coûts environnementaux entre les deux méthodes d'orchestration soit plus important pour les commandes livrées à domicile que pour les commandes retirées en *Click & Collect* : alors que l'optimisation priorise les magasins de retrait pour satisfaire les commandes en *Click & Collect*, les règles d'orchestration favorisent l'envoi des commandes depuis l'entrepôt vers les magasins de retrait.

Il était attendu d'observer une différence significative de coûts environnementaux entre l'orchestration retournée par l'optimisation écologique en séquentiel $\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ et l'orchestration issue de l'*OMS* basée sur des règles d'orchestration définies par les enseignes. En effet, celles-ci ont leur contraintes opérationnelles et leurs objectifs qui leurs sont propres. Notamment, la majorité des enseignes conçoivent des règles d'orchestration à des fins économiques et non pas écologiques. Assez réalistement, sans une réglementation contraignante qui n'existe pas à l'heure actuelle, le surcoût économique de l'orchestration écologique devra être faible, voire nul, pour que celle-ci soit utilisée par les e-commerçants.

5.3.3 Une première évaluation économique de l'optimisation écologique de l'orchestration de commandes

La viabilité économique représente la priorité des e-commerçants. Une orchestration écologique qui induirait une augmentation significative des coûts économiques a peu de chance d'être adoptée en l'absence d'une réglementation contraignante. Ainsi, nous proposons dans cette section une estimation de la pertinence économique de notre modèle d'orchestration écologique. Puisque le calcul du coût économique d'une commande en ligne pour un e-commerçant est complexe : frais d'approvisionnement, de stockage, de préparation, d'expédition, risque de stocks invendus en fin de saison, etc..., nous nous concentrons sur un critère économique simplifié : le nombre de colis expédiés. Cette métrique est en fait considérée par de nombreux e-commerçants puisqu'elle est directement liée aux frais d'expédition. De plus, nous n'introduisons pas de contraintes opérationnelles, qui sont propres au contexte opérationnel de chaque e-commerçant C'est aussi la métrique utilisée par [Xu et al., 2009] dont l'objectif était de réduire les coûts économiques de l'orchestration de commandes pratiquée par leur partenaire industriel.

Le Tableau 5.6 présente pour les instances de `dataR` le nombre moyen de colis expédiés par commande dans les solutions de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ et de l'*OMS*. Les résultats sont détaillés selon le mode de livraison (LD : livraison à domicile, CkC : *Click & Collect*). Nous indiquons entre parenthèses dans la colonne "#colis(*OMS*)" l'écart en pourcentage entre le nombre de colis retourné par les deux méthodes d'orchestration.

$\mathcal{R}$	# colis ($\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$)	# colis(*OMS*)
Total	1.033	1.108 (+7.271)
r_1	1.015	1.047 (+3.163%)
r_1 - LD	1.172	1.065 (-9.116%)
r_1 - CkC	0.787	1.021 (+29.706%)
r_2	1.003	1.042 (+3.87%)
r_2 - LD	1.173	1.145 (-2.387%)
r_2 - CkC	0.941	1.004 (+6.712%)
r_3	0.989	1.208 (+22.106%)
r_3 - LD	1.243	1.254 (+0.836%)
r_3 - CkC	0.832	1.18 (+41.742%)
r_4	1.036	1.114 (+7.519%)
r_4 - LD	1.223	1.158 (-5.285%)
r_4 - CkC	0.777	1.052 (+35.376%)
r_5	1.151	1.173 (+1.92%)
r_5 - LD	1.239	1.219 (-1.687%)
r_5 - CkC	1.044	1.118 (+7.16%)

TABLEAU 5.6 – Comparaison du nombre de colis expédiés dans les solutions de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ et de l'*OMS* pour les instances industrielles `dataR`.

A l'exception de l'enseigne r_3, le nombre moyen de commandes par colis est très proche entre les solutions du modèle d'optimisation séquentielle $\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ et l'or-

chestration pratiquée par l'*OMS*, avec un léger avantage pour la méthode d'optimisation séquentielle. Nous notons toutefois que les résultats diffèrent selon le mode de livraison. Pour les commandes livrées à domicile, l'orchestration basée sur l'*OMS* génère moins de colis que l'orchestration basée sur l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$. En revanche, le modèle d'optimisation $\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ favorise les points de retrait pour servir les commandes en *Click* & *Collect*, comme l'indique le nombre de colis par commandes moyen inférieur à 1 pour les enseignes 1 à 4. Si les solutions de l'*OMS* ne semblent pas favoriser les points de retrait pour satisfaire les commandes en *Click* & *Collect*, cela s'explique par les contraintes opérationnelles imposées par les e-commerçants.

A la vue de ces premiers résultats, utiliser un solveur pour l'optimisation écologique de l'orchestration de commandes n'est pas incompatible avec les enjeux économiques. Cela confirme aussi à nouveau que favoriser le regroupement des commandes est une stratégie intéressante, tant d'un point de vue écologique qu'économique.

Notons que l'optimisation de l'orchestration permet également une simplification opérationnelle significative pour les enseignes, et donc un argument de vente pour un *OMS*. En effet, concevoir une séquence sophistiquée de règles d'orchestration n'est pas chose aisée pour un humain, et malgré l'accompagnement des équipes de l'*OMS*, la conception des règles d'orchestration est une étape laborieuse pour les e-commerçants. De plus, les règles établies ne garantissent pas in fine une stratégie permettant d'effectivement minimiser le critère souhaité. À l'inverse, orchestrer des commandes à l'aide de l'optimisation nécessite seulement la détermination d'un critère d'optimisation puis assure de fournir la meilleure orchestration vis-à-vis de ce critère. Si besoin, des contraintes traduisant des besoins opérationnels peuvent être ajoutées au modèle mathématique de l'$\texttt{UGTPED}$.

5.4 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons abordé l'intérêt de l'optimisation mathématique pour la mise en pratique de l'orchestration écologique de commandes.
Dans un premier temps, nous avons montré que l'optimisation séquentielle de l'orchestration écologique de commandes était une alternative très pertinente à l'optimisation par lots de commandes. En plus de correspondre à l'architecture logicielle d'un *OMS*, l'orchestration séquentielle présente des performances calculatoires beaucoup plus intéressantes que l'orchestration par lots de commandes, sans voir pour autant ses performances environnementales se dégrader sur les instances que nous considérons. Si ces résultats remettent en question l'application pratique de l'orchestration par lots de commandes, son intérêt théorique demeure puisqu'elle sert de base comparative pour évaluer la qualité des autres méthodes.
Dans un second temps, nous avons regardé si l'optimisation séquentielle présentait un intérêt significatif par rapport au processus d'orchestration actuel. Nous avons constaté une réduction des coûts environnementaux de 40% entre les résultats de notre approche séquentielle d'orchestration écologique et l'orchestration actuelle

pratiquée par l'*OMS*.
Enfin, nous avons jaugé la pertinence économique de notre modèle d'orchestration écologique à l'aide d'un critère simple mais utilisé en pratique, le nombre de colis expédiés. Les résultats montrent qu'en considérant ce critère, notre modèle d'orchestration écologique ne diffère pas significativement d'un point de vue économique de l'orchestration actuelle issue de l'*OMS*.

Ainsi, nous avons pu montrer dans ce chapitre que l'approche séquentielle proposée $\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ présente un intérêt à la fois en termes écologique et économique, tout en préservant le principe de fonctionnement commande par commande. Son déploiement au sein d'un *OMS* peut alors être envisagé. Cependant, bien que ce soit une étape importante, la validation technique de l'optimisation écologique de l'orchestration ne constitue pas le seul frein à son déploiement. Entre disponibilité des données, gestion des commandes avec un grand nombre d'articles ou encore prix élevés des solveurs d'optimisation, d'autres barrières doivent encore être franchies. Elles seront abordées au chapitre suivant et des solutions seront proposées.

Chapitre 6

Des méthodes alternatives d'orchestration écologique de commandes pour en faciliter le déploiement opérationnel

Sommaire

6.1 Introduction 97

6.2 Optimisation écologique alternative de l'orchestration de commandes à l'aide de critères d'optimisation alternatifs . 98

6.2.1 Classification de l'accessibilité aux données pour définir des critères d'optimisation écologiques alternatifs 98

6.2.2 Les critères d'optimisation écologiques alternatifs 100

6.2.3 Des modèles alternatifs d'optimisation écologique pour l'orchestration de commandes 101

6.2.4 Analyse des performances environnementales des modèles alternatifs d'optimisation écologique de l'orchestration de commandes 104

6.3 Orchestration écologique de commandes à partir des règles d'orchestration d'un *OMS* 109

6.3.1 Règles d'orchestration pour une orchestration écologique . . . 110

6.3.2 Performances environnementales des règles d'orchestration écologiques 111

6.4 Synthèse 114

6.1 Introduction

Étant donné le contexte économique actuel sous tension et le peu de contraintes (par exemple réglementaires) imposées sur la réduction de l'empreinte carbone de la logistique, le déploiement d'une orchestration écologique de commandes ne constitue pas une priorité forte pour les e-commerçants. Ainsi, pour que l'orchestration écologique de commandes soit adoptée à court terme, elle doit être peu contraignante et peu coûteuse. Dans ce chapitre, nous cherchons donc à simplifier l'adoption de l'orchestration écologique de commandes par les e-commerçants.

Premièrement, nous cherchons à atténuer l'effort de collecte des données nécessaire à son déploiement. En effet, notre modèle d'optimisation écologique s'appuie sur une fonction environnementale complète mais dont la majorité des données ne sont pas facilement accessibles. Nous proposons donc des modèles alternatifs d'optimisation utilisant différents critères d'optimisation construits à partir de données facilement accessibles. Ces modèles sont ensuite évalués afin d'en juger la pertinence d'un point de vue environnemental.
Deuxièmement, nous évaluons le potentiel d'une orchestration de commandes basée sur les règles d'orchestration existantes en se focalisant sur celles qui, expérimentalement, ont le plus d'impact écologique. Déterminer des règles d'orchestration implémentables dans le logiciel existant et présentant de bonnes performances environnementales permettrait d'offrir rapidement une option d'orchestration écologique de commandes.

Dans la suite de ce chapitre, nous introduisons et analysons en Section 6.2 des modèles alternatifs d'optimisation écologique d'orchestration reposant sur des données facilement accessibles pour les e-commerçants. Puis, la Section 6.3 présente des règles d'orchestration écologiques construites à partir de ce qu'est déjà capable de proposer un *OMS*. Enfin, la Section 6.4 propose une synthèse du chapitre.

6.2 Optimisation écologique alternative de l'orchestration de commandes à l'aide de critères d'optimisation alternatifs

Dans la Section 2.2 (page 34), nous avons introduit la fonction F_G (Equation (2.5)) pour mesurer l'empreinte environnementale d'une orchestration de commandes. Cette fonction est utilisée comme critère objectif par les modèles d'optimisation écologique d'orchestration de commandes. Toutefois, cette fonction est calculée à partir de nombreuses données qui ne sont pas toujours facilement accessibles pour les e-commerçants. L'effort nécessaire pour récupérer ces données peut être un frein à l'adoption de l'orchestration écologique.
Ainsi, nous proposons plusieurs critères d'optimisation alternatifs calculés à partir de données facilement accessibles par les e-commerçants et visant une orchestration de commandes à faible coût environnemental. Dans la suite de cette section, nous évaluons l'accessibilité des différentes données, puis nous présentons les critères d'optimisation écologiques alternatifs retenus et les modèles d'optimisation associés. Enfin, nous nous intéressons à leurs performances environnementales vis-à-vis du critère écologique F_G.

6.2.1 Classification de l'accessibilité aux données pour définir des critères d'optimisation écologiques alternatifs

Comme dit précédemment, parmi les données nécessaires pour calculer la fonction environnementale F_G, certaines données sont plus facilement accessibles que

d'autres. À partir des connaissances métier de notre partenaire industriel, nous avons attribué un score sur 5 à chaque donnée nécessaire au calcul de la fonction F_G afin de rendre compte de leur facilité de collecte par un e-commerçant. Un score de 5/5 correspond à une donnée obtenable avec un minimum d'effort tandis qu'un score de 0/5 correspond à une donnée dont l'obtention nécessite beaucoup de travail, par le e-commerçant ou par un tiers. Le Tableau 6.1 évalue le score d'accessibilité des données liées aux boîtes et aux produits. Puis, le Tableau 6.2 évalue le score d'accessibilité des données liées aux coûts environnementaux.

Donnée	**Notation**	**Accessibilité**	**Commentaire**
Types boîtes	$\mathcal{B}$	4/5	A collecter auprès des points de stock
Volume boîte (m^3)	V_b	4/5	Obtention facile à partir des types de boîtes
Masse boîte (kg)	M_b	4/5	Obtention facile à partir des types de boîtes
Volume produit (m^3)	v_p	4/5	Connu, parfois incomplet et imprécis
Masse produit (kg)	m_p	4/5	Connu, parfois incomplet et imprécis
Coefficient de sécurité	α	5/5	À fixer soi-même

TABLEAU 6.1 – Évaluation de l'accessibilité des données relatives aux boîtes et aux produits.

Donnée	**Notation**	**Accessibilité**	**Commentaires**
Distances points de stock - lieux de livraisons	dist_{sc}	5/5	Connu, à partir des adresses et des coordonnées géographiques associées
Coûts d'approvisionnement (gCO_2eq)	CA_{ps}	2/5	Requiert la connaissance des véhicules et des trajets empruntés
Coûts de stockage (gCO_2eq)	CS_{ps}	2/5	Nécessite de faire un bilan énergétique de chaque point de stock
Coûts d'emballage (gCO_2eq)	CE_b	4/5	Obtention facile à partir des types de boîtes
Coûts de manutention (gCO_2eq)	CM_{sc}	1/5	À collecter auprès des transporteurs
Coûts de transport liés aux produits (gCO_2eq)	CTP_{psc}	1/5	À collecter auprès des transporteurs
Coûts de transport liés aux boîtes (gCO_2eq)	CTB_{bsc}	1/5	À collecter auprès des transporteurs

TABLEAU 6.2 – Évaluation de l'accessibilité des données relatives aux coûts environnementaux.

Globalement, les données de distances entre points de stock et destinations ainsi

que les caractéristiques des produits et des boîtes pourraient aisément être utilisées pour construire des critères d'optimisation de l'orchestration. En revanche, il est plus difficile pour les e-commerçants d'accéder aux données liées aux coûts environnementaux (en équivalent CO_2) des différentes étapes de la logistique (approvisionnement, stockage, manutention, transport). Nous présentons maintenant les critères d'optimisation alternatifs à la fonction environnementale F_G que nous avons construits.

6.2.2 Les critères d'optimisation écologiques alternatifs

Les notations utilisées pour décrire les critères d'optimisation alternatifs sont les mêmes que celles du Chapitre 4. Nous rappelons que y_{bnsc} vaut 1 si la boîte numéro n de type b est expédiée depuis le point de stock s vers la commande c et que x_{pscbn} indique le nombre de produits p expédiés dans la boîte numéro n de type b sur le chemin (sc).

Nombre de colis expédiés

Le premier critère correspond au nombre de colis expédiés, dénoté F_C. Nous introduisons K_{sc}, $\forall s \in \mathcal{S}, c \in \mathcal{C}$. K_{sc} vaut 0 si la commande c est une commande en *Click* & *Collect* dont le point de retrait est le point de stock s, 1 sinon. F_C est donné par l'équation (6.1).

$$F_C = \sum_{b\in\mathcal{B}} \sum_{n\in\mathcal{N}} \sum_{s\in\mathcal{S}} \sum_{c\in\mathcal{C}} \mathrm{K}_{sc} \cdot y_{bnsc} \tag{6.1}$$

Distance parcourue par les articles

Le deuxième critère correspond à la distance parcourue par les articles, dénoté F_{DA}. Nous rappelons que $\forall s \in \mathcal{S}, c \in \mathcal{C}$, dist_{sc} correspond à la distance entre le point de stock s et la destination de la commande c. F_{DA} est donné par l'équation (6.2).

$$F_{DA} = \sum_{p\in\mathcal{P}} \sum_{s\in\mathcal{S}} \sum_{c\in\mathcal{C}} \mathrm{dist}_{sc} \cdot x_{psc} \tag{6.2}$$

Distance parcourue par les colis

Le troisième critère correspond à la distance parcourue par les colis, dénoté F_D, donné par l'équation (6.3).

$$F_D = \sum_{b\in\mathcal{B}} \sum_{n\in\mathcal{N}} \sum_{s\in\mathcal{S}} \sum_{c\in\mathcal{C}} \mathrm{dist}_{sc} \cdot y_{bnsc} \tag{6.3}$$

Distance parcourue par les colis pondérée par leur volume

Le quatrième critère correspond à la distance parcourue par les colis pondérée par leur volume, dénoté F_{DV}, donné par l'équation (6.4).

$$F_{DV} = \sum_{b\in\mathcal{B}} \sum_{n\in\mathcal{N}} \sum_{s\in\mathcal{S}} \sum_{c\in\mathcal{C}} \text{dist}_{sc} \cdot V_b \cdot y_{bnsc} \tag{6.4}$$

Distance parcourue par les colis pondérée par leur masse

Le cinquième critère correspond à la distance parcourue par les colis pondérée par leur masse, égale à la somme de la masse de la boîte et de la masse des produits. Ce critère, dénoté F_{DM}, est donné par l'équation (6.5).

$$F_{DM} = \sum_{b\in\mathcal{B}} \sum_{n\in\mathcal{N}} \sum_{s\in\mathcal{S}} \sum_{c\in\mathcal{C}} \text{dist}_{sc} \cdot (M_b \cdot y_{bnsc} + \sum_{p\in\mathcal{P}} m_p \cdot x_{pscbn}) \tag{6.5}$$

6.2.3 Des modèles alternatifs d'optimisation écologique pour l'orchestration de commandes

Les modèles mono-objectifs

À partir des critères d'optimisation que nous venons d'introduire, nous construisons des modèles d'optimisation de l'orchestration de commandes en supposant les produits insécables.
Pour les critères "nombre de colis", "distance parcourue par les colis", "distance parcourue par les colis pondérée par leur volume" et "distance parcourue par les colis pondérée par leur masse", nous utilisons les contraintes de respect des demandes, de respect des stocks et d'empaquetage par boîtes de l'`UGTPED` définies en Section 2.4.1, page 42. Les modèles d'optimisation correspondant sont dénotés respectivement par `UGTPED-C`, `UGTPED-D`, `UGTPED-DV` et `UGTPED-DM` et sont donnés ci-après.

(`UGTPED-C`) min $F_C = (6.1)$
s.c. $(2.9) - (2.13)$

(`UGTPED-D`) min $F_D = (6.3)$
s.c. $(2.9) - (2.13)$

(`UGTPED-DV`) min $F_{DV} = (6.4)$
s.c. $(2.9) - (2.13)$

(`UGTPED-DM`) min $F_{DM} = (6.5)$
s.c. $(2.9) - (2.13)$

Pour le critère "distance parcourue par les articles", la notion de boîtes n'intervient pas. Ainsi, le modèle d'optimisation de l'orchestration associé ne nécessite pas de contrainte d'empaquetage. Ce modèle, dénoté `UGTPED-DA`, est donné ci-après, et se

rapproche du problème de transport multi-indices, introduit Section 1.3.2 (page 20).

$$\texttt{(UGTPED-DA)} \quad \min F_{DA} = \sum_{p\in\mathcal{P}}\sum_{s\in\mathcal{S}}\sum_{c\in\mathcal{C}} \text{dist}_{sc} x_{psc} \tag{6.6}$$

$$\text{s.c.} \sum_{s\in\mathcal{S}} x_{psc} = d_{pc} \qquad \forall p\in\mathcal{P}, \forall c\in\mathcal{C} \tag{6.7}$$

$$\sum_{c\in\mathcal{C}} x_{psc} \leq q_{ps} \qquad \forall p\in\mathcal{P}, \forall s\in\mathcal{S} \tag{6.8}$$

$$x_{psc} \in \mathbb{N} \qquad \forall p\in\mathcal{P}, s\in\mathcal{S}, c\in\mathcal{C} \tag{6.9}$$

Les modèles bi-objectifs basés sur un ordre lexicographique

L'analyse par indicateur de référence des performances environnementales de l'UGTPED menée dans la Section 4.3 (page 73) semblait indiquer une légère corrélation entre les coûts environnementaux des commandes et le nombre de colis par commande. Toutefois, la simple minimisation du nombre de colis peut mener à de nombreuses solutions équivalentes vis à vis de ce critère, mais aux coût environnementaux largement différents.
Par conséquent, nous proposons des modèles d'orchestration de commandes bi-objectifs s'appuyant sur un ordre lexicographique des critères, où l'on minimise en premier le nombre de colis expédiés, puis on optimise un second critère parmi "distance parcourue par les colis", "distance parcourue par les colis pondérée par leur volume", "distance parcourue par les colis pondérée par leur masse" et "distance parcourue par les articles". Les modèles d'optimisation correspondant sont dénotés respectivement par UGTPED-C-D, UGTPED-C-DV, UGTPED-C-DM et UGTPED-C-DA et sont donnés ci-après.

(UGTPED-C-D)		(UGTPED-C-DV)		(UGTPED-C-DM)	
min	$F_C = (6.1)$	min	$F_C = (6.1)$	min	$F_C = (6.1)$
min	$F_D = (6.3)$	min	$F_{DV} = (6.4)$	min	$F_{DM} = (6.5)$
s.c.	$(2.9) - (2.13)$	s.c.	$(2.9) - (2.13)$	s.c.	$(2.9) - (2.13)$

$$\begin{aligned} \texttt{(UGTPED-C-DA)} \quad & \min F_C = (6.1) \\ & \min F_{DA} = \sum_{p\in\mathcal{P}}\sum_{b\in\mathcal{B}}\sum_{n\in\mathcal{N}}\sum_{s\in\mathcal{S}}\sum_{c\in\mathcal{C}} \text{dist}_{sc} \cdot x_{pscbn} \\ & \text{s.c. } (2.9) - (2.13) \end{aligned}$$

Notons que nous ne proposons pas de modèles bi-objectifs où nous minimiserions un premier critère parmi "distance parcourue par les colis", "distance parcourue par les colis pondérée par leur volume", "distance parcourue par les colis pondérée par leur masse" et "distance parcourue par les articles" puis le nombre de colis. En effet, du fait des valeurs décimales utilisées pour le calcul des critères $F_D, F_{DA}, F_{DV}, F_{DM}$, il est hautement improbable que leur minimisation mène à plusieurs solutions équi-

valentes de même valeur de critère objectif, rendant inutile l'optimisation ensuite via un second critère.

Re-calcul de l'empaquetage

Pour chacun des modèles que nous venons de présenter, la résolution fournit une affectation des articles de chaque commande aux points de stock, soit les valeurs x^*, ainsi qu'un choix des boîtes à utiliser, soit les valeurs y^* (à l'exception de l'`UGTPED-DA` qui ne retourne que les valeurs des variables x) . Toutefois, les valeurs attribuées aux variables y ne sont pas forcément pertinentes d'un point de vue du critère environnemental F_G. Par exemple, pour l'`UGTPED-D` qui minimise la distance parcourue par les colis, la boîte de plus grand volume sera favorisée même si le volume d'articles à transporter est faible et qu'une boîte de plus petite taille suffirait. Il est donc nécessaire de re-calculer la sélection des boîtes la plus appropriée étant donnée l'affectation des articles aux points de stock x^*.
La procédure de l'`OPR` présentée en Section 2.4.3 (page 45) ne peut pas être utilisée car elle nécessite des données dont nous cherchons à nous affranchir. Afin de rendre compte au mieux des coûts environnementaux réels de chaque modèle d'orchestration, nous appliquons une procédure de re-calcul qui vise à retourner les boîtes qui seraient effectivement sélectionnées par une personne humaine devant empaqueter une commande. Intuitivement, la priorité serait de minimiser le nombre de boîtes utilisées pour la commande. Étant donné ce nombre, nous avons ensuite décidé de minimiser le volume total des boîtes utilisées.
Cette procédure de re-calcul de l'empaquetage, est dénotée *Number Parcels Then Volume Package Recomputing* (`NPTVPR`) et est appliquée à chaque chemin (sc). Le modèle mathématique est donné ci après sur un chemin (sc), où x^* correspond à l'affectation optimale réalisée par l'un des modèles d'orchestration présentés précédemment.

$$(\texttt{NPTVPR}_{sc}(x^*)) \quad \min \sum_{b\in\mathcal{B}} \sum_{n\in\mathcal{N}_{bsc}} y_{bn} \tag{6.10}$$

$$\min \sum_{b\in\mathcal{B}} \sum_{n\in\mathcal{N}_{bsc}} V_b y_{bn} \tag{6.11}$$

$$\text{s.c. } (2.26) - (2.29) \tag{6.12}$$

En définitive, nous obtenons neuf modèles alternatifs d'optimisation écologique de l'orchestration de commandes, cinq modèles mono-objectifs et quatre modèles bi-objectifs. Les données requises pour tester ces modèles sont plus facilement accessibles que les données requises par l'`UGTPED`. Regardons désormais la qualité environnementale des solutions retournées par ces modèles d'optimisation alternatifs.

6.2.4 Analyse des performances environnementales des modèles alternatifs d'optimisation écologique de l'orchestration de commandes

Méthodologie expérimentale

Pour tester nos modèles alternatifs d'optimisation écologique, nous utilisons l'optimisation séquentielle commande par commande que nous avons présentée en Section 5.2. Nous définissons ainsi les équivalents séquentiels des neuf modèles d'optimisation alternatifs présentés dans la section précédente, dénotés $\texttt{UGTPED-C}_{\texttt{seq}}$, $\texttt{UGTPED-D}_{\texttt{seq}}$, $\texttt{UGTPED-DV}_{\texttt{seq}}$, $\texttt{UGTPED-DM}_{\texttt{seq}}$, $\texttt{UGTPED-DA}_{\texttt{seq}}$, $\texttt{UGTPED-C-D}_{\texttt{seq}}$, $\texttt{UGTPED-C-DV}_{\texttt{seq}}$, $\texttt{UGTPED-C-DM}_{\texttt{seq}}$ et $\texttt{UGTPED-C-DA}_{\texttt{seq}}$. Pour chacun de ces modèles, la résolution séquentielle fournit une affectation des articles de chaque commande aux points de stock, soit les valeurs x^*, puis les choix des boîtes, soit les valeurs y^*, sont donnés par la procédure NPTVPR. Ainsi, nous pouvons recalculer les coûts environnementaux des solutions des différents modèles d'orchestration alternatifs avec la fonction F_G. Puis, nous comparons ces coûts aux coûts environnementaux des solutions du modèle séquentiel initial d'optimisation écologique de l'orchestration de commandes $\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$, basé sur des données environnementales plus détaillées.

Nous menons des tests sur les instances industrielles $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$ et les instances réalistes générées dataG. Cependant, les résultats de la Section 5.3.3 nous ont montré l'impact important des contraintes opérationnelles introduites par les e-commerçants sur l'orchestration réelle des commandes en *Click & Collect*. Ainsi, pour les instances industrielles $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$, nous ne conservons que les composantes connexes qui ne contiennent pas de commande en *Click & Collect*. De même, pour les instances réalistes générées dataG, nous ne conservons que les instances avec %CkC=0. Nous dénotons ces deux ensembles $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}\texttt{-LD}$ et dataG-LD (LD=Livraison à Domicile).

Enfin, notons que nous ne ferons pas d'analyse des performances de calcul car chaque modèle alternatif est au moins aussi performant que l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$, dont les performances sont déjà acceptables d'un point de vue opérationnel.

Performances environnementales des modèles alternatifs sur les instances industrielles

La Figure 6.1 indique, pour les instances de $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}\texttt{-LD}$, la distribution des écarts de coûts environnementaux entre les solutions des neuf modèles alternatifs d'optimisation écologique de l'orchestration de commandes et les solutions de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$. Cet écart est noté $\Delta CO2$ et est exprimé en pourcentage. La distribution des écarts est représentée pour chaque modèle sous la forme d'un diagramme en boîte [1]. Plus la boîte s'approche de zéro, plus les solutions du modèles sont proches des solutions

1. Les bords inférieurs et supérieurs de la boîte représentent le premier et le troisième quartile tandis que la médiane est représentée par le trait à l'intérieur de la boîte. Les moustaches sont d'une longueur d'au plus 1.5 fois l'écart interquartile et s'arrêtent à la valeur observée la plus extrême de cet intervalle. Un point est ajouté pour chaque valeur observée dépassant l'écart des moustaches.

de l'UGTPED$_{seq}$. Sur le graphique, pour les critères "distance parcourue par les colis" (F_D), "distance parcourue par les articles" (F_{DA}), "distance parcourue par les colis pondérée par leur volume" (F_{DV}) et "distance parcourue par les colis pondérée par leur masse" (F_{DM}), la boîte de gauche correspond à l'optimisation mono-objectif et la boîte de droite correspond à l'optimisation multi-objectif avec l'approche lexicographique.

En complément, le Tableau 6.3 indique pour les instances dataR$_{cc}$-LD la moyenne, l'écart type, la proportion de valeurs à 0 % et la proportion de valeurs $\geq$ 50 % pour la distribution des écarts de coûts environnementaux $\Delta CO2$ entre les neuf modèles alternatifs d'optimisation écologique et l'UGTPED$_{seq}$.

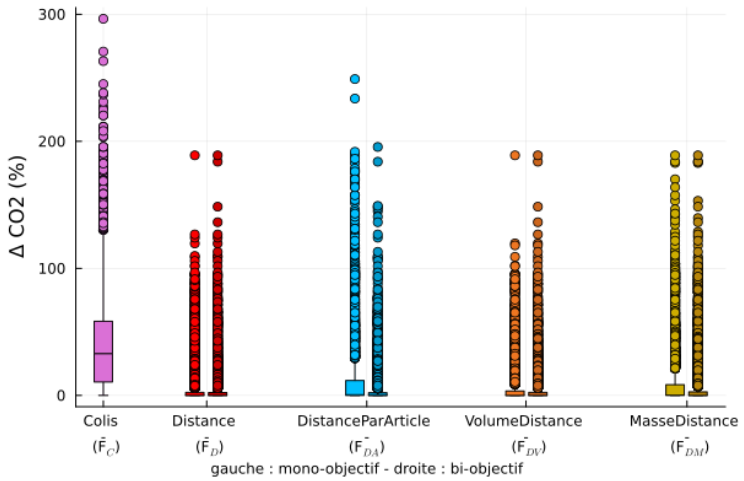

FIGURE 6.1 – Distribution des écarts de coûts environnementaux entre les solutions de l'UGTPED$_{seq}$ et les solutions des modèles alternatifs d'optimisation écologique pour les instances dataR$_{cc}$-LD.

Tout d'abord, nous constatons que le modèle d'UGTPED-C$_{seq}$ minimisant simplement le nombre de colis expédiés F_C n'est pas satisfaisant d'un point de vue environnemental. En moyenne, minimiser seulement le nombre de colis entraîne un surcoût environnemental de près de 40 % par rapport à l'orchestration proposée par UGTPED$_{seq}$. Cependant, ce critère est pertinent lorsqu'il est combiné à un second critère d'optimisation. En effet, les coûts environnementaux moyens des modèles bi-objectifs sont systématiquement plus faibles que les coûts environnementaux des modèles mono-objectifs correspondants.
Ensuite, à l'exception de l' UGTPED-C$_{seq}$, les valeurs des moyennes et des médianes sont d'au plus quelques pourcents pour chacun des modèles. Toutefois, systématiquement plus d'1% des commandes ont un surcoût environnemental de plus de 50% par rapport à l'UGTPED$_{seq}$.
Enfin, les résultats permettent d'établir une première hiérarchie des différents modèles d'optimisation alternatifs quant à leur capacité à retourner une orchestration écologique de commandes. Les modèles d'optimisation bi-objectifs UGTPED-C-D$_{seq}$,

Modèle	$\Delta CO2_\mu$	$\Delta CO2_\sigma$	$\%\Delta CO2{=}0$	$\%\Delta CO2 \geq 50$
UGTPED-C$_{seq}$	38.7	35.0	15.4	32.1
UGTPED-D$_{seq}$	4.1	11.8	56.8	1.9
UGTPED-C-D$_{seq}$	3.8	11.4	57.2	1.6
UGTPED-DA$_{seq}$	12.2	25.2	46.5	8.3
UGTPED-C-DA$_{seq}$	3.7	11.6	58.0	1.5
UGTPED-DV$_{seq}$	4.9	12.1	52.4	1.9
UGTPED-C-DV$_{seq}$	3.8	11.3	56.3	1.5
UGTPED-DM$_{seq}$	9.6	20.4	48.0	5.9
UGTPED-C-DM$_{seq}$	5.1	14.3	55.1	2.5

TABLEAU 6.3 – Moyenne - écart type - proportion de valeurs à 0 % - proportion de valeurs ≥ 50 % pour la distribution des écarts de coûts environnementaux entre l'UGTPED$_{seq}$ et les neuf modèles alternatifs d'optimisation écologique pour dataR$_{cc}$-LD.

UGTPED-C-DA$_{seq}$, et UGTPED-C-DV$_{seq}$ minimisant d'abord le nombre de colis puis, soit la distance parcourue par les colis, soit la distance parcourue par les articles, soit la distance parcourue par les colis pondérée par leur volume, semblent les plus performants. A l'inverse, la seule minimisation de la distance parcourue par les articles, UGTPED-DA$_{seq}$, souvent utilisée dans la littérature comme objectif environnemental, ou la seule minimisation du nombre de colis, UGTPED-C$_{seq}$, sont les moins performants.

Performances environnementales des modèles alternatifs sur les instances réalistes générées

La Figure 6.2 et le Tableau 6.4 montrent les écarts de coûts environnementaux entre les solutions des neuf modèles alternatifs d'optimisation écologique de l'orchestration de commandes et des solutions de l'UGTPED$_{seq}$ pour les instances dataG-LD. Leurs caractéristiques sont les mêmes que celles de la Figure 6.1 et du Tableau 6.3. Comme pour les instances de dataR$_{cc}$-LD, la simple minimisation du nombre de colis UGTPED-C$_{seq}$ ou la seule minimisation de la distance parcourue par les articles UGTPED-DA$_{seq}$ ne sont pas satisfaisantes pour les instances de dataG-LD$_{seq}$. Combiner le critère de minimisation du nombre de colis avec un second critère permet toujours une réduction des coûts environnementaux par rapport à l'optimisation mono-objectif. Les modèles bi-objectifs UGTPED-C-D$_{seq}$, et UGTPED-C-DV$_{seq}$ sont les plus performants d'un point de vue environnemental. Ils sont suivis par les modèles UGTPED-C-DA$_{seq}$ et UGTPED-C-DM$_{seq}$.
Pour les instances dataG-LD, nous relevons quelques commandes pour lesquelles les modèles d'optimisation alternatifs proposent une orchestration plus écologique que le modèle UGTPED$_{seq}$ ($\Delta CO2 < 0$). Comme le montrera plus tard la Figure 6.6, ces commandes appartiennent à des instances avec une forte tension sur les stocks (ratio %d/q=0.5 ou =1) sur lesquelles l'optimisation séquentielle écologique UGTPED$_{seq}$

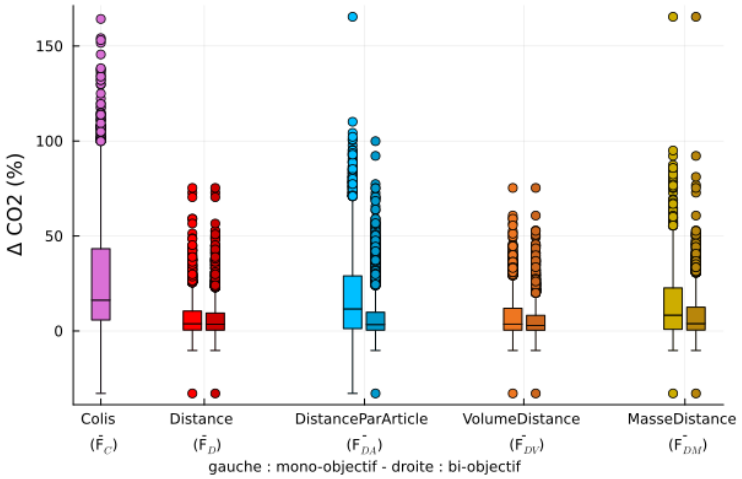

FIGURE 6.2 – Distribution des écarts de coûts environnementaux entre les solutions de l'UGTPED$_{seq}$ et les solutions des modèles alternatifs d'optimisation écologique pour les instances dataG-LD.

Modèle	$\Delta CO2_{\mu}$	$\Delta CO2_{\sigma}$	$\%\Delta CO2{=}0$	$\%\Delta CO2 \geq 50$
UGTPED-C$_{seq}$	26.5	26.5	4.7	21.6
UGTPED-D$_{seq}$	5.6	6.9	15.6	0.1
UGTPED-C-D$_{seq}$	5.6	7.4	16.0	0.1
UGTPED-DA$_{seq}$	16.9	18.5	11.1	6.0
UGTPED-C-DA$_{seq}$	6.6	9.7	16.3	0.7
UGTPED-DV$_{seq}$	6.7	7.9	14.6	0.2
UGTPED-C-DV$_{seq}$	5.2	7.1	16.1	0.1
UGTPED-DM$_{seq}$	12.9	14.4	12.2	2.6
UGTPED-C-DM$_{seq}$	7.1	9.3	15.2	0.3

TABLEAU 6.4 – Moyenne - écart type - proportion de valeurs à 0 % - proportion de valeurs $\geq$ 50 % pour la distribution des écarts de coûts environnementaux entre l'UGTPED$_{seq}$ et les neuf modèles alternatifs d'optimisation écologique pour dataG-LD.

prend de mauvaises décisions qui induisent un surcoût environnemental élevé par rapport à l'optimisation par lots de commandes UGTPED. Pour ces instances-ci, les mauvaises décisions de l'UGTPED$_{seq}$ ne sont pas reprises par l'optimisation séquentielle des modèles alternatifs d'orchestration écologique, ce qui leur permet en définitive d'orchestrer certaines commandes de manière plus écologique que l'UGTPED$_{seq}$.

Analysons désormais l'influence des indicateurs de référence sur les performances environnementales des modèles alternatifs d'optimisation écologique. Les Figures 6.3 à 6.6 montrent la distribution des écarts de coûts environnementaux entre les solutions des neuf modèles alternatifs d'optimisation écologique de l'orchestration de commandes et les solutions de l'UGTPED$_{seq}$ pour les instances de dataG-LD, en

fonction du nombre de boîtes disponibles $|\mathcal{B}|$, du nombre d'articles par commande `#a/c`, du nombre d'entrepôts $|\mathcal{E}|$ et du ratio `%d/q`. Ces graphiques ne visent pas à être lus dans les détails mais à illustrer une évolution selon les valeurs des indicateurs. Sur ces graphiques, pour chaque valeur d'indicateur, les neuf modèles alternatifs d'optimisation sont représentés en suivant le même ordre que celui des Figures 6.1 et 6.2.

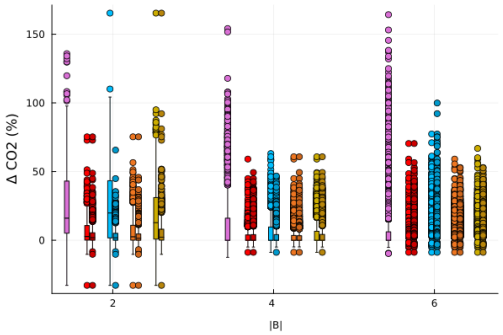

FIGURE 6.3 – Distribution des écarts de coûts environnementaux entre les solutions de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ et les solutions des modèles alternatifs d'optimisation écologique pour les instances `dataG-LD` en fonction de $|\mathcal{B}|$.

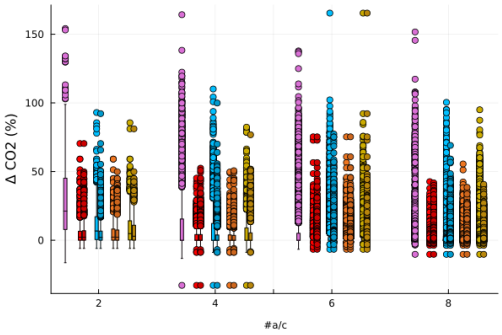

FIGURE 6.4 – Distribution des écarts de coûts environnementaux entre les solutions de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ et les solutions des modèles alternatifs d'optimisation écologique pour les instances `dataG-LD` en fonction de `#a/c`.

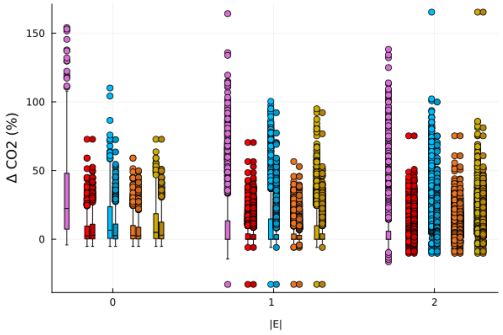

FIGURE 6.5 – Distribution des écarts de coûts environnementaux entre les solutions de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ et les solutions des modèles alternatifs d'optimisation écologique pour les instances `dataG-LD` en fonction de $|\mathcal{E}|$.

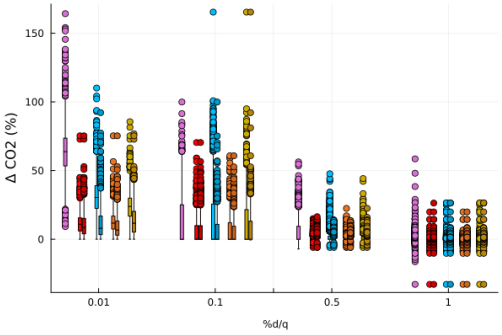

FIGURE 6.6 – Distribution des écarts de coûts environnementaux entre les solutions de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ et les solutions des modèles alternatifs d'optimisation écologique pour les instances `dataG-LD` en fonction de `%d/q`.

Les Figures 6.3, 6.4 et 6.5 ne révèlent pas d'impact significatif des indicateurs $|\mathcal{B}|$, `#a/c` ou $|\mathcal{E}|$ sur les performances environnementales des modèles alternatifs d'optimisation écologique avec l'approche d'optimisation séquentielle puisque les diagrammes en boîte sont relativement similaires lorsque les valeurs de ces indicateurs varient.

En revanche, la Figure 6.6 illustre une nouvelle fois l'impact prépondérant du ratio `%d/q` sur les résultats. Lorsque la valeur du ratio `%d/q` est élevée (`%d/q`=1), les possibilités d'orchestration sont restreintes, menant à de bonnes performances environnementales des modèles alternatifs d'optimisation écologique par rapport aux performances de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$. A l'inverse, lorsque la valeur du ratio `%d/q` est faible (`%d/q`=0.01), les possibilités d'orchestration sont variées, conduisant ainsi les modèles alternatifs d'optimisation écologique à des performances environnementales dégradées.

En conclusion, il semble possible de proposer une optimisation alternative de l'orchestration de commandes présentant de bonnes performances environnementales moyennes tout en s'affranchissant de la fonction environnementale F_G, complète mais nécessitant des données peu accessibles. En particulier, trois modèles d'optimisation alternatifs permettent une orchestration de commande séquentielle dont le coût environnemental est en moyenne à moins de 5% du coût environnemental de l'orchestration séquentielle écologique $\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$. Ces modèles d'optimisation alternatifs sont bi-objectifs et reposent sur une première minimisation du nombre de colis suivie de la minimisation d'un objectif complémentaire, parmi la distance parcourue par les colis (`UGTPED-C-D`), la distance parcourue par les colis pondérée par leur volume (`UGTPED-C-DV`) et la distance parcourue par les articles (`UGTPED-C-DA`). Nous avons aussi relevé que la simple minimisation du nombre de colis (`UGTPED-C`) ou la simple minimisation de la distance parcourue par les articles (`UGTPED-DA`) étaient les options les moins satisfaisantes parmi celles que nous avons évaluées. Désormais, nous pouvons utiliser ces résultats pour concevoir une orchestration écologique facilement déployable opérationnellement.

6.3 Orchestration écologique de commandes à partir des règles d'orchestration d'un *OMS*

Nous avons pu montrer l'intérêt d'utiliser une optimisation séquentielle pour l'orchestration écologique de commandes. Cependant, remplacer les règles d'optimisation implémentées actuellement dans un *OMS* par un solveur d'optimisation est un processus pouvant s'avérer coûteux, au moins en argent et en temps. Par ailleurs, la section précédente nous a montré qu'il était possible d'obtenir une fonction objectif écologique alternative à partir de données déjà disponibles tout en conservant de bonnes performances environnementales dans le contexte de l'optimisation séquentielle de commandes.
Dans cette section, nous étudions comment exploiter les règles d'orchestration existantes dans les *OMS* afin d'améliorer le coût environnemental F_G. En proposant une approche d'orchestration écologique de commandes à partir des règles d'orchestration existantes, l'effort d'adaptation parait moindre. Dans la suite de cette section, nous évaluons les performances environnementales de cette approche par rapport à l'optimisation écologique séquentielle de l'orchestration de commandes.

6.3.1 Règles d'orchestration pour une orchestration écologique

Les résultats de la Section 5.2 ont montré que l'optimisation écologique séquentielle de l'orchestration de commandes présentait des performances environnementales satisfaisantes par rapport à l'orchestration par lots de commandes. Ensuite, les résultats de la Section 6.2 ont montré qu'orchestrer les commandes en minimisant d'abord le nombre de colis puis un second critère parmi la distance parcourue par les colis, la distance parcourue par les colis pondérée par leur volume et la distance parcourue par les articles, permettait d'obtenir des performances environnementales moyennes satisfaisantes. Ainsi, pour notre conception de règles d'orchestration écologiques, nous proposons d'utiliser des règles qui orchestrent séquentiellement chaque commande en visant la minimisation du nombre de colis tout en cherchant à contenir les distances parcourues.
Cependant, la notion de boîte, et donc de colis, n'est actuellement pas considérée par les *OMS*. Pour les règles d'orchestration que nous cherchons à concevoir, nous nous affranchissons alors des contraintes d'empaquetage et nous allons chercher à minimiser le nombre de sources de stock nécessaires à la satisfaction de chaque commande, en substitution du nombre de colis. Pour cela, nous augmentons progressivement le nombre de sources à utiliser pour satisfaire une commande. Pour ce nombre fixé, le ou les points de stock sont sélectionnés s'ils sont situés dans un rayon donné de distance maximale par rapport au lieu de livraison demandé. Tant qu'aucun point de stock ou combinaison de points de stock situés dans ce rayon de distance ne peut satisfaire la commande étant donné le nombre maximal de sources requis, le rayon de distance est augmenté. Le nombre de sources autorisé est augmenté d'une unité si aucune solution n'a été trouvée pour toutes les limites de distance.
Ces règles d'orchestration écologiques sont données en Figure 6.7, où DISTANCES est une liste, dont la taille vaut N, contenant des distances seuils triées par ordre croissant et MS est le nombre maximal de sources nécessaires, correspondant au nombre d'articles de la commande. Nous dénotons cet ensemble de règles d'orchestration écologiques par `R-ORCH`.

Pour chaque commande, les règles d'orchestration sont parcourues séquentiellement, jusqu'à ce que le nombre de sources autorisé et le rayon de distance considéré permettent d'identifier un point de stock candidat ou une combinaison de points de stock candidats (dans le cas où aucune source ne peut satisfaire individuellement la commande). Les points de stock candidats ou les combinaisons de points de stock candidats retournés sont considérés équivalents et l'affectation finale de la commande se fait aléatoirement.

Ainsi définies, ces règles d'orchestration écologiques sont assez proches du modèle de l'$\texttt{UGTPED-C-D}_{\texttt{seq}}$. En effet, alors que `R-ORCH` minimise le nombre de sources puis limite les distances d'expédition, l'$\texttt{UGTPED-C-D}_{\texttt{seq}}$ minimise le nombre de colis et minimise les distances d'expédition.

Puisque l'orchestration écologique à base des règles que nous proposons exploite des règles d'orchestration déjà utilisées actuellement chez les *OMS*, les performances

1) nombre de sources ≤ 1 ET distance $\leq$ DISTANCES[1]
2) nombre de sources ≤ 1 ET distance $\leq$ DISTANCES[2]
...
N) nombre de sources ≤ 1 ET distance $\leq$ DISTANCES[N]
N+1) nombre de sources ≤ 2 ET distance $\leq$ DISTANCES[1]
N+2) nombre de sources ≤ 2 ET distance $\leq$ DISTANCES[2]
...
2N) nombre de sources ≤ 2 ET distance $\leq$ DISTANCES[N]
...
MS×N) nombre de sources $\leq$ MS ET distance $\leq$ DISTANCES[N]

FIGURE 6.7 – Règles d'orchestration écologiques `R-ORCH` basées sur les possibilités techniques actuelles des *OMS*.

de calcul de `R-ORCH` répondent aux besoins opérationnels des *OMS* et ne seront pas détaillées ici. Intéressons-nous cependant à leurs performances environnementales.

6.3.2 Performances environnementales des règles d'orchestration écologiques

Les règles d'orchestration écologiques `R-ORCH` permettent d'affecter les articles commandés aux points de stock, i.e. de retourner les valeurs x^*. Pour déterminer les boîtes utilisées, i.e. les valeurs y^*, nous appliquons la procédure `NPTVPR` présentée en Section 6.2.3. Le coût environnemental de l'orchestration proposée par `R-ORCH` est ensuite calculé avec la fonction F_G.

Afin d'évaluer les performances environnementales des règles d'orchestration écologiques `R-ORCH`, nous menons des tests sur les instances industrielles $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$-`LD` et les instances réalistes générées `dataG-LD`.
Pour effectuer les expérimentations, nous définissons quatre listes DISTANCES. Chacune est construite à partir d'un pas de distance noté `pas`, multiplié par un coefficient $\lambda \in \{1, ..., \overline{\lambda}\}$, tel que $(\overline{\lambda} - 1) \times \texttt{pas} < 1000$ et $\overline{\lambda} \times \texttt{pas} \geq 1000$ ainsi que d'une distance seuil maximale $\overline{\text{dist}}$. Une liste DISTANCES avec un pas `pas` est donnée ci-dessous.

$$\text{DISTANCES}_{\texttt{pas}} = [\texttt{pas}, 2 \times \texttt{pas}, 3 \times \texttt{pas}, ..., \overline{\lambda} \times \texttt{pas}, \overline{\text{dist}}]$$

Les règles d'orchestration écologiques paramétrées avec une liste $\text{DISTANCES}_{\texttt{pas}}$ sont dénotées `R-ORCH`(`pas`). Nous fixons $\texttt{pas} \in \{50, 100, 150, 200\}$km et $\overline{\text{dist}} = 10000$km.

La Figure 6.8 indique le pourcentage de commandes orchestrées en fonction de la distance seuil pour les instances $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$-`LD`, `dataG-LD` et `dataG-LD` avec `%d/q`=0.01.

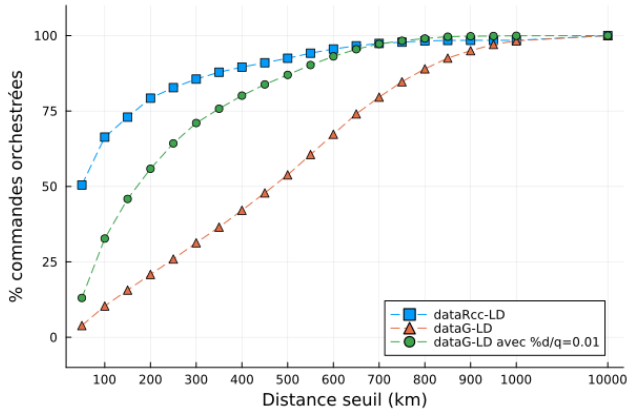

FIGURE 6.8 – Pourcentage de commandes orchestrées par R-ORCH(50) en fonction de la distance seuil pour les instances $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$-LD et dataG-LD.

Cette figure met en évidence qu'une proportion significativement plus importante de commandes des instances industrielles $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$ est satisfaite depuis des points de stock situés dans un rayon de distance proche des lieux de livraison que pour les commandes des instances générées dataG. Cela s'explique notamment par la génération des coordonnées géographiques des points de stock et des lieux de livraison des instances réalistes. En effet, les coordonnées ont été générées aléatoirement d'après une loi uniforme alors que les points de stock et les lieux de livraison proviennent plus probablement des espaces densément peuplés.
Ensuite, ce graphique révèle que la moitié des commandes de $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$-LD sont satisfaites depuis un point de stock situé à moins de 50km de leur destination, alors que seulement 3% des commandes de dataG-LD sont orchestrées depuis un point de stock situé à moins de 50km de leur destination. De plus, sur les premières distances seuils, le pourcentage de commandes orchestrées augmente plus vite pour les commandes de $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$-LD que pour dataG-LD. Ainsi, nous nous attendons à observer un impact plus fort du pas sur les instances industrielles que sur les instances réalistes générées.

Instances industrielles

La Figure 6.9 montre la répartition des coûts environnementaux et le nombre de colis par commande des solutions de l'optimisation séquentielle $\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$, des solutions issues des règles d'orchestration écologique avec différentes valeurs de pas R-ORCH(50), R-ORCH(100), R-ORCH(150), R-ORCH(200) et des solutions retournées par l'orchestration historique de l'*OMS* pour les instances de $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$-LD.
Tout d'abord, ce graphique montre les bonnes performances environnementales des règles d'orchestration écologiques R-ORCH par rapport au modèle d'optimisation écologique séquentiel $\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$. Dans le meilleur des cas étudié, R-ORCH(50) induit un surplus de coûts environnementaux de 6.1 %, tandis que le pire des cas étudié

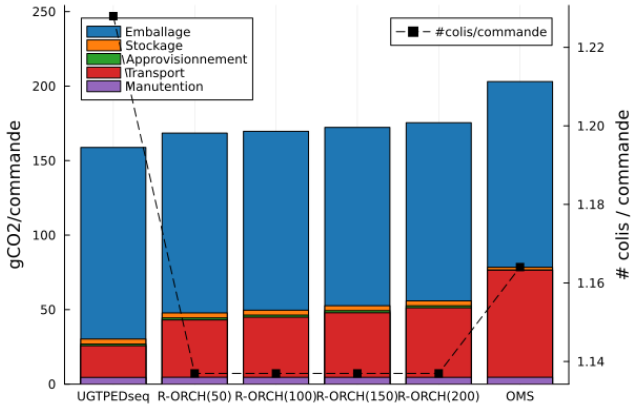

FIGURE 6.9 – Répartition des coûts environnementaux et nombre de colis par commande des solutions de $\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$, R-ORCH(50), R-ORCH(100), R-ORCH(150), R-ORCH(200) et de l'*OMS* pour les instances de $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$-LD.

R-ORCH(200) induit un surplus de coûts environnementaux de 10.4%.
Bien que la part des coûts environnementaux liés au transport soit plus élevée dans les solutions des règles d'orchestration écologiques R-ORCH par rapport aux solutions de l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$, la part des coûts liés aux emballages, elle, diminue. Notons que par rapport à l'$\texttt{UGTPED-C-D}_{\texttt{seq}}$ qui minimise le nombre de colis puis minimise la distance parcourue, R-ORCH(50) n'induit qu'une hausse de 2.3% des coûts environnementaux moyens.
Ensuite, lorsque le pas pas augmente, i.e. lorsque la sélection géographique des points de stock candidats est moins fine, la valeur des coûts environnementaux liés aux emballages reste stable tandis que la valeur des coûts liés au transport augmente.
Enfin, nous retrouvons le fait que les coûts environnementaux des solutions de l'orchestration historique pratiquée par l'*OMS* sont supérieurs à l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$. Les coûts environnementaux générés par l'*OMS* actuel sont également supérieurs à ceux pouvant être atteint en utilisant les règles d'orchestration écologiques R-ORCH.

Pour ce qui est du nombre de colis par commande, nous constatons que les solutions des règles d'orchestration écologiques R-ORCH, visant à réduire le nombre de sources pour satisfaire chaque commande, génèrent moins de colis que l'optimisation écologique séquentielle de l'orchestration $\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ et que l'*OMS* sur les commandes des instances de $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$-LD.

Instances réalistes générées

La Figure 6.10 montre la répartition des coûts environnementaux et le nombre de colis par commande des solutions de $\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$, ainsi que des solutions des règles d'orchestration écologique avec différents seuils de distance R-ORCH(50), R-ORCH(100), R-ORCH(150) et R-ORCH(200) pour les instances de dataG-LD.

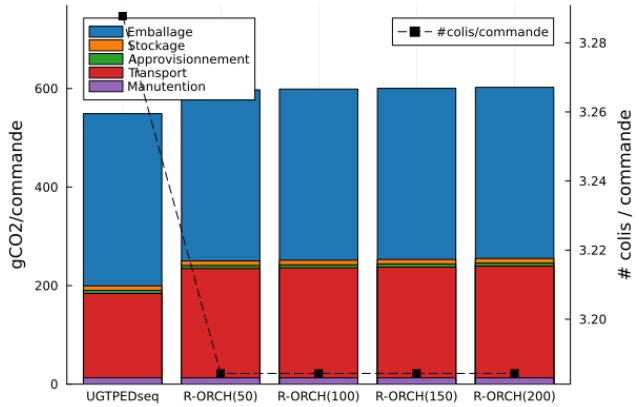

FIGURE 6.10 – Répartition des coûts environnementaux et nombre de colis par commande des solutions de $\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$, R-ORCH(50), R-ORCH(100), R-ORCH(150) et R-ORCH(200) pour les instances de dataG-LD.

Pour les instances de dataG-LD, nous observons que les règles d'orchestration écologiques entraînent pour les quatre cas étudiés un surplus de coûts environnementaux compris entre 8.7 et 9.7% par rapport aux coûts environnementaux de l'optimisation écologique séquentielle de l'orchestration $\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$. Cela correspond à une hausse de 3.1% par rapport aux coûts environnementaux de l'$\texttt{UGTPED-C-D}_{\texttt{seq}}$.

Pour ces instances, les coûts environnementaux liés aux emballages restent stables entre l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$ et les règles R-ORCH tandis que les coûts environnementaux liés au transport augmentent de près de 30% avec l'orchestration basée sur les règles R-ORCH par rapport à $\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$. Cependant, l'augmentation des coûts environnementaux liés au transport induite par l'augmentation du pas pas est moins marquée que pour les instances $\texttt{dataR}_{\texttt{cc}}$-LD. De même, l'augmentation du surplus environnemental induite par l'augmentation du pas pas est moins marquée sur les instances réalistes générées que sur les instances industrielles, confirmant ce que nous attendions après l'observation de la Figure 6.8.

En conclusion, les règles d'orchestration écologiques R-ORCH que nous avons introduites dans cette section retournent des solutions dont les performances environnementales peuvent être très intéressantes. En utilisant des données facilement accessibles et en s'appuyant sur le mode de fonctionnement actuel des *OMS*, nos tests numériques sur des instances industrielles ont montré un surplus des coûts environnementaux induits par nos règles d'orchestration écologiques de seulement 6.1% par rapport à une optimisation écologique séquentielle de l'orchestration de commandes.

6.4 Synthèse

Ce chapitre visait à rendre l'orchestration écologique de commandes exploitable en pratique par un *OMS*.

Dans un premier temps, nous avons développé une optimisation écologique de l'orchestration de commandes qui s'affranchit des données peu accessibles aux e-commerçants mais requises pour calculer le critère environnemental F_G. Pour cela, nous avons proposé cinq critères d'optimisation alternatifs reposant sur des données facilement accessibles pour les e-commerçants. A partir de ces critères, nous avons construits neuf modèles d'optimisation alternatifs, mono-objectifs et bi-objectifs, de l'orchestration de commandes. La comparaison des performances environnementales de ces modèles avec les performances environnementales du modèle d'optimisation écologique séquentiel a permis d'identifier trois modèles alternatifs bi-objectifs dont les performances environnementales moyennes sont très satisfaisantes. Ces trois modèles bi-objectifs reposent sur une première minimisation du nombre de colis puis sur la minimisation d'un second critère basé sur la distance parcourue par les colis ou les articles.
Dans un second temps, nous avons cherché à développer une orchestration écologique de commandes à partir des règles d'orchestration utilisées actuellement par les *OMS*. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur les résultats obtenus dans la première partie du chapitre et avons proposé des règles d'orchestration écologiques qui minimisent en priorité le nombre de points d'expédition puis contraignent la distance parcourue. En considérant les commandes livrées à domicile parmi les instances industrielles, nos règles d'orchestration écologiques n'entraînent qu'un surplus de 6.1% des coûts environnementaux par rapport à l'optimisation écologique séquentielle de l'orchestration de commandes.

Le Tableau 6.5 synthétise les coûts environnementaux par commande de l'UGTPED, le RGTPED, l'$\text{UGTPED}_{\text{seq}}$, l'*OMS*, l'$\text{UGTPED-C-D}_{\text{seq}}$ et R-ORCH(50) sur les instances dataR_{cc}-LD et dataG-LD. Pour une comparaison équitable, seules les instances résolues par l'ensemble des modèles sont considérées. Nous indiquons entre parenthèses l'écart relatif de chaque modèle par rapport à l'UGTPED.

Modèle	**Section d'introduction**	**Coût environnemental F_G par commande pour dataR_{cc}-LD**	**Coût environnemental F_G par commande pour dataG-LD**
UGTPED	2.4.1	157.5	600.0
RGTPED	2.4.3	161.5 (+2.5%)	610.1 (+1.7%)
$\text{UGTPED}_{\text{seq}}$	5.2	158.8 (+0.8%)	606.2 (+1.0%)
OMS	5.3	205.0 (+30.2%)	N/A
$\text{UGTPED-C-D}_{\text{seq}}$	6.2.3	164.9 (+4.7%)	628.5 (+4.8%)
R-ORCH(50)	6.3.1	168.5 (+7.0%)	640.8 (+6.8%)

TABLEAU 6.5 – Coût environnemental par commande de l'UGTPED, le RGTPED, l'$\text{UGTPED}_{\text{seq}}$, l'*OMS*, l'UGTPED-C-D et R-ORCH(50) sur les instances dataR_{cc}-LD et dataG-LD.

Nous avons débuté ces travaux de thèse en proposant une optimisation écolo-

gique idéale de l'orchestration par lots de commandes, modélisée par l'UGTPED.
En parallèle, nous avons introduit un modèle d'optimisation en deux phases, le RGTPED, légèrement plus facile à résoudre. L'écart de coûts environnementaux entre les solutions des deux modèles est de l'ordre de 2% sur les instances considérées. Toutefois, ces deux modèles reposaient sur des données difficilement accessibles, un solveur d'optimisation onéreux à exploiter, présentaient des performances de calcul qui ne remplissaient pas les besoins opérationnels d'un *OMS* et dont le déploiement opérationnel aurait requis un changement profond de la structure logicielle actuelle. Ainsi, nous avons commencé par étudier une optimisation séquentielle de l'orchestration, l'$\texttt{UGTPED}_{\texttt{seq}}$, qui présente des temps de calcul très intéressants et dont l'écart avec le modèle idéal par lots de commande de l'UGTPED ne dépasse pas 1% sur les instances considérées.
Ensuite, nous avons facilité la collecte des données requises pour une orchestration écologique en proposant des modèles d'optimisation alternatifs utilisant des données facilement accessibles. Parmi ces modèles, l'un des plus pertinents d'un point de vue environnemental est l'$\texttt{UGTPED-C-D}_{\texttt{seq}}$, dont l'écart de coûts environnementaux avec l'UGTPED est de moins de 5% sur les instances considérées.
Enfin, à partir des recherches menées jusqu'alors, nous avons conclu qu'il était possible de définir des règles d'orchestration utilisant des données facilement accessibles, reposant sur le fonctionnement actuel d'un *OMS* et présentant des performances environnementales très satisfaisantes. Ces règles, notées R-ORCH, présentent un écart moyen de coût environnemental d'environ 7% avec l'orchestration écologique idéale de commandes UGTPED sur les instances considérées.
Évidemment, ces résultats s'affranchissent des contraintes opérationnelles que rencontrent les e-commerçants et seraient peut-être sujets à des interprétations différentes avec d'autres données expérimentales. Toutefois, nous avons ici une première option simple et à faible coût économique d'orchestrer plus écologiquement des commandes en ligne.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

Dans ce manuscrit, nous avons cherché à réduire l'empreinte environnementale de l'orchestration de commandes effectuée par les *OMS*. Après avoir défini ce que signifiait d'orchestrer écologiquement des commandes, nous avons utilisé le contexte opérationnel des *OMS* pour proposer une méthode d'orchestration qui soit performante d'un point de vue environnemental mais aussi facilement déployable industriellement.

Le **Chapitre** 1 synthétise la revue de littérature que nous avons effectuée pour cette thèse. Nous avons relevé que les enjeux environnementaux sont absents de la littérature du problème d'orchestration de commandes, qui priorise les enjeux économiques. Nous avons également effectué une brève revue de littérature du problème de transport et de quelques unes de ses variantes, proches du problème d'orchestration de commandes et du problème d'orchestration écologique de commandes que nous définissons ultérieurement. Ce chapitre se termine par le recueil de différentes manières de prendre en compte les enjeux environnementaux au sein d'une chaîne logistique. Cela nous a permis d'identifier les différentes sources d'impacts environnementaux à considérer pour une orchestration écologique de commandes.

Le **Chapitre** 2 présente, à notre connaissance, les premiers modèles d'orchestration écologique de commandes. Ils reposent sur un critère environnemental qui contient l'ensemble des enjeux environnementaux sur lesquels les décisions d'un *OMS* ont un impact. Afin d'intégrer ce critère environnemental, nous ajoutons diverses contraintes d'empaquetage à notre modèle d'orchestration de commandes, menant à trois modèles d'orchestration écologique de commandes. L'`UGTPED` considère des produits insécables, le `GTPED` considère des produits sécables tandis que le `RGTPED` considère des produits insécables mais s'appuie sur une première résolution du `GTPED` puis une seconde phase de recalcul de l'empaquetage optimal. Nous prouvons à la fin de ce chapitre que les trois modèles sont NP-difficiles.

Le **Chapitre** 3 introduit les instances utilisées dans ce manuscrit pour évaluer nos modèles d'orchestration de commandes. A l'aide de notre partenaire, nous collectons les données industrielles de quatre jours de commandes et de cinq e-commerçants. Ces données constituent nos instances industrielles mais ne peuvent pas être partagées. Ainsi, nous analysons ces instances à l'aide d'indicateurs de caractérisation provenant de la littérature puis utilisons ces analyses pour générer des instances réalistes et partageables.

Le **Chapitre** 4 présente l'évaluation de trois modèles d'optimisation écologique de l'orchestration de commandes. Pour chacun des modèles, une large majorité des instances industrielles sont résolues en seulement quelques secondes. Toutefois, la plupart des instances qui ne sont pas résolues au bout du temps imparti d'une heure sont des instances de grande taille, ce qui représente une part importante des commandes à orchestrer. Les performances de calcul du `GTPED` et du `RGTPED` sont très proches grâce à une procédure de recalcul de l'empaquetage optimal très rapide, tandis que l'`UGTPED` présente des temps de calcul légèrement moins bons. D'un point de vue environnemental, introduire l'hypothèse de sécabilité des produits permet d'obtenir une borne inférieure sur les coûts environnementaux avec un écart de l'ordre de 10% pour le `GTPED` par rapport à l'`UGTPED`. L'optimisation en deux phases du `RGTPED` produit quant à elle une borne supérieure qui, en moyenne, ne dépasse les coûts environnementaux de l'`UGTPED` que de 2%. Ces premiers travaux auront permis de définir une référence pour l'orchestration écologique de commandes. La suite du manuscrit s'attache à proposer une méthode qui soit compatible avec le contexte opérationnel actuel d'un *OMS*.

Le **Chapitre** 5 vise à simplifier l'effort technique requis pour le déploiement opérationnel de l'orchestration écologique de commandes et d'en justifier l'intérêt pour un *OMS*. Dans un premier temps, nous comparons l'optimisation écologique de l'orchestration par lots de commandes, telle que nous l'avons proposée dans le Chapitre 2, et l'optimisation écologique de l'orchestration séquentielle commande par commande, qui se rapproche davantage du mode de fonctionnement actuel d'un *OMS*. Les résultats montrent que l'optimisation séquentielle permet d'orchestrer en seulement quelques secondes la quasi totalité des commandes, et ce, au prix d'un surcoût environnemental modéré, proche de 1%. Dans un second temps, nous comparons l'optimisation écologique de l'orchestration de commandes séquentielle avec l'orchestration de commandes effectuée par un *OMS* sur des données historiques. Les tests numériques montrent un surcoût environnemental de 40% pour l'orchestration de l'*OMS*. En termes de nombre de colis expédiés, une métrique considérée par les enseignes comme estimation des coûts économiques, nous avons vu que l'optimisation écologique de l'orchestration de commandes était plutôt satisfaisante.

Enfin, le **Chapitre** 6 simplifie l'orchestration écologique de commandes pour en faciliter son déploiement. Pour commencer, nous proposons des critères d'optimisation alternatifs, mono-objectifs ou bi-objectifs, qui simplifient la collecte des données nécessaires pour une orchestration écologique. Ces critères sont construits à partir de données facilement accessibles, à l'inverse du critère environnemental initial. Les expériences permettent d'identifier deux modèles bi-objectifs, reposant sur la minimisation du nombre de colis puis la minimisation d'un second critère comprenant la distance d'expédition, dont les performances environnementales sont très intéressantes par rapport au critère environnemental initial. Enfin, pour terminer ce manuscrit, nous utilisons les observations faites précédemment afin de proposer

des règles d'orchestration écologiques. Elles consistent à minimiser le nombre de points de stock puis à modérer la distance parcourue par les colis. Ces règles d'orchestration sont pertinentes d'un point de vue opérationnel puisqu'elles sont déjà utilisables dans les *OMS*. Elles s'avèrent être également pertinentes d'un point de vue environnemental puisqu'elles induisent un surcoût environnemental de seulement quelques pourcents par rapport à une optimisation écologique séquentielle de l'orchestration.

Publications

Les travaux de cette thèse ont donné lieux à des publications et communications scientifiques.

Revue

— Théo Le Brun, Marie-José Huguet, Sandra Ulrich Ngueveu, Romulus Grigoras. *Green Order Orchestration for E-commerce Deliveries.* Communications in Computer and Information Science. Accepté, Juillet 2025, **A paraître**.

Conférence internationale avec actes

— Théo Le Brun, Marie-José Huguet, Sandra Ulrich Ngueveu, Romulus Grigoras. *A Green Transportation Problem for E-commerce Deliveries.* 14th International Conference on Operations Research and Enterprise Systems (ICORES), Porto, Portugal, Février 2025.

Conférence nationale sans acte

— Théo Le Brun, Marie-José Huguet, Sandra Ulrich Ngueveu, Romulus Grigoras. *A Green variant of the Transportation Problem for E-commerce.* In ROADEF, 25ème congrès annuel de la société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision, Marne la Vallée, France, Février 2025.

— Théo Le Brun, Marie-José Huguet, Sandra Ulrich Ngueveu, Romulus Grigoras. *Approaching a Green Optimisation Criteria for Order Orchestration in E-commerce.* In ROADEF, 26ème congrès annuel de la société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision, Tours, France, Février 2026.

Perspectives

Les travaux de cette thèse ouvrent à plusieurs perspectives de travail. Nous en mentionnons quelques une parmi celles que nous jugeons les plus intéressantes. Certaines d'entre elles ont pu être abordées par d'autres travaux dans le cadre de la chaire *retail responsable* [Toulouse INP, 2026].

Explorer d'autres méthodes de calcul des coûts environnementaux. La modélisation mathématique de l'orchestration écologique de commandes que nous avons proposée correspond à une vision du problème industriel sous-jacent. Or, le contexte industriel du commerce en ligne est complexe et la modification d'un seul paramètre pourrait mener à des résultats significativement différents. Par exemple, bien qu'elles soient motivées, nous ne remettons pas en cause dans ce manuscrit nos hypothèses quant au calcul des coûts environnementaux. Cependant, il aurait été intéressant de modifier ces hypothèses et les valeurs considérées et de mener une étude de sensibilité en fonction des véhicules utilisés pour le transport, du type d'emballage considéré, du système d'approvisionnement des stocks, etc ... En particulier, nous soupçonnons nos coûts d'approvisionnement d'être sous-estimés. Si tel devait être le cas, les entrepôts seraient d'autant plus pertinents pour satisfaire écologiquement les commandes.
Aussi, nous avons considéré des boîtes rigides avec un volume fixé pour confectionner nos colis. Si ce type d'empaquetage concerne une part importante de commandes en ligne, d'autres modes d'empaquetage sont aussi largement utilisés. Dans le secteur de l'habillement particulièrement, il est courant d'utiliser des pochettes plastiques dont le volume final s'adapte au volume des articles empaquetés. La modélisation de l'`UGTPED` resterait inchangée mais les coûts relatifs aux produits intégreraient désormais les coûts de manutention et l'intégralité des coûts de transport. Cette modification pourrait impacter les performances de calcul mais aussi rediriger les flux de commandes.

Méthodes avancées pour la résolution exacte d'instances de grande taille. Nous avons vu que les gains de l'orchestration par lots de commandes par rapport à une orchestration séquentielle augmentent lorsque la taille des lots augmente. Or, les solveurs d'optimisation peinent à résoudre à l'optimum les instances industrielles de plus de quelques centaines de commandes. Pour augmenter la taille des instances résolues à l'optimum, nous pourrions recourir à une méthode de *Branch & Price*. L'article de [Roberti et al., 2015] propose une méthode de *Branch & Price* qui améliore significativement la résolution du `FCTP` et qui pourrait être transférée à notre étude. Une colonne correspondrait alors à une manière de satisfaire une commande. Ce point est abordé dans le cadre d'un post-doctorat [Lamothe et al., 2026].

Méthodes approchées pour la résolution rapide d'instances de grande taille. Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à une résolution à l'optimum des instances dans le but d'avoir une comparaison équitable des performances en-

vironnementales des méthodes d'orchestration proposées. Or, dans notre contexte industriel, nous pourrions nous satisfaire de très bonnes solutions sans qu'elles soient optimales. Ces très bonnes solutions pourraient être retournées rapidement par le solveur d'optimisation ou issues de méthodes heuristiques de résolution. Dans le cadre de stages proposées par la chaire *retail responsable*, plusieurs heuristiques ont été étudiées sur un modèle de *Multi-Commodity* `FCTP` testé sur des données propres au e-commerce. Notamment, une matheuristique combinant des méthodes de "Relax and Fix" et de "Fix and Optimize" a été testée, ainsi qu'une méthode de génération de colonnes pour obtenir des bornes duales. Les premiers résultats semblent indiquer de bonnes performances pour la génération de colonne, et pourraient pousser à développer une version adaptée à notre problème d'orchestration écologique de commandes.

S'affranchir des solveurs d'optimisation payants. En tant qu'industriel, utiliser un solveur d'optimisation à des fins commerciales peut être particulièrement onéreux. Pour le remplacer, un solveur d'optimisation en libre accès pourrait être utilisé si ses performances de calcul sont satisfaisantes. Autrement, il faudrait développer en interne un algorithme, exact ou non, de résolution. A l'échelle de notre partenaire, développer un solveur dédié paraît démesuré. En revanche, nous pourrions développer une méthode heuristique sans solveur d'optimisation, comme un algorithme glouton ou une méthode de recherche par voisinage.

La consolidation de commandes. Nous pourrions envisager des modèles de distribution alternatifs afin de réduire les coûts environnementaux associés. En premier lieu, la consolidation des commandes multi-articles pourrait permettre une réduction globale des coûts logistiques. La consolidation de commandes consiste à regrouper en un même point géographique (un entrepôt ou un magasin) les articles d'une même commande provenant de différents points de stock en vue d'une livraison finale commune. Dans certains cas, cela permet d'économiser des emballages et de réduire les coûts environnementaux liés au transport. Cette problématique a fait l'objet d'un stage au sein de la chaire *retail responsable* dont les premiers résultats montrent que des gains environnementaux sont possibles, au prix d'une complexification importante de la résolution.

Intégrer les enjeux sociétaux. Dans ces travaux, nous nous sommes focalisés sur les enjeux environnementaux et avons abordé succinctement les enjeux économiques, mais nous avons délaissé les enjeux sociaux. Or, en orientant les flux de commandes vers les différents points de stocks, l'orchestration a un impact majeur sur les travailleurs en magasins et dans les entrepôts. Il serait par exemple pertinent de considérer des bornes inférieures et supérieures de flux de commandes pour chaque point de stocks afin de veiller à une répartition équitable de la charge de travail.

Annexes

Annexe A

Détail des composantes connexes de commandes des instances industrielles

A.1 Composantes connexes des instances de `dataR`

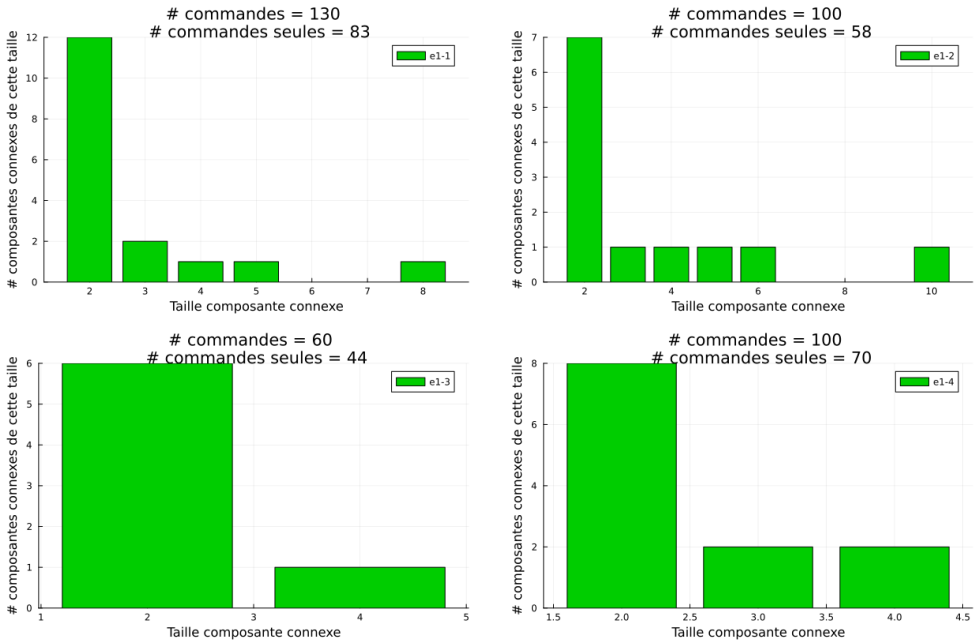

Tableau A.1 – Répartition des composantes connexes des instances de l'enseigne r_1

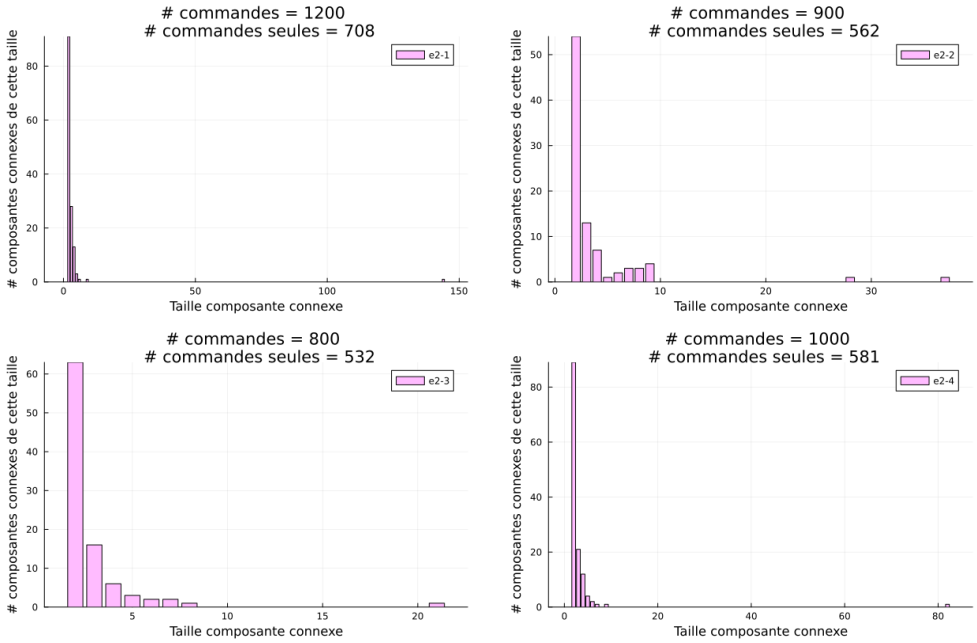

TABLEAU A.2 – Répartition des composantes connexes des instances de l'enseigne r_2

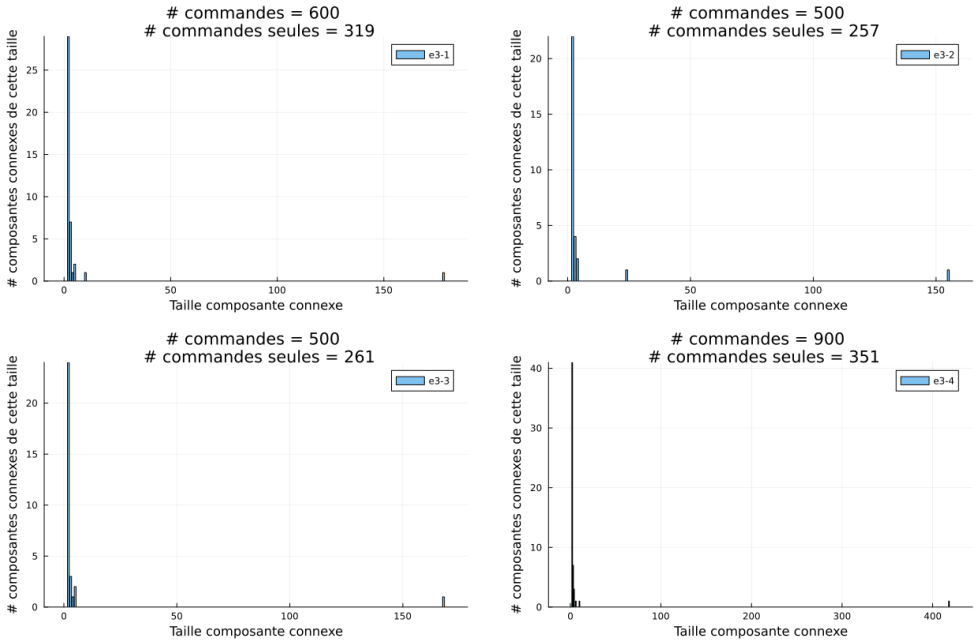

TABLEAU A.3 – Répartition des composantes connexes des instances de l'enseigne r_3

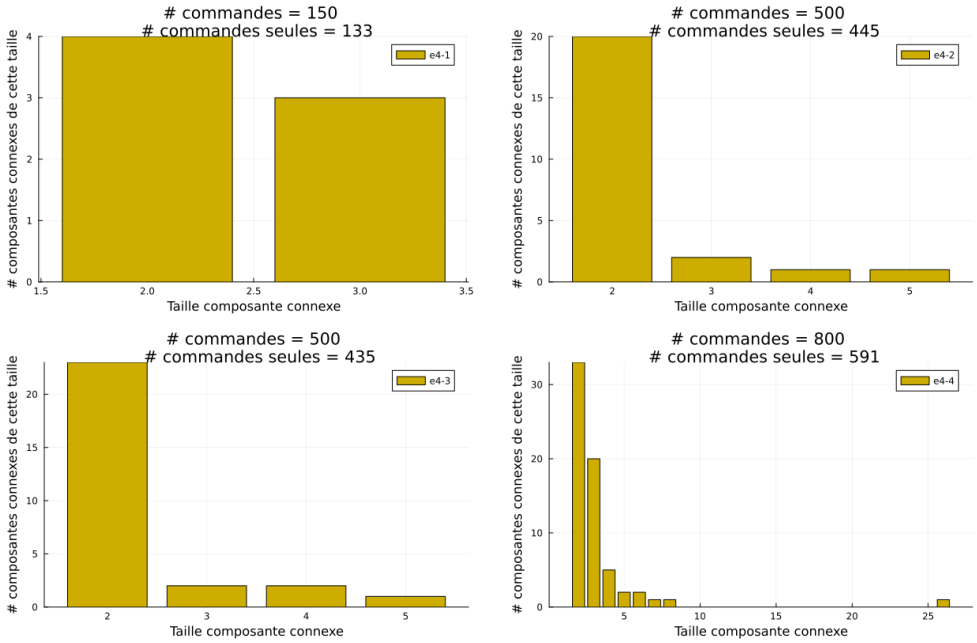

TABLEAU A.4 – Répartition des composantes connexes des instances de l'enseigne r_4

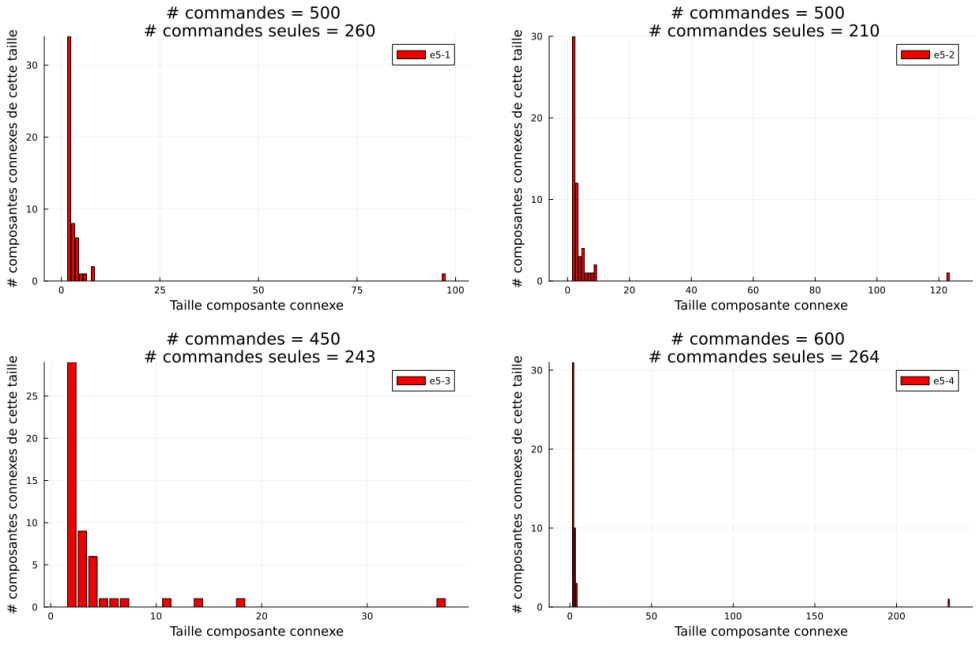

TABLEAU A.5 – Répartition des composantes connexes des instances de l'enseigne r_5

Annexe B

Programme de génération d'instances

Nous présentons dans cette annexe notre programme de génération d'instances, dénoté `PGI`, qui permet d'obtenir les données de commandes et de stocks pour une instance d'`OP`. Pour chaque instance, nous pouvons décider de la valeur de nos indicateurs de références : le nombre de commandes $|\mathcal{C}|$, le nombre d'articles par commandes `#a/c`, la proportion de *Click & Collect* `%CkC`, le nombre d'entrepôts $|\mathcal{E}|$ et enfin la part de la demande par rapport aux stocks `%d/q`. Nous commençons par détailler la création du réseau, i.e. de la localisation des points de stocks et des lieux de livraison. Ensuite, nous détaillons la génération des données liées aux commandes. Enfin, nous présentons la génération des données de stocks.

B.1 Création du réseau

Création du réseau de distribution : nous générons $|\mathcal{S}|$ magasins aux coordonnées géographiques aléatoires, la longitude et la latitude suivant des lois uniformes $\mathcal{U}$([-4,8]) et $\mathcal{U}$([42,52]) respectivement, ce qui permet approximativement de mailler le territoire métropolitain français. Si $|\mathcal{E}| \geq 1$, i.e. un ou plusieurs entrepôts doivent être ajoutés, nous générons $|\mathcal{E}|$ entrepôts d'après le même processus.

Création des lieux de livraison : nous générons $|\mathcal{C}|$ lieux de livraisons aux coordonnées géographiques aléatoires, la longitude et la latitude suivant des lois uniformes $\mathcal{U}$([-4,8]) et $\mathcal{U}$([42,52]). Puis, chaque commande a une probabilité égale à la proportion de *Click & Collect* `%CkC` de devenir une commande en *Click & Collect*. Pour chacune des commandes concernées, nous sélectionnons aléatoirement un magasin de $\mathcal{S}$ pour être leur point de retrait. Évidemment, le processus demanderait à être amélioré si l'on souhaitait aller plus loin. En effet, en ne corrélant pas le choix du point de retrait aux coordonnées géographiques du lieu de livraison initial, le déplacement du consommateur induit pourrait être particulièrement important. Cela ne constitue pas un problème pour notre étude actuelle.

B.2 Création de la demande

Nous cherchons à générer un ensemble de commandes dont le graphe "commandes-produits" (*c.f.* la méthode de décomposition des instances de [Xu et al., 2009] que

nous avons présentée en Section 1.2.1 page 13) soit connexe, tout en préservant une part d'aléatoire. Pour cela, nous générons aléatoirement dans un premier temps la demande de nos commandes. Puis, dans un second temps, nous modifions la demande pour rendre connexe cet ensemble de commandes. Puisque les stocks n'ont pas encore été générés, nous ignorons pour l'instant l'amélioration de la décomposition que nous avons proposé dans la Section 3.3 page 54. Ainsi, avoir au moins un produit en commun suffit pour rendre deux commandes connexes.

Création initiale de la demande : dans un premier temps, nous choisissons les articles commandés par chaque commande. Pour cela, pour chaque commande c, nous effectuons la procédure suivante :

1. détermination du nombre d'articles commandés na_c avec $na_c = \max(1, nar_c)$ où nar_c suit une loi normale $\mathcal{N}(\texttt{\#a/c}, 1)$.
2. sélection des na_c articles commandés d'après un tirage aléatoire pondéré avec remise parmi 1800 produits disponibles, chaque produit p ayant un poids P_p choisi d'après une loi uniforme $\mathcal{U}([0, 1])$.

La valeur de 1800 produits a été déterminée par des travaux préliminaires de manière à ce que la création initiale de la demande permette de générer un ensemble de commandes dont le graphe "commandes-produits" commence à être connexe.

Modification de la demande pour créer une unique composante connexe : nous identifions les composantes connexes du graphe "commandes-produits" de la demande initialement créée. Tout d'abord, pour chaque commande c formant une composante connexe unitaire, nous appliquons la procédure suivante :

1. Sélectionner aléatoirement un produit p de la commande c et décrémenter sa demande de 1.
2. Sélectionner aléatoirement une commande $c' \neq c$.
3. Sélectionner aléatoirement un produit p' de la commande c'.
4. Incrémenter de 1 la demande en produit p' de la commande c.

Grâce à cette procédure, la connectivité du graphe augmente mais le nombre d'articles par commandes reste stable. Suite à cette procédure, il n'y a plus de composante connexe unitaire. Maintenant, nous appliquons la procédure suivante jusqu'à obtenir une unique composante connexe :

1. Sélectionner aléatoirement une commande c d'une composante connexe CC.
2. Sélectionner aléatoirement un produit p d'une commande c' d'une composante connexe $CC' \neq CC$.
3. Incrémenter de 1 la demande de la commande c en produit p.

À la fin de cette procédure, notre graphe "commandes-produits" ne contient qu'une seule composante connexe.

B.3 Création des stocks

Nous présentons maintenant la création de nos données de stocks. Dans un premier temps, nous générons aléatoirement les stocks à partir du ratio `%d/q`. Puis, nous nous assurons que la génération des stocks n'a pas cassé la connexité des commandes si l'on considère l'amélioration de la décomposition présentée en Section 3.3.

Génération initiale des stocks : nous considérons que chaque magasin a le même poids dans la génération des stocks. En revanche, les entrepôts représentent 30% des stocks totaux. Chaque entrepôt a donc un poids égal à $30/|\mathcal{E}|$. Pour la génération du stock de chaque produit p, la procédure suivante est appliquée :

1. Calcul du stock total q_p de produit p : $q_p = \lceil \frac{\sum_{c \in \mathcal{C}} d_{pc}}{\texttt{\%d/q}} \rceil$.
2. Affectation du stock q_p aux points de stocks à l'aide d'un tirage aléatoire pondéré avec remise.

Suite à cette procédure, si le ratio `%d/q` est bien inférieur à 1, nous sommes assurés d'avoir suffisamment de stock pour satisfaire l'intégralité des commandes.

Modification des stocks pour garder la connexité des commandes : d'après l'amélioration de la décomposition des instances présentée en Section 3.3, la connexité du graphe "commandes-produits" peut être brisée par des stocks en grande quantité. En effet, tout produit dont la demande totale est inférieure au stock minimal non nul peut être retiré du graphe "commandes-produits". Pour nous en prémunir, pour tout produit dont la demande totale est inférieure au stock minimal non nul, nous sélectionnons aléatoirement un point de stock hors entrepôt dont nous fixons le stock à 1.

B.4 Caractéristiques des boîtes utilisées

Le tableau renseigne les caractéristiques des boîtes utilisées. Les boîtes n°2 et n°6 ne sont disponibles que pour les instances avec 6 boîtes, les boîtes n°1 et n°4 ne sont disponibles que pour les instances avec 4 et 6 boîtes.

N°	Volume (m^3)	Masse (kg)	Émissions liées à la production (geqCO_2)
1	0.0014	0.0756	29.484
2	0.005544	0.189	73.71
3	0.003588	0.122808	47.89512
4	0.009135	0.228312	89.04168
5	0.02106	0.400932	156.36348
6	0.04625	0.6762	263.718

Tableau B.1 – Caractéristiques des boîtes utilisées.

Annexe C

Figures complémentaires au chapitre 4

C.1 Evolution du pourcentage d'instances résolues en fonction du temps et des indicateurs de références pour le GTPED et le RGTPED pour les instances réalistes générées

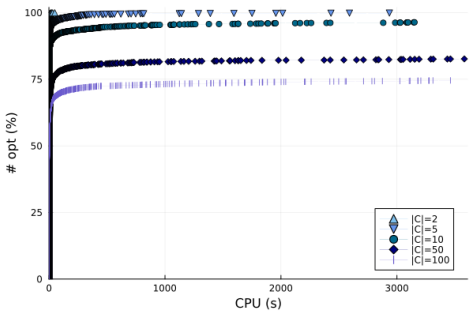

Figure C.1 – % d'instances résolues à l'optimalité en fonction du temps de calcul par le GTPED pour les instances de dataG en fonction de $|\mathcal{C}|$.

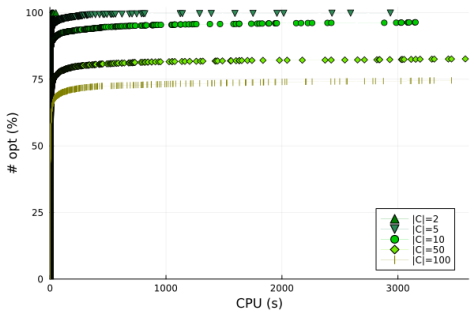

Figure C.2 – % d'instances résolues à l'optimalité en fonction du temps de calcul par le RGTPED pour les instances de dataG en fonction de $|\mathcal{C}|$.

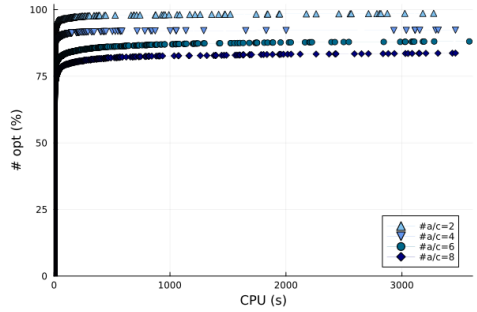

Figure C.3 – % d'instances résolues à l'optimalité en fonction du temps de calcul par le GTPED pour les instances de dataG en fonction de #a/c.

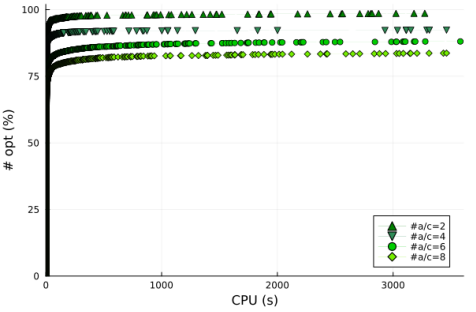

Figure C.4 – % d'instances résolues à l'optimalité en fonction du temps de calcul par le RGTPED pour les instances de dataG en fonction de #a/c.

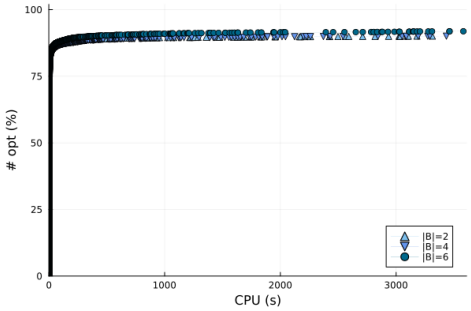

FIGURE C.5 – % d'instances résolues à l'optimalité en fonction du temps de calcul par le `GTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de $|\mathcal{B}|$.

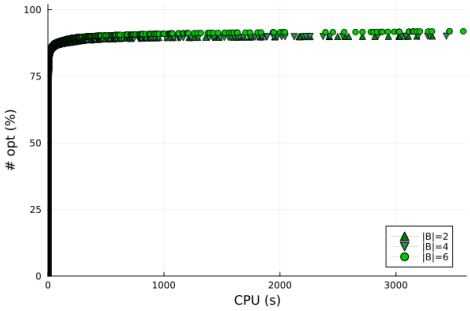

FIGURE C.6 – % d'instances résolues à l'optimalité en fonction du temps de calcul par le `RGTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de $|\mathcal{B}|$.

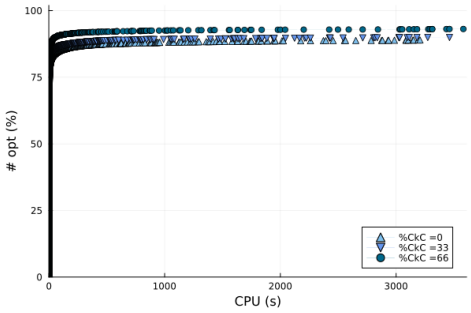

FIGURE C.7 – % d'instances résolues à l'optimalité en fonction du temps de calcul par le `GTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de `%CkC`.

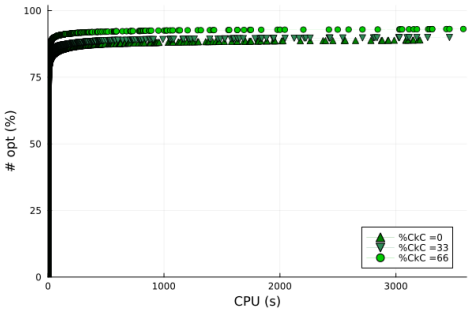

FIGURE C.8 – % d'instances résolues à l'optimalité en fonction du temps de calcul par le `RGTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de `%CkC`.

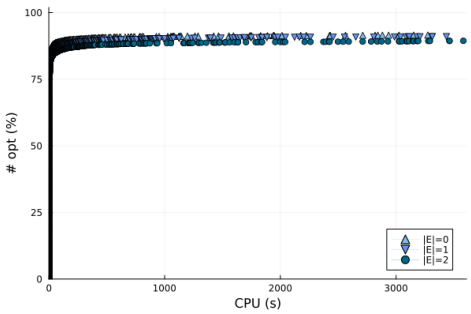

FIGURE C.9 – % d'instances résolues à l'optimalité en fonction du temps de calcul par le `GTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de $|\mathcal{E}|$.

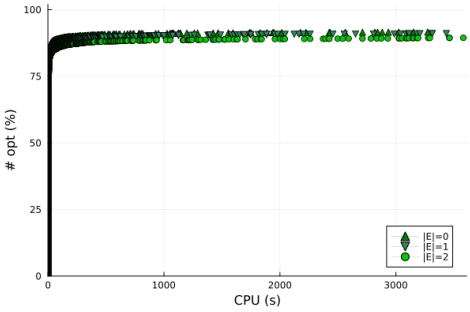

FIGURE C.10 – % d'instances résolues à l'optimalité en fonction du temps de calcul par le `RGTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de $|\mathcal{E}|$.

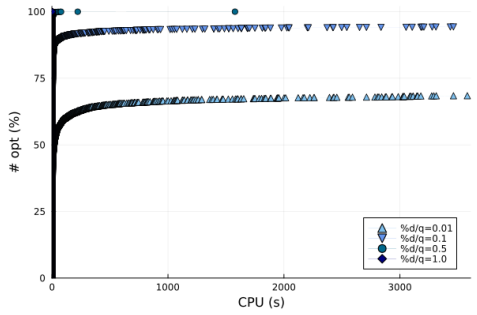

FIGURE C.11 – % d'instances résolues à l'optimalité en fonction du temps de calcul par le `GTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de `%d/q`.

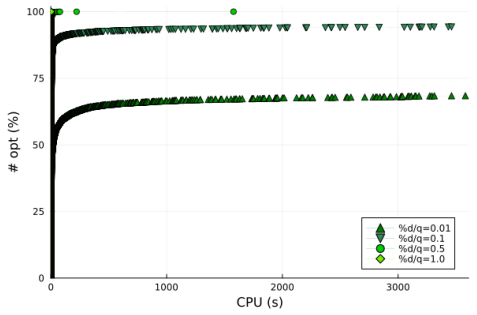

FIGURE C.12 – % d'instances résolues à l'optimalité en fonction du temps de calcul par le `RGTPED` pour les instances de `dataG` en fonction de `%d/q`.

C.2 Répartition des coûts environnementaux des solutions de l'UGTPED, du GTPED et du RGTPED pour les instances réalistes générées

UGTPED

Indicateur	Manutention	Transport	Approvisionnement	Stockage	Emballage
$\|\mathcal{C}\|$=2	11.7	157.2	5.5	8.2	316.3
$\|\mathcal{C}\|$=5	13.0	178.0	6.1	8.9	346.0
$\|\mathcal{C}\|$=10	13.7	188.6	6.1	8.8	350.6
$\|\mathcal{C}\|$=50	14.5	203.8	6.0	8.6	364.9
$\|\mathcal{C}\|$=100	14.7	205.0	5.7	8.4	367.4
#a/c=2	7.0	78.6	2.9	4.2	175.1
#a/c=4	12.4	169.4	5.0	7.4	313.3
#a/c=6	18.5	268.5	7.2	10.8	464.5
#a/c=8	24.4	362.3	9.9	14.3	614.4
$\|\mathcal{B}\|$=2	14.2	275.8	5.8	8.6	442.9
$\|\mathcal{B}\|$=4	14.6	171.2	5.8	8.5	331.0
$\|\mathcal{B}\|$=6	14.5	159.4	5.8	8.5	319.0
%CkC=0	14.8	206.6	5.8	8.6	372.0
%CkC=33	14.6	203.3	5.8	8.6	366.8
%CkC=66	14.0	194.8	5.8	8.4	352.5
$\|\mathcal{E}\|$=0	16.6	207.8	6.2	9.0	405.4
$\|\mathcal{E}\|$=1	12.6	191.9	5.6	8.1	326.7
$\|\mathcal{E}\|$=2	13.8	203.4	5.6	8.4	350.1
%d/q=0.01	4.3	17.0	3.5	5.3	131.8
%d/q=0.1	9.5	97.3	5.2	7.7	259.3
%d/q=0.5	15.4	201.6	6.0	8.9	387.2
%d/q=1	18.2	295.8	6.3	9.1	441.7

TABLEAU C.1 – Répartition des coûts environnementaux pour l'UGTPED sur les instances dataG en fonction des indicateurs.

GTPED

Indicateur	Manutention	Transport	Approvisionnement	Stockage	Emballage
$\|\mathcal{C}\|$=2	16.4	115.9	5.5	8.2	291.1
$\|\mathcal{C}\|$=5	18.5	131.8	6.1	8.9	317.2
$\|\mathcal{C}\|$=10	19.3	139.3	6.1	8.8	321.6
$\|\mathcal{C}\|$=50	20.8	146.5	6.0	8.6	332.3
$\|\mathcal{C}\|$=100	21.3	145.7	5.7	8.4	333.6
#a/c=2	9.9	56.3	2.9	4.2	159.5
#a/c=24	17.7	122.3	5.0	7.4	285.8
#a/c=26	26.8	191.7	7.2	10.8	421.8
#a/c=28	35.3	259.5	9.9	14.3	558.7
$\|\mathcal{B}\|$=2	26.5	160.0	5.8	8.6	374.4
$\|\mathcal{B}\|$=4	18.9	138.2	5.8	8.5	313.4
$\|\mathcal{B}\|$=6	17.0	135.5	5.8	8.5	305.9
%CkC=0	21.3	148.0	5.8	8.6	338.6
%CkC=33	21.0	145.8	5.8	8.6	333.9
%CkC=66	20.1	139.6	5.8	8.4	320.5
$\|\mathcal{E}\|$=0	24.0	142.4	6.2	9.0	367.1
$\|\mathcal{E}\|$=1	17.8	143.0	5.5	8.1	298.5
$\|\mathcal{E}\|$=2	19.8	148.1	5.6	8.4	319.6
%d/q=0.01	5.1	15.9	3.5	5.3	124.6
%d/q=0.1	12.3	81.3	5.2	7.7	251.0
%d/q=0.5	22.2	147.7	6.0	8.9	350.7
%d/q=1	27.2	200.6	6.3	9.1	392.6

TABLEAU C.2 – Répartition des coûts environnementaux pour l'GTPED sur les instances dataG en fonction des indicateurs.

RGTPED

Indicateur	Manutention	Transport	Approvisionnement	Stockage	Emballage
$\|\mathcal{C}\|$=2	11.9	158.0	5.5	8.2	322.4
$\|\mathcal{C}\|$=5	13.2	179.5	6.1	8.9	352.9
$\|\mathcal{C}\|$=10	13.9	189.7	6.1	8.8	358.3
$\|\mathcal{C}\|$=50	14.7	207.2	6.0	8.6	371.6
$\|\mathcal{C}\|$=100	15.0	209.6	5.7	8.4	374.2
#a/c=2	7.1	80.7	2.9	4.2	178.2
#a/c=4	12.6	172.7	5.1	7.4	319.8
#a/c=6	18.8	273.5	7.3	10.8	473.1
#a/c=8	24.8	368.0	10.0	14.3	625.3
$\|\mathcal{B}\|$=2	14.5	281.7	5.9	8.6	454.9
$\|\mathcal{B}\|$=4	14.8	174.5	5.9	8.5	335.7
$\|\mathcal{B}\|$=6	14.7	161.5	5.8	8.5	323.0
%CkC=0	15.0	210.4	5.9	8.6	379.0
%CkC=33	14.8	207.0	5.9	8.6	373.6
%CkC=66	14.2	198.6	5.8	8.4	359.1
$\|\mathcal{E}\|$=0	16.7	208.8	6.2	9.0	413.2
$\|\mathcal{E}\|$=1	12.8	198.0	5.6	8.1	332.5
$\|\mathcal{E}\|$=2	14.1	208.1	5.8	8.4	356.9
%d/q=0.01	4.4	18.2	3.5	5.3	133.3
%d/q=0.1	9.9	99.0	5.3	7.7	273.6
%d/q=0.5	15.7	208.1	6.1	8.9	394.3
%d/q=1	18.3	298.8	6.4	9.1	443.9

TABLEAU C.3 – Répartition des coûts environnementaux pour l'RGTPED sur les instances dataG en fonction des indicateurs.

Bibliographie

[Acimovic and Graves, 2015] Acimovic, J. and Graves, S. C. (2015). Making better fulfillment decisions on the fly in an online retail environment. *Manufacturing & Service Operations Management*, 17(1) :34–51. (Cité en pages 15, 49, 51 et 63.)

[Agarwal and Aneja, 2012] Agarwal, Y. and Aneja, Y. (2012). Fixed-charge transportation problem : Facets of the projection polyhedron. *Operations research*, 60(3) :638–654. (Cité en pages 53 et 61.)

[Ahuja et al., 1994] Ahuja, R. K., Magnanti, T. L., and Orlin, J. B. (1994). *Network Flos : Theory, Algorithms, and Applications*. Prentice Hall. (Cité en page 19.)

[Aktar et al., 2021] Aktar, M. S., De, M., Mazumder, S. K., and Maiti, M. (2021). Multi-objective green 4-dimensional transportation problems for breakable incompatible items with different fixed charge payment policies. *Computers & Industrial Engineering*, 156 :107184. (Cité en pages 21 et 28.)

[Alishah et al., 2017] Alishah, E. J., Moinzadeh, K., and Zhou, Y.-P. (2017). Store fulfillment strategy for an omni-channel retailer. *preprint https ://api. semanticscholar. org/CorpusID*, 53991396. (Cité en pages 16 et 52.)

[Andrews et al., 2019] Andrews, J. M., Farias, V. F., Khojandi, A. I., and Yan, C. M. (2019). Primal–dual algorithms for order fulfillment at Urban Outfitters, Inc. *INFORMS Journal on Applied Analytics*, 49(5) :355–370. (Cité en pages 15, 49, 51, 52 et 63.)

[Angelini and Carricato, 2026] Angelini, M. and Carricato, M. (2026). Optimizing 3D Bin Packing of Heterogeneous Objects Using Continuous Transformations in SE(3). *Advanced Intelligent Systems*, n/a(n/a) :e202501228. (Cité en page 40.)

[Balinski, 1961] Balinski, M. L. (1961). Fixed-cost transportation problems. *Naval Research Logistics Quarterly*, 8(1) :41–54. (Cité en page 21.)

[Barth et al., 2005] Barth, M., Younglove, T., and Scora, G. (2005). Development of a Heavy-Duty Diesel Modal Emissions and Fuel Consumption Model. *Institute of Transportation Studies, UC Berkeley, Institute of Transportation Studies, Research Reports, Working Papers, Proceedings*. (Cité en pages 27 et 37.)

[Bektaş and Laporte, 2011] Bektaş, T. and Laporte, G. (2011). The pollution-routing problem. *Transportation research part b : methodological*, 45(8) :1232–1250. (Cité en page 27.)

[Bind et al., 2024] Bind, A. K., Rani, D., Ebrahimnejad, A., and Verdegay, J. (2024). New strategy for solving multi-objective green four dimensional transportation problems under normal type-2 uncertain environment. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 137 :109084. (Cité en pages 21 et 29.)

[Bon-Maury et al., 2021] Bon-Maury, G., Fosse, J., Deketelaere-Hanna, M., Verzat, V., Lambert, P., Guerin, V., and Vincon, P. (2021). Pour un développement durable du commerce en ligne. *France Stratégie-Conseil général de l'Environnement et du Développement durable-Inspection générale des Finances*. (Cité en page 2.)

[Borggren et al., 2011] Borggren, C., Moberg, Å., and Finnveden, G. (2011). Books from an environmental perspective—Part 1 : environmental impacts of paper books sold in traditional and internet bookshops. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(2) :138–147. (Cité en pages 26 et 36.)

[Brenner, 2008] Brenner, U. (2008). A faster polynomial algorithm for the unbalanced Hitchcock transportation problem. *Operations Research Letters*, 36(4) :408–413. (Cité en pages 19 et 20.)

[Buson et al., 2014] Buson, E., Roberti, R., and Toth, P. (2014). A reduced-cost iterated local search heuristic for the fixed-charge transportation problem. *Operations Research*, 62(5) :1095–1106. (Cité en page 53.)

[Castro et al., 2025] Castro, S., Figueira, G., and Almada-Lobo, B. (2025). Order Allocation in Online Retail : Classification and Literature Review. *European Journal of Operational Research*. (Cité en page 17.)

[Chanas et al., 1984] Chanas, S., Kołodziejczyk, W., and Machaj, A. (1984). A fuzzy approach to the transportation problem. *Fuzzy sets and Systems*, 13(3) :211–221. (Cité en page 22.)

[Chen et al., 2024] Chen, Y., Pellemans, M., Richter, F., Roshandel, Y., Schmeits, V., Waldert, P., Wehbi, L., and van der Zanden, T. C. (2024). IKEA : Innovative Know-how for E-commerce Allocation. In *Proceedings of the Studygroup Mathematics with Industry (SWI) 2024*, pages 1–33. Vrije Universiteit Amsterdam NL. (Cité en pages 15, 49, 51, 52 et 63.)

[Colissimo, 2023] Colissimo (2023). Colissimo Box – CO2 calculator. (Cité en pages 26, 37 et 38.)

[Comité Européen de Normalisation, 2023] Comité Européen de Normalisation (2023). EN 17837 - Services postaux - Empreinte environnementale de la livraison de colis - Méthodologie pour le calcul et la déclaration des émissions de GES et polluants atmosphériques des services logistiques de livraison de colis. Technical report, International Organization for Standardization. (Cité en page 26.)

[CPV Associés et al., 2023] CPV Associés, GSV Communication, and RDC Environment (2023). Commerce en ligne - Impacts environnmentaux de la logistique, des transports et des déplacements : état des lieux, outil d'évaluation et pistes de progrès. (Cité en pages xi, 5, 6, 25, 38, 65 et 75.)

[Das et al., 2018] Das, A., Bera, U. K., and Maiti, M. (2018). Defuzzification and application of trapezoidal type-2 fuzzy variables to green solid transportation problem. *Soft computing*, 22(7) :2275–2297. (Cité en page 28.)

[Das et al., 2023] Das, J. N., Tiwari, M. K., Sinha, A. K., and Khanzode, V. (2023). Integrated warehouse assignment and carton configuration optimization using deep clustering-based evolutionary algorithms. *Expert systems with applications*, 212 :118680. (Cité en page 17.)

[Eurostat, 2026] Eurostat (2026). Glossary : Carbon dioxide equivalent. (Cité en page 6.)

[FEVAD, 2025] FEVAD (2025). Chiffres clés e-commerce 2025. (Cité en page 1.)

[Flamand et al., 2023] Flamand, T., Iori, M., and Haouari, M. (2023). The transportation problem with packing constraints. *Computers & Operations Research*, 157 :106278. (Cité en pages 22, 52 et 53.)

[Flood, 1953] Flood, M. M. (1953). On the Hitchcock distribution problem. *Pacific Journal of Mathematics*. (Cité en page 18.)

[Garfinkel and Rao, 1971] Garfinkel, R. S. and Rao, M. (1971). The bottleneck transportation problem. *Naval Research Logistics Quarterly*, 18(4) :465–472. (Cité en page 22.)

[Goedkoop, 1999] Goedkoop, M. J. (1999). The Eco-indicator 99 a damage oriented method for life cycle impact assessment methodology report. *Pre Concultants*. (Cité en page 23.)

[Haley, 1962] Haley, K. (1962). New methods in mathematical programming—the solid transportation problem. *Operations research*, 10(4) :448–463. (Cité en page 20.)

[Hitchcock, 1941] Hitchcock, F. L. (1941). The distribution of a product from several sources to numerous localities. *Journal of mathematics and physics*, 20(1-4) :224–230. (Cité en page 18.)

[Jaller and Pahwa, 2020] Jaller, M. and Pahwa, A. (2020). Evaluating the environmental impacts of online shopping : A behavioral and transportation approach. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 80 :102223. (Cité en page 25.)

[Jasin and Sinha, 2015] Jasin, S. and Sinha, A. (2015). An LP-based correlated rounding scheme for multi-item ecommerce order fulfillment. *Operations Research*, 63(6) :1336–1351. (Cité en pages 15, 51, 52, 53 et 63.)

[Junginger, 1993] Junginger, W. (1993). On representatives of multi-index transportation problems. *European journal of operational research*, 66(3) :353–371. (Cité en page 21.)

[Kacher and Singh, 2021] Kacher, Y. and Singh, P. (2021). A comprehensive literature review on transportation problems. *International Journal of Applied and Computational Mathematics*, 7 :1–49. (Cité en page 22.)

[Klingman et al., 1974] Klingman, D., Napier, A., and Stutz, J. (1974). NETGEN : A program for generating large scale capacitated assignment, transportation, and minimum cost flow network problems. *management science*, 20(5) :814–821. (Cité en page 53.)

[Klose, 2008] Klose, A. (2008). Algorithms for solving the single-sink fixed-charge transportation problem. *Computers & Operations Research*, 35(6) :2079–2092. (Cité en pages 21 et 53.)

[Kowalski and Lev, 2008] Kowalski, K. and Lev, B. (2008). On step fixed-charge transportation problem. *Omega*, 36(5) :913–917. (Cité en page 22.)

[Lamothe et al., 2026] Lamothe, F., Ngueveu, S. U., Nouy, T., Afeli, K. J., and Ricci, D. (2026). A Comparative Study Heuristic Methods for the Multi-Commodity Fixed-Charge Transportation Problem. Working Paper. (Cité en page 120.)

[Larribeau and Pénard, 2002] Larribeau, S. and Pénard, T. (2002). Le commerce électronique en France : un essai de mesure sur le marché des CD. *Economie et statistique*, 355(1) :27–46. (Cité en page 1.)

[Le Brun et al., 2023a] Le Brun, T., Huguet, M.-J., and Ngueveu, S. U. (2023a). Un aperçu du e-commerce éco-responsable français. Technical report, Toulouse INP ; LAAS - CNRS. (Cité en pages 6 et 7.)

[Le Brun et al., 2023b] Le Brun, T., Huguet, M.-J., and Ngueveu, S. U. (2023b). Un aperçu du e-commerce socialement-responsable français. Technical report, Toulouse INP ; LAAS - CNRS. (Cité en pages 1, 6 et 7.)

[Le Nouvel Obs, 2000] Le Nouvel Obs (2000). Plus de 5 millions d'internautes en France. *Le Nouvel Obs*. (Cité en page 1.)

[Lei et al., 2018] Lei, Y., Jasin, S., and Sinha, A. (2018). Joint dynamic pricing and order fulfillment for e-commerce retailers. *Manufacturing & service operations management*, 20(2) :269–284. (Cité en page 16.)

[Lhotellier et al., 2018] Lhotellier, J., Less, E., Bossanne, E., and Pesnel, S. (2018). Modélisation et Évaluation ACV de Produits de Consommation et Biens d'Équipement : Rapport ADEME. *186 pages*. (Cité en pages 4 et 35.)

[Li et al., 2023] Li, Y., Côté, J.-F., Coelho, L. C., Zhang, C., and Zhang, S. (2023). Order assignment and scheduling under processing and distribution time uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 305(1) :148–163. (Cité en page 17.)

[Liu et al., 2018a] Liu, L., Zhang, B., and Ma, W. (2018a). Uncertain programming models for fixed charge multi-item solid transportation problem. *Soft Computing*, 22 :5825–5833. (Cité en page 22.)

[Liu et al., 2018b] Liu, S., He, L., and Shen, Z.-J. M. (2018b). Data-driven order assignment for last mile delivery. *SSRN Electronic Journal*. (Cité en page 17.)

[Mahar and Wright, 2009] Mahar, S. and Wright, P. D. (2009). The value of postponing online fulfillment decisions in multi-channel retail/e-tail organizations. *Computers & operations research*, 36(11) :3061–3072. (Cité en pages 14, 15, 49 et 52.)

[Malacký and Madleňák, 2023] Malacký, P. and Madleňák, R. (2023). Transportation problems and their solutions : literature review. *Transportation Research Procedia*, 74 :323–329. TRANSCOM 2023 : 15th International Scientific Conf. on Sustainable, Modern and Safe Transport. (Cité en page 22.)

[Martello et al., 2000] Martello, S., Pisinger, D., and Vigo, D. (2000). The three-dimensional bin packing problem. *Operations research*, 48(2) :256–267. (Cité en page 40.)

[Matsui and Scheifele, 2016] Matsui, T. and Scheifele, R. (2016). A linear time algorithm for the unbalanced Hitchcock transportation problem. *Networks*, 67(2) :170–182. (Cité en page 20.)

[Midya et al., 2021] Midya, S., Roy, S. K., and Yu, V. F. (2021). Intuitionistic fuzzy multi-stage multi-objective fixed-charge solid transportation problem in a green supply chain. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 12 :699–717. (Cité en page 28.)

[Mingozzi and Roberti, 2018] Mingozzi, A. and Roberti, R. (2018). An exact algorithm for the fixed charge transportation problem based on matching source and sink patterns. *Transportation Science*, 52(2) :229–238. (Cité en page 21.)

[Ministère de la Transition Ecologique, 2021] Ministère de la Transition Ecologique (2021). Le développement du e-commerce : marché, organisation logistique, enjeux environnementaux. https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-38057-developpement-e-commerce-analyse-cgdd.pdf. (Cité en pages 4 et 38.)

[Orlin, 1988] Orlin, J. (1988). A faster strongly polynomial minimum cost flow algorithm. In *Proceedings of the Twentieth annual ACM symposium on Theory of Computing*, pages 377–387. (Cité en page 20.)

[Pishvaee and Razmi, 2012] Pishvaee, M. S. and Razmi, J. (2012). Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming. *Applied mathematical modelling*, 36(8) :3433–3446. (Cité en page 23.)

[Rebman, 1974] Rebman, K. R. (1974). Total unimodularity and the transportation problem : a generalization. *Linear Algebra and its Applications*, 8(1) :11–24. (Cité en page 12.)

[Rivière et al., 2021] Rivière, L., Artigues, C., Cheref, A., Jozefowiez, N., Huguet, M.-J., Ngueveu, S. U., and Charvillat, V. (2021). Multi-product, Multi-supplier Order Assignment and Routing for an e-Commerce Application in the Retail Sector. In *ICORES*, pages 438–445. (Cité en page 16.)

[Roberti et al., 2015] Roberti, R., Bartolini, E., and Mingozzi, A. (2015). The fixed charge transportation problem : An exact algorithm based on a new integer programming formulation. *Management Science*, 61(6) :1275–1291. (Cité en pages 21, 53 et 120.)

[Shojaie and Raoofpanah, 2018] Shojaie, A. A. and Raoofpanah, H. (2018). Solving a two-objective green transportation problem by using meta-heuristic methods under uncertain fuzzy approach. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 34(1) :1–10. (Cité en page 27.)

[Sundarakani et al., 2010] Sundarakani, B., De Souza, R., Goh, M., Wagner, S. M., and Manikandan, S. (2010). Modeling carbon footprints across the supply chain. *International journal of production economics*, 128(1) :43–50. (Cité en page 24.)

[Toulouse INP, 2026] Toulouse INP (2026). Chaire retail responsable. https://wp.laas.fr/chaireretailresp/. (Cité en pages 7 et 120.)

[Van Loon et al., 2015] Van Loon, P., Deketele, L., Dewaele, J., McKinnon, A., and Rutherford, C. (2015). A comparative analysis of carbon emissions from online retailing of fast moving consumer goods. *Journal of cleaner production*, 106 :478–486. (Cité en pages 6, 24, 25 et 75.)

[Wang et al., 2011] Wang, F., Lai, X., and Shi, N. (2011). A multi-objective optimization for green supply chain network design. *Decision support systems*, 51(2) :262–269. (Cité en page 24.)

[Xu et al., 2009] Xu, P. J., Allgor, R., and Graves, S. C. (2009). Benefits of reevaluating real-time order fulfillment decisions. *Manufacturing & Service Operations Management*, 11(2) :340–355. (Cité en pages xi, 13, 14, 15, 49, 50, 54, 56, 58, 63, 94 et 129.)

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

Université de Toulouse

Titre : Optimisation de l'orchestration de commandes en ligne pour réduire l'impact environnemental de la logistique du e-commerce

Mots clés : Recherche opérationnelle, E-commerce, Logistique, Développement durable, Système de gestion de commandes

Résumé : L'essor du e-commerce s'accompagne d'une multiplication des flux logistiques et des impacts environnementaux associés. Afin de participer à la lutte contre le dérèglement climatique, chaque secteur économique se doit de rendre ses activités plus vertueuses, et la logistique du e-commerce ne fait pas exception. Alors qu'à l'origine du e-commerce, les commandes en ligne étaient satisfaites uniquement depuis un entrepôt dédié, le e-commerce est aujourd'hui omnicanal, ce qui implique qu'une commande en ligne peut être expédiée depuis le ou les entrepôts ainsi que depuis n'importe quel magasin du réseau de distribution. Dans ce contexte, le rôle d'un logiciel de gestion de commandes est d'effectuer l'orchestration des commandes en ligne, c'est à dire de déterminer le point de stock en charge de satisfaire chaque commande.
Dans cette thèse, nous cherchons à optimiser les flux logistiques du e-commerce de manière à en réduire l'empreinte environnementale, en adoptant le point de vue de notre partenaire industriel, un éditeur de logiciel de gestion de commandes.
Dans une première partie, nous modélisons le problème d'orchestration écologique de commandes en introduisant un critère environnemental d'optimisation et différentes contraintes d'empaquetage des articles d'une commande. Pour évaluer nos modèles, nous utilisons deux jeux de données. Le premier est constitué de données industrielles et confidentielles, obtenues via notre partenaire industriel. Le second est un jeu de données réaliste partageable à la communauté scientifique, généré à partir de nos instances industrielles.
Dans une seconde partie, nous cherchons à rendre l'orchestration écologique de commandes déployable chez les e-commerçants. Nous évaluons tout d'abord l'intérêt de nos modèles basés sur une orchestration par lots de commandes, intéressante d'un point de vue optimisation mais contraignante en application, par rapport à une orchestration standard se faisant commande par commande. Ensuite, nous comparons les résultats de nos modèles avec les performances écologiques de l'orchestration de commandes basée sur des règles métier actuellement utilisée dans des contextes industriels réels. Puis, nous cherchons à approcher notre critère d'optimisation environnemental qui requiert de nombreuses données par un critère plus accessible et plus facilement applicable au contexte métier des e-commerçants. Enfin, nous proposons des règles d'orchestration écologiques basées sur ce qu'il est actuellement possible de faire au sein d'un système de gestion de commandes.

Title: Optimisation of online orders orchestration to reduce the environmental impact of e-commerce logistics

Key words: Operational research, E-commerce, Logistic, Sustainable development, Order management system

Abstract: The rise of e-commerce has led to an increase in logistics flows and their associated environmental impacts. To play its part in the fight against climate change, every economic sector must make its operations more sustainable, and e-commerce logistics is no exception. Whereas in the early days of e-commerce, online orders were fulfilled solely from a dedicated warehouse, commerce is now omnichannel, meaning that an online order can be dispatched from any warehouse or any store within the distribution network. In this context, the role of an order management system is to orchestrate online orders, i.e. to determine which stock location is responsible for fulfilling each order.
In this thesis, we seek to optimise e-commerce logistics flows in order to reduce their environmental footprint, adopting the perspective of our industrial partner, which provides an order management software.
First, we model the problem of eco-friendly order orchestration by introducing an environmental optimisation criterion and several constraints to pack items into shipping boxes. To test our models, we use two datasets. The first consists of industrial and confidential data obtained via our partner. The second is a realistic dataset generated from our industrial instances and therefore can be shared with the scientific community.
Second, we aim to make eco-friendly orchestration of orders easy to be rolled out to e-retailers. We first evaluate the benefits of our models based on batch order orchestration, which is advantageous from an optimisation perspective but restrictive in practice, compared to the standard order-by-order approach. Then we compare the results of our models with the environmental performance of the order orchestration currently used in the industrial context. Next, we aim to approach our comprehensive environmental optimisation criterion, which requires extensive data, with a criterion that is more accessible to the business context of e-retailers. Finally, we propose eco-friendly orchestration rules based on current practices in order management systems.