

UNIVERSITÉ PARIS-EST

ECOLE DOCTORALE
VILLE TRANSPORTS ET TERRITOIRES

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

Section Aménagement

Spécialité Transport

François COMBES

TRANSPORT DE MARCHANDISES ET LOGISTIQUE : PERFORMANCE, IMPACTS, STRUCTURE DES COÛTS

Soutenue publiquement le 27/09/2018 devant le jury composé de :

Yves Crozet, Professeur émérite, Sciences Po Lyon (IEP Lyon), rapporteur
Jose Holguin-Veras, Professeur, Rensselaer Polytechnic Institute, rapporteur
Valentina Carbone, Professeure, ESCP Europe, rapporteure
Lorant Tavasszy, Professeur, TU Delft, examinateur
Gernot Liedtke, Professeur, DLR, examinateur
Corinne Blanquart, Directrice de Recherche, IFSTTAR, examinatrice
Michel Savy, Professeur émérite, Université Paris-Est, référent

Remerciements

Ce travail est la synthèse de dix années de recherches sur le transport de marchandises et la logistique. Il bénéficie donc de mes nombreuses et enrichissantes discussions avec beaucoup de collègues, chercheurs et experts, et bien d'autres aussi. J'espère qu'il servira également de support à de nouvelles discussions tout aussi fructueuses.

Je tiens en premier lieu à remercier Michel Savy pour ses conseils éclairés lors de la préparation de ce mémoire scientifique. Bien entendu, je garde l'entière responsabilité des positions et erreurs que ce mémoire présente et pourrait contenir. Je remercie aussi les membres du jury d'avoir aussi aimablement accepté de participer à mon jury et, partant, de lire les dizaines et dizaines de page que j'ai cru bon de devoir commettre. C'est un honneur pour moi, et j'espère que vous aurez pu y trouver un peu d'intérêt.

Je remercie également mes collègues de l'IFSTTAR, pour leur excellent accueil d'abord, puis pour nos nombreuses conversations, plaisantes et très instructives (pour moi en tout cas!) : Corinne, Pétronille, Martin, Gwen, David, Christophe, Laetitia, Françoise, Antoine, Reinhard, Nicole, Emmanuel, Huguette et les autres. Patrick mérite une place à part, bien naturellement, nos discussions sont toujours un plaisir, mais il faut dire qu'elles causent souvent chez moi une certaine appréhension, relative à mon emploi du temps (mais ça vaut le coup!).

Je ne peux pas lister toutes les autres personnes que j'ai croisé au cours de ce début de carrière, mais je pense à beaucoup d'entre eux et je les remercie également ; j'ai la chance de pouvoir poursuivre ma carrière dans la recherche publique et dans d'excellentes conditions, il semble – en particulier en cette période – que ce soit une chance rare et je dois beaucoup à ces rencontres. Je remercie aussi ceux qui m'ont fait confiance en me recrutant, je leur dois aussi beaucoup.

Je remercie enfin ma famille, pour tout le reste. Je ne vais pas en parler, parce que je ne sais pas faire, mais c'est le plus important.

Table des matières

1	Définitions et cadrage	15
1.1	Transport de marchandises	15
1.1.1	Les spécificités du transport de marchandises en tant qu'activité économique	16
1.1.2	Les raisons d'être du transport de marchandises	19
1.1.3	Les caractéristiques d'une prestation de transport de marchandises	21
1.1.4	Production du transport de marchandises : ressources, modes, transferts	24
1.1.5	Les agents et leurs relations dans le transport de marchandises	27
1.2	Logistique	31
1.2.1	Définition de la logistique	31
1.2.2	Le niveau de service logistique	36
1.2.3	Interactions des agents dans les chaînes logistiques	41
1.3	Représentations systémiques	43
1.4	Conclusion	44
2	Enjeux du fret et de la logistique	47
2.1	Objectifs et contraintes	47
2.2	Externalités	51
2.2.1	Externalités négatives pures	52
2.2.2	Conflits d'usage	53
2.2.3	Externalités positives	54
2.3	Autres enjeux	55
2.4	Grandes transformations	59
2.5	Complexité du contexte réglementaire	69
2.6	Conclusion	73
3	Les coûts des transporteurs	75
3.1	Un premier modèle	76
3.2	Structure spatiale des opérations	82
3.2.1	Fret retour : coûts joints, équilibre de marché	83
3.2.2	Le retour à vide	84
3.2.3	Généralisation	86

3.2.4	Ruptures de charge, aires de marché	88
3.3	Massification	92
3.3.1	Modélisation des coûts du groupage-dégroupage	92
3.3.2	Massification, hiérarchie des réseaux, aménagement du territoire	99
3.4	Dimensionnement de flotte	103
3.4.1	Dimension optimale d'une flotte	104
3.4.2	Dimensionnement et structure des coûts	107
3.5	Conclusion	110
4	Préférences des chargeurs	111
4.1	Méthode du point de commande	112
4.2	Le modèle Economic Order Quantity	115
4.2.1	Présentation du modèle EOQ	115
4.2.2	Introduction de la contrainte de capacité	122
4.2.3	Choix de taille d'envoi et choix modal	123
4.3	Le modèle de réassort périodique	131
4.3.1	Cas monomodal	132
4.3.2	Cas à deux modes : synchronodalité	142
4.4	Conclusion	145
5	Externalités positives	147
5.1	Introduction	147
5.2	Économies d'échelle en logistique	148
5.2.1	Cas simple : contrainte de capacité saturée	149
5.2.2	Généralisation	154
5.3	Localisation des entrepôts	155
5.3.1	L'étalement logistique	156
5.3.2	Localisation des entrepôts : le modèle de coût	156
5.3.3	Structure des coûts, implications en termes d'aménagement.	160
5.4	Conclusion	162

Table des figures

1.1	Illustration de différents types de chaînes de transport	27
1.2	Les différentes unités d'observation et ce qu'elles représentent . .	30
1.3	Compromis coût niveau de service : coût logistique total	34
1.4	Coopération et compétition dans et entre les chaînes d'approvi- sionnement.	42
1.5	Représentation systémique de l'offre de transport de fret.	44
1.6	Représentation systémique de la demande de transport de fret. .	45
2.1	Objectifs et contraintes du transport de fret et de la logistique. .	48
2.2	Différentes logistiques pour différents territoires	51
2.3	Évolution des tailles de navires porte-conteneur, unité TEU (à partir de TRAN et HAASIS, 2015)	61
2.4	Transports intérieurs de marchandises (Gtkm, axe de gauche) et PIB (G€ prix chaînés, axe de droite), France	68
3.1	Description des opérations de transport, cas simple, sans rup- ture de charge.	77
3.2	Evolution du coût du transport avec la taille d'envoi.	79
3.3	Prix unitaire du transport routier de fret, fonction de la dis- tance, cas des envois de plus de 10 tonnes. Données ECHO 2004-2005.	79
3.4	Coûts relatifs de deux modes en fonction de la taille d'envoi et de la distance	82
3.5	Fret retour : prix et quantités à l'équilibre (à partir de FELTON, 1981)	84
3.6	Fret retour : demande asymétrique et retour à vide (à partir de FELTON, 1981)	85
3.7	Évolution des prix de transport d'un conteneur entre les Etats- Unis et l'Asie (HOFFMANN et ORTHLIEB, 2012)	86
3.8	Economies d'échelle, économies d'envergure	87
3.9	Zones de pertinence des différentes options de transport (à partir de NIÉRAT, 1997)	90
3.10	Une organisation possible du transport avec groupage-dégroupage	93
3.11	Absence et présence d'opérations de groupage-dégroupage	97
3.12	Taille des envois, distance de transport, nombre de ruptures de charge. Données ECHO 2004-2005.	98

3.13	Prix unitaire par mode de transport principal, fonction de la distance à vol d'oiseau et du poids, données ECHO 2004-2005	102
4.1	La méthode du point de commande : évolution temporelle de l'inventaire à destination.	114
4.2	Évolution dans le temps de l'inventaire à origine dans le cadre du modèle EOQ.	116
4.3	Le coût total logistique (<i>TLC</i>) dans le modèle EOQ.	119
4.4	Taille d'envoi optimale et <i>TLC</i> en fonction de Q , modèle EOQ avec contrainte de capacité.	123
4.5	Coûts totaux logistiques de deux modes, léger et lourd.	124
4.6	Zones de pertinence de deux modes de transport léger et lourd.	125
4.7	Répartition des tailles d'envoi.	127
4.8	Répartition des tailles d'envoi dans l'enquête ECHO (GUILBAULT & SOPPÉ, 2009).	128
4.9	Choix modal en fonction de la densité de valeur, du flux chargeur-destinataire, et de la distance	129
4.10	Choix d'organisation de transport en fonction du flux chargeur-destinataire (ordonnée, en log) et de la valeur de la marchandise (abscisse, en log)	131
4.11	Evolution temporelle de la demande à destination et part des différents modes de transport (à partir de DONG, BOUTE, MCKINNON et VERELST, 2017).	143
4.12	Combinaison du transport maritime et du transport aérien dans l'exemple des ordinateurs portables : effet sur les coûts.	145
4.13	Combinaison du transport maritime et du transport aérien dans l'exemple des voitures : effet sur les coûts.	146
5.1	Effet d'une baisse des coûts du transport.	150
5.2	Effet d'une baisse des coûts du transport : prise en compte du coût total logistique.	154
5.3	Coût total logistique unitaire en fonction de la distance au centre de l'entrepôt.	157
5.4	Effet du hausse du nombre d'opérations : baisse des distances inter-opérations.	161

Liste des tableaux

4.1	Estimation du modèle EOQ avec les données ECHO	121
4.2	Modèle de réassort et choix modal : exemple de l'ordinateur portable	138
4.3	Modèle de réassort et choix modal : exemple des voitures	139

Introduction

Le présent mémoire s'intéresse aux deux domaines étroitement liés que sont le transport de marchandises et la logistique. Par transport de marchandises, on entend ici les opérations qui ont pour objet de déplacer des biens matériels d'un point à un autre (on revient plus loin sur le détail des définitions, et les difficultés qu'elles peuvent poser.) et les dispositifs industriels – les systèmes de transport – qui ont pour vocation de produire ces opérations. Par logistique, on entend le processus de gestion qui consiste à fournir à des clients ou des usagers des marchandises dans les conditions matérielles qui conviennent aux préférences de ceux-ci. Ce processus de gestion met en oeuvre un ensemble d'opérations, qui comprend le transport de marchandises.

Ces domaines intéressent une très grande partie de l'économie, celle qui implique la production, l'échange et la consommation de biens (cela comprend donc l'industrie, mais aussi une part substantielle des services, comme le commerce et la distribution par exemple). La performance du transport de marchandises et de la logistique est un enjeu économique important et transversal car la productivité de nombreux secteurs en dépend, ainsi que, de façon générale, l'accès des personnes et entreprises aux marchés de biens. Cette performance est d'ailleurs vecteur d'attractivité économique pour les territoires, et à ce titre, entre autres, intéresse la puissance publique et les collectivités. Mais la logistique et le transport de marchandises, sont aussi sources d'impacts, parmi lesquels l'émission de polluants, de bruit, de gaz à effet de serre (le transport de marchandises est contributeur important de gaz à effet de serre et difficile à décarboner) ; ils sont source d'accidents, de congestion, de gêne visuelle, etc. et à ce titre aussi intéressent l'action publique.

L'objectif de ce mémoire est de proposer une présentation globale du transport de marchandises et de la logistique, et des liens entre ces deux domaines. Il ne s'agit pas d'un manuel pour les opérateurs de transport de marchandises et les gestionnaires de chaîne logistique. Ce mémoire s'adresse plutôt aux acteurs impliqués par les politiques publiques, intéressés au fonctionnement de ces secteurs pris dans leur ensemble, et aux enjeux de politique publique qu'ils soulèvent. Ces acteurs sont souvent dans la position où ils doivent trouver ou gérer un équilibre délicat entre performance et impacts.

Performance et impacts sont les deux côtés d'une même médaille. Ils appliquent des pressions intenses et fortement antagonistes sur les transporteurs et sur les chaînes logistiques : exigence d'efficacité et de compétitivité d'une

part, réduction des impacts négatifs d'autre part. Il est important de bien comprendre le caractère multicritère de la performance, à la fois du transport de marchandises, et de la logistique. C'est pourquoi ce mémoire explique en détail ce que signifie performance dans ces contextes. Cette représentation est utile pour l'élaboration de politiques publiques : une politique publique qui intensifie la pression sur le transport de marchandises ou sur les chaînes logistiques aura un coût en termes de performance, qu'il ne ni ignorer, ni exagérément simplifier.

Dans l'objectif de proposer une vision globale du transport de marchandises et de la logistique, ce mémoire rappelle également les nombreux enjeux de politique publique qui les concernent. Le paysage institutionnel complexe concerné par le transport de marchandises et les chaînes logistiques est également décrit : il constitue une première base pour percevoir les enjeux et difficultés de gouvernance (notamment la répartition des compétences parmi de nombreux acteurs compétents sur de nombreux territoires différents.)

Du point de vue méthodologique, l'approche consiste à analyser en détail la structure des coûts des chargeurs et des transporteurs, à l'aide d'une série de modèles économiques théoriques simples focalisés sur différents sujets. La structure des coûts est une question qui recouvre plusieurs dimensions :

- le lien entre la nature d'une prestation de transport, son inscription dans un certain contexte spatial (notamment un ensemble d'autres prestations de transport) et les ressources qu'il faut engager pour effectivement produire cette prestation (et donc, entre autres, la pertinence des différents modes de transport, en fonction des contextes) ;
- les ressources qui doivent être engagées par l'utilisateur, qu'il s'agisse d'un voyageur (donc le temps qu'il passe, les situations de confort ou d'inconfort dans lesquelles il se retrouve, les risques auxquels il s'expose) ou d'un chargeur (l'immobilisation de la marchandise, les risques que le chargeur prend, concernant à la fois l'état même de la marchandise et la capacité du chargeur à pouvoir répondre aux besoins de ses clients en termes de qualité de service logistique), ou enfin d'un tiers, concerné par une externalité ;
- les caractéristiques géométriques de la structure de ces coûts : présence de rendements croissants ou décroissants, avec les implications en termes de structure de marché et de régulation ; question de la prise en compte ou non des coûts des usagers dans l'analyse ; question de l'interdépendance des zones, des liaisons, des réseaux, et donc présence d'éventuelles économies ou déséconomies d'envergure, ici aussi avec des implications complexes en termes de régulation et de gouvernance.

Les travaux visant à améliorer la connaissance de la structure des coûts ont deux vertus. Premièrement, une meilleure connaissance de la structure des coûts a des bénéfices directs pour évaluer et élaborer des politiques de transport ayant pour objectif d'améliorer la pertinence ou la compétitivité

d'un mode, d'un ensemble de services ou d'un système de transport, en vue de réduire tel ou tel impact ou externalité. Deuxièmement, les conclusions des études concernant la régulation des marchés dépendent de façon directe des hypothèses posées concernant les fonctions de production : une erreur sur ces hypothèses peut se traduire directement par une erreur importante sur les conclusions.

L'approche développée dans cet ouvrage repose sur l'élaboration de modèles analytiques relativement simples. Chaque modèle est conçu pour comprendre le fonctionnement et l'interaction d'un nombre limité de mécanismes. Ces modèles sont complémentaires : nous espérons qu'ensemble, ils donnent une vision relativement large des différents phénomènes en jeu dans le fonctionnement du transport de marchandises et de la logistique. Il ne s'agit pas de donner des grandeurs numériques : ces modèles sont élaborés et analysés à la fois pour comprendre qualitativement le fonctionnement des chargeurs et des transporteurs, et aussi pour en tirer des conclusions en termes d'enjeux et d'action publique lorsque c'est pertinent. Cela dit, quand c'est possible, des validations empiriques (directes ou indirectes) sont proposées. Les outils relèvent essentiellement de l'économie, mais les conclusions portent autant sur les caractéristiques géographiques des systèmes de transport et sur les implications en termes d'aménagement du territoire que sur les dimensions plus classiques des politiques de transport.

Le Chapitre 1 pose le cadre, les définitions, et présente de façon systémique les interactions entre les agents concernés par le transport de fret et la logistique : transporteurs, chargeurs, clients des chargeurs. Pour comprendre les choix des chargeurs, et le fonctionnement du transport de fret, il faut savoir ce que veulent les clients des chargeurs, la façon dont cela influence les chaînes logistiques des chargeurs, et enfin la façon dont cela oriente les choix des chargeurs en termes de transport. La notion centrale de niveau de service traverse ces catégories d'agents : le chargeur fournit ses clients avec un niveau de service logistique donné, et doit donc se procurer les prestations de transport qui permettent d'atteindre ce niveau de service logistique.

Les enjeux et impacts relatifs au transport de marchandises et à la logistique sont présentés dans le Chapitre 2. Sur cette thématique vaste, le mémoire ne prétend pas à l'exhaustivité. Il s'agit plutôt de faire un échantillonnage représentatif des différentes problématiques. Trois catégories d'enjeux sont présentés : les enjeux relatifs à la structure des coûts et aux externalités, notamment environnementales ; un ensemble d'autres enjeux qui justifient aujourd'hui la très grande diversité de politiques publiques mises en oeuvre pour gérer ces secteurs ; et enfin les grandes transformations en cours et défis à venir.

Le Chapitre 3 analyse la structure des coûts du transport de fret. La diversité des techniques et la complexité des processus font du transport de marchandises un objet économique complexe. L'objectif de ce chapitre est d'étudier la structure des coûts à l'aide de modèles théoriques relativement simples, afin de mettre en lumière certains aspects importants du fonctionnement du trans-

port de fret, économiques et géographiques. Des notions telles que les domaines de pertinence des différents modes de transport, aires d'attraction des terminaux, hiérarchie des réseaux, noeuds du transport et massification des flux sont ainsi explicitées, analysées, et parfois relativisées.

Les préférences des chargeurs en termes de transport de fret ne dépendent pas que des coûts et des temps de trajet. Elles dépendent aussi des caractéristiques des chaînes logistiques des chargeurs. Le Chapitre 4 étudie les préférences des chargeurs, à l'aide de modèles économiques. A travers la notion de coût total logistique, le chapitre montre pourquoi certains modes de transport et certaines organisations conviennent mieux à certaines chaînes logistiques. Il montre aussi comment les caractéristiques et exigences des clients influencent les choix des chargeurs.

Le Chapitre 5 présente enfin des travaux exploratoires concernant la présence potentielle d'externalités positives dans le transport de fret et la logistique. A partir des résultats des chapitres précédents concernant la structure des coûts des transporteurs et des chargeurs, le chapitre étudie deux sujets : les économies d'échelle dans les chaînes logistiques et leurs conséquences en termes d'évaluation de politique publique, et les économies d'échelle dans le transport massifié, les conséquences en termes de localisation des entrepôts autour des villes, et les implications en termes de politiques publiques et notamment d'aménagement du territoire.

Chapitre 1

Transport de marchandises et logistique : définitions et cadrage

On s'intéresse dans cet ouvrage aux deux domaines que sont le transport de marchandises, et la logistique. L'objectif de ce premier chapitre est simple : il s'agit d'abord de fixer le vocabulaire utilisé dans le reste de cet ouvrage, ensuite de présenter les caractéristiques fondamentales du transport de fret et de la logistique, dont le reste de l'ouvrage ne fait que détailler l'analyse.

Dans un premier temps, les différentes définitions relatives au transport de marchandises sont présentées, ainsi que quelques données de cadrage (Section 1.1). La Section 1.2 fait de même pour la logistique. Une représentation systématique du transport de fret et de la logistique est proposée dans la Section 1.3, et la Section 1.4 conclut le chapitre.

1.1 Le transport de marchandises : définition, cadrage

Le transport de marchandises est l'activité économique qui consiste à déplacer des marchandises¹. Dans cet ouvrage, il s'agit de considérer le transport de marchandises comme une prestation économique, souvent réalisée par un acteur économique pour un autre (mais pas toujours : il s'agit de la distinction compte-propre versus compte d'autrui, sur laquelle on reviendra). On retien-

1. Derrière cette définition simple en apparence se cachent un certain nombre de subtilités. Si on se penche sur la Nomenclature d'activité française, révision 2 (INSEE, 2008) on constate par exemple que le transport de bagages et d'animaux accompagnant des voyageurs n'est pas du transport de marchandises. La distribution d'eau, même par camion, n'en est pas non plus. Le transport de grumes dans les forêts dans le cadre de l'exploitation forestière non plus, les activités de poste et de courrier non plus, etc. Les services de déménagement en font partie, alors que le déménagement n'est pas considéré comme un contrat de transport du point de vue de la jurisprudence (Cass. com. 1^{er} avril 2003 N°01-03109)... On ne cherchera pas ici à aller plus loin dans le détail de ces subtilités.

dra donc la définition suivante : *une opération de transport de marchandises consiste à transporter un envoi d'un point donné (l'origine) à un moment donné (l'heure de chargement) à un autre point donné (la destination) à un moment donné (l'heure de livraison)*. On s'inscrit donc dans une logique de transport porte-à-porte. Comme on le verra dans la partie concernant la logistique, c'est la notion la plus pertinente pour étudier les préférences des chargeurs et leurs décisions.

Cette définition fait appel à la notion d'envoi, définie comme suit : *l'envoi est la quantité de marchandises mise à disposition à un moment donné pour être transportée dans le cadre d'une même opération de transport depuis un expéditeur vers un destinataire donné* (GUILBAULT & SOPPÉ, 2009). Le transport d'un envoi est donc l'unité de référence dans le cadre de ce travail. C'est à la fois une unité de décision – c'est bien sur cette prestation que porte la transaction entre le l'expéditeur et le destinataire – et une unité d'observation qui a un intérêt majeur même si, de ce point de vue, ce n'est ni la seule ni même la plus courante dans les enquêtes portant sur le transport de fret et la logistique.

Dans la suite, les spécificités du transport de marchandises en tant qu'activité économique sont présentées (Section 1.1.1). Les raisons d'être du transport de marchandises en tant qu'activité économique sont analysées (Section 1.1.2). Comme il est essentiel de bien comprendre ce que c'est qu'une prestation de transport de marchandises du point de vue d'un chargeur, les différentes caractéristiques d'une prestation de transport sont présentées dans la Section 1.1.3. Le côté offre est brièvement exposé dans la Section 1.1.4. Enfin, les agents qui interviennent dans le fonctionnement du transport de marchandises étant très divers et leurs relations complexes, la Section 1.1.5 pose quelques définitions.

1.1.1 Les spécificités du transport de marchandises en tant qu'activité économique

Le transport de marchandises est une activité économique au sens où des ressources sont combinées en vue de produire quelque chose, ici le déplacement d'une certaine quantité de biens dans certaines conditions. Il est utile d'en préciser certaines caractéristiques importantes :

Localisation des biens : tous les biens sont datés et localisés. Pour qu'un bien ait de la valeur aux yeux de celui qui va l'utiliser ou bien le consommer (en particulier pour l'utilisateur final, c'est-à-dire le consommateur), alors il faut que ce bien soit au bon endroit au bon moment². Cela renvoie à la notion de logistique, définie ci-après, mais il s'agit de la *raison d'être* du transport de marchandises, et de la source de la valeur ajoutée lui est associée.

2. Le cas des déchets est différent, mais en fait symétrique : il y a de la valeur à déplacer (en l'occurrence enlever) ces biens depuis ceux qui les ont générés, et à le faire au bon moment.

Demande dérivée : en conséquence du point ci-dessus, la demande de transport de marchandises est systématiquement une demande dérivée : sans activité économique, pas de transport de marchandises³. De façon assez liée, le transport de marchandises est un secteur très transversal, qui concerne beaucoup d'autres secteurs économiques.

Marché différencié : le transport de marchandises n'est pas un marché unique et homogène, mais un ensemble de marchés distincts. Les prestations offertes sont très différenciées. Les prestations suivantes, par exemple, sont très différentes : un transport de Paris vers Lyon, un transport de Paris vers Bordeaux ; un transport en 24h, un transport en 72h ; un départ un lundi, un départ un vendredi ; un transport de lait, un transport d'animaux vivants ; une livraison entre 8h et 9h, une livraison entre 8h et 18h ; etc. Ce que l'on peut considérer parfois à tort comme un secteur homogène est en fait un secteur extrêmement hétérogène, ou certaines prestations sont partiellement substituables et d'autres pas du tout. Cela soulève des questions difficiles en termes d'observation ainsi que de régulation. Cela illustre également la spécificité de ce secteur dans lequel la dimension spatiale et temporelle joue un rôle très important.

Compte d'autrui et compte propre : par ailleurs, le transport de marchandises est dans une proportion significative des cas produite directement par le bénéficiaire de l'opération, c'est-à-dire le chargeur. La question du faire ou faire faire se pose de façon centrale en transport de marchandises, et elle soulève plusieurs difficultés, par exemple pour établir des statistiques, voire pour parler de secteur économique : les chargeurs qui font du transport pour compte propre ne sont généralement pas des transporteurs. Il faut préciser ici que dans ce mémoire on parlera de *marché* de façon élargie, par abus de langage. On fera donc l'hypothèse que parmi les alternatives offertes à un chargeur par les marchés, il y a celle de faire soi-même (le chargeur est donc en concurrence avec les autres opérateurs, en quelque sorte.)

Coûts du chargeur : le transport de marchandises est caractérisé par le fait que le transporteur n'est pas seul à supporter les coûts de la réalisation d'une opération de transport. Le chargeur, c'est-à-dire celui qui commande l'opération de transport, supporte également des coûts, au delà du montant financier qu'il va transférer au transporteur : beaucoup de ces coûts relèvent de la manutention, de l'emballage, des démarches administratives, etc. Certains relèvent du fait même qu'il faut s'équiper pour pouvoir utiliser certains modes de transport. Enfin certains coûts correspondent au fait que le chargeur doit accepter que sa marchandise soit immobilisée pendant un certain temps, ce

3. C'est également le cas du transport de voyageur, à l'exception des déplacements qui procurent un plaisir pour eux-mêmes, comme les promenades. Mais il n'y a pas d'exceptions pour le transport de marchandises.

qui l’oblige à immobiliser du capital, et à prendre de nombreux risques : risque d’obsolescence, de dépréciation, de rupture de stocks, etc. Ces coûts ne sont pas directement visibles dans les prix du transport, mais ont une très grande importance dans l’analyse de ce secteur économique. Cela renvoie ici aussi à la question de la logistique.

Mobilité des ressources : les ressources fondamentales du transport de marchandises sont les infrastructures, les véhicules, les personnels et l’énergie. Les véhicules et les personnels sont mobiles, ce qui soulève de nombreux problèmes spécifiques, par exemple de concurrence internationale, non seulement sur le marché des transports mais aussi sur le marché du travail.

Structure des coûts du transporteur : du fait que les prestations de transport de marchandises sont très différenciées, mais que les ressources mises en oeuvre pour réaliser ces prestations sont partagées, la structure des coûts est complexe. Il y a des économies d’échelle, et des économies d’envergure. Cette structure des coûts, en lien avec les caractéristiques de la demande, se traduit par l’existence de réseaux de transport souvent hiérarchisés⁴. Du point de vue économique et d’aménagement du territoire, la question de la structure des coûts est centrale, et sera examinée en détail dans le Chapitre 3.

Le transport de marchandises : industrie ou service ? En France, l’INSEE⁵ considère que le transport de marchandises relève des services. L’industrie est en effet définie comme *les activités économiques qui combinent des facteurs de production (installations, approvisionnements, travail, savoir) pour produire des biens matériels destinés au marché*.⁶ On peut remettre en question cette définition : en effet, la localisation fait partie des caractéristiques physiques d’un bien. Transporter ce bien en modifie donc les caractéristiques physiques, ce qu’on peut assimiler à une opération industrielle (SAVY, 2017). Le transport partage d’ailleurs avec d’autres activités classiquement considé-

4. On en cherchera pas ici à définir très précisément ce qu’on entend par hiérarchisation des réseaux. L’idée est que l’on observe des niveaux, à la fois d’infrastructures, de véhicules et de services. Les niveaux dits supérieurs assurent les liaisons de grande distance et de volume élevé, tandis que les niveaux dits inférieurs ont des fonctions plus locales. La notion de hiérarchie provient de ce que les niveaux inférieurs ont également pour fonction d’alimenter les niveaux supérieurs, qui n’auraient pas de pertinence économique dans cela. Le fait que les réseaux de transport aient une structure hiérarchisée est commune au transport de passagers et au transport de marchandises, et a plusieurs autres systèmes économiques et d’autres natures. Il faut noter que cette notion est souvent multimodale : ainsi le transport routier de marchandise sert de niveau secondaire au transport aérien qui est le niveau principal : le transport routier a d’autres fonctions propres, mais le transport aérien ne peut pas vivre sans le transport routier.

5. Institut National de la Statistique et des Études Économiques.

6. <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1426>. Il s’agit d’une définition approximative ; le contour précis du secteur industriel est défini par les différentes nomenclatures comme, par exemple, la Nomenclature d’activité française (NAF) .

rées comme industrielles le fait que la production même du transport mobilise des actifs capitalistiques lourds.

On peut aller plus loin et noter que, selon certains auteurs, la distinction entre industrie et services est inutile et contre-productive. Ainsi, VARGO et LUSCH (2008) exposent une vision de l'économie centrée sur les services, et expliquent que tout échange économique est fondé sur la mise en oeuvre de compétences par une partie au bénéfice de l'autre partie, *et cela que des échanges de biens soient impliquée ou non*. Ils affirment même que la distribution de biens est en réalité un mécanisme de distribution de services (l'acquisition d'un réfrigérateur est en réalité l'acquisition d'une capacité de stockage frais ; l'acquisition d'un véhicule est en réalité l'acquisition d'une capacité de mobilité, ainsi que d'un affichage de richesse et de valeurs.)

Par extension, le mouvement de tertiarisation de l'économie est, selon eux, une sorte d'artefact intellectuel causé par le fait que l'économie est depuis longtemps, par erreur, réduite à la dimension tangible de la transformation de matières et de biens manufacturés. Le fait que l'on isole aujourd'hui des activités économiques dites "de service" résulte en réalité de la combinaison des causes suivantes : la capacité croissante de l'économie à gérer les informations et les biens séparément ; et la spécialisation croissante des activités économiques.

Toutes ces spécificités font que le transport de marchandises est un domaine complexe, plus qu'il ne peut parfois le paraître. On peut, par exemple, avoir l'impression que le transport routier est une industrie simple, produisant des prestations homogènes, en concurrence parfaite, sans présence particulière de rendements croissants. La réalité est plus complexe. D'une part, les transporteurs sont très divers, et, pour beaucoup d'entre eux, spécialisés. Cette spécialisation peut concerner un secteur géographique, un type d'envoi et de prestation (la messagerie se concentre sur les envois de moins de six palettes, la course urbaine se concentre sur les envois devant être transmis en quelques heures, ...), un type de marchandises (certains transporteurs sont spécialisés dans le transport réfrigéré, le transport de matières dangereuses, le transport exceptionnel⁷, etc.)

D'autre part, les relations entre chargeurs, intermédiaires et transporteurs, et entre transporteurs eux-mêmes, sont très variées. La section suivante aborde ce point plus spécifiquement.

1.1.2 Les raisons d'être du transport de marchandises

Dans la section précédente, nous avons indiqué le fait que la demande de transport de marchandises est une demande dérivée. Nous revenons ici sur ce point. Le transport de marchandises est une activité économique dont la dimension géographique est très forte. Dans cette section, on expose rapidement

7. Tous ces types de transport requièrent des matériels spécifiques et peu ou pas interchangeables.

quelques raisons d'être fondamentales du transport de marchandises : pourquoi les marchandises se déplacent-elles ?

La première raison fondamentale est la dispersion des ressources, et la dispersion des lieux de consommation, et le fait que les lieux de consommation ne sont pas nécessairement implantés là où beaucoup de ressources sont disponibles. Il est donc nécessaire de déplacer soit les ressources, afin de les transformer puis de consommer les produits, soit de les transformer et de déplacer les produits, soit les deux. On peut noter que la localisation des lieux de consommation n'est pas exogène, ni même celles de plusieurs ressources (on ne peut effectivement pas déplacer une mine de charbon ; par contre on peut cultiver différentes choses sur un même terrain). On retrouve ici des questions classiques mais d'une infinie complexité d'économie spatiale et de géographie : pourquoi certaines activités sont-elles situées à tel endroit et pas à tel autre ? Pourquoi se forment les villes ? Etc.

Une deuxième raison, qui fait que les matières premières, produits intermédiaires et produits finis peuvent se déplacer beaucoup plus que ce qu'un raisonnement naïf d'optimisation laisserait imaginer est l'existence de différentiels de productivité relative (théorie des avantages comparatifs) : chaque nation (ou territoire, ou unité géographique de référence qu'il n'est pas forcément si facile de définir pour cette question) doit se spécialiser dans le domaine dans lequel ses avantages comparatifs sont les meilleurs. Il s'ensuit que chaque nation va produire des choses bien différentes de ce qu'elle va consommer et donc que des marchandises vont devoir être acheminées dans tous les sens à la surface de la Terre.

La théorie des avantages comparatifs explique pourquoi les nations doivent se spécialiser dans la production de certains biens (dans l'exemple de Ricardo, le Portugal vend du vin à l'Angleterre et l'Angleterre des draps au Portugal) et donc pourquoi on observe des échanges *interbranches* mais n'explique pas pourquoi deux nations s'échangent la même chose – échanges *intrabranches*⁸. La Nouvelle Economie Géographique (notamment HELPMAN et KRUGMAN, 1985) a proposé une explication supplémentaire aux flux de marchandises, qui combine principalement deux éléments fondamentaux. Le premier est la différenciation des produits : pour reprendre l'exemple de l'automobile, deux modèles de deux marques différentes sont, dans une certaine mesure, substituables, mais ils ne sont pas du tout identiques aux yeux des consommateurs. D'où l'échange intrabranche qu'on observe en quantité dans les statistiques de commerce international et que les théories classiques n'expliquent pas. Le second est la présence d'économies d'échelles dans les fonctions de production⁹,

8. Par exemple, en 2012, les Etats-Unis d'Amérique ont exporté G\$12,8 d'automobiles depuis l'Union Européenne et en ont importé G\$47,6 (COMITÉ DES CONSTRUCTEURS FRANÇAIS D'AUTOMOBILES [CCFA], 2014)

9. Pas de *backyard capitalism* : tout le monde n'est pas capable de produire dans son garage l'ensemble des produits dont il a besoin. Mais peut-être cette hypothèse sera-t-elle devenue inadéquate lorsque des imprimantes 3D généralistes pourront produire l'ensemble des biens de grande consommation à partir de matières premières génériques ?

et l'hétérogénéité des préférences des consommateurs¹⁰. Cette deuxième hypothèse, bien plus réaliste, rend les choses bien plus compliquées : la production pourra être concentrée pour dégager des rendements d'échelle ou dispersée pour mieux répondre à la préférence pour la diversité des consommateurs. Par conséquent, les lieux de production devront trouver un équilibre entre proximité des ressources naturelles et produits intermédiaires, proximité aux marchés finaux, proximité avec les concurrents (causant une perte de pouvoir de marché mais l'accès à un marché plus grand, car se localisant aussi là où est la demande) ou bien distanciation des concurrents, pour les raisons opposées. Ce dernier modèle, plus réaliste, est aussi bien plus complexe ; l'unicité d'équilibre qu'on trouve dans beaucoup des modèles fondamentaux d'économie n'est plus garantie, et on a des phénomènes de dépendance au sentier qui rendent la compréhension et la modélisation de ces processus bien plus ardue.

On peut enfin évoquer les logiques d'approvisionnement des entreprises, qui renvoient à des enjeux de logistique. Par exemple, une entreprise peut vouloir diversifier ses approvisionnements, si c'est possible, à la fois pour réduire sa vulnérabilité à la rupture d'approvisionnement sur un produit critique, ou bien pour réduire sa dépendance à un fournisseur.

Dans tous les cas, l'amélioration des techniques de production du transport de marchandises, y compris les grandes mutations telles que la conteneurisation ne sont que le moyen, et pas la cause première, des évolutions du transport de marchandises dans le passé. Le coût de transport est un frein aux mouvements des marchandises, mais la valeur des mouvements de marchandise provient des causes citées ci-dessus.

1.1.3 Les caractéristiques d'une prestation de transport de marchandises

Le transport de marchandises est un domaine fortement différencié. C'est aussi un secteur fortement générateur d'impacts négatifs, et qui à ce titre notamment, intéresse fortement la puissance publique. De nombreuses mesures d'action publique (par exemple les politiques de report modal) ont pour vocation de mettre en avant telle façon de produire du transport de fret par rapport à telle autre. Afin d'élaborer et d'évaluer correctement ces politiques, la bonne compréhension des choix des chargeurs est indispensable.

Pour comprendre les choix des chargeurs, il faut identifier les caractéristiques des prestations de transport de marchandises auxquels ils sont sensibles (ce qui est susceptible de modifier le prix qu'ils sont prêts à payer et des coûts qu'ils sont prêts à supporter pour que la prestation de transport soit réalisée

10. On a indiqué plus haut que le marché du transport de fret était un marché non pas homogène, mais différencié. C'est le cas de bien d'autres marchés. Ce que l'on dit ici, c'est que pour un marché donné, par exemple le marché automobile, deux consommateurs différents n'ont pas les mêmes goûts : l'un va préférer une voiture citadine petite et peu consommatrice, l'autre voudra une grande routière confortable et ostentatoire. Sur l'économie des marchés différenciés, voir par exemple ANDERSON, de PALMA et THISSE (1992).

d'une certaine manière). Lorsqu'un chargeur et un transporteur contractualisent, ils doivent spécifier un certain nombre d'éléments. L'objectif ici est de tenter de lister ces caractéristiques ; on ne vise pas l'exhaustivité, mais l'idée est de montrer la diversité des options qui s'offrent aux chargeurs et aux transporteurs.

- *Origine et destination* : un envoi doit être enlevé à un endroit précis, et livré à un endroit précis. Cela dit, la destination proposée par le transporteur n'est pas forcément la destination ultime souhaitée par le chargeur. On peut citer le cas des ITE (Installations Terminales Embranchées) ferroviaires ou fluviales, qui ne sont que quelques milliers en France ; ou bien la livraison en point relai pour les particuliers : à leur charge de réaliser le dernier kilomètre de la prestation de transport, c'est-à-dire de ramener le colis chez eux. Par ailleurs la précision sur l'origine et la destination est aussi un paramètre important : les erreurs de livraison se produisent, et peuvent avoir de très lourds impacts.
- *Horaire de chargement et de déchargement* : un envoi doit être enlevé à un moment donné et livré à un moment donné. Ces moments sont déterminés avec plus ou moins de précision. Le transporteur et le chargeur vont généralement convenir d'un créneau plus ou moins large (une heure, une demi-journée, entre 3 et 7 jours, etc.) : il y a nécessité de coordination des programmes d'activité. Le temps de trajet lui-même (tel que perçu par le chargeur) a également son importance¹¹. La fiabilité avec laquelle ce qui a été annoncé est réalisé est également très importante, comme on le discutera plus loin au sujet de la logistique.
- *Taille et poids de l'envoi* : l'envoi lui-même a un volume et un poids, les véhicules qui seront mis en oeuvre pour le transporter doivent être compatibles. Cette contrainte est plus ou moins forte en fonction de la pression appliquée par les pouvoirs publics sur le respect des réglementations.
- *Conditions physiques du chargement et du déchargement* : Il s'agit de déterminer qui est responsable de charger et décharger la marchandise, avec quels moyens, et si les installations du chargeur sont compatibles avec les moyens qui seront mis en oeuvre par le transporteur (par exemple : présence d'un quai de chargement, présence d'équipements de manutention, chargement réalisé par le chauffeur routier ou non, etc.)
- *Conditions du transport de l'envoi* : dépendant de la nature de la marchandise : température dirigée, arrimage, conditionnement, protection contre les vols, etc.
- *Opérations annexes* : l'opération de transport peut être accompagnée d'un ensemble de prestations annexes : reprise des palettes vides ou conteneurs vides, démarches administratives diverses, voire pose lorsque

11. Dans l'analyse coût-bénéfice des projets d'infrastructure de transport, il s'agit avec les gains de coût du poste de gain le plus important, en général. Les autres dimensions évoquées dans cette partie ne sont en général pas chiffrées.

des particuliers sont livrés¹².

- *Information* : il peut s'agir de traçabilité en temps réel avec plus ou moins de précision (de quelques alertes émises lors des ruptures de charge à la géolocalisation), mais aussi du monitoring, en temps réel ou en temps différé, d'un ensemble d'indicateurs comme la température des marchandises ou les chocs, par exemple.
- *Gestion des aléas* : régulièrement, le transport de marchandises ne se déroule pas comme prévu. Il s'agit alors de définir comment l'aléa sera géré : si l'envoi a été livré au mauvais endroit, en combien de temps sera-t-il réacheminé¹³ ? Que fera le transporteur si le destinataire refuse la livraison pour non conformité ? Que fera le transporteur si le destinataire est absent (cas des livraisons aux particuliers ?)

On remarque qu'il y a deux catégories de paramètres : ceux qui sont relatifs à une valeur cible à atteindre, et ceux qui sont relatifs à la façon dont un aléa sera géré : précision avec laquelle la cible nominale est atteinte, et gestion des incidents. Dans tous les cas, de façon très générale, plus le niveau de prestation demandé est élevé (rapidité, précision, etc.) plus la prestation sera contraignante pour le transporteur, l'empêchant de faire jouer à plein les économies d'échelle et d'envergure, et plus elle sera coûteuse.

Au delà des caractéristiques mêmes de la prestation, il y a plusieurs dimensions qu'on ne pourra pas aborder dans cet ouvrage, mais qui sont d'une très grande importance et qu'on liste ici rapidement :

- *Tarifcation de la prestation* : il s'agit d'une question très importante, voire stratégique, en particulier si la forme de la tarification comprend des incitations (par exemple des pénalités) susceptibles de modifier le comportement des transporteurs.
- *Responsabilités, assurances* : au cours de la réalisation d'une prestation de transport, les responsabilités sont en principe clairement définies. Par ailleurs les acteurs peuvent voire doivent s'assurer pour certains des risques encourus. Il s'agit d'une dimension supplémentaire de gestion des aléas.
- *Contrats cadres* : lorsque des opérations de transport répétées sont concernées, ils permettent aux parties de maîtriser des aléas à un autre niveau, et de maîtriser les coûts de transaction. Ils peuvent en particulier contenir des engagements réciproques en termes de prix, de niveau de service, de volumes, etc.
- *Contrats entre intermédiaires et transporteurs* : Même si le chargeur ne signe de contrat qu'avec un interlocuteur, il y aura probablement une chaîne de contrats qui en découlent en aval entre plusieurs acteurs qui se coordonnent par ce moyen : partenaires, sous-traitants, acteurs

12. On sort dans ce cas du transport à proprement parler mais il y a des économies d'envergure : les livreurs, également capables de faire la pose, ne font qu'un déplacement au lieu de deux.

13. Voire sera-t-il réacheminé ? Par exemple la Poste propose des dédommagements forfaitaires lorsque les colis sont perdus, hors cas particuliers.

de différents modes de transport, etc. On retrouve à chaque niveau, de façon implicite ou explicite, les questions soulevées ci-dessus.

- *Contrôle de la réglementation et fraude* : le transport de marchandises est au coeur de nombreux enjeux de réglementation (transport de marchandises réglementées, voire illégales - stupéfiants, contrefaçons, etc. ; respect des réglementations de poids maximal en charge ; de durée de temps de travail ; de respect des règles de cabotage ; de fiscalité ; etc.) qui peuvent amener un chargeur et un transporteur à lier un contrat qui ne représente pas la réalité de la prestation.

Il faut noter que dans le cas particulier du compte-propre, la question se pose dans des termes différents car le chargeur réalise lui-même le transport. Cela dit, les questions sous-jacentes de mobilisation de ressource économique et de gestion des aléas se posent de façon somme toute similaire.

Enfin, il faut remarquer que la notion de mode de transport n'apparaît pas dans les caractéristiques ci-dessus. C'est parce que le mode de transport n'est pas important *en tant que* tel du point de vue du chargeur : il est important dans la mesure où il permet de réaliser une prestation qui convient aux besoins du chargeur, et où les matériels mis en oeuvre par le transporteur sont compatibles avec ceux du chargeur. Ainsi, il ne faut pas penser que les chargeurs préfèrent le camion au train pour des raisons liées de façon intrinsèque à ces modes de transport. S'ils choisissent des transporteurs utilisant un mode plutôt qu'un autre, c'est parce que les prestations offertes par les transporteurs conviennent mieux aux besoins des chargeurs. On peut d'ailleurs remarquer que pour le cas du transport combiné ou des autoroutes ferroviaires, le chargeur ignore souvent si la marchandise a été transportée exclusivement par route ou bien à la fois par la route ou par le train. Il ne s'agit pas d'une information essentielle pour les chargeurs, à part s'ils le produisent ou en maîtrisent de prêt la production¹⁴.

1.1.4 Production du transport de marchandises : ressources, modes, transferts

Les sections précédentes offrent une perspective orientée vers la demande. Il faut également regarder l'offre, et en particulier les ressources que les transporteurs mettent en oeuvre pour déplacer les marchandises. On distingue quatre grands types de ressources physiques dans le transport de marchandises : les infrastructures, les véhicules, les personnels et l'énergie. Ces ressources sont combinées de manière complexe afin de produire le transport, grâce à des processus, des savoirs-faire, du recueil et de l'échange d'information.

14. Pour illustrer ce point, on peut faire l'analogie avec un particulier passant un contrat avec un fournisseur d'accès à Internet (le particulier étant le chargeur et le FAI étant le transporteur). Le particulier demande un certain débit, une certaine fiabilité, la compatibilité avec son propre matériel informatique, mais n'est absolument pas intéressé de savoir si, du côté des FAI, les données passent par tel ou tel type de fibre ou de câble, par tels serveurs localisés à tels endroits et programmés de telle façon, etc.

Modes de transport : l'offre de transport est hétérogène ; elle va de la course urbaine réalisée par un motard sur une distance de quelques dizaines de kilomètres aux vraquiers qui peuvent transporter plusieurs centaines de milliers de tonnes de marchandises en traversant les océans. Pour sérier l'offre de transport, et parce que les ressources, les techniques, les environnements et les organisations sous-jacentes sont très différentes, on distingue les *modes* de transport. Un mode de transport peut être défini comme la combinaison d'un certain type de véhicule et d'infrastructure. Classiquement, on distingue le transport maritime, le transport fluvial, le transport ferroviaire, le transport routier, et le transport aérien. Pour chaque mode, il y a une vraie diversité d'offre : les navires sont très différents ; en aérien le fret peut être transporté avec des passager ou dans des avions dédiés ; en routier on trouve des petits véhicules et de gros ensembles routiers, avec des logiques d'exploitation très diverses. On peut aussi distinguer comme modes des organisations qui combinent plusieurs infrastructures avec des véhicules et des contenants spéciaux, comme le transport combiné, pour lequel des caisses mobiles sont transportées à la fois par route et par fer ; ou les autoroutes ferroviaires, où des ensembles routiers sont transportés sur des wagons spécifiques. Quoiqu'il en soit, les techniques sont variées, souvent concurrentes, et pourtant aussi souvent complémentaires.

Ruptures de charge, inter/multi/synchro-modalité : les opérations de transport de marchandises impliquent dans bien des cas l'utilisation de plusieurs véhicules et/ou de plusieurs modes de transport. On peut avoir des ruptures de charges *monomodales* : c'est le cas lorsqu'on transfère un envoi d'un camion à un autre camion, soit pour des logiques de massification, soit pour assurer le dernier kilomètre.

Il peut également y avoir des ruptures de charges *multimodales* lorsque deux modes de transport différents sont utilisés, comme par exemple l'avion et le routier, ou le fluvial et le maritime. On distingue le cas spécifique de l'*intermodal* lorsque deux modes ou plus sont utilisés, mais que le contenant de la marchandise (conteneur, caisse mobile) n'est pas empoté ou dépoté. Ce dernier cas correspond au transport combiné¹⁵, ou au transport maritime de conteneur.

La multimodalité est un sujet central en politique des transports, notamment (mais pas uniquement) du point de vue de la réduction des impacts : l'objectif est souvent de réduire la place de la route, en transférant les marchandises sur d'autres modes. On y reviendra plus loin, dans le Chapitre 2, relatif aux enjeux du transport de marchandises et de la logistique.

Ces dernières années, le nouveau concept de *synchromodalité* a émergé. Bien que récent et pas complètement stabilisé, il recouvre plusieurs idées qui sont

15. Le transport combiné est défini comme un transport intermodal où le mode routier et un mode non routier (ferroviaire, fluvial ou maritime) sont utilisés ensemble, dans des conditions telles que les trajets routiers soit permettent d'atteindre les terminaux de transfert modal appropriés les plus proches, soit n'excèdent pas 150 km à vol d'oiseau (CONSEIL DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES, 1992).

toutes liées non pas à la façon dont le transport est réalisé mais à la façon dont il est *planifié*. Par exemple, l’institut néerlandais pour la logistique Dinalog propose l’idée selon laquelle si le chargeur commande une prestation de transport définie uniquement en termes de niveau de service, alors le transporteur pourra choisir les modes qui lui conviennent le mieux, de façon flexible, pour atteindre ce niveau de service (DINALOG, 2015). La plateforme européenne ALICE¹⁶ définit pour sa part la synchronodalité comme une intermodalité synchronisée, où la combinaison des moyens de transport est définie pour chaque envoi le plus tard possible. Les chaînes logistiques “bi-mode” de certains chargeurs sont citées comme un exemple d’application déjà mis en oeuvre, mais les cas restent rares (ALICE, 2014).

Cette idée de chaîne bi-mode consiste à considérer le choix modal d’une façon différente : il ne s’agit plus de considérer que le chargeur demande une prestation dont la réalisation revient aux transporteurs, à partir d’un cahier des charges en termes de niveau de service. Il s’agit au contraire de considérer que le chargeur va lui-même choisir, de façon dynamique, le mode de transport à utiliser, en intégrant gestion des stocks et pilotage du transport. D’un point de vue méthodologique, il y a une vaste littérature en recherche opérationnelle qui traite notamment de la question du transport d’urgence. En logistique et en économie des transports, cette question émerge depuis peu. Elle a d’abord été étudiée dans F. COMBES (2011) sans référence explicite à la notion de synchronodalité.

Plus récemment, DONG, BOUTE, MCKINNON et VERELST (2017) ont proposé la définition suivante de la synchronodalité dite SSCP (*Synchronodality from a Supply Chain Perspective*) : *une stratégie multimodale qui intègre le choix flexible du mode de transport dans la gestion de la chaîne logistique par les chargeurs*. Cette définition remonte la question de la combinaison des modes au niveau du chargeur, à la distinction des définitions précédentes qui relèvent uniquement de l’organisation du transport. Il s’agit ici pour le chargeur de repenser la gestion de sa chaîne logistique afin de combiner deux modes de transport. Les implications de cette définition du point de vue de la façon dont on pourrait mieux combiner des modes de transport différents afin d’augmenter la part modale des modes non routiers est étudiée en détail dans la Section 4.3.2, dans le Chapitre 4.

La Figure 1.1 ci-dessous présente ces différentes définitions sur un schéma unique. On distingue sur les différentes chaînes de transport illustrées les modes de transport, les contenants s’il y a lieu, et les envois. Dans le cas monomodal (a), plusieurs configurations sont possibles, qui ne sont pas explicitées : il peut y avoir changement des contenants (par exemple déchargement d’une palette d’une remorque puis chargement dans autre remorque, ou bien transfert de la remorque d’un véhicule à un autre, etc.) Les contenants ne sont explicitement affichés que pour distinguer le cas multimodal (b) du cas intermodal (c). L’exemple synchronodal (d) montre l’utilisation simultanée, pilotée par le chargeur, de plusieurs modes pour une même chaîne d’approvisionnement. La

16. Alliance for Logistics Innovation through Collaboration in Europe.

différence principale, illustrée par le schéma, est qu'on ne raisonne plus pour un unique envoi, mais pour une relation chargeur-destinataire, donc plusieurs envois.

Les cas plus complexes comme les navires Ro-Ro ou les autoroutes ferroviaires où un véhicule transporte un autre véhicule qui transporte lui-même de la marchandise ne sont pas représentés ici, leur importance dans la globalité des systèmes de transport de marchandises étant très limitée, même s'ils peuvent avoir une pertinence locale, pour des franchissements d'obstacle naturel par exemple.

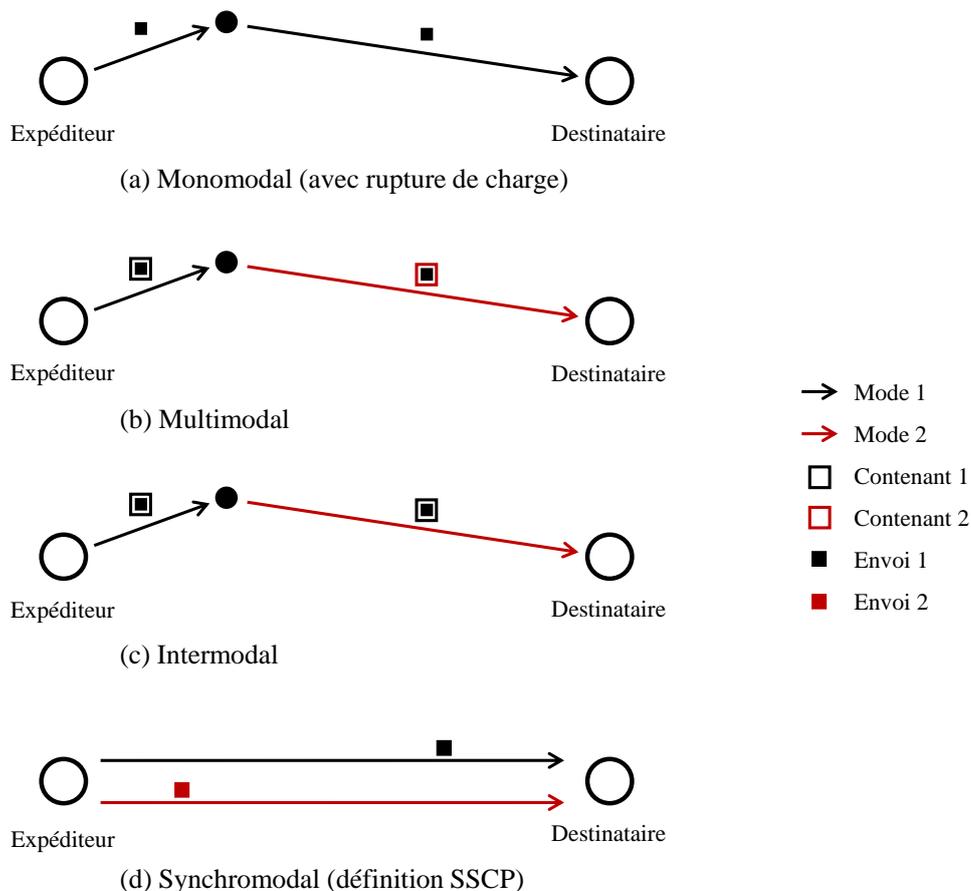


FIGURE 1.1 – Illustration de différents types de chaînes de transport

1.1.5 Les agents et leurs relations dans le transport de marchandises

L'opération de transport a lieu entre un *expéditeur* et un *destinataire*, qui peuvent être des particuliers, des entreprises ou des administrations, et l'opération elle-même est commanditée par un *chargeur* qui peut être l'expéditeur ou le destinataire. Le transporteur et le chargeur peuvent se confondre, auquel

cas l'opération est réalisée *pour compte propre*¹⁷. Quand l'opération est réalisée par une autre entreprise (généralement un transporteur) alors elle l'est *pour compte d'autrui*.

En réalité, les relations peuvent être bien plus complexes. D'une part, les contrats entre chargeurs et transporteurs peuvent être de nature diverse, allant de la prestation ponctuelle ("spot") au contrat pluriannuel avec engagements de quantité et de prix. D'autre part les transporteurs font souvent appel à la sous-traitance, soit parce qu'ils ne sont pas capables eux-mêmes d'assurer une certaine prestation (véhicules tous mobilisés au moment de la demande¹⁸, zone géographique non desservie, matériel spécifique ou compétence non disponible, etc.) soit parce qu'ils trouvent économiquement plus compétitif de faire appel à la sous-traitance. Cette seconde raison, très importante dans le transport routier, tient notamment aux différentiels internationaux du coût du travail, en particulier en Europe. Elle repose également sur le fait que les artisans chauffeurs routiers, étant patrons de leurs sociétés, ne sont ni limités en termes de salaire minimum ni limités en termes de temps de travail maximum¹⁹. Enfin elle repose sur le fait que des petites entreprises ne vont pas respecter les règles aussi bien que des grandes. Cette question du faire ou faire-faire est d'ailleurs complexe en soit : on constate une grande variété d'organisations et de modes de coopération entre entreprises dans le transport routier de marchandises, avec des grands groupes, des petites entreprises, mais aussi des grandes alliances de petites entreprises.

Par ailleurs, il faut noter le rôle primordial que jouent les intermédiaires dans le fonctionnement du transport de marchandises. Un de leur rôles consiste à faciliter le rapprochement entre chargeurs et transporteurs. En effet, comme indiqué ci-dessus, d'une part le marché du transport de marchandises est extrêmement différencié, d'autre part il y a des économies d'échelle et d'envergure, et donc un intérêt pour les transporteurs (et donc par répercussion pour les chargeurs) à ce que les besoins de différents chargeurs soient satisfaits simultanément : en d'autres termes il y a un intérêt à *mutualiser* les ressources.

17. Un des cas les plus importants de transport de marchandises pour compte propre est celui des particuliers qui se rendent en magasin pour faire leurs courses. En ramenant leurs achats chez eux, ils réalisent en fait eux-même la dernière étape de la chaîne logistique, qui est effectivement achevée lorsque les marchandises sont à leur disposition, chez eux. Classiquement, on considère les déplacements d'achat comme de la mobilité de personne. Mais fondamentalement il s'agit de transport de marchandises pour compte propre.

18. La question du dimensionnement de la flotte, et la part des ressources qu'un transporteur souhaite avoir en propre pour répondre aux attentes de ses clients, est complexe. Elle est étudiée un peu plus en détail dans le Chapitre 3, Section 3.4.

19. Plus précisément : en France, le temps de travail d'un salarié est limité (de l'ordre de 40h par semaine) ; un non salarié n'est pas concerné par cette contrainte. Par contre, le chauffeur routier doit respecter les limites de temps de travail hebdomadaire (de l'ordre de 50h par semaine) qui ont été établies pour répondre à des enjeux de sécurité routière et qui concernent l'ensemble des travailleurs du secteur. Cette limite ne concerne pas les chauffeurs de véhicules de moins de 3,5 tonnes ; et on constate en effet que dans la messagerie urbaine les conditions de travail sont très défavorables, en particulier pour les sous-traitants (RÈME HARNAY, CRUZ & DABLANC, 2014).

La mise en relation entre chargeur et transporteur est donc une tâche difficile, avec une valeur ajoutée substantielle, depuis longtemps réalisée par des agents dédiés à ce travail, mais sur lequel des plateformes d'intermédiation se positionnent aujourd'hui, au moins pour une partie du monde du transport de marchandises.

Du point de vue de l'analyse économique et de la régulation, cette réalité est une complexité technique majeure. Il faut noter que tous les exemples très schématiques présentés ci-dessus concernent principalement le transport routier : les choses sont au moins aussi compliquées pour les autres modes de transport, et encore plus si on prend en compte les interfaces entre ces modes. Dans tous les cas, les approches économiques et économétriques globales sont, par nature, limitées par les données et par le niveau de détail avec lequel les prestations de transport de marchandises peuvent être décrites. Ces approches macroscopiques ont leurs utilités, mais des approches microscopiques qualitatives sont nécessaires pour fournir les informations complémentaires que les bases de données nationales et internationales permettent pas d'observer.

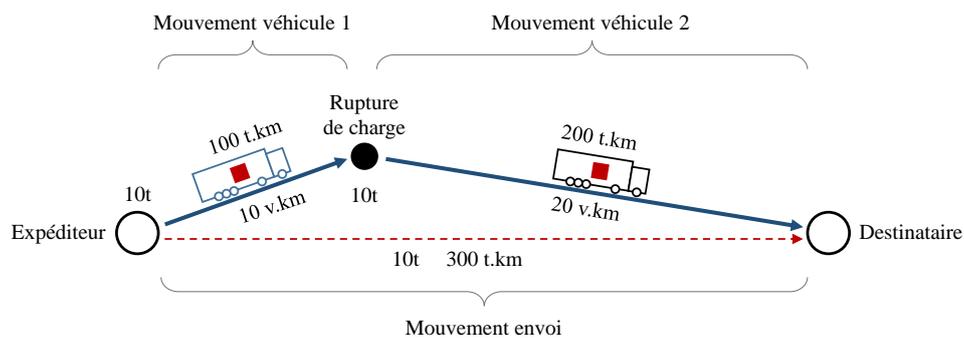
Unités d'observation

L'observation quantitative et les statistiques sont des outils essentiels pour la connaissance et le pilotage des systèmes de transport. La construction d'une statistique passe par le choix d'une unité d'observation, qui définit une population, à partir de laquelle un échantillon est rassemblé. Selon les variables et phénomènes que l'on souhaite observer, l'unité d'observation pertinente sera très différent. On présente dans cet encadré quelques unes des unités d'observation qui peuvent être pertinentes pour l'analyse géographique et économique du transport de marchandises.

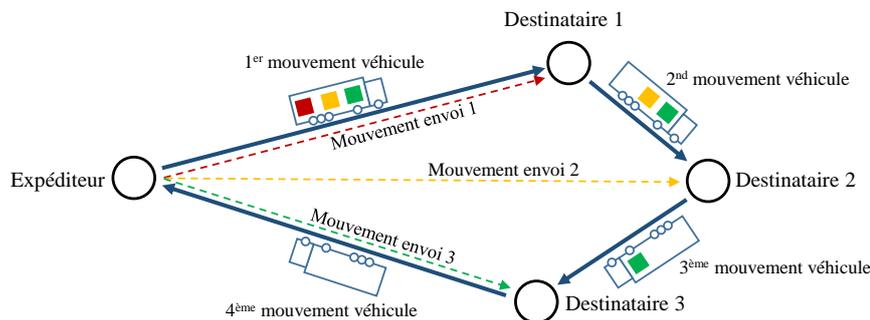
- *Le trafic* : pour la mesure des flux, l'unité d'observation sera classiquement soit un débit en nombre de véhicules par période, soit un trafic qu'on mesurera en véhicule-kilomètre, c'est-à-dire la somme des distances parcourues pas les véhicules (COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE [CGDD], 2012).
- *Les flux de marchandises* : les unités principales sont les tonnes (lorsqu'un camion déplace des marchandises d'un point A à un point B on compte, à chaque chargement, la masse de marchandises déplacées) et les tonnes-kilomètres, qui sont le produit des masses déplacées et des distances qu'elles ont parcourues (CGDD, 2012).
- *Les envois* : lorsqu'on s'intéresse plus précisément au lien entre logistique et transport de marchandises, il est pertinent de choisir comme unité d'observation l'envoi, sur lequel à la fois le chargeur et le transporteur prennent leurs décisions (GUILBAULT et al., 2006).
- *Les mouvements* : pour le transport en ville de marchandise, le mouvement est une unité d'observation très pertinente. On compte un mouvement quand un véhicule s'arrête pour charger ou décharger de la marchandise, ou les deux (ROUTHIER, SEGALOU & DURAND, 2002).

Il s'agit d'un échantillon très orienté "transport" : les données relatives aux entreprises, aux emplois, aux salaires ne sont pas citées ici, mais elles sont également très importantes. Dans tous les cas, à chacune de ces unités d'observation correspondent des protocoles de mesure et des bases de données différentes ; de façon générale les bases de données relatives au transport de fret et à la logistique sont de natures très diverses. Elles sont aussi, souvent, assez coûteuses à renseigner.

La Figure 1.2 illustre les différentes unités d'observation. La première partie de la figure représente le transport d'un envoi de 10t d'un expéditeur vers un destinataire. Deux véhicules sont utilisés, le premier parcourt 10 km, puis l'envoi est transféré dans un second véhicule qui parcourt 20 km. Si l'on mesure les tonnes par la méthode classique utilisée notamment par EUROSTAT pour établir les statistiques européennes, on observe que 20 tonnes ont été transportées : deux camions ont chargés 10 tonnes chacun. Si l'on mesure les tonnes-kilomètre, on comptabilise d'abord 100 tkm puis 200 tkm, ce qui correspond à un total de 300 tkm.



(a) Transport interurbain avec rupture de charge



(b) Transport urbain avec tournées

FIGURE 1.2 – Les différentes unités d'observation et ce qu'elles représentent

Si l'on fait les mêmes mesures au niveau de l'envoi, dont l'opération de transport est représentée par la flèche pointillée rouge, on mesure que 10 tonnes ont été transportées sur 300 km. Les flux mesurés en tonnes-kilomètres sont bien les mêmes, mais les tonnages mesurés sont différents. Ce type d'approche correspond aux enquêtes chargeurs, qui sont réalisées dans quelques pays dont les États-Unis d'Amérique, la France, la Suède et le Japon (COMES & COMBES, 2017).

La seconde partie de la figure illustre un cas que l'on retrouve en urbain : un véhicule livre, au cours d'une même tournée, différents envois à des destinataires distincts. Dans un tel cas, le mouvement de chaque envoi peut différer fortement des mouvements du véhicule, comme la figure le montre avec les flèches pleines et pointillées respectivement.

1.2 Logistique : définition, cadrage

Dans les littératures académique et professionnelles, la logistique est définie de bien des façons différentes. On présente ci-dessous celle qui est retenue dans cet ouvrage (section 1.2.1), avant de présenter de façon générique les différentes dimensions du niveau de service logistique du point de vue d'un consommateur (section 1.2.2).

1.2.1 Définition de la logistique

De nombreuses définitions de la logistique ont été proposées²⁰. Celle que nous retenons ici est la norme EN 14943 (ou en français NF X50-601).

Planification, exécution et maîtrise des mouvements et des mises en place de personnes ou des biens et des activités de soutien liées à ces mouvements et à ces mises en place, au sein d'un système organisé pour atteindre des objectifs spécifiques.

Cette définition fait ressortir l'ensemble des éléments les plus importants dans la notion de logistique. Ils sont commentés ci-dessous, en commençant par la fin, c'est-à-dire par l'objectif :

Les objectifs spécifiques : comme indiqué dans la section 1.1.1, les biens sont datés et localisés. La valeur associée à un bien ou service ne se réalise que si ledit bien ou service est effectivement, physiquement à disposition de celui qui va l'utiliser ou en bénéficier. En d'autres termes, il faut fournir le bien ou service *au bon moment, au bon endroit*²¹.

20. Voir par exemple SAVY (2015) qui présente plusieurs d'entre elles.

21. À ce propos, Jeff Bezos, le patron d'Amazon, a dit : *"I very frequently get the question : 'What's going to change in the next 10 years ?' And that is a very interesting question ; it's a very common one. I almost never get the question : 'What's not going to change in the next 10 years ?' And I submit to you that that second question is actually the more important*

Lorsque le bien ou service est produit par une entreprise, ou une institution, cette entreprise ou institution doit définir avec quel *niveau de disponibilité* elle va mettre ses biens à disposition de ses clients ou usagers. Cette notion de disponibilité est en quelque sorte l'équivalent pour la logistique de la notion d'accessibilité que l'on rencontre souvent en géographie.

Dans le langage de la logistique, on fait souvent référence à cette notion en parlant de *niveau de service*, ou de *qualité de service*. Le niveau de service ne se réduit pas à une variable mais, au contraire, comprend de nombreuses dimensions, que l'on détaillera dans la section suivante. On peut cependant faire immédiatement deux remarques essentielles :

- *Le compromis coût-niveau de service* : le spectre des solutions est très large en termes de niveau de service : on peut aller du niveau le plus faible, comme de ne vendre le produit que dans une unique usine au monde²², au niveau le plus élevé, comme de construire un réseau dédié de transport²³.
- *la stratégie de positionnement de l'entreprise en termes de niveau de service* : il faut considérer que la qualité de service logistique associée à un bien fait partie des caractéristiques de ce bien lorsqu'un consommateur décide, ou non, de se le procurer²⁴. Différentes entreprises peuvent se positionner différemment : une entreprise peut offrir un bien de qualité médiocre mais avec une grande disponibilité, tandis qu'une entreprise concurrente peut offrir un bien de qualité bien supérieure mais avec une

of the two – because you can build a business strategy around the things that are stable in time. ... [I]n our retail business, we know that customers want low prices, and I know that's going to be true 10 years from now. They want fast delivery; they want vast selection. It's impossible to imagine a future 10 years from now where a customer comes up and says, 'Jeff I love Amazon; I just wish the prices were a little higher,' [or] 'I love Amazon; I just wish you'd deliver a little more slowly.' (<https://techcrunch.com/2017/05/14/why-amazon-is-eating-the-world/>, consulté le 30 mai 2017.) **Cette citation met le service rendu au client au centre de la fonction logistique**, et d'une part considère comme fondamentales les attentes du client, d'autre part considère que ces attentes, si elles peuvent changer de forme, d'expression, d'intensité, ne changent pas sur le fond.

22. Par exemple, la bière de Westvleteren n'est produite et vendue qu'à l'abbaye de Saint-Sixte, à Westvleteren, en Belgique, et seulement 4800 hectolitres sont produits par an. Pour s'en procurer, il faut prendre rendez-vous en avance et indiquer le numéro de plaque d'immatriculation de la voiture avec laquelle on viendra faire l'achat. Les quantités vendues à chaque client sont limitées.

23. C'est le cas de l'eau courante dans les pays et territoires équipés. Le niveau de service est quasiment maximal pour un bien commercial : chacun en a à disposition, chez lui, en quantité souhaitée, à la température souhaitée. On constate d'ailleurs, avec cet exemple, que le niveau de service n'est pas nécessairement corrélé à la valeur de la marchandise elle-même : l'eau ne coûte que quelques euros par tonne.

24. En économie, la théorie du consommateur de LANCASTER (1966) propose un cadre dans lequel les biens n'interviennent pas dans les fonctions d'utilité des consommateurs tels quels mais au travers de leurs caractéristiques, décrites par un certain nombre de variables. La qualité de service logistique fait partie des caractéristiques des biens. Il est intéressant de noter qu'on trouve une présentation similaire en marketing, avec un vocabulaire différent. Ainsi, selon DEIGHTON (1992), les consommateurs n'achètent pas des biens, mais des performances.

disponibilité moindre. De ce point de vue, le marché du bien en question est un marché différencié, avec toutes les conséquences très complexes en termes de positionnement stratégique des entreprises concurrentes (ANDERSON et al., 1992).

De façon générale, il faut retenir que plus le niveau de service offert au consommateur est élevé, plus celui-ci est prêt à payer pour obtenir le produit concerné. Par contre, offrir un bon niveau de service au consommateur est coûteux pour l'entreprise, et il faut donc trouver un compromis entre niveau de service et coût²⁵. Enfin il faut retenir que le niveau de service résume un grand nombre de variables, auquel on peut en quelque sorte associer un coût : comme pour le transport de marchandises – et d'ailleurs comme pour le transport de voyageurs – en logistique, le client ou consommateur ne fait pas que payer pour se procurer un bien ou service, il supporte également des coûts qui lui sont propres²⁶ (attente, nécessité d'anticipation, coût des dysfonctionnements, etc.)

En supposant que l'on puisse résumer la disponibilité à une variable continue placée sur un axe²⁷, et que l'on peut raisonner à niveau de demande fixé, alors on se retrouve face à un compromis tel que celui représenté par la Figure 1.3. Il s'agit alors pour l'entreprise de minimiser la somme de ses propres coûts logistiques et du coût associé à l'insatisfaction de ses clients²⁸. On peut dès maintenant définir cette fonction : il s'agit du *coût total logistique*. On constatera dans la suite de cet ouvrage que de façon générale, les choix logistiques s'inscrivent dans un cadre similaire, et que le même type de courbe en ressort souvent.

Les ressources et leur mise en oeuvre : la définition de la logistique présentée ci-dessus aborde aussi la question des ressources nécessaires au fonctionnement de la logistique. On peut faire différentes distinctions concernant ces ressources : d'une part entre les personnes et les matériels, d'autre part

25. Ce constat général n'est pas très pertinent pour ce qui concerne l'information, notamment de traçabilité ; on y revient dans la section suivante.

26. Cette notion, selon laquelle le consommateur participe à la chaîne logistique et donc supporte une partie des coûts, est exprimée de façon apparemment opposée, mais en réalité fondamentalement similaire en marketing, où l'on dit que *le consommateur est co-créateur de valeur* (VARGO & LUSCH, 2008.)

27. Pourvu que l'on puisse représenter les préférences des consommateurs par des fonctions d'utilité, c'est effectivement le cas : on peut associer à un niveau de service toutes les combinaisons de paramètres parmi lesquelles le consommateur est indifférent.

28. Supposons un bien offert à un consommateur avec un niveau de service parfait (le bien est livré instantanément, précisément là où le consommateur le souhaite, au moment où celui en ressent le besoin). Considérons que le consommateur est prêt à payer une somme p_0 pour ce bien, dans ces conditions. Considérons le même bien, cette fois-ci avec un niveau de service moindre (le bien sera livré deux semaines après la commande, entre 8h et 18h sans plus de précision, etc.) Le consommateur est prêt à payer p_1 dans cette seconde situation. En principe $p_1 < p_0$, et la différence $p_0 - p_1$ peut-être considérée comme l'insatisfaction du client lié à la mauvaise disponibilité du produit. D'ailleurs, si l'entreprise peut passer de la situation 0 à la situation 1 pour un coût unitaire inférieur à $p_0 - p_1$ elle a tout intérêt à le faire et à augmenter le prix des produits qu'elle vend, par exemple de $p_0 - p_1$.

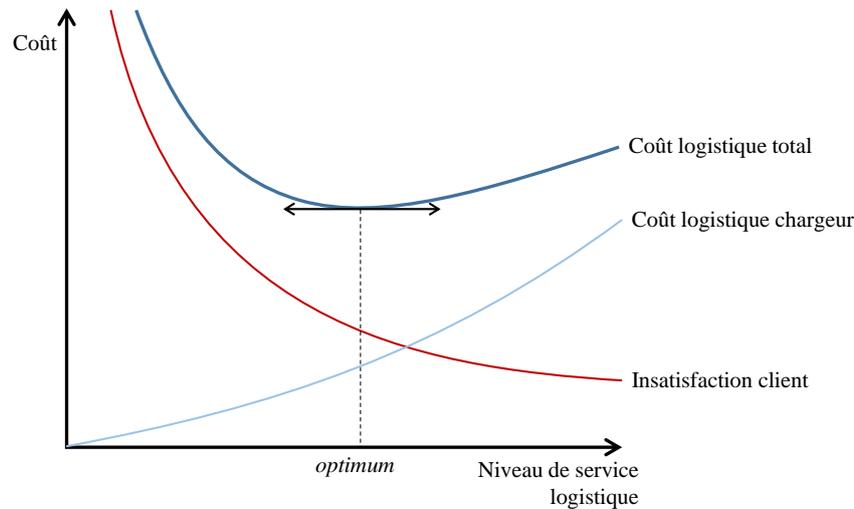


FIGURE 1.3 – Compromis coût niveau de service : coût logistique total

entre les ressources fixes et mobiles. Les personnes et ressources mobiles sont plutôt dédiées au transport de marchandises (véhicules, conducteurs, conteneurs, etc.) tandis que les personnes et ressources fixes sont mobilisées pour des activités de transbordement, de conditionnement, et d'entreposage, entre autres. Par ailleurs, un ensemble de ressources immatérielles sont mobilisées, parmi lesquelles les informations, les processus, etc. Il est d'ailleurs très important de ne pas réduire la logistique au transport ! Le transport n'est qu'une brique dans un système bien plus vaste.

On voit par ailleurs ici apparaître une *logistique de la logistique* : afin de fournir les biens et services au bon moment et au bon endroit, il est nécessaire de placer les ressources fixes et mobiles au bon moment, au bon endroit, en respectant les contraintes liées à l'utilisation de ces ressources (vitesse et autonomie des véhicules, horaires de travail des conducteurs, etc.) C'est là la source de la grande complexité de la logistique du point de vue de l'analyse économique : beaucoup de processus d'optimisation s'y croisent, avec l'objectif, pour atteindre un niveau de service donné, de minimiser les coûts.

Les processus : on voit enfin apparaître dans la définition des processus, à travers les notions de planification, de maîtrise, d'exécution, et de système organisé. On les explique ici très simplement, et très rapidement.

- *Planification* : il s'agit des décisions structurantes, qui portent à la fois sur les investissements et décisions difficilement réversibles d'un point de vue matériel (localisation d'installations, locations de long terme, achat de flotte, choix de conditionnement etc.) et immatériel, ou en tout cas moins matériel (définition des processus et stratégies de gestion, traduction opérationnelle des objectifs stratégiques cités plus haut, déploiement des capteurs et systèmes d'information associés, etc.)
- *Exécution* : il s'agit d'assurer le fonctionnement au quotidien des chaînes

logistiques, avec les prises de décision associées et l'exécution de ces décisions, avec l'objectif d'atteindre les objectifs fixés.

- *Maîtrise* : il s'agit, en lien avec les phases de planification et d'exécution, à la fois d'être informé sur l'état des systèmes concernés afin de pouvoir prendre les décisions nécessaires (notamment pour la gestion des aléas) et d'améliorer en continu les systèmes et processus, afin d'atteindre les objectifs visés à un coût maîtrisé.
- *Systèmes organisés* : on constate que la définition ne s'arrête pas aux frontières de l'entreprise ou de l'institution concernée : la logistique est une problématique *systémique* à la fois au sein de l'entreprise puisqu'elle est transversale aux subdivisions traditionnelles, et inter-entreprises puisqu'il s'agit typiquement d'un domaine où la coordination est nécessaire afin d'obtenir une efficacité d'ensemble.

Les questions que soulève cette présentation très rapide et un peu naïve sont immenses, et des domaines entiers des sciences de gestion, de la recherche opérationnelle, et des sciences économiques visent à y répondre. On ne les abordera pas beaucoup plus en détail ici, mais il faut en retenir au moins deux choses : premièrement, la logistique est une fonction complexe, et la façon dont s'inscrit le transport de marchandises dans la logistique reflète cette complexité.

Deuxièmement, elle est au coeur d'une contradiction assez forte pour les entreprises : par essence systémique et transversale, la logistique a toutes les chances de fonctionner mieux si les différents acteurs d'une chaîne d'approvisionnement partagent les informations et les responsabilités de façon intelligente. Mais ce partage est tout sauf évident : en effet, chaque acteur poursuit un objectif (souvent de maximisation de profit) qui lui est propre, et il peut avoir intérêt à retenir de l'information et/ou à prendre des décisions contre-productives d'un point de vue global s'il y trouve localement avantage.

Sur ce dernier point, il n'est pas impossible qu'un ensemble d'entreprises et d'institutions se retrouve dans une situation fortement sous-optimale ; si ce groupe d'acteurs est soumis à une concurrence internationale réelle, et que dans d'autres pays, les groupes concurrents ont réussi à mieux se coordonner, alors le groupe en question peut être substantiellement désavantagé. Par ailleurs, on s'en rend bien compte ici, les notions de mutualisation sont également au coeur de cette contradiction : la mutualisation est bénéfique à l'ensemble, mais souvent perçue comme un risque du point de vue des objectifs de chacun.

Remarque : logistique des services et des services publics : on associe traditionnellement la logistique aux biens, aux marchandises (ou à l'enlèvement de biens, comme les déchets) mais la définition ci-dessus s'applique très directement à la prestation de service, qui s'agisse de dépannage à domicile, de flexibilité sur les horaires de passage d'infirmières, de délais pour l'installation d'équipements de télécommunication, ou encore le délai pour avoir un rendez-vous chez le médecin, le temps d'attente dans les différents services publics, la réactivité des services médicaux d'urgence, voire de police, tous ces sujets

sont essentiellement logistiques dans leur nature et la définition de la norme EN 14943 s’y applique sans qu’il soit nécessaire de la modifier aucunement.

Cela soulève une question très importante, en particulier dans l’optimisation des services publics : comment prendre en compte les coûts des usagers dans l’optimisation de ces services ? Sont-ils pris en compte lorsqu’on parle de réduire les coûts des services publics ? Et si ce n’est pas le cas, n’est-on pas simplement en train de remplacer des coûts mesurables par des coûts bien plus difficilement mesurables ?

1.2.2 Le niveau de service logistique

L’objectif de cette section est d’identifier à grands traits les dimensions importantes du niveau de service logistique. Elles sont assez génériques, et on peut facilement constater que si les grandes mutations logistiques des dernières décennies (y compris le e-commerce) ont révolutionné les niveaux de performance obtenus, elles n’ont pas fondamentalement modifié le cadre d’analyse. On observe que certains sont plutôt applicables à la livraison aux particuliers, d’autre à la livraison aux entreprises. Un certain nombre de ces critères concerne également les aléas et risques.

En voici la liste :

- *Quantités commandées* : la première variable du niveau de service logistique est la liberté qui est laissée au client sur le choix des quantités commandées : les petites quantités permettent de limiter le risque d’immobilisation du capital et de surdimensionnement de commande, les grandes quantités à l’inverse peuvent permettre de se prémunir de risques de pénurie, d’attente ou de variation de prix, et de profiter d’économies d’échelle de production.
- *Conditionnement* : la façon dont les marchandises sont livrées peut correspondre plus ou moins bien aux souhaits des clients, entreprises ou particuliers. L’entreprise de bâtiment pourra se faire livrer le sable en camion complet, l’enseigne de bricolage des palettes de sacs de sable, et le particulier quelques sacs.
- *Délai de livraison* : il a une triple dimension. Premièrement, la rapidité à laquelle intervient la livraison à partir du moment où intervient la commande. Plus cet instant est réduit, moins le client a besoin d’attendre, voire d’anticiper, ce qui réduit ses propres coûts²⁹. Deuxièmement, la précision du moment de la livraison : elle peut être précise à l’heure près, ou bien à la semaine. Certains clients ont besoin d’un contrôle précis des dates et heures de livraison³⁰, d’autres peuvent s’accommo-

29. Les effets de la durée de livraison sur les coûts d’un client confronté à des problématiques de gestion de stock sont complexes, mais potentiellement très importants. Ils sont analysés dans le Chapitre 4.

30. Prenons l’exemple extrême d’une usine utilisant plusieurs centaines de références pour fabriquer quelque chose, par exemple des voitures, en flux tendus. Ces pièces sont achevinées par camions. Ces camions se partagent un nombre restreint de quais de livraisons. La faiblesse des stocks dans la chaîne de production et le fait que de nombreux camions

der d'une moins grande prévisibilité. Troisièmement le risque sur la date de livraison (risque de retard en particulier) : dans de nombreuses situations, pour des entreprises comme pour des particuliers, un retard de livraison peut avoir un ensemble de conséquences néfastes, à tel point que ces clients sont prêts à payer cher pour être certains que la livraison soit effectuée à l'heure dite.

- *Lieu de livraison* : l'idéal est que la livraison ait lieu là où le client est localisé. Mais ce n'est pas nécessairement le cas, et il peut être nécessaire pour le client de se déplacer pour aller chercher la marchandise, sur un point relai pour un particulier, voire à l'usine pour une entreprise.
- *Qualité de la marchandise* : l'état dans laquelle la marchandise est livrée (et l'écart par rapport à ce que le client s'attend à recevoir) est un paramètre très important : une marchandise non conforme est un risque contre lequel le client doit se protéger. Dans une certaine mesure, cet enjeu est lié à celui de la traçabilité.
- *Accessibilité des magasins (spatiale et temporelle) et qualité de service* : Lorsque ce sont les clients qui se déplacent pour acquérir les marchandises (clients dans les magasins, commerçants dans le commerce de gros, etc.) la question n'est pas celle du délai de livraison (sauf pour les commandes à récupérer en magasin) mais plutôt de l'accessibilité de ces magasins. Plus ils maillent le territoire, plus le coût pour le client de se rendre au magasin est réduit. Par ailleurs, il faut noter à ce niveau les économies d'échelle liées au fait de trouver dans un lieu restreint un large ensemble de magasins et de références, et le sujet de la façon dont le client va transporter l'ensemble des marchandises qu'il aura acquises (ce qui explique en bonne partie le succès des supermarchés et centres commerciaux.) Enfin la localisation des magasins ne fait pas tout : la plus ou moins grande facilité d'y faire ses courses, les temps d'attente, etc. sont des paramètres également importants.
- *Risque de rupture de stock* : paramètre critique dans les situations où ce sont les clients qui se déplacent pour effectuer les achats (car il y a alors le risque que le client se soit déplacé pour rien), c'est également un paramètre important lorsque le client effectue sa commande à distance, ou pour une chaîne de production qui se fait livrer. Plus le risque de rupture de stock est élevé, plus les conséquences pour les clients sont grandes, plus ils doivent se prémunir contre ce risque.
- *Traçabilité* : information fournie au client à partir du moment où une commande a été réalisée, elle est utile au client si elle permet de repérer la survenue d'un aléa et ses conséquences au plus tôt, et donc de déterminer en connaissance de cause quelles mesures mettre en oeuvre pour en limiter les impacts.
- *Mode de commande, mode de paiement* : la façon dont le client peut passer commande est un paramètre absolument capital. On peut dire

doivent se succéder sur le nombre limité de quais implique une grande exigence en termes de synchronisation.

que pour beaucoup, les mutations de la logistique de ces dernières années reposent sur cette dimension. Pour faire simple, avant Internet, pour acquérir de l'information sur les différentes références disponibles, il fallait se rendre sur place. Aujourd'hui, il est possible d'acquérir cette information à domicile. De façon plus générale, beaucoup des évolutions du commerce sur le long terme sont liées à des évolutions de la gestion des transactions, et au développement de système permettant de construire de la confiance entre les acteurs.

- *Possibilités d'échange* : une entreprise ou un particulier court toujours le risque que la marchandise acquise ne corresponde en réalité pas à ses besoins. Les possibilités d'échange et de reprise permettent de diminuer la conséquence de la réalisation de ce risque.

La mesure de la sensibilité des clients aux paramètres de niveau de service est complexe. Elle est très dépendante des contextes et des clients. Cela dit, à titre d'illustration, nous pouvons citer ZETES (2017), qui a réalisé une étude auprès de 2200 consommateurs (la population et l'échantillonnage ne sont pas détaillés), et en tire les enseignements suivants vis-à-vis du niveau de service logistique dans les magasins ou sur les sites internet : 78% des clients envisagent de ne plus s'adresser à un détaillant au bout de trois livraisons retardées ou incomplètes ; 30% des clients se reportent vers un autre site ou interrompent leurs achats si un article n'est pas en stock ; en magasin, 70% des consommateurs n'acceptent pas d'attendre cinq minutes pour savoir si un article est en stock. Cette étude montre que les particuliers ont une exigence de qualité très élevée. On peut se poser la question du caractère absolu de cette exigence : les clients attendent probablement ce que les entreprises sont capables de fournir, et dans un monde où les technologies et organisations seraient très différentes les attentes des clients seraient probablement aussi bien différentes. En attendant, l'état des marchés est tel que les entreprises font aujourd'hui face à des exigences de niveau de service que l'on peut qualifier de très élevées, qui vont façonner en amont les chaînes logistiques.

Par ailleurs, comme cela a déjà été indiqué dans la section précédente, il est clair que pour les variables d'accessibilité spatiale et temporelle, comme pour les variables relatives aux risques ou celles relatives aux quantités commandées, toute amélioration de niveau de service sera source d'une contrainte supplémentaire pour le fournisseur, ou bien l'obligera à se prémunir plus fortement contre des risques : en d'autres termes, elle sera source de coûts supplémentaires. On en donne quelques exemples ci-dessous, qui illustreront les mécanismes en oeuvre :

Exemple 1 : fréquence d'envoi. Lorsqu'une entreprise envoie un flux régulier de marchandises à une autre entreprise, ce flux régulier peut être transporté sous la forme de petits envois très fréquents, ou bien de quelques gros envois plus espacés. La première solution est avantageuse pour le destinataire : elle permet de limiter les quantités stockées, évite l'immobilisation du capital associée aux marchandises, etc. Elle est par contre plus coûteuse pour l'expé-

diteur, puisqu'elle ne permet ni de maximiser le remplissage des véhicules, ni de produire en plus grandes séries, ce qui dégage des économies d'échelle. Il y a donc un compromis entre les coûts logistiques du destinataire d'une part, et les coûts de production de l'expéditeur et les coûts de transport d'autre part. Ce compromis simple est la source du modèle Economic Order Quantity qui sera étudié plus en détail dans le Chapitre 4, Section 4.2.

Exemple 2 : probabilité de rupture de stock. Lorsqu'un client se présente en magasin, il sera insatisfait de constater que le produit qu'il souhaite acheter est absent, l'obligeant à se contenter d'un second choix moins satisfaisant ou à revenir plus tard. Une réduction de la probabilité de rupture de stock est donc de nature à mieux satisfaire les clients. Cette réduction de la probabilité est par contre plus coûteuse pour le vendeur : pour réduire les probabilités de rupture de stock il est en effet nécessaire d'augmenter les niveaux de stock moyens (et donc les différents coûts associés, dont les risques d'inventus) ou bien de réduire les temps de trajet depuis le lieu de production des marchandises concernées (ce qui est généralement source d'un coût de transport supplémentaire). On observe ici aussi un compromis entre la satisfaction du client et les coûts mis en oeuvre pour offrir un certain niveau de service. Ce sujet est exploré plus en détail dans le Chapitre 4, Section 4.3.

Exemple 3 : possibilité de reprise. Lorsqu'un client se fait livrer certains types de marchandise après avoir les avoir acheté à distance, il se peut qu'il n'en soit pas satisfait. Si les possibilités de reprise sont flexibles (possibilité de reprise après un long délai, passage du livreur pour récupérer la marchandise, remboursement, etc.) alors les conséquences pour le client de recevoir un produit inadéquat seront moindres, et le client sera de manière générale plus satisfait. Par contre offrir de bonnes possibilités de reprises est coûteux pour le fournisseur : il faut offrir les services de transport associés, il faut récupérer les marchandises, en espérant les revendre alors qu'elles peuvent être devenues obsolètes (exemple des articles de mode), etc. Il y a ici aussi un compromis entre la satisfaction du client et les coûts que le fournisseur doit engager afin d'offrir un niveau de service donné.

Exemple 4 : durée des créneaux de livraison. En ce qui concerne une livraison, à destination d'un particulier ou d'une entreprise, un créneau de livraison précis (par exemple "entre 9h et 10h") est toujours préférable à un créneau de livraison plus large (par exemple "dans la matinée") : les contraintes induites sur l'emploi du temps du particulier et l'enchaînement de ses activités, ou sur les ressources que l'entreprise doit mettre à disposition pour réceptionner la marchandise, sont plus fortes dans le second cas que dans le premier. A l'inverse, pour un transporteur, livrer les gens à un horaire précis est plus contraignant que de les livrer à un horaire moins précis : en effet, pour réaliser les prestations de transport le transporteur doit combiner ses différentes ressources (dont les véhicules et les personnels) de façon à produire les prestations

prévues en minimisant les coûts et, comme dans tout problème d'optimisation, des contraintes supplémentaires augmentent nécessairement les coûts.

On voit au travers de ces quatre exemples le compromis qui s'établit de façon générale entre une satisfaction liée à un niveau de service en face duquel vient un coût. En réalité, ces compromis doivent être réalisés simultanément, ce qui rend le problème bien plus complexe. On note également qu'apparaissent de façons assez variées les termes de clients, expéditeurs, destinataires, transporteurs etc. parce qu'en réalité, le portage de ces coûts est très variable et dépendant des situations. Lorsqu'on présentera plus loin des modèles qui optimisent les fonctions de coût total logistique combinant à la fois les coûts et la satisfaction des clients liée au niveau de service, ce sera en général sans détailler qui porte quel coût. Il s'agit d'ailleurs d'une limite importante de ce type d'approche : si plusieurs acteurs interagissent, chacun avec son propre objectif, alors il n'est pas automatique que le résultat de cette interaction soit un optimum collectif.

En ce qui concerne la disponibilité d'information, il n'est pas possible de faire émerger, comme pour les autres paramètres, de compromis coût-qualité. Les choses sont plus compliquées : les outils nécessaires pour fournir les informations aux clients (notamment sur les références disponibles, ou sur la traçabilité) sont utiles au fournisseur lui-même : les exigences de traçabilité et d'information des clients ne sont donc pas forcément systématiquement sources de coûts supplémentaires³¹. Plus probablement, il y a un compromis global entre coût du système d'information à déployer et de ses capacités et valeur de l'information pour la chaîne logistique, et ce compromis doit être variable en fonction des contextes : dans certains, des techniques rudimentaires avec peu de traçabilité, des supports papiers, etc. pourront être jugées suffisantes tandis que dans d'autres des systèmes et des capteurs très sophistiqués seront déployés.

Il est difficile de faire un tableau exhaustif de l'ensemble des dimensions auxquelles seront sensibles les clients, qu'ils soient particuliers ou entreprises. Par exemple, on n'a pas évoqué l'importance de l'ambiance esthétique et de la qualité du contact humain lorsqu'un particulier fait des achats ; il s'agit pourtant d'un paramètre de très grande importance, mais qui concerne plutôt des enjeux de communication et de marketing qu'on ne pourra pas évoquer plus

31. F. COMBES et DE PALMA (2016) analysent l'effet de l'information sur la décision de consommateurs choisissant un magasin, ou un restaurant, parmi plusieurs. Deux situations sont comparées : dans la première, l'information sur l'offre proposée par les différentes options n'est pas connue, les consommateurs doivent se rendre sur place pour observer leurs caractéristiques, avant de finalement faire leurs choix. Dans le seconde, l'information est disponible à domicile : les consommateurs comparent à domicile — par exemple sur Internet — les différentes options avant de se rendre physiquement à celle qu'ils ont retenu. On constate que fournir l'information à domicile améliore le bien-être des agents, mais aussi que les distances parcourues augmentent. La conséquence pour les vendeurs, par contre, n'est pas si claire : est-ce que fournir l'information va se traduire par une concurrence exacerbée et une perte de pouvoir de marché ?

en détail. On n'évoque pas non plus la préférence que certains consommateurs peuvent accorder à certains types d'organisation logistique pour des raisons éthiques par exemple (circuits courts, produits locaux, commerce équitable, etc.), qui dépasse les pures préférences personnelles et les dimensions de niveau de service à proprement parler.

1.2.3 Interactions des agents dans les chaînes logistiques

Dans la production d'un bien ou service interviennent bien souvent de très nombreuses entreprises, fournisseurs, fournisseurs des fournisseurs, clients, clients des clients, etc., qui doivent s'organiser collectivement pour aboutir à la production d'un produit final et pour mettre ce produit à disposition d'un client final. La complexité des interactions qui en résultent, et la nécessité pour les entreprises de se coordonner malgré des objectifs non convergents, font de la logistique un sujet de nature systémique.

Chaînes logistiques : collaboration, concurrence. Ces entreprises s'organisent au sein de chaînes logistiques, qu'on peut définir comme CHRISTOPHER (1992), cité par CARBONE (2004) :

La chaîne d'approvisionnement d'un ensemble de biens ou services est le réseau d'organisations qui sont impliquées, par des relations en amont ou en aval, dans les différents processus qui produisent de la valeur sous la forme d'un bien ou service remis entre les mains d'un consommateur final³².

Les interactions des entreprises dans ces systèmes que sont les chaînes logistiques sont très complexes, car des dynamiques contradictoires y opèrent. Comme dans F. COMBES (2009, p. 107), considérons de façon extrêmement simplifiée que les stratégies des entreprises dans ces chaînes d'approvisionnement sont guidées par des motifs d'ordre coopératif d'une part, et d'ordre concurrentiel (non-coopératif) d'autre part.

La Figure 1.4 montre, de façon très simplifiée, comment une chaîne d'approvisionnement se positionne, et comment une entreprise se positionne dans une chaîne d'approvisionnement. Comme dans CHRISTOPHER (1992), le schéma part du client final, de qui tout découle. Trois modes d'interaction entre les entreprises sont indiquées dans cette figure :

- *Concurrence entre chaînes logistiques* : les entreprises offrant des produits concurrents sur un marché donné sont en concurrence : elles doivent offrir les meilleurs produits au moindre prix ; elles doivent également offrir un bon niveau de service logistique à leurs clients (cf. section précédente). Une chaîne logistique performante du point de vue de la logistique a un avantage concurrentiel sur les chaînes concurrentes.

32. *The supply chain of (set of) good(s) or service(s) is the network of organisations that are involved, through upstream and downstream linkages, in the different processes and activities that produce value in the form of this product or service in the hand of the ultimate consumer.*, traduction par l'auteur.

- *Collaboration au sein de la chaîne logistique* : les entreprises d'une même chaîne logistique doivent se coordonner pour offrir le meilleur niveau de service logistique. Par sa nature, la logistique implique une collaboration étroite entre les entreprises impliquées, en termes de matériels, d'informations, de processus. Les méfaits d'une absence de coordination entre entreprises d'une même chaîne logistique sont bien connus³³.
- *Concurrence au sein de la chaîne logistique* : et pourtant, bien que les entreprises coopèrent pour maximiser la part de marché et la valeur générée par la chaîne logistique à laquelle elles appartiennent, elles ont des intérêts contradictoires quand il s'agit de partager cette valeur ajoutée. Ici, des logiques de rapport de force complexes sont à l'oeuvre, mais il s'agit fondamentalement d'une concurrence pour répartir les gains générés collectivement.

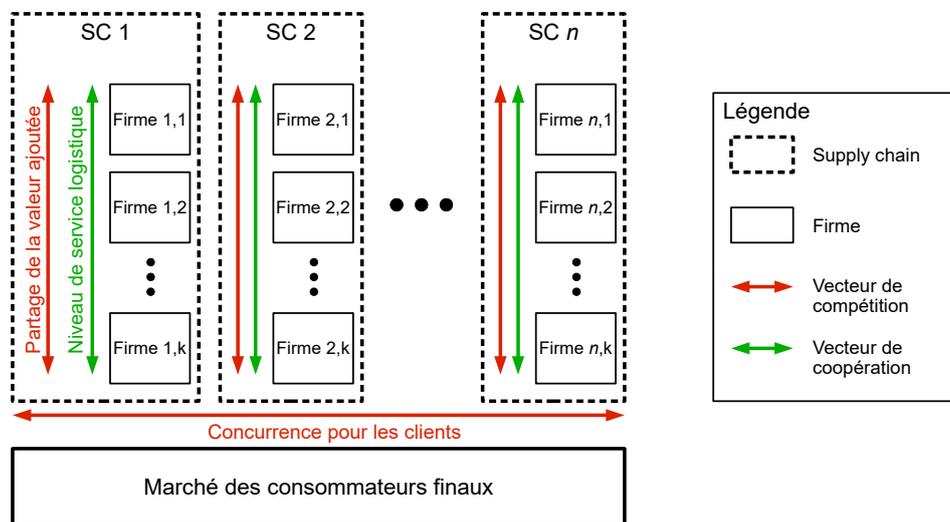


FIGURE 1.4 – Coopération et compétition dans et entre les chaînes d'approvisionnement.

Les interactions entre entreprises au sein et entre chaînes d'approvisionnement sont complexes, d'autant plus que la structure des chaînes logistiques est en réalité bien plus compliquée et hétérogène qu'illustré sur le schéma ci-dessus, au point qu'il peut être plus pertinent de parler de "réseaux" que de "chaînes".

Externalisation : les prestataires de service logistique. Pour la gestion des chaînes logistiques comme pour le transport de fret, la question du

33. Le phénomène célèbre du "coût de fouet" ("*bullwhip effect*") est modélisé et expliqué par FORRESTER (1961) : lorsque les entreprises d'une chaîne logistique donnée optimisent toutes localement leurs logistiques sans s'interfacier avec les autres, un aléa mineur sur la demande en fin de chaîne peut s'amplifier très fortement et créer des variations de stock énormes et très erratiques au fur et à mesure qu'on remonte la chaîne logistique de fournisseur en fournisseur, avec comme conséquences des coûts et une dégradation d'ensemble du niveau de service logistique qui peut causer la perte de l'ensemble des entreprises impliquées.

faire ou *faire faire* se pose. Les prestataires de service logistique (PSL) sont de nature variées, et offrent une large gamme de service. Les 3PL (*third party logistics providers*) offrent typiquement un ensemble de prestations de transport, entreposage, gestion d'inventaire etc. en vue d'acheminer des matières et composants depuis les fournisseurs vers l'entreprise, et les produits de l'entreprise vers les clients (COUNCIL OF SUPPLY CHAIN MANAGEMENT PROFESSIONALS [CSCMP], 2013). Les 4PL (*fourth party logistics providers*) se positionnent sur des fonctions plus stratégiques de la gestion logistique de leurs clients, peuvent eux-même traiter avec 3PL.

Passer un contrat avec un prestataire de service logistique présente différents avantages pour un chargeur, parmi lesquels la compétence du prestataire en gestion de chaîne logistique, la possibilité du prestataire de mutualiser ses actifs avec d'autres chargeurs et donc de mieux les utiliser. Cela dit, une entreprise peut préférer ne pas passer contrat avec un tel type de prestataire, pour plusieurs raisons. Par exemple, ses flux peuvent être trop faibles pour rentabiliser les coûts d'un 3PL. Ou bien l'entreprise peut considérer que la gestion de sa chaîne logistique fait partie de son cœur de métier et/ou de ses fonctions stratégiques et souhaite en conserver la maîtrise, ou encore l'entreprise est suffisamment grande pour posséder ses propres moyens de transport ou de stockage et pour les gérer efficacement, etc.

1.3 Représentation systémique du transport de fret et de la logistique

Les deux premières sections ont illustré, à la fois dans le transport de marchandises, et dans la logistique, la diversité des acteurs et la complexité de leurs interactions. L'objectif de cette section est de donner une représentation simple mais globale de ces systèmes, sous forme de couches superposées³⁴ Ces couches représentent la dimension spatiale de ces systèmes, et leur superposition fait référence à la fois à l'imbrication des différentes décisions concernées (par exemple les choix d'itinéraire des véhicules dépendent des choix d'implantation des infrastructures de transport) et à des horizons temporels distincts.

Dans la logique de cette ouvrage, l'opération de transport d'un envoi est placée au centre : le système de transport de fret a pour objectif de produire ces opérations, tandis que les échanges commerciaux et les chaînes logistiques forment la demande. Du côté de l'offre (Figure 1.5), on distingue les grandes catégories de ressource que sont les ressources fixes d'une part : infrastructures et installations fixes, et les ressources mobiles d'autre part que sont les véhicules, les contenants (qui peuvent être de conteneurs, des palettes, des semi-remorques, etc.), et les personnels. Ces ressources sont combinées par les

34. Ce type de représentation est notamment utile pour définir l'architecture de modèles spatialisés de prévision de la demande de transport, et on peut trouver de nombreux auteurs qui proposent de telles représentations dans la littérature académique. La représentation présentée dans ce chapitre est adaptée de F. COMBES et LEURENT (2009).

transporteurs via des processus complexes qu'on peut appeler la *logistique des transporteurs* afin de transporter des envois, dans les conditions qui correspondent à ce qu'ils ont défini avec les chargeurs.

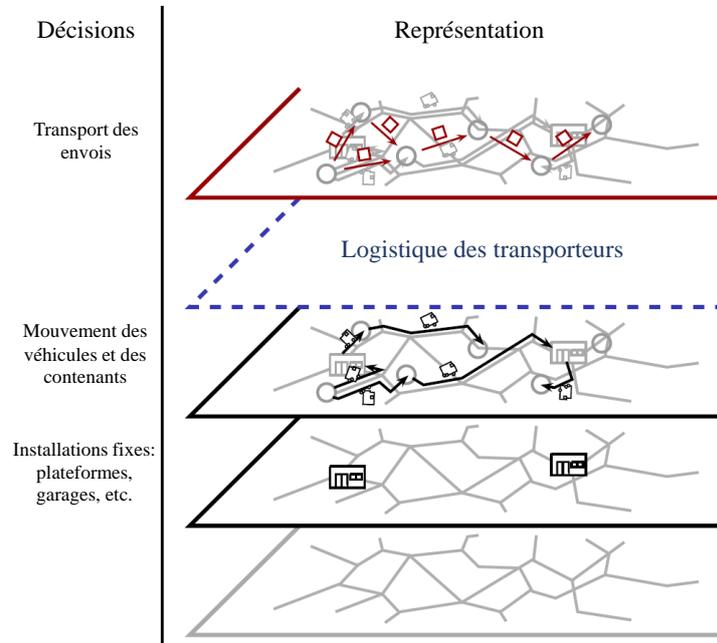


FIGURE 1.5 – Représentation systémique de l'offre de transport de fret.

Du côté de la demande, on représente de façon simplifiée les décisions logistiques en plaçant tout en haut les lieux de production, de transformation, et de consommation. En découlent les décisions d'approvisionnement et de ventes, puis la configuration de chaînes logistiques, et enfin le transport des envois (Figure 1.6).

On constate en particulier grâce à cette représentation que deux types de rupture de charge peuvent intervenir dans le parcours d'une marchandise entre le moment où elle est produite et le moment où elle est utilisée : les ruptures de charge relevant du transport proprement dit (transbordement d'un véhicule à un autre, report modal, etc.) et les passages en plateforme logistique et entrepôt qui obéissent aux logiques des chaînes logistiques.

Cette représentation a aussi pour objectif de montrer comment une modification à un des niveaux, qu'elle ait pour cause un changement technologique, fiscal, réglementaire, ou autre, pourra avoir des répercussions dans l'ensemble des systèmes concernés, avec des modifications couplées de l'offre et de la demande.

1.4 Conclusion

Ce premier chapitre avait pour objectif de poser les bases de l'analyse du transport de fret et de la logistique, en partant de la demande. En guise de

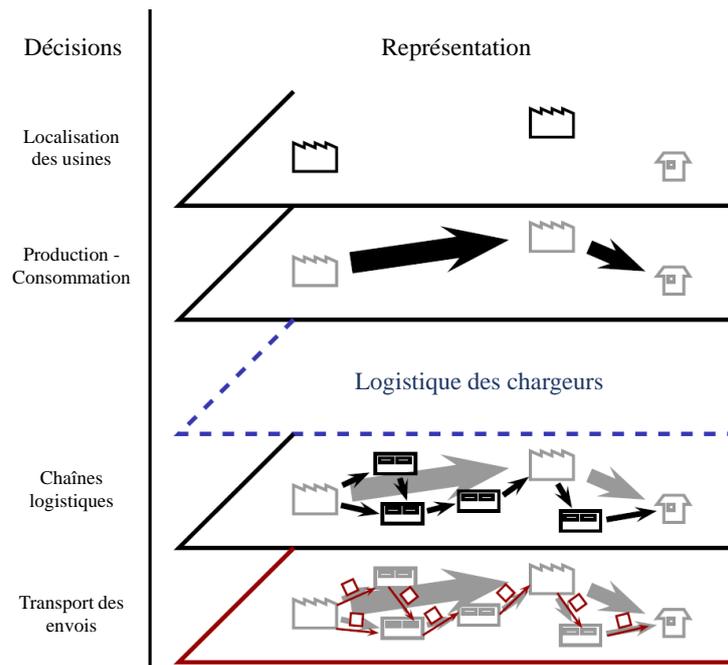


FIGURE 1.6 – Représentation systémique de la demande de transport de fret.

conclusion, nous en rappelons ici très brièvement les principaux points, en revenant d'abord sur la logistique.

- Les biens sont datés et localisés : *un bien n'a de valeur qu'entre les mains du client final*, et toute l'organisation des chaînes logistiques et du transport de marchandises est tirée par les préférences du client final, notamment en termes de niveau de service logistique.
- La fonction logistique consiste à fournir les biens *au bon endroit et au bon moment* : les besoins des clients ne portent pas seulement sur les caractéristiques et quantités des produits qu'ils acquièrent, mais aussi sur la façon dont ils leurs sont mis à disposition.
- Le niveau de service logistique est *multidimensionnel*. Des dimensions comme les quantités livrées, les délais de livraison, les lieux de livraison, les modes de commande, la flexibilité, la fiabilité, la traçabilité, auront des importances relatives distinctes en fonction des clients et des marchés.
- Le chargeur, et en particulier le consommateur, porte une partie des coûts. En particulier, le consommateur final réalise généralement lui-même la fin de la chaîne logistique (le dernier kilomètre). En ce sens, en empruntant le vocabulaire du marketing, le consommateur est *co-créateur de valeur*.
- Les chargeurs doivent établir des *compromis* en termes de niveau de service logistique. Ils doivent trouver un équilibre entre accroître le niveau de service logistique et contrôler leurs coûts logistiques.
- La performance logistique s'établit pour une chaîne logistique dans son ensemble. Elle est motif de coopération entre acteurs dont les intérêts

peuvent par ailleurs être divergents. Cela confère à la logistique une dimension *systemique*.

En ce qui concerne plus spécifiquement le transport de fret, les points suivants sont particulièrement importants :

- Le transport de fret est un marché *hétérogène* : les prestations sont très diverses, et répondent souvent à des besoins spécifiques.
- Le transport de fret est une *demande dérivée*, et seulement une brique des chaînes logistiques. Il ne faut pas confondre transport et logistique.
- Pour un chargeur, la valeur d'une prestation de transport donnée dépend de la pertinence des caractéristiques de cette prestation *comptenu de ses propres besoins et objectifs logistiques* (et donc de ceux de ses clients). Le mode de transport n'a pas d'importance en tant que tel. S'il en a, c'est au travers de ses performances (vitesse, coût, capacité, fiabilité, flexibilité, etc.) et des équipements que son utilisation peut rendre nécessaire.
- Le transport de fret n'est pas un marché homogène et uniforme, dont la structure des coûts est linéaire. La production de transport combine des ressources selon des processus complexes pour produire efficacement une grande quantité de prestations très diverses. *La structure des coûts du transport de fret est complexe*. Appréhender cette complexité, ne pas la sous-estimer, est essentiel.
- L'utilisation efficace des ressources fixes et mobiles du transport de fret passe par la mutualisation. *La mutualisation existe aujourd'hui, et est très répandue*. Elle est assurée par plusieurs acteurs, les transporteurs et par des intermédiaires tels que les commissionnaires, transitaires et autres prestataires de service logistique.

Ce chapitre s'est attaché à décrire rapidement les fondamentaux du transport de fret et de la logistique. Le prochain chapitre aborde les questions de politique publique, en abordant les impacts, enjeux et grandes transformations qui concernent le fret et la logistique.

Chapitre 2

Les enjeux du transport de marchandises et de la logistique

On considère comme enjeux les sujets susceptibles de provoquer de grandes transformations des équilibres entre les acteurs concernés par les secteurs du transport de fret, ou bien d'être des motifs à agir pour l'action publique ou la collectivité. Dans les domaines du transport de marchandises et de la logistique, ces enjeux sont très nombreux. On s'intéresse ici principalement aux enjeux économiques et d'aménagement du territoire. L'objectif est ici de fournir une vision, autant que possible, globale et équilibrée des différents enjeux. La complexité du transport de fret vient de ce qu'il s'inscrit dans une grande tension entre injonction de performance d'un côté et réduction des impacts de l'autre. L'idée ici n'est pas de proposer la solution pour trouver le bon équilibre entre ces objectifs souvent contradictoires, mais de présenter un tableau global permettant d'aider à l'élaboration de politique publique.

La Section 2.1 présente les enjeux principaux. La Section 2.2 présente les principales externalités liées au transport de fret et à la logistique. Enfin, d'autres enjeux sont rapidement évoqués dans la Section 2.3. Les secteurs du transport de fret et de la logistique étant perpétuellement en transition, la Section 2.4 présentent quelques unes des grandes transformations en cours.

2.1 Les objectifs et contraintes du transport de fret et de la logistique

Le transport de fret et la logistique font face à des systèmes de contraintes similaires en nature. De façon imagée, on peut dire que *“le consommateur exige ce que le citoyen refuse¹”*. Plus précisément, la pression sur les coûts est très forte : cela implique notamment des relations de concurrence souvent dures,

1. Selon l'expression de Michel Chalot, président de l'Observatoire Régional des Transports et de la Logistique en Lorraine et président directeur général de l'entreprise Transports Chalots, lors du colloque sur l'observation de la logistique en Grand Est, le 4 juillet 2017 à la Maison de la Région, Metz.

voire exacerbées entre les entreprises (et donc une incitation forte, pour ces entreprises, à tenter de contourner la réglementation). D'autre part, la pression en termes de niveau de service est très forte : le niveau de performance et de qualité demandé aux transporteurs et aux chaînes logistiques est très élevé.

Par ailleurs, les impacts environnementaux (émissions de gaz à effet de serre, pollution locale, bruit, mais aussi impact paysager, etc.) générés par le transport de marchandises et la logistique sont élevés, et en augmentation dans un contexte où, en France, les émissions liées aux activités industrielles diminuent². La pression pour réduire ces impacts est très forte, et différenciée sur le territoire.

Le transport de marchandises a aussi la particularité d'être souvent en conflit d'usage frontal avec le transport de voyageurs, que ce soit en occupation de la voirie et en occupation des places de stationnement pour le seul cas du transport routier. Les enjeux de congestion associés sont très importants, spécifiquement en milieu urbain, mais pas seulement. Pour la logistique, la situation est un peu différente : le conflit d'usage porte plutôt sur le foncier, et est globalement internalisé par le marché foncier. Mais cela soulève des questions d'action publique spécifique, d'une part parce que le marché foncier est loin d'être totalement dérégulé, d'autre part parce qu'il y a des externalités liées à la géographie de l'offre et de la demande en transport de fret et en logistique qui ont des implications concrètes en terme d'aménagement du territoire (voir la Section 5.3, Chapitre 5).

Le dessin ci-dessous (Figure 2.1) illustre ce système de contraintes, qui sont toutes très fortes, et souvent contradictoires.

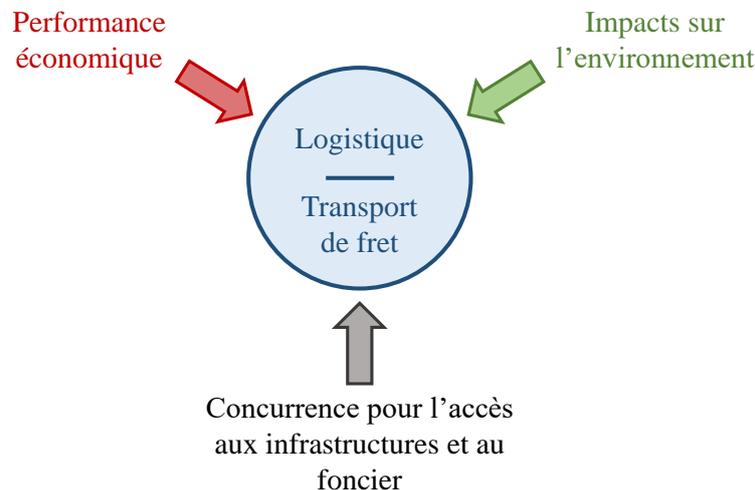


FIGURE 2.1 – Objectifs et contraintes du transport de fret et de la logistique.

La visibilité politique actuelle du transport de fret et de la logistique semble donner une importance élevée aux impacts environnementaux et aux conflits

². au moins pour les émissions générées sur le territoire français ; si on prend en compte les émissions générées dans le monde pour la fabrication et le transport des biens consommés en France le diagnostic est probablement un peu différent.

d'usage, et moins aux enjeux d'efficacité économique, en particulier dans les sphères concernées par les infrastructures et la régulation des transports, l'aménagement du territoire et la logistique urbaine. Or *dans l'élaboration de l'action publique il est important d'avoir une représentation équilibrée non seulement des impacts, mais aussi de la fonction économique du transport de marchandises et de la logistique*. Prenons un exemple simple : aujourd'hui, la circulation des camions et véhicules utilitaires légers en zone urbaine dense pose de vrais problèmes en termes de pollution. S'il est vrai qu'il faut agir afin de réduire ces impacts, il faut avoir en tête que toute augmentation de coût associée se répercutera sur le prix des marchandises que les habitants des villes concernées se procurent au quotidien. *Elle se répercutera également sur une diminution des niveaux de service logistique dont bénéficient les habitants³ qui ne sera pas forcément mesurable financièrement mais n'en sera pas moins réelle*. L'exemple donné ici relève du contexte urbain, mais il est aussi valide en interurbain.

Performance logistique et territoires

La performance logistique pour une personne ou une entreprise relève de la notion de niveau de service présentée dans la Section 1.2.2. Mais comment prendre en compte la performance logistique dans l'action publique ? Premièrement, elle n'est pas facile à mesurer. Deuxièmement, elle concerne un grand ensemble d'acteurs économiques, pas toujours connus avec précision, et avec des besoins différents. Enfin, chaque acteur public s'intéresse à un territoire en particulier, or les chaînes logistiques traversent très généralement de nombreux territoires et de nombreuses échelles géographiques différents. Comment peut-on alors parler de performance logistique à l'échelle d'un territoire ?

Pour tenter de réduire un peu la complexité de ce problème, on propose ici une typologie simple, inspirée notamment de PIPAME (2009), qui permet d'illustrer différentes perspectives complémentaires. La première consiste à s'intéresser à la performance logistique pour les entreprises et établissements présents dans le territoire concerné. On parle alors de *logistique endogène*, et l'enjeu est celui de la compétitivité de ces entreprises. La seconde consiste à s'intéresser à l'offre de service logistique et de transport du territoire pour des chaînes logistiques traversantes. Il s'agit ici de *logistique exogène*. Une troisième perspective, spécifique mais très importante, est la *logistique urbaine*. Enfin, on distingue spécifiquement la *logistique intercontinentale*, car elle soulève des enjeux particuliers.

- *Logistique endogène* : l'enjeu principal sera ici celui de la compétitivité des entreprises du territoire. Plus précisément, l'entreprise sera d'autant plus compétitive qu'elle pourra se fournir dans de bonnes conditions, et qu'elle pourra elle-même faire facilement parvenir ses produits à ses clients, avec un bon niveau de service logistique.

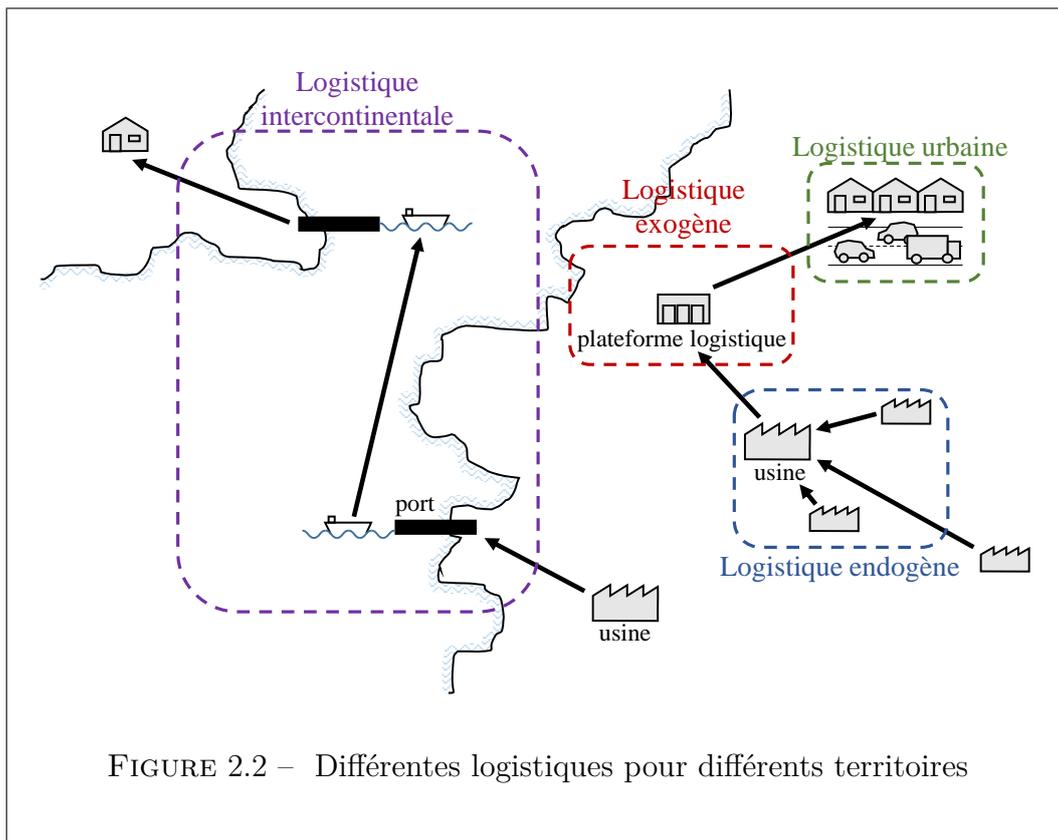
3. nombre de références disponibles, délais de livraison, probabilité de rupture de stock, etc.

- *Logistique exogène* : l'approche consiste à considérer la logistique comme une activité économique à part entière, susceptible de créer valeur ajoutée et emplois dans le territoire, même si elle est au service de chaînes logistiques qui ne font que traverser le territoire.
- *Logistique urbaine* : la logistique urbaine a une spécificité : d'une part, presque toutes les chaînes logistiques, considérées au sens large, se terminent chez des particuliers, qui sont les véritables consommateurs finaux. D'autre part, ils s'agit de clients compliqués : comparés à de gros clients industriels, les gens achètent des choses variées, en petite quantité, sans s'engager en avance, ni sur des volumes, ni sur des types de produits ; ils sont par ailleurs très exigeants, en souhaitant bénéficier de nombreux canaux d'approvisionnement différents, de livraisons rapides, de magasins proches, etc. A l'échelle d'une agglomération, la performance logistique consiste donc à obtenir que les habitants bénéficient d'un bon niveau de service logistique. La difficulté est bien sûr que cela s'inscrit dans un contexte où l'espace est rare, et où les impacts (bruit, sécurité, pollution) sont très forts ; il est donc difficile de trouver le bon équilibre entre performance et impacts.
- *Logistique intercontinentale* : les enjeux de performance sont de même nature que pour la logistique endogène de façon générale, mais avec des particularités : premièrement, la logistique intercontinentale s'inscrit dans le contexte du commerce international, des importations et des exportations, et donc d'enjeux exacerbés en termes de compétitivité. En termes d'infrastructure et d'offre de transport aussi, la dimension intercontinentale est spécifique, car elle rend obligatoire le passage par un port ou un aéroport ; et l'accès des entreprises aux marchés mondiaux dépendra notamment de la bonne desserte des ports et aéroports par les opérateurs de transport. Il peut y avoir un vrai désavantage concurrentiel à être mal connecté à un port lui même mal desservi, par exemple.

La bonne connaissance des enjeux est un préalable à l'établissement d'objectifs stratégiques en termes de logistique. En cela, la typologie ci-dessus est une base pour qualifier et sérier les enjeux dans une première approche. Elle met en lumière le fait qu'en ce qui concerne la logistique et le transport de marchandises, les territoires sont nécessairement interdépendants. Elle montre aussi, bien que de façon très simple, que la question des échelles géographiques n'est pas neutre : les questions qui concernent la logistique urbaine et la logistique intercontinentale sont bien différentes. Or ces logistiques ne sont pas séparées : les chaînes logistiques ne sont jamais exclusivement urbaines, ou régionales, ou internationales : dans bien des cas, toutes les échelles sont présentes, et l'action d'un territoire va avoir des impacts qui le dépasseront largement.

Une fois construit le diagnostic, il appartient ensuite à chaque territoire et à ses acteurs de définir des objectifs et les moyens de les atteindre, en équilibrant performance logistique et impacts, tels qu'ils sont présentés ci-après.

La typologie proposée dans cet encadré est illustrée par la Figure 2.2 ci-dessous. On constate que dans chaque cas, les différentes notions de logistique se définissent par rapport à un territoire donné.



2.2 Les externalités

Plusieurs des enjeux relatifs au transport de marchandises et à la logistique concernent les externalités qui y sont liées. Par externalité, on entend ici le fait qu'une transaction entre un producteur (par exemple un transporteur) et un consommateur (par exemple un chargeur) impacte un tiers sans que le tiers ait son mot à dire, ou bien que l'impact subi par le tiers se reflète dans le prix de la transaction. Ces externalités sont intrinsèquement liées à la nature de *production jointe* du transport de marchandises : dans l'état actuel des technologies, il est presque impossible de produire une opération de transport sans produire simultanément une série d'impacts non voulus⁴.

La question des externalités en transport de marchandises et plus généralement en logistique soulève des questions très complexes. L'objectif dans cette section se limitera à lister rapidement les grandes catégories d'externalités, en faisant le lien avec la question de la structure des coûts en transport et logis-

4. D'un point de vue formel, on peut modéliser les choses ainsi. Soit $F(x, y, e)$ la fonction de production qui relie le nombre d'opérations de transport x qu'il faut mettre en oeuvre pour transporter y envois, et e la pollution générée ce faisant. x est la ressource mise en oeuvre, y et e sont les produits ; F est la technologie : seules les combinaisons telles que $F(x, y, e) = 0$ sont faisables. Il y a des externalités car il n'existe aucune combinaison (x, y) telle que $F(x, y, 0) = 0$: en d'autres termes on ne peut pas produire du y avec du x sans avoir du e : il s'agit bien d'une conséquence de la production jointe.

tique. Pour cette section, la source principale est COMMISSARIAT GÉNÉRAL À LA STRATÉGIE ET À LA PROSPECTIVE (CGSP, 2013). Trois grandes catégories sont présentées ci-dessous : les externalités négatives pures (Section 2.2.1), les externalités issues de conflit d’usage (Section 2.2.2), et les externalités positives (Section 2.2.3).

2.2.1 Externalités négatives pures

Il s’agit principalement les externalités environnementales : elles sont principalement liées au transport de marchandises, mais les entrepôts en causent également. Lorsqu’une opération de transport de marchandises est produite, un ensemble d’impacts sont également produits, et ces impacts génèrent des externalités. On peut en distinguer deux catégories :

- *les impacts locaux* : il s’agit des impacts dont l’intensité dépend du lieu où l’opération de transport est réalisée : pour le bruit, ou pour les émissions de polluants locaux, les impacts sont d’autant plus forts que beaucoup de personnes sont présentes autour du lieu où l’opération de transport est réalisée.
- *les impacts globaux* : il s’agit des impacts dont l’intensité est indépendante du lieu de production du transport. Cela concerne en particulier les émissions de gaz à effet de serre, CO₂ et autres, dont l’effet en termes de changement climatique est indépendant du lieu d’émission.

Connaître ces externalités, en mesurer les impacts, et les gérer sont des questions complexes, sur lesquelles nous ne reviendrons pas ici. Par ailleurs, il faut noter que la présentation ci-dessus n’est pas complète : en particulier, la question des effets amont-aval (externalités lors de la construction et de la déconstruction des infrastructures, véhicules, carburants et autres ressources) a son importance.

Il y a des différences importantes entre urbain et interurbain, en particulier en ce qui concerne le transport routier de marchandises. Premièrement, la quantité de personnes exposées aux impacts locaux est bien plus élevée en urbain qu’en interurbain : la densité de personnes présentes est bien plus élevée en ville qu’ailleurs, et les mêmes quantités de bruit et de pollution générées par un type donné de véhicule auront bien plus d’impact en milieu urbain. Deuxièmement, les véhicules opérant en milieu urbain sont très différents de ceux qui opèrent en interurbain : dans un cas on trouve plutôt de grands véhicules (porteurs, semi-remorques⁵), plutôt récents, et opérant dans des conditions pour

5. On peut cependant noter que certains observateurs semblent constater un développement du trafic interurbain en Véhicule Utilitaire Léger (VUL) en France (DIRECTION GÉNÉRALE DES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT ET DE LA MER [DGITM], 2016). Bien que les méthodes d’observation mises en oeuvre soient peu fiables, ce constat n’est pas complètement illogique : le transport en VUL permet de contourner largement les très nombreuses règles et protocoles de contrôle qui accompagnent le transport de fret en poids lourd, et cela peut créer une opportunité économique, qui s’accompagne de problèmes potentiellement très sérieux de sécurité, de régulation du travail, et de concurrence pour les transporteurs français.

lesquelles ils ont été optimisés : vitesse de croisière, stable, optimale, taux de remplissage plutôt élevés, etc.) tandis qu'en urbain les véhicules sont plus petits, mais aussi plus vieux, circulent dans des conditions dégradées (vitesses faibles, accélérations et décélérations fréquentes, etc.). Du point de vue de l'action publique, dans le contrôle des externalités liées au transport de fret routier, il faut donc clairement distinguer l'urbain de l'interurbain.

2.2.2 Conflits d'usage

De façon générale, toutes les activités économiques sont en concurrence pour les ressources nécessaires à leur réalisation. Les conflits d'usage ne sont donc pas spécifiques au transport de fret et à la logistique. Néanmoins, il est important d'identifier deux conflits d'usage spécifique à ces secteurs, qui jouent des rôles très particuliers du point de vue de l'aménagement du territoire : le conflit d'usage avec les voyageurs sur la voirie, d'une part, et le conflit d'usage pour le foncier, d'autre part.

- *Conflit d'usage pour la voirie* : le transport de marchandises partage souvent les réseaux d'infrastructure avec le transport de voyageurs (et plusieurs autres usages). En transport routier, une des conséquences principales de ce conflit d'usage est la congestion⁶. Cela soulève la question du partage de la voirie entre voyageurs et marchandises, et de la façon de gérer ce partage. Le stationnement pose des problèmes similaires. Pour les autres modes de transport, la question se pose aussi, mais de façon différente. Par exemple, pour le réseau ferroviaire, la gestion des sillons fait qu'il n'y a pas de congestion à proprement parler (ou qu'elle ne se manifeste pas comme dans le routier). Mais la priorité accordée aux trains de passagers par rapport au fret pourrait causer le fait que les trains de fret souffrent de retards plus fréquents et plus longs.
- *Conflit d'usage pour le foncier* : le transport de marchandises et la logistique sont consommateurs d'espace : le transport de marchandises pour les infrastructures de circulation et de stationnement, et la logistique pour les entrepôts (par exemple, en Île-de-France, il s'est construit en moyenne plus de 600000m² par an d'entrepôts entre 1975 et 2010 – SAMARCANDE AND SCET, 2012). La première intuition est de dire que ce conflit d'usage n'est pas source d'externalité à proprement parler : la compétition pour le foncier est gérée par les marchés. Cependant, il faut noter d'une part que la productivité des différents modes de transport dépend de décisions d'aménagement, d'autre part que les décisions d'aménagement peuvent aider à traiter d'autres types d'externalités. On reviendra sur cette question plus précisément dans le Chapitre 5.

6. la congestion est une externalité d'une nature un peu particulière : chaque usager souffre de la congestion, et donc la prend en compte, mais, à réseau d'infrastructure donné, chaque usager dégrade la performance de l'ensemble de façon marginale, et cela, il ne le prend pas en compte. C'est pour cette raison qu'il y s'agit d'une externalité.

De façon générale, il n'est pas facile de déterminer quelle place relative accorder aux marchandises et à la logistique en termes de voirie et de foncier, en particulier dans les zones où la concurrence pour ces ressources est forte. Dans tous les cas, quand on cherche à répondre à ces questions, il faut garder à l'esprit que, premièrement la décision met en jeu de nombreuses externalités, qu'il faut prendre en compte de façon globale, dans la mesure du possible. Deuxièmement, il faut prendre en compte quelles sont les solutions de repli disponibles lorsqu'on cherche à privilégier un usage par rapport à un autre⁷.

2.2.3 Externalités positives

Les externalités négatives du transport de fret et de la logistique sont plutôt bien connues, et très documentées. Des méthodes pour les prendre en compte de façon monétarisée dans les évaluations de politique et de projet de transport ont été élaborées dans plusieurs pays. Les externalités positives sont beaucoup moins étudiées dans la littérature académique, et il semble aussi qu'elles ont un poids bien moindre dans le débat public, alors même que leurs implications sont probablement très importantes.

Les externalités positives, si elles existent, peuvent notamment provenir d'économies d'échelle et d'envergure (voir encadré 86). La présence d'économies d'échelle et d'envergure est source d'externalité car une opération supplémentaire diminue les coûts unitaires, ce qui bénéficie à d'autres agents que ceux impliqués dans l'opération. De façon quelque peu arbitraire, et sans ordre particulier, on peut distinguer quatre catégories :

- *économies d'échelle du transport de marchandises* : le transport de marchandises présente des économies d'échelle auxquelles on peut trouver différentes sources, telle que l'indivisibilité des ressources comme les véhicules – le fait qu'un plus gros véhicule soit généralement moins cher à exploiter la tonne transportée qu'un véhicule plus petit, pourvu qu'il soit bien rempli – les personnels, les plateformes, etc. Une autre source d'économie d'échelle vient de la taille de la flotte, avec une exposition au risque d'avoir une certaine proportion de véhicules en panne plus faible, une plus grande capacité à les redéployer, etc. Une troisième source est liée aux infrastructures elles-mêmes.
- *économies d'échelle de la logistique* : dans les chaînes logistiques, les économies d'échelle sont très présentes : économies sur la fréquence des envois, sur les tailles de stock, sur le choix de type de véhicules, sur le nombre de références traités, etc. Les effets sont ici très complexes ; ils seront pour certains étudiés de façon exploratoire dans le Chapitre 5.

7. Cette question a fait l'objet d'un premier traitement dans KONING, COMBES et COULOMBEL (2017). Les auteurs examinent dans le cas de l'Ile-de-France si, pour réduire la congestion routière et les autres externalités, il faut plutôt réduire le trafic routier de voyageurs ou le trafic routier de marchandises. La question dépend non seulement des externalités associées à ces deux trafics, mais aussi des options de report qui existent. Le problème est que l'élasticité de la demande de transport routier de marchandise en urbain est très mal connue.

- *économies liées à la densité spatiale des opérations* : dans le transport de marchandises, une partie importante des envois sont chargés et livrés dans le cadre de tournées. Cela a un impact particulier en termes de structure de coût : plus les opérations sont nombreuses, moins la distance entre deux opérations successives est grande. En conséquence, le transport de fret, dans des configurations de tournées qui peuvent concerner à la fois la logistique urbaine ou bien les opérateurs ferroviaire de proximité, présente une structure de coût bien particulière avec des implications qui seront également étudiées dans le Chapitre 5.
- *économies liées à la localisation des établissements* : enfin, dans le cadre des opérations de transport qui impliquent de la consolidation, plus les établissements qui sont servis par un même transporteur sont proches les uns des autres, plus les opérations de transport seront efficaces. Ici aussi, cette structure des coûts soulève des questions d'aménagement du territoire qui sont loin d'être secondaires.

Ces externalités, si elles existent, peuvent être la cause d'une distorsion de marché. En économie des transports, ce phénomène est notamment connu pour les transports collectifs, il s'agit de l'effet Mohring (MOHRING, 1972). Selon cet effet, lorsqu'il y a plus de voyageurs sur une ligne de transport collectif, il faut augmenter la fréquence, et donc le temps d'attente de tout le monde décroît. Cependant, le prix que le voyageur marginal sera prêt à payer pour prendre le bus ne prend pas en compte le fait que le temps d'attente de tous les autres voyageurs va diminuer marginalement. C'est un phénomène exactement inverse à celui de la congestion, qui implique que les prix ne s'établissent pas au niveau socialement optimal sur les marchés de transport collectif. Cet effet est régulièrement invoqué parmi les arguments qui justifient la subvention des transports collectifs.

En termes de politique économique et de régulation, savoir si un secteur est caractérisé par des économies d'échelle et d'envergure pose des questions cruciales : y a-t-il monopole naturel et nécessité de régulation ? Y a-t-il rendements constants pour tout ou partie du système économique considéré ? Est-on en situation de concurrence imparfaite, et faut-il prendre des mesures correctives ? Les prix sont-ils proches ou éloignés des coûts marginaux, les quantités échangées sont-elles proches ou éloignées des niveaux optimaux, quels instruments déployer pour se rapprocher d'une situation optimale ? Etc. Il s'agit en tout cas d'une direction de recherche importante à creuser aujourd'hui ; quelques pistes sont

2.3 Un aperçu des autres enjeux

Les enjeux du transport de fret et de la logistique ne se limitent pas aux questions de structure des coûts et de régulation économique. Beaucoup d'autres dimensions sont concernées ; on en liste ici une partie, sans viser l'exhaustivité, dans l'objectif d'en illustrer la diversité.

Indépendance énergétique et prix de l'énergie : le transport de fret et la logistique reposent actuellement très fortement sur des vecteurs d'énergie liquides, les plus efficaces apporter de l'énergie à des véhicules qui doivent bénéficier d'une autonomie élevée et qui ne peuvent pour la plupart pas être alimentés en continu par l'infrastructure. Actuellement, ces vecteurs énergétiques concernent presque essentiellement des énergies fossiles, ce qui pose le problème de l'impact climatique de cette activité économique. Mais à l'échelle d'un pays ou d'un territoire, cela pose au moins deux autres types de problèmes essentiels, qui sont d'une part l'exposition à la variation des prix de ces vecteurs énergétiques (et la capacité des économies à résister à ces variations) et d'autre part celui de l'indépendance énergétique, avec tous les enjeux économiques et géopolitiques qui en découlent⁸.

Compétitivité : le transport de marchandises et la logistique sont des activités économiques transverses qui influencent la compétitivité d'une grande partie de l'économie. Comme cela en découle de la définition proposée p. 31, un bien n'a de valeur que dans les mains de l'agent qui va en disposer. Par conséquent, il est essentiel pour une entreprise que les biens qu'elle produit arrivent efficacement dans les mains de ses clients. Symétriquement, il est important pour les habitants d'un territoire d'avoir accès aux biens produits ailleurs.

Rapports de force entre entreprises, entre entreprises et travailleurs : les chaînes d'approvisionnement sont des systèmes d'acteurs économiques qui doivent à la fois coopérer pour produire de la valeur, et négocier pour se répartir cette valeur. Ces négociations résultent de rapports de force qui peuvent être très défavorables à certains. Par exemple, les petits sous-traitants du transport de marchandises en ville, sont pour beaucoup peu payés et ne veulent ou peuvent souvent pas respecter les règles (en particulier de temps de travail) qui les régissent (RÈME HARNAY et al., 2014).

Concurrence internationale entre transporteurs : un autre enjeu spécifique au transport de marchandises, particulièrement important en Europe, trouve sa cause dans les différentiels de salaires des chauffeurs de nationalités distinctes. Le transport de fret étant une activité itinérante, beaucoup de véhicules circulant dans un pays donné peuvent être d'un pavillon différent de celui

8. Le sujet de l'impact climatique des émissions de gaz à effet de serre et des mesures qui doivent être prises pour les réduire fait l'objet d'une littérature immense, qu'on ne peut malheureusement ni lister ni résumer ici. Nous nous contenterons de citer ELIASSON et PROOST (2015). Les deux auteurs reviennent sur les grands enjeux de la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ils expliquent en particulier en quoi ces efforts doivent être menés de façon coordonnée à l'échelle internationale. Ils montrent que des efforts individuels de pays "exemplaires" peuvent n'avoir que peu ou pas d'effet, mais citent les objectifs géopolitiques et d'indépendance énergétique comme des motivations valables pour mener des politiques unilatérales de réduction des émissions de gaz à effet de serre

du pays traversé⁹. Cela pose des problèmes sévères, notamment d'acceptabilité par les populations, avec des conséquences politiques loin d'être neutres, même si le transport de fret n'est pas le seul secteur concerné par cet enjeu.

Sécurité, sûreté, contrôle du commerce international : le transport de marchandises et la logistique soulève bien entendu un très grand nombre de problèmes de risques, en face de quel un arsenal considérable de mesures techniques et réglementaires sont mises en oeuvre. Ces risques concernent bien sûr les accidents liés au transport lui-même, sur les personnels impliqués et sur les autres personnes potentiellement installées. L'atteinte d'un niveau satisfaisant de sécurité s'accompagne de coûts élevés, et la tentation est donc forte pour les entreprises de s'affranchir de certaines des règles, comme les respects de temps de conduite ou de chargement maximaux des véhicules. C'est pourquoi les réglementations sont accompagnées de protocoles de contrôle et sanction qui peuvent être coûteux.

Le stockage soulève évidemment des problèmes similaires, là aussi nettement plus forts lorsque les marchandises concernées sont dangereuses. Il s'agit alors d'élaborer des normes sur les bâtiments et leurs exploitations, et de vérifier que ces normes sont mises en oeuvre correctement. Ces normes peuvent poser des questions d'aménagement du territoire, puisque les bâtiments, selon les usages pour lesquels ils seront conçus, ne seront en conséquence pas implantés aux mêmes endroits.

On cite aussi pour mémoire, et sans aucunement minimiser leur importance, les enjeux de sûreté, de contrôle de la circulation de certains types de marchandises, de contrôle du commerce notamment international, etc.

Formation et emploi : Le transport de marchandises et la logistique sont des fonctions de l'entreprise qui nécessitent des compétences spécifiques. Assurer que des personnels formés de façon adéquate soient disponibles sur le marché du travail est donc un enjeu d'efficacité pour ces secteurs. La formation est une question collective, car elle est le produit de la coopération de nombreux acteurs tels que les organismes de formation, le monde professionnel, le monde universitaire, etc. Il semble qu'en France la formation en logistique présente un certain déficit, en particulier pour les PME pour lesquelles les cadres manquent non seulement de compétence pour gérer correctement leurs chaînes logistiques mais ignorent même les enjeux et les risques qu'ils courent à ne pas accorder à ces questions l'attention qu'elles méritent.

De façon générale, une tension sur les marchés de l'emploi à la fois pour le transport (concernant plutôt la main d'oeuvre) et pour la logistique (concernant plutôt l'encadrement, et notamment l'encadrement intermédiaire) semble se manifester dans plusieurs pays développés, avec différentes causes, dont le

9. En France, en 2014, sur un flux total de 288.5 Gtkm transportées par route, 36.7% l'ont été par des véhicules de pavillon étrangers. L'activité du pavillon français n'a augmentée que d'environ 15% entre 1990 et 2014, tandis que celle du pavillon étranger a augmenté de plus de 160% sur la même période (CGDD, 2015)

manque d'attractivité de ces métiers, et comme conséquences une difficulté pour les entreprises à faire fonctionner efficacement leurs chaînes logistiques (CAPGEMINI & LANGLEY, 2016).

Vulnérabilité des réseaux, robustesse, résilience : Les chaînes logistiques sont des systèmes d'acteurs économiques en interface, qui aujourd'hui comprennent souvent de très nombreuses entreprises réparties sur de très grands territoires. Si on prend l'exemple de l'automobile on observe que les constructeurs sont au coeur d'un réseau de centaines de fournisseurs, présents dans plusieurs pays et plusieurs continents. Par ailleurs, les processus logistiques se sont tendus : pour un même flux de produits d'un fournisseur à un client, la tendance a généralement été à la réduction des stocks, afin d'améliorer la flexibilité et réduire les coûts de stockage.

Cela pose des problèmes de robustesse (résistances des chaînes logistiques à la défaillance de l'un de leurs composants – qui peut être une entreprise mais aussi un entrepôt, un port, un aéroport, etc.) et de résilience (capacité de retour à la normale en cas de défaillance d'un des composants). Ces problèmes peuvent être à l'échelle des entreprises (susceptibles de mettre en danger leur existence) mais aussi à l'échelle des pouvoirs publics, lorsqu'un secteur économique entier, voire la population, sont exposées à des risques systémiques. On peut citer les exemples ci-dessous, pour illustrer cet enjeu :

- *Problème du fournisseur clé ou "nexus"* : dans les chaînes logistiques complexes, on trouve des fournisseurs de rang 1, 2, 3 et plus, et dont la robustesse voire l'existence ne sont pas toujours connus de leurs clients. Un tel fournisseur peut être à la source de composants peu substituables et essentiels à plusieurs de ses clients. Sa défaillance aura alors des causes sans commune mesure avec l'importance nominale du fournisseur dans sa chaîne logistique (YAN, CHOI, KIM & YANG, 2015).
- *Risque entreprise vs risque global* : les risques de rupture d'approvisionnement semblent gagner en importance dans la perception qu'on les entreprises des dangers auxquelles elles sont exposées. Ceci dit, il ne faut pas en déduire que les mesures prises par les entreprises sont suffisantes pour protéger la collectivité des conséquences de risques systémiques. En effet, fondamentalement, l'important pour une entreprise est de faire mieux que ses concurrents. Dans le cas de la réalisation d'un risque de grande ampleur, toutes les entreprises sont "dans le même bateau" et même si elles peuvent être exposées à des difficultés de trésorerie, cela ne signifie pas que le risque pour chacune d'elles est le même que le risque pour l'ensemble. En conséquence, pour certaines chaînes logistiques stratégiques, la connaissance et le traitement des risques est une véritable problématique d'action publique.
- *Ressources stratégiques* : pour certaines ressources, comme les produits alimentaires ou les carburants, une rupture d'approvisionnement généralisée peut avoir des conséquences critiques sur la population, l'économie, et les capacités de défense d'un territoire. A ce titre, les pouvoirs

- publics peuvent intervenir dans la gestion des stocks, et des études sont menées pour apprécier la vulnérabilité des chaînes logistiques correspondantes (**hansen_hanno_food_supply_chain_icplt_2015**)
- *Changement climatique* : le sujet très important du changement climatique et de ses conséquences sur le transport de marchandises et la logistique sera évoqué dans la section suivante. Cela dit, le changement climatique et ses impacts – en particulier sur les infrastructures de transport – a une place spécifique dans la question de la vulnérabilité des chaînes logistiques, et cette place est appelée à augmenter.

2.4 Quelques grandes transformations, et leurs implications

Le transport de fret et la logistique sont caractérisés par une série de transformations de fond, dont il est aussi difficile d'anticiper les suites que d'apprécier les conséquences. Compte-tenu des impacts attendus, elles font partie des éléments essentiels du contexte du transport de fret et de la logistique. Elles sont présentées ci-dessous brièvement et sans ordre d'importance.

Numérisation : la première et probable principale mutation de fond est la diffusion des technologies de l'information et la communication dans le transport de marchandises et la logistique. Dans ces deux secteurs, la gestion du temps et de l'espace est au coeur de la performance. Plus l'information sur l'état et la localisation des ressources est précise et disponible rapidement, plus les opérations peuvent être gérées finement, adaptées, optimisées. La qualité des prévisions est également essentielle : beaucoup de décisions en logistique reposent sur des estimations, et ont pour objectif de gérer de l'incertitude¹⁰. Plus les prévisions sont fiables, plus il est possible d'améliorer les niveaux de service en réduisant les coûts. Des informations de qualité et faciles à échanger sont également essentielles à la coordination des acteurs, et en transport de fret comme en logistique, les acteurs sont souvent nombreux à coopérer ou à s'interfacier dans la gestion et la réalisation des opérations.

Les progrès techniques sur la collecte et la gestion des informations sont une tendance de fond depuis plusieurs décennies, et vont certainement continuer encore longtemps. Ils concernent tant l'acquisition et l'échange de données (avec par exemple l'Internet des Objets¹¹), que l'utilisation de bases de données sans cesse croissantes pour améliorer la prévision et la gestion des chaînes logistiques (dans ce domaine en particulier, les évolutions "Big Data" ont un impact très important.) Les systèmes d'information gagnent en complexité et en éten-

10. Voir par exemple la gestion des stocks dans le Chapitre 4.

11. Selon l'Union Internationale des Télécommunications, il s'agit d'une infrastructure mondiale pour la société de l'information, qui permet de disposer de services évolués en interconnectant des objets (physiques ou virtuels) grâce aux technologies de l'information et de la communication interopérables existantes ou en évolution.

due, les acteurs changent, les modes de transaction également (par exemple, on passe du système d'information dédié développé pour une entreprise par un prestataire, pour un coût de développement puis un coût de maintenance, à une prestation de service fournie à l'entreprise par le prestataire informatique contre paiement régulier.) La gestion des informations concerne aussi les changements de propriété et de responsabilité : problématique fondamentale dans le domaine de la logistique, il s'agit de savoir à tout instant qui est propriétaire de quoi, qui est responsable de quoi. Les transactions doivent faire l'objet de vérifications, et être enregistrées de façon fiable¹². Cette tendance soulève des enjeux notamment en termes d'opérabilité¹³.

Evolution des matériels de transport : Parmi les ressources nécessaires au transport de marchandises, les véhicules jouent un rôle central. Ils ont beaucoup évolué dans le passé, et vont probablement continuer à évoluer beaucoup dans le futur aussi, sur de nombreux plans.

Un axe d'évolution important est celui des dimensions. On peut à titre d'exemple citer les tailles des porte-conteneurs, passés progressivement de capacités de quelques centaines de TEU dans les années 1950 à des capacités de l'ordre de 18000 TEU après 2010 (RODRIGUE, 2017) : ces évolutions ont permis de dégager des économies d'échelle très importantes, et ont par ailleurs accompagné la croissance du trafic maritime (Figure 2.3). Il n'est pas facile de dire si cette tendance va se poursuivre, car il y a au moins deux freins importants : d'une part il faut être capable de massifier pour tirer pleinement parti de la capacité de ces grands navires, et cela ne doit pas être réalisé au dépend du niveau de service pour les clients, par exemple avec des temps de transit trop long et des ruptures de charge trop nombreuses ; d'autre part plus les navires sont grands, moins nombreux sont les ports capables de les accueillir et de les charger et décharger efficacement.

Les poids lourds sont également concernés par cette évolution des dimensions. En France a été généralisée au 1er janvier 2013 l'autorisation du 44 tonnes de PTRAs (poids total roulant autorisé) après plus de vingt ans de PTRAs de 40 tonnes (hors dérogations). Certains pays, comme l'Australie, les Etats-Unis d'Amérique, ou la Suède, autorisent des camions de plus grande taille, de l'ordre de 60 tonnes de PTRAs dans certains cas. Les enjeux sous-jacents sont complexes. Il y a d'une part la performance économique réelle ou supposée d'utiliser des camions plus gros (baisse des coûts de personnel à la tonne transportée, par exemple, pourvu que les taux de remplissage soient adéquats, ainsi que l'augmentation du ratio charge utile sur poids total). Les

12. C'est une des raisons du grand intérêt de ces secteurs pour la technologie *blockchain*, technologie de stockage et de transmission d'information qui semble infalsifiable et fonctionnant de façon décentralisée.

13. On peut citer à titre d'exemple la publication par le Comité Européen de Normalisation d'un guide technique à l'attention des services postaux européens proposant un standard pour l'identification des colis internationaux. Auparavant, la co-existence de différentes solutions propriétaires rendait nécessaire des ré-étiquetages (SUPPLY CHAIN MAGAZINE, 2017)

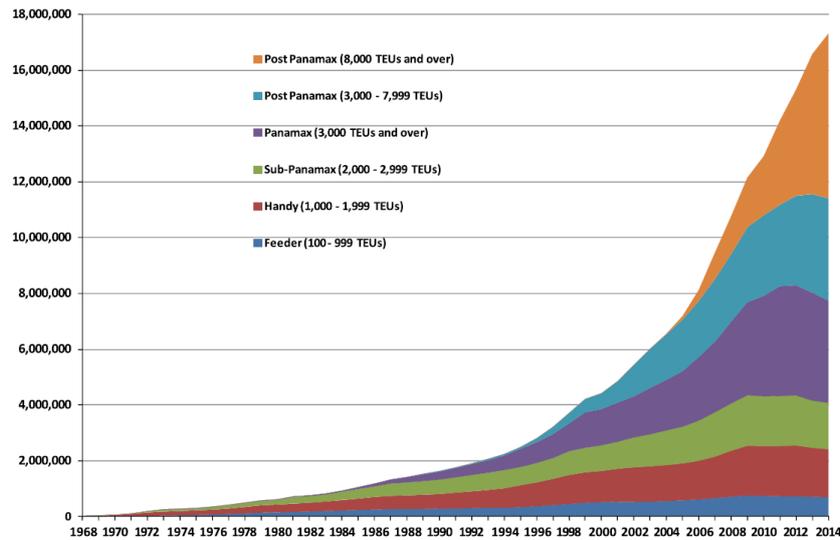


FIGURE 2.3 – Évolution des tailles de navires porte-conteneur, unité TEU (à partir de TRAN et HAASIS, 2015)

désavantages sont à chercher du côté de l'usure des routes, de la sécurité, du partage de la voirie avec les autres usagers, etc.

Les véhicules évoluent également en terme de vecteur énergétique, d'efficacité énergétique et de pollutions. Pour reprendre l'exemple des poids lourds, la consommation kilométrique de carburant a été divisée par deux entre 1960 et 2005, passant de 60 à 33L/100km. Les différentes normes Euro ont permis de réduire les émissions de polluants, même si les émissions théoriques et les émissions en condition réelle de circulation ne sont pas nécessairement les mêmes, comme l'ont montré les récents scandales impliquant plusieurs constructeurs de véhicules particuliers. Demain, la question est de savoir comment remplacer l'actuel vecteur énergétique principal, le carburant liquide issu de gisement fossiles, afin de réduire drastiquement l'impact climatique du transport de fret : faut-il passer à l'électrique ? Sur batterie ou acheminé jusqu'au véhicule par caténaire ou par induction ? Faut-il rester au thermique, mais avec des biocarburants, ou du gaz naturel issu de sources renouvelables ? Les directions qui seront prises sont-elles les mêmes en urbain et en interurbain ? Cela renvoie à la question du changement climatique.

Enfin, il semble qu'on se dirige à terme vers l'automatisation totale ou partielle des véhicules, et le développement de drones (volants ou non), sujet que l'on discute un peu plus loin.

Désintermédiation, économie du partage : le développement des technologies de l'information et de la communication s'est accompagnée de profondes mutations des rapports entre les entreprises. Comme indiqué plus haut les intermédiaires jouent un rôle central dans le fret et la logistique : il s'agit de produire, transporter ou de stocker de très nombreux envois efficacement, tout en profitant, via la massification, des économies d'échelles dégagées par

les véhicules, les plateformes logistiques, et les entrepôts : il y a donc un travail d'appariement indispensable.

Avec le développement des technologies numériques ces dernières années, la façon d'opérer cet appariement est en train de changer : ainsi, des plateformes numériques mettent en relation très efficacement des producteurs ou fournisseurs avec des utilisateurs, là ou auparavant des intermédiaires étaient nécessaires (on peut citer Airbnb dans la location de logements pour des courtes durées, Blablacar dans le covoiturage passager). Il s'agit de désintermédiation, dans le sens où les intermédiaires traditionnels sont contournés par les nouveaux outils et les acteurs qui les proposent.

Dans le transport de marchandises, les intermédiaires sont nombreux, et du fait de l'intérêt économique de la soustraitance, les outils informatiques d'appariement entre chargeurs et transporteurs, ou entre transporteurs, existent depuis longtemps (c'est le cas, par exemple, des bourses de fret.) Mais on voit apparaître de nouveaux acteurs, dont une partie fondée sur l'économie du partage¹⁴. Dans le domaine du transport de fret et de la logistique, le sujet n'est encore que peu étudié. CARBONE, ROUQUET et ROUSSAT (2017) ont examiné plusieurs dizaines d'initiatives de logistique collaborative. Les auteurs introduisent la définition suivante de la logistique collaborative (précisément de la *crowd logistics*) comme étant les initiatives mobilisant les ressources logistiques de la population pour produire des prestations de service logistique¹⁵. Ils identifient que les plateformes Internet sont généralement au cœur de ces initiatives, que l'on peut regrouper en quatre catégories, en fonction qu'elles concernent : le stockage, la livraison de courte distance, le transport de fret sur des distances plus longues mais visant des modes de transport terrestres, et enfin le transport sur très longue distance. Selon les auteurs, c'est sur la livraison de courte distance que les initiatives de logistique collaborative semblent aujourd'hui avoir le plus de chances de se développer, malgré plusieurs freins importants.

A terme, on peut s'attendre à deux conséquences probables du point de vue du fonctionnement général du système : d'une part, une meilleure utilisation des ressources (véhicules, entrepôts etc.) via une meilleure massification ; d'autre part un éclatement supplémentaire des chaînes logistiques permis par la meilleure efficacité des chaînes logistiques. En ce qui concerne les acteurs économiques, il est très difficile d'établir un pronostic : en tout cas les nouveaux acteurs cherchent à se placer en tant qu'intermédiaires, via leurs plateformes. S'ils y arrivent, alors la structure de ces secteurs peut changer radicalement¹⁶.

14. Selon SCHOR (2014), il est très difficile d'établir aujourd'hui les contours de ce que l'on appelle "économie du partage", mais il est possible d'en délimiter les quatre principaux domaines d'application. Ceux-ci sont : la réutilisation des biens (par les marchés d'occasion par exemple), l'utilisation accrue des actifs (par la location par exemple), l'échange de services (comme par des plateformes), et le partage d'actifs productifs (comme par des coopératives).

15. "*initiatives that tap into the logistical resources of the crowd to perform logistics services*", traduction de l'auteur.

16. Il n'est pas facile d'identifier les conditions qui permettront que cela se produise.

En attendant, des barrières économiques importantes existent, ce sont les barrières qui aujourd'hui freinent déjà la mutualisation, comme la volonté d'entreprises de maîtriser leurs actifs (véhicules, entrepôts) ou bien de ne pas partager d'information avec leurs concurrents.

Mutualisation, Internet Physique : la mutualisation consiste en l'utilisation par plusieurs agents économiques de ressources par ailleurs indivisibles. Il peut s'agir de transporter des marchandises appartenant à des chargeurs différents dans le même véhicule, ou bien de les stocker dans le même entrepôt. A un niveau supérieur, il peut s'agir de synchroniser le transport, la gestion logistique voire la production de différents agents afin de maximiser l'utilisation des ressources.

Le concept d'Internet Physique (BALLOT, MONTREUIL & MELLER, 2014) pousse la logique encore plus loin. Partant de l'idée que le transport de fret et les chaînes logistiques seraient aujourd'hui très inefficaces, les auteurs proposent un nouveau système, inspiré d'Internet (et à ne pas confondre avec l'Internet des Objets). Il s'agit d'interconnecter les réseaux logistiques existants, grâce à des processus de collaboration standardisés, des conteneurs modulaires et des interfaces efficaces. Les composants en sont donc : des conteneurs modulaires de tailles normalisées, permettant d'optimiser les opérations de manutention et les taux de remplissage ; des protocoles qui offrent un ensemble de services structuré de façon similaire au standard OSI (Open System Interconnection) qui organise les systèmes de communication digitaux ; et des hubs qui doivent permettre les transferts de marchandises, notamment multimodaux, de façon efficace.

Au delà des questions techniques et économiques (il ne s'agit pas seulement de trouver des solutions, il faut aussi qu'elles s'avèrent moins chères et/ou plus efficaces que les technologies alternatives actuelles et futures), plusieurs questions de fond restent à résoudre, comme l'indiquent les auteurs. La première est celle des modèles économiques : l'Internet Physique suppose une forme de collaboration ou au moins de coordination entre de nombreux acteurs qui pose la question de la qualité de service, de la responsabilité, et du niveau de service. Ce sujet est complexe mais l'époque montre que les modèles économiques peuvent énormément varier, rien n'est exclu a priori. La seconde question est celle du caractère stratégique des actifs logistiques pour les chargeurs : le contrôle du rythme des expéditions, des quantités, et du niveau de service joue un rôle majeur dans les stratégies de nombreuses entreprises, et si celles-ci continuent de penser qu'elles doivent garder le contrôle de leurs actifs logistiques, et de leur savoir-faire spécifiques cela peut freiner voire bloquer le

On peut tout de même noter l'importance de la notion de masse critique : ce qui fait qu'une plateforme acquiert une grande valeur pour ses utilisateurs, et par la même donne un pouvoir de marché très élevé au propriétaire de la plateforme, c'est le fait que plus les offres ou demandes placées sur la plateforme sont nombreuses, plus la plateforme a de valeur aux yeux de leurs utilisateurs, qui savent qu'ils trouveront selon toute probabilité une option proche de leurs souhaits. Il ya alors manifestation d'un effet de club. Le domaine du transport, avec sa structure spatiale et temporelle, peut présenter ces caractéristiques.

déploiement de ce système dont les principes sont l'ouverture et le partage. Il y a enfin la question du partage des données, qui n'est pas simple non plus : les informations de flux sont parmi les données commerciales les plus stratégiques. Cela changera-t-il dans le futur ? Ou bien sera-t-il possible de conserver aux entreprises une forme d'anonymat dans un système partagé ? Il s'agit là aussi d'un frein potentiellement important.

Il ne faut par ailleurs pas oublier deux choses : premièrement, de nombreux acteurs du transport et de la logistique ont pour raison d'être la mutualisation : c'est le cas des transporteurs pour compte d'autrui, des prestataires de service logistique, et des nombreux intermédiaires de différentes natures dont le métier est d'optimiser les opérations de transport afin, entre autres, de dégager la meilleure marge ou d'obtenir le meilleur prix. Deuxièmement, il ne faut pas avoir une fausse représentation de la productivité actuelle des transports, fondée sur des indicateurs inadaptés, tels que des taux de remplissage mesurés uniquement en tonnage ou des taux horaires d'utilisation des véhicules qui ne prendraient pas en compte les différentes contraintes réglementaires ou d'exploitation qui peuvent donner l'apparence que les actifs sont sous-exploités¹⁷.

Actuellement, l'Internet Physique est présenté par ses concepteurs comme un ensemble de recommandations ainsi qu'une feuille de route technologique et de recherche. Une première idée sous-jacente, selon laquelle il y a dans le transport de fret et la logistique de fortes économies d'échelle et d'envergure, et que la segmentation des réseaux ne permet pas d'en profiter à plein, est tout à fait cohérente avec le reste de ce présent mémoire. La seconde, selon laquelle beaucoup de progrès peuvent et doivent venir d'amélioration de l'interopérabilité des différents systèmes concernés, milite de fait pour un travail commun des acteurs du secteur, notamment dans la standardisation et la normalisation.

Automatisation : il s'agit d'un défi majeur pour des pans entiers de l'économie. Le transport de marchandises et la logistique semblent aujourd'hui particulièrement concernés, car ce sont des secteurs intenses en emplois ouvriers, dans les coûts desquelles la main d'oeuvre a un poids important, et pour lesquels la concurrence par les prix est forte. Le sujet a une sensibilité particulière dans les pays et territoires affectés par la désindustrialisation car, en particulier pour la logistique, il s'agit d'emplois qui sont, dans une certaine

17. Par exemple, on mesure souvent le taux de remplissage en poids des camions, sans prendre en compte la contrainte de volume. Dans une étude fondée sur une enquête approfondie menée auprès de chauffeurs routiers empruntant la RN10, un grand axe de transport routier orienté Nord-Sud et situé dans l'Ouest de la France, F. COMBES et LEURENT (2013) identifient qu'un quart des poids lourds sont remplis en volume et non en poids. Il n'est pas possible de dire si ce chiffre est valide pour la France entière, faute d'études complémentaires de ce type. Cependant, si on émet l'hypothèse que la densité moyenne des marchandises décroît au fur et à mesure que les marchandises sont de valeur ajoutée croissante (et au fur et à mesure que les activités industrielles lourdes sont délocalisées dans d'autres pays et continents), alors une baisse des taux de remplissage en poids pourrait en fait traduire une hausse de l'importance de la contrainte de volume dans les véhicules, et non pas une baisse de productivité.

mesure, non délocalisables.

Les impacts du développement de l'automatisation sont compliqués à prévoir. De façon très simplifiée, on peut distinguer deux domaines principaux :

- *Automatisation des entrepôts* : le phénomène est déjà en cours depuis longtemps, et des entrepôts employant une forte main d'oeuvre côtoient des entrepôts fortement automatisés. L'hétérogénéité des activités logistiques fait qu'on peut imaginer que ce sera le cas encore longtemps. Beaucoup des innovations technologiques concernent soit l'automatisation de tâches, soit la facilitation par des machines ou des dispositifs de communication de tâches réalisées par des manutentionnaires.
- *Automatisation des véhicules* : ce sujet attire aujourd'hui une certaine attention, la valeur que les transporteurs pourraient dégager du fait de ne plus avoir de conducteurs dans les véhicules étant élevée. Cette valeur a deux sources : la première, immédiate, est le fait de ne plus avoir besoin de payer les chauffeurs. La seconde, très importante, est le fait que le transporteur peut ainsi, potentiellement, se dégager de nombreuses contraintes d'exploitation (le véhicule peut rouler la nuit sans surcoût, il n'est pas nécessaire de gérer les pauses et repos des conducteurs, de vérifier qu'ils peuvent rentrer chez eux, etc.) Cela ne va pas sans poser de nombreux problèmes, techniques, mais aussi en ce qui concerne la gestion des interfaces, des aléas et des responsabilités dans la chaîne de transport ; mais on peut s'attendre à ce que les efforts investis pour dépasser ces obstacles soient considérables.

Il est difficile de prévoir comment ce phénomène va faire bouger les équilibres. Dans tous les cas, il faut garder à l'esprit deux éléments essentiels : premièrement, le remplacement des humains par l'automatisation ne s'établira que là où cela permettra de diminuer les coûts ; or les coûts des ressources humaines dans le transport de fret et dans la logistique ne sont pas si élevés que ça. Deuxièmement, la généralisation de l'automatisation modifiera les flux et les chaînes logistiques. C'est d'ailleurs pour cette raison qu'on peut imaginer que l'automatisation ne remplace pas les emplois, mais les déplace, avec une offre de service logistique qui pourrait devenir beaucoup plus variée encore qu'aujourd'hui en termes de type de prestation et de niveau de service.

Evolutions de la production, des canaux de distribution, de la consommation : l'évolution du transport de fret et de la logistique s'inscrit dans le contexte des échanges commerciaux, des structures de production, des modes de consommation, des canaux de distribution, qui ont changé de façon spectaculaire ces derniers siècles et décennies et qui vont certainement continuer à évoluer fortement.

Il n'est naturellement pas possible de dessiner ici ne serait-ce que brièvement le tableau de ces évolutions, ni dans le passé, ni dans le futur ; nous allons nous contenter d'évoquer brièvement quelques grandes tendances et quelques contre-phénomènes qui peuvent remettre en question, ne serait-ce que marginalement, ces évolutions :

- *Production et échanges commerciaux* : la tendance de long terme est à l'augmentation des échanges, portée par l'amélioration de la performance des transports et des chaînes logistiques, ainsi qu'à l'augmentation de la diversité des produits et aux économies d'échelle dans la conception et la production, et à des évolutions importantes de la régulation du commerce international dans de nombreux pays (BALDWIN & LOPEZ-GONZALEZ, 2015). Il n'est pas facile de dire si cette tendance s'inversera ou comment elle s'infléchira. On semble déjà observer une baisse de l'élasticité des échanges commerciaux internationaux au PIB mondial depuis la crise de 2008 (ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT – INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM [OECD/ITF], 2017), et certaines études anticipent le retour d'activités de production manufacturière dans les pays développés, comme SIRKIN, ZINSER, HOHNER et al. (2011) ou, plus récemment, MIEBACH CONSULTING (2017)¹⁸. Du point de vue de la complexité des chaînes logistiques, il est plus difficile d'établir des régularités globales. FALLY (2012), par exemple, constate aux Etats-Unis une diminution tendancielle, depuis 50 ans, du nombre des étapes de production en moyenne¹⁹.
- *Modes de consommation* : on peut sans trop de risque affirmer que la tendance générale est à la multiplication des références et des produits, diversifier l'offre afin que chacun trouve ce qui lui convient le mieux ; les durées de vie commerciale des produits tendent également à diminuer sur le long terme. Un autre changement aux conséquences fondamentales est le développement de l'économie de la fonctionnalité : si les personnes ne sont plus propriétaires de ressources (qu'elles doivent donc gérer, et maintenir) mais bénéficiaires de services, alors il faudra que ces services bénéficient d'une logistique non plus seulement en phase de production, mais aussi pendant l'exploitation.

18. La première étude pronostique que le différentiel du coût du travail entre la Chine et les Etats-Unis d'Amérique devrait bientôt ne plus compenser l'avantage pour une entreprise desservant le territoire américain d'avoir ses usines proches de ses marchés. Cela, combiné à la hausse de différents coûts en Chine dont le foncier, pourrait engendrer un début de relocalisation. La seconde étude, plus récente, établit à partir d'un sondage auprès d'une centaine d'entreprises que beaucoup envisagent de relocaliser leurs activités non dans leurs pays d'origine mais dans leur continent d'origine. Ainsi, en Europe, les pays d'Europe centrale et de l'Est semblent avoir un certain potentiel. Face à ces tendances, le développement de l'Asie comme marché intérieur fait qu'il restera bien sûr là-bas de fortes capacités de production.

19. Il est utile de dire un mot de la méthode appliquée dans cette étude : il s'agit d'utiliser une analyse input-output sur des données désagrégées au niveau des établissements. L'auteur considère qu'il y a une étape de production chaque fois qu'un input est utilisé pour fabriquer un produit. Cette démarche permet effectivement de mesurer la profondeur des chaînes d'approvisionnement (par exemple il y a de nombreuses étapes de transformation avant que du minerai de fer devienne un produit de consommation finale), mais pas la complexité horizontale des chaînes d'approvisionnement (par exemple si une entreprise se fournit auprès de cinquante fournisseurs distincts de composants électroniques, cette fragmentation ne sera pas mesurée). Précisément, comme l'auteur l'indique, il mesure donc une baisse de la fragmentation verticale des chaînes d'approvisionnement.

- *Canaux de distribution* : ici également il semble que la tendance soit à la multiplication des canaux de distribution, encore une fois pour proposer une diversité d'options qui permet à chaque client de trouver l'alternative qui lui convient le mieux. Les technologies numériques, avec le développement du e-commerce, ont fondamentalement modifié la plupart des chaînes logistiques ces dernières années. Le défi est, pour les fournisseurs, de dégager des synergies entre ces canaux afin de ne pas en subir le coût de plein fouet. Comme contre-phénomène, on peut évoquer les circuits courts, et plus généralement l'attachement (et la propension à payer, ou à fournir un effort) de certains à la provenance des produits qu'ils achètent, et à la façon dont ces produits ont été fabriqués, ou cultivés.

Il s'agit de phénomènes qui interagissent de façon très complexe. Ils sont une part essentielle de l'environnement dans lequel les chaînes logistiques et le transport de marchandises s'inscrivent. Il est très difficile de prévoir la façon dont ce contexte va évoluer. De ce point de vue, un des enjeux est la prise en compte de cette incertitude dans la planification et la gestion des chaînes logistique, afin de ne pas s'enfermer dans un jeu d'hypothèses précises qu'on n'a pas les moyens de construire.

Trafics : tendances nationales et internationales

Malgré ce contexte changeant, incertain, et difficilement mesurable, il est possible d'établir un certain nombre de constats à l'échelle agrégée. Premièrement, en France, la demande de transport de marchandises semble se détacher de l'évolution de l'activité économique (CGDD, 2016a), FIGURE 2.4. Faut-il y avoir l'amorce d'un découplage ? Les projections du ministère français de l'environnement aux horizons 2030, 2050 et 2070 semblent plutôt parier sur un rattrapage des tendances précédentes, avec une croissance globale du trafic poids lourd de 2,1% par an sur la période 2012-2030 puis de 1,11% par an ou 0,88% par an sur la période 2030-2050 selon les scénarios (CGDD, 2016b) ; étude qui repose, il est vrai, sur des hypothèses de croissance économique sous-jacentes plutôt dynamiques.

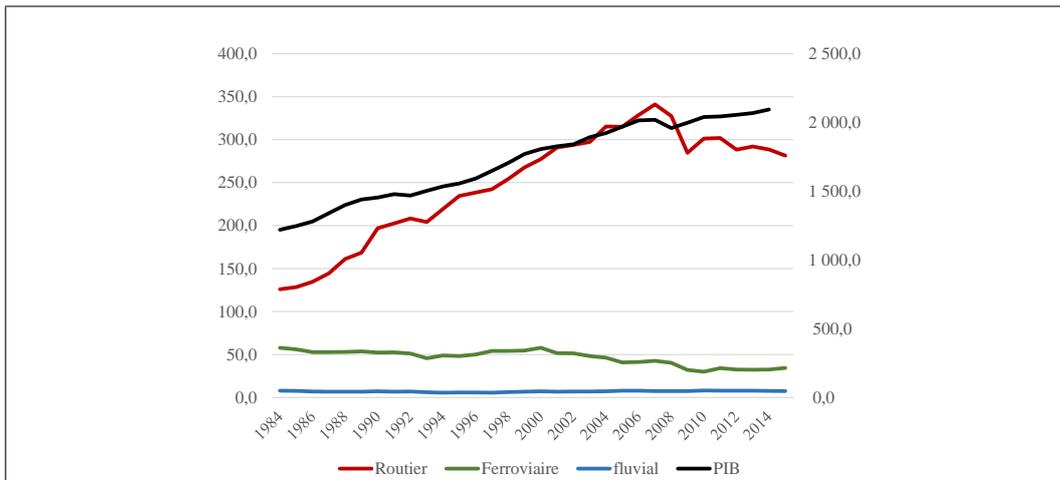


FIGURE 2.4 – Transports intérieurs de marchandises (Gt.km, axe de gauche) et PIB (G€ prix chaînés, axe de droite), France

L'activité de la messagerie montre une augmentation de la quantité d'envois traités, pour un chiffre d'affaire qui d'ailleurs est plutôt en diminution (CGDD, 2017). Ainsi le chiffre d'affaire de l'express national tous poids (colis de plus de 30kg transportés pendant la nuit) a baissé d'environ 8% entre début 2011 et fin 2016 tandis que le nombre d'envois a augmenté d'environ 7% sur la même période. En ce qui concerne l'express national colis légers (colis de moins de 30kg transportés pendant la nuit), alors le chiffre d'affaire a augmenté de 36% et le nombre d'envois de 48% sur la même période. La fragmentation des envois déjà identifiée rigoureusement par des enquêtes précédentes sur la période 1988-2004 (GUILBAULT et al., 2006), et donc la fragmentation des chaînes logistiques, ne semblent pas s'être interrompues.

À l'international, les évolutions du transport de marchandises sont restées très dynamiques des dernières années (OECD/ITF, 2017). Les flux maritimes, mesurés en tonnes-kilomètres, ont ainsi augmenté de 5,2% par an entre 2010 et 2015, et les flux de conteneurs (TEU) ont augmenté de 4,8% par an entre 2008 et 2014, en prenant en compte la chute des trafics temporaire en 2009. Sur la même période, l'évolution des flux de fret en aérien en tonne-kilomètres a été de 2,8% par an. Les modes terrestres ont des rythmes d'évolution différenciés, plus élevés en Chine et en Inde que dans les pays de l'OCDE. Les scénarios de prévision de la demande à horizon 2050 de l'OCDE prévoient une augmentation forte des flux en tonne-kilomètres (3,1% par an), et par conséquent une augmentation des émissions de CO₂ si des mesures fortes de réduction de l'intensité carbone du transport ne sont pas mises en oeuvre.

Concernant les parts modales, l'évolution en France n'a pas été en faveur des modes non routiers. Malgré de nombreuses initiatives d'action publique et différentes réformes organisationnelles (dont la libéralisation du fret ferroviaire et la réforme portuaire), et malgré l'augmentation significative du prix du pétrole sur la décennie 2000-2010, la part modale des modes terrestres non routiers ne s'est pas redressée. La baisse des coûts du pétrole sur les trois dernières années et la dégradation progressive de la situation des finances publiques n'ont pas arrangé

la situation. La question de savoir si les différents modes (en particulier la route) couvrent bien leurs coûts se pose, mais la situation française reste, en termes de report modal, peu satisfaisante, et le report modal n'a pas été un levier efficace en termes de réduction de l'empreinte environnementale du transport de marchandises ces dernières décennies. Et, malheureusement, il y n'y a guère plus de raisons d'envisager qu'il le soit dans les décennies futures, encore que la situation semble meilleure dans quelques uns des pays limitrophes de la France. On remarque par exemple que dans les projections à horizon 2050 du CGDD, le scénario "Stratégie Nationale Bas Carbone" prévoit une part modale *plus élevée* de la route que le scénario "fil de l'eau" : les baisses d'émissions seront essentiellement dues, dans ce scénario, aux progrès techniques et environnementaux des poids lourds.

Changement climatique : le transport de marchandises est une des activités économiques contribuant le plus aux émissions de gaz à effet de serre qui sont et seront dans les prochaines décennies la cause de modifications du climat aux conséquences majeures. Le transport de marchandises et la logistique sont impactées de deux façons. En premier lieu, la pression économique et réglementaire devrait devenir de plus en plus forte pour que leurs impacts sur le climat soient réduits. Cela peut se traduire de nombreuses façons différentes, une des principales étant une modification des techniques de transport avec des véhicules plus économes en énergie, ou utilisant des énergies aux impacts environnementaux moindres.

Par ailleurs les chaînes logistiques et le transport de marchandises seront impactés par le changement climatique, peut-être avec quelques nouvelles opportunités (ouverture de nouvelles liaisons maritimes au nord de la Russie) mais probablement avec une plus grande exposition aux événements climatiques extrêmes et aux disruptions qui en résulteront. Cela rejoint le sujet évoqué plus haut de la robustesse et de la résilience des réseaux (p. 58), à toutes les échelles.

2.5 Complexité du contexte réglementaire

Une grande partie des enjeux cités dans ce chapitre font l'objet de réglementations ou plus généralement de politiques publiques. Ces politiques publiques sont mises en oeuvre par des acteurs très différents et sur des territoires très divers. Il est difficile d'en dresser un portrait complet. Dans cette section, nous proposons un balayage de différents exemples de politiques concernant le transport de fret et la logistique, et nous insisterons spécifiquement sur la question de l'efficacité administrative dans la compétitivité des territoires.

Diversité de la politique publique dans le transport de fret et la logistique. L'objectif modeste, ici, est de donner une idée de la diversité des

politiques et de celle des acteurs qui les élaborent et les mettent en oeuvre en France. Face à la complexité de ce sujet, on ne peut malheureusement pas prétendre à l'exhaustivité. Nous nous contentons même, en toute simplicité, de lister les outils dont nous avons connaissance :

- *Infrastructures* : planification (financement : répartition et types de contrats, concertation, déclaration d'utilité publique, études d'impact ; l'élaboration de guides techniques concernant la planification de ces infrastructures), maintenance, etc. Beaucoup d'échelons institutionnels peuvent intervenir.
- *Gestion des trafics* : mode de régulation de la gestion d'infrastructure (public, privé, mixte, séparation entre gestionnaires et opérateurs, etc.), tarification, fiscalité/subventions, priorisation entre différents types de véhicules et de services) ; police de la voirie ; *Low Emission Zones*, etc. De très nombreux acteurs sont impliqués, aux niveaux locaux, nationaux et internationaux.
- *Risques et sécurité* : sécurité routière, maritime, aérienne, fluviale et ferroviaire ; homologation des véhicules (gabarits, charges, comportements, etc.), contrôle technique, signalisation, contrôle-sanction ; conduite et temps de repos des personnels roulants ou navigants ; normes et instruction des dossiers de permis de construire pour les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement, pour le transport de matières dangereuses, enjeux de sûreté, fraude, contrebande etc. Le sujet de la maîtrise des risques est très complexe : il fait par exemple intervenir en France la direction générale ayant en charge les transports d'une part et la direction générale ayant en charge la prévention des risques d'autre part, mais aussi le ministère de l'intérieur et le ministère ayant en charge l'économie. Il y a par ailleurs un enjeu d'efficacité administrative sur lequel on revient spécifiquement un peu plus loin.
- *Structure de marché, régulation, droit du travail, fiscalité* : Libéralisation ou non (autorités organisatrices de la mobilité pouvant se substituer à l'offre privée en cas de défaillance de marché), cas spécifique du transport de déchets ; régulation des relations de sous-traitance et des relations entre acteurs de la chaîne logistique et de la distribution (délais de paiement, prix, ristournes etc.) ; régulation de l'activité de transport (inscription au Registre des Transporteurs, contrôle) ; règles concernant le cabotage, les travailleurs détachés etc. ; fiscalité, part et contrôle du travail informel ; enjeux sociaux, salaires, etc. ; cette catégorie d'enjeux, très complexe, intéresse de nombreux ministères et a une dimension internationale importante et compliquée ; les différents acteurs ont des intérêts très divergents (beaucoup de chargeurs, et de moyennes et grandes entreprises de transport, ont intérêt à pouvoir soustraire au maximum à des artisans ou petites entreprises mal contrôlées, aux coûts très bas) et l'Etat est même tutelle ou actionnaire de certains opérateurs (SNCF, RATP, Air France, La Poste, etc.)
- *Fiscalité* : perception de recettes pour la puissance publique (TVA,

charges sociales, et contrôle du secteur informel; taxe sur les carburants, concurrence internationale sur ce point); fiscalité environnementale (éco-taxe, vignette, taxe carbone, subvention des modes non routiers telles le "coup de pince", directives européennes Eurovignette, etc.); fiscalité locale, etc.

- *Aménagement, commerces* : documents de planification aux différents échelons, avec prise en compte ou non de la logistique et du transport de marchandises, soit directement soit indirectement; commissions départementales d'aménagement commercial; politiques d'agrément, réservation de foncier; subventions de centres de distribution urbains ou d'hôtels logistiques etc.
- *Externalités, environnement, réchauffement climatique* : traités internationaux, politiques nationales, initiatives locales; normes portant sur les véhicules, fiscalité également.

Lorsqu'on réfléchit aux enjeux du transport de fret et de la logistique, à l'opportunité d'introduire de nouvelles mesures ou plus largement à influencer sur le fonctionnement du système, une des difficultés, et non des moindres, est d'avoir en tête le maquis de règles, normes et dispositifs de contrôle déjà en place et la façon dont ils agissent et interagissent; il faut aussi avoir connaissance des différents acteurs, publics et privés, concernés par ces règles et normes, de leurs enjeux et objectifs.

Efficacité administrative, normes : les très nombreuses règles, normes, modalités de contrôle dont la liste ci-dessus n'offre qu'un aperçu font partie du contexte des entreprises dans les territoires où elles sont localisées. Dans un contexte où les différents territoires (qu'il s'agisse de pays ou de communes) n'appliquent pas les mêmes règles (soit parce qu'elles sont formellement distinctes, soit parce qu'elles sont mises en oeuvre de façon différentes), cela devient un enjeu de compétitivité, dans la mesure où des entreprises peuvent décider de s'installer ou non à un endroit donné en fonction de ces règles, ou d'utiliser certains ports ou aéroports plutôt que d'autres, pour les mêmes raisons. Dans son indice de performance de la logistique, la Banque Mondiale retient plusieurs indicateurs liés à l'efficacité administrative (THE WORLD BANK, 2016).

Cette question de l'efficacité administrative dans le transport et la logistique est aujourd'hui concernée par trois tendances : la numérisation et la digitalisation, qui font évoluer les façons de travailler des administrations ou leur permettent de dématérialiser leurs relations avec les entreprises; la réduction des ressources financières publiques qui ne facilitent pas le contrôle; enfin la concurrence économique internationale exacerbée, dans le cadre de laquelle les décisions de localisation de beaucoup d'entreprises se font dans un univers de choix désormais très grand. De ce point de vue, il faut garder à l'esprit le caractère capitalistique de l'activité de logistique et de transport de fret : au-delà des règles et de la manière dont elles sont appliquées, l'instabilité réglementaire est elle-même une donnée que les entreprises vont prendre en compte

dans leurs choix : les investissements exposés au risque de devenir obsolètes sont, de fait, plus coûteux.

Stratégies logistiques nationales et régionales, observatoires : les enjeux concernant le transport de fret et la logistique sont nombreux, complexes, et changeants. Les politiques publiques qui ont pour objectif de les traiter sont de nature très diverses, et elles sont élaborées et mises en oeuvre par de nombreux acteurs présents à tous les échelons institutionnels. D'après la Banque Mondiale (THE WORLD BANK, 2016, p. 4), *"Il y a par conséquent un besoin croissant pour la mise en place de stratégies cohérentes et transversales, en particulier dans les pays développés. Les décideurs des pays développés ou des grands émergents ne doivent pas tant gérer les problèmes de passage de frontière, ce que doivent gérer les pays moins développés, que des déficits de productivité interne des chaînes d'approvisionnement (une réalité que le LPI ne reflète qu'imparfaitement). Les stratégies globales ne se concentrent pas sur la simple réduction des coûts, mais plutôt sur la facilitation et l'accélération d'un secteur qui concerne une grande partie de l'économie (...)." ²⁰*

Un certain nombre de pays et de régions ont d'ailleurs élaborés des stratégies logistiques. Plusieurs exemples sont décrits en détail dans SAVY (2015), comme l'Italie, la Grèce, l'Allemagne et plus récemment la France²¹ qui ont élaboré des plans d'action de dimension stratégique. On peut également citer les cas du Maroc et plus récemment de la Tunisie, qui ont élaboré ou sont en train d'élaborer des stratégies aux multiples dimensions, qui comprennent le développement de plateformes logistiques. SAVY recense également quelques démarches au niveau régional, comme à Lyon ou en Bretagne, en France.

Dans certains cas, ces stratégies s'appuient ou s'accompagnent sur des observatoires de la logistique, qui ont comme objectif à la fois d'identifier les enjeux qui doivent faire l'objet d'actions mais aussi de mesurer à la fois la mise en oeuvre et les effets des stratégies. L'observation de la logistique est un sujet complexe, notamment dans le choix des indicateurs, qui doivent couvrir de nombreuses dimensions, dans la nécessité d'être à la fois synthétique et pertinent alors même que les objectifs ne sont pas toujours définis, et dans la capacité à percevoir des changements qui peuvent être rapides. Les rapports OECD/ITF (2016) et CGEDD ET CGEIET (2016) évoquent le sujet de la mesure de la performance logistique, En France, un observatoire régional de la logistique est en cours d'établissement dans la Région Grand-Est et a déjà donné lieu à un travail d'identification d'indicateurs ; un indicateur national est également en cours de constitution, en même temps que les outils de

20. *"There is thus an expanding need for consistent strategies that cut across the numerous policy dimensions, especially in high- and middle-income countries. Policy makers in large emerging or developed economies have to deal not so much with border issues, such as in low performance countries, but with the internal performance of domestic supply chains (a reality not well captured in the main LPI index). Comprehensive strategies increasingly focus not merely on looking at the source of costs, but on steering a sector with a large footprint in the economy (...)"*, traduit par l'auteur.

21. ROYAL, MACRON et VIDALIES (2016)

gouvernance de la Stratégie France Logistique se mettent en place.

2.6 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est d'identifier les grands enjeux du transport de fret et de la logistique et les motifs à mettre en oeuvre des politiques publiques. On en rappelle ici quelques éléments importants :

- Le transport de fret et la logistique sont au coeur d'un système de contraintes fortes et souvent contradictoires : une exigence de performance très élevée, une exigence de diminution des impacts environnementaux, une concurrence avec la mobilité des personnes pour l'accès aux infrastructures de transport, et une concurrence pour le foncier avec les autres modes d'occupation du sol.
- Les enjeux sont différenciés en fonction des territoires, et ceux-ci pourront adopter des objectifs différents selon qu'ils veulent renforcer la compétitivité de leurs entreprises, devenir de grandes régions logistiques, privilégier le cadre de vie de leurs habitants, etc.
- Les externalités négatives sont plutôt bien connues et ont fait l'objet de nombreux travaux. Ce n'est pas le cas des externalités positives, qui seront abordées un peu plus loin dans ce rapport.
- Du point de vue de l'action publique, le transport de fret et la logistique sont concernés pas de très nombreuses règles relevant de très nombreux acteurs qui ne se concertent pas toujours. Cette complexité des règles existantes doit être prise en compte dans l'élaboration de nouvelles politiques, et peut être par ailleurs facteur de perte de compétitivité pour les entreprises.
- De grandes transformations technologiques et économiques traversent les secteurs du fret et de la logistique. Il peut s'agir tant d'automatisation que de numérisation, de désintermédiation, etc. Il est difficile pour les puissances publiques et les acteurs existants de se positionner face à ces nouvelles évolutions.
- Le réchauffement climatique est un enjeu spécifique : le transport de marchandises contribue fortement aux émissions de gaz à effet de serre et la pression pour la réduction de ces émissions s'accroîtra progressivement. Par ailleurs, l'efficacité des chaînes logistiques sera certainement négativement influencée par les impacts du changement climatique, et notamment les événements extrêmes.

Après le balayage thématique réalisé dans ce chapitre, forcément trop rapide, la suite du mémoire aborde des questions plus techniques d'analyse de la structure des coûts des chargeurs et des transporteurs.

Chapitre 3

La structure des coûts des transporteurs

Les transporteurs combinent des ressources (infrastructures, véhicules, énergie, ressources humaines) afin de produire des prestations de transport, c'est-à-dire de déplacer des envois d'un point à un autre dans certaines conditions. Comme indiqué dans le Chapitre 1, les prestations de transport sont d'une grande variété. Cette variété peut tenir aux technologies (compatibilité des matériels employés avec le type de marchandise transporté), aux caractéristiques physiques de la prestation (distance, dimensions et poids de l'envoi transporté), au niveau de service (vitesse, flexibilité, fiabilité, etc.), ainsi qu'aux prix.

De fait, la structure des coûts du transport de marchandises est très complexe. Dans ce chapitre, on en illustre partiellement la richesse et la complexité par la présentation d'un certain nombre de modèles simples ou de quelques analyses empiriques, dont l'objectif est à chaque fois d'éclairer un aspect particulier de la structure des coûts et de la formation des prix.

Le premier modèle développé dans ce chapitre est un modèle de formation des prix de transport d'un envoi de taille donné (Section 3.1). Malgré sa simplicité, il montre l'importance de différents paramètres fondamentaux comme les taux de remplissage des véhicules, le coût et la durée des opérations de chargement et déchargement, la densité spatiale de la demande, la probabilité de retour à vide, et le conditionnement. Ce modèle est étendu qualitativement à la comparaison de deux modes de transport en termes de coût, pour des distances et tailles d'envoi différentes. Il montre clairement que la comparaison entre deux modes ne saurait se réduire à la comparaison de leurs coûts unitaires en € par tonne-kilomètre.

La seconde partie de ce chapitre aborde le sujet de la structure spatiale des opérations et de la structure des coûts et des prix (Section 3.2). Le transport de fret est par essence une production jointe : il n'est pas possible de produire du transport de A vers B sans en produire de B vers A , quitte à passer par C entretemps. Et, pour autant, les demandes peuvent être très asymétriques. Un modèle simple de fret retour montre que l'équilibre offre-demande se comporte de façon particulière dans un tel contexte, et que le lien entre coût et prix

devient complexe et non trivial. Un second modèle compare deux modes de transport ayant des structures de coût différentes. Le second mode implique des ruptures de charge dans des terminaux : ces terminaux ont donc, en quelque sorte, des zones de pertinence ; mais le modèle montre qu'il n'est pas possible d'associer simplement une zone de pertinence définie, par exemple, par un rayon à un terminal.

La troisième partie de ce chapitre (Section 3.3) aborde plus directement la question du groupage-dégroupage et de la massification. Elle procède en deux temps, premièrement via un modèle relativement simple de tournée, qui permet d'identifier les paramètres économiques déterminant la pertinence de ce type d'opération, et aussi les envois le plus susceptible d'être concernés par de telles opérations. Ensuite, la question plus globale de la massification et de la multimodalité est posée. Il s'agit d'un sujet très complexe, avec des enjeux très importants en termes d'aménagement du territoire, notamment en ce qui concerne les infrastructures portuaires et aéroportuaires, et leurs connexions avec leurs hinterlands.

Enfin, un modèle simple de dimensionnement de flotte est présenté (Section 3.4). Ce modèle introduit deux notions fondamentales, que sont d'une part le caractère aléatoire de la demande pour un transporteur, et les exigences des clients en termes de niveau de service (ici, la capacité à effectivement pouvoir fournir une prestation pour laquelle le transporteur s'est engagé). Le modèle illustre la difficulté de devoir s'équiper en capitaux (ici : des véhicules) et donc en capacité de production fixée alors que la demande est aléatoire. Les conséquences en termes de structure des coûts sont étudiées. Le modèle permet de montrer une caractéristique importante de l'économie du transport de marchandises : une même prestation, un même contrat, peuvent avoir une valeur très différente selon les transporteurs qui vont envisager de la réaliser, en fonction de leurs autres activités. Il démontre aussi l'importance des poids relatifs des coûts fixes (coûts de capitaux) et des coûts variables (coûts d'exploitation).

3.1 Un premier modèle des coûts

Le premier modèle présenté dans ce chapitre a comme objectif de montrer avec une représentation très simple comment les transporteurs combinent leurs ressources afin de produire des prestations de transport de marchandises. Le modèle considère le transport d'un ensemble de n_s envois de poids $\{s_1, \dots, s_{n_s}\}$, par un transporteur, d'une zone A à une zone B séparées par une distance d , comme indiqué dans la Figure 3.1. Les envois sont chargés en A au sein d'un même véhicule qui rejoint ensuite une zone B , située plus loin, via un mouvement de traction, puis y décharge les envois à leurs destinations respectives.

Ces opérations sont réalisées avec un unique mode de transport, et sans transbordement. Il s'agit donc d'un fonctionnement de type transport en trace directe, sans passage par une plateforme de transbordement, et avec une cer-

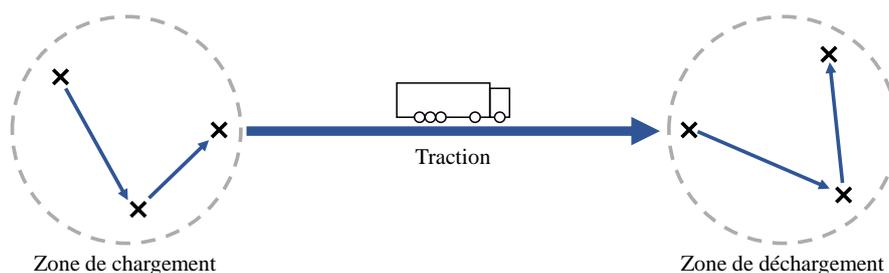


FIGURE 3.1 – Description des opérations de transport, cas simple, sans rupture de charge.

taine régularité des opérations locales. En routier on parlera de transport en lot partiel ou complet (selon que le véhicule transporte plusieurs ou un seul envoi). Le fonctionnement avec passage par des plateformes de transbordement est différent, et plus souvent utilisé pour des envois plus petits.

Le poids total des envois est :

$$S = \sum_{i=1}^{n_s} s_i.$$

Le transporteur met en oeuvre quatre types de ressources pour réaliser ces opérations :

- l'infrastructure,
- l'énergie,
- des ressources humaines,
- un véhicule, de capacité K [t], circulant à la vitesse moyenne v [km/h].

A ces ressources correspondent des coûts : de façon très simplifiée, on considère qu'une partie de ces coûts est proportionnelle aux distances parcourues : c_d [€/km]. Cela comprend le coût de l'énergie, l'usure du véhicule, et le droit d'accès éventuel à l'infrastructure. L'autre partie des coûts est proportionnelle au temps d'utilisation des véhicules : c_h [€/h]. Il comprend le coût de possession amorti du véhicule¹, le coût des ressources humaines, et la part du coût d'exploitation du véhicule dépendant du temps d'utilisation. On raisonne ici en assimilant les coûts liés à la distance aux coûts liés au temps, il y a une hypothèse implicite de vitesse moyenne stable.

On verra dans les sections suivantes comment la structure des coûts est modifiée par la présence de ruptures de charge, monomodales (Section 3.3) ou multimodales (Section 3.2.4), ou lorsqu'on prend en compte la nécessité pour le transporteur de minimiser son taux de circulation à vide, par exemple en trouvant du fret retour (Section 3.2.1). La distance d'accès entre deux points,

1. Le coût d'achat du véhicule est un coût fixe, mais on suppose ici que le transporteur l'a financé par emprunt, location, ou autre contrat de ce type, ou qu'il aurait pu le faire. D'autre part, cela revient d'une certaine façon d'un réel marché d'occasion et que le transporteur peut se séparer du véhicule s'il n'en n'a plus besoin. On relâche en partie ces hypothèses dans la Section 3.4.

en zone A ou B est considérée comme fixée, on examinera comment relâcher cette hypothèse plus loin dans le Chapitre 5.

On considère donc que pour chacun des n_s envois, il y a un mouvement d'approche d'une longueur moyenne d_a au lieu de chargement et au lieu de déchargement, et que les opérations de chargement et de déchargement durent t_l [h] en moyenne. Le temps pris par le mouvement d'accès pour chaque envoi est d_a/v .

En conséquence, le coût total des chargements et déchargements est :

$$C_l(\{s_i\}_i) = 2n_s \left(t_l + \frac{d_a}{v} \right) c_h + 2n_s d_a c_d,$$

Les véhicules eux-mêmes ont un taux de remplissage moyen λ_s en charge, et un taux de parcours à vide λ_e . Il faut donc approximativement $S/\lambda_e \lambda_s K$ véhicules pour les transporter. Le coût du transport de la zone A et B est alors :

$$C_d(\{s_i\}) = \frac{S}{\lambda_e \lambda_s K} \left(\frac{c_h}{v} + c_d \right) d.$$

Le coût complet, somme de C_l et C_d , est :

$$C(\{s_i\}) = 2n_s \left(t_l + \frac{d_a}{v} \right) c_h + 2n_s d_a c_d + \frac{S}{\lambda_e \lambda_s K} \left(\frac{c_h}{v} + c_d \right) d. \quad (3.1)$$

Le coût marginal d'un envoi donné (la quantité par laquelle augmente le coût complet si on y ajoute un envoi de taille s) s'en déduit :

$$c(s) = 2 \left(t_l + \frac{d_a}{v} \right) c_h + 2d_a c_d + \frac{s}{\lambda_e \lambda_s K} \left(\frac{c_h}{v} + c_d \right) d. \quad (3.2)$$

Si l'on simplifie, en ne faisant apparaître que la taille d'envoi, on obtient :

$$c(s) = b + cs, \quad (3.3)$$

avec b et c dépendant de l'ensemble des paramètres introduits :

$$\begin{cases} b &= 2 \left(t_l + \frac{d_a}{v} \right) c_h + 2d_a c_d, \\ c &= \frac{1}{\lambda_e \lambda_s K} \left(\frac{c_h}{v} + c_d \right) d. \end{cases} \quad (3.4)$$

En d'autres termes, le coût marginal de transport d'un envoi de taille s entre la zone A et la zone B comprend un coût fixe, indépendant de la taille de l'envoi, lié au mouvement d'approche et aux opérations de chargement et déchargement, et un coût variable, dépendant de la taille de l'envoi, qui concerne le trajet permettant de passer d'une zone à l'autre. La forme de la fonction de coût, et sa relation avec la taille d'envoi, est illustrée par la Figure 3.2.

Cette propriété de la fonction de coût joue un rôle essentiel à la fois dans le choix de la taille des envois par les chargeurs et dans leur choix de type d'opération de transport (et notamment le mode).

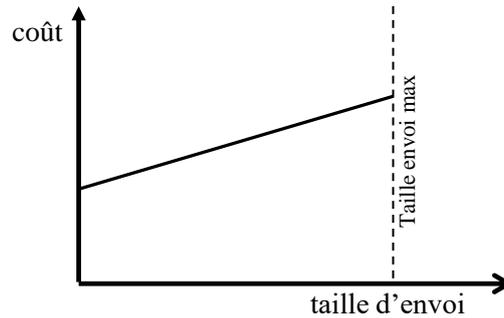


FIGURE 3.2 – Evolution du coût du transport avec la taille d'envoi.

Non linéarité des coûts. Malgré sa simplicité, le modèle développé ci-dessus montre que l'hypothèse, souvent faite, selon laquelle les prix en transport de fret sont proportionnels au tonnage transporté et à la distance parcourue, est fautive. Empiriquement, on observe en réalité que les prix unitaires ont tendance à décroître avec la distance, jusqu'à une certaine limite, comme le montre la Figure 3.3, construite à partir des données ECHO (enquête chargeur réalisée en France entre 2004 et 2005, GUILBAULT et al. (2006) ; cette enquête fournit des données de prix mais pas forcément avec une précision parfaite). Sur cette figure, chaque point correspond à un envoi. Seuls ont été affichés les envois de plus de 10 tonnes transportés par route sans rupture de charge, afin d'isoler en partie l'effet de la distance, et pour ne prendre en compte qu'un type donné d'opération de transport.

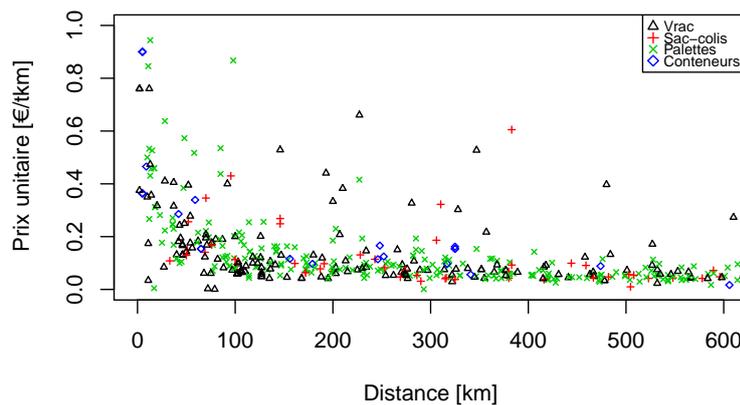


FIGURE 3.3 – Prix unitaire du transport routier de fret, fonction de la distance, cas des envois de plus de 10 tonnes. Données ECHO 2004-2005.

On observe par ailleurs que les prix sont dispersés autour de leur valeur moyenne, dispersion d'autant plus forte que les distances parcourues sont faibles. Une des nombreuses causes qui peuvent expliquer cette variabilité est

l'équilibre de la demande de transport entre la zone de départ et la zone d'arrivée de chacun des envois, et la plus ou moins grande facilité pour le transporteur de trouver du fret retour. La section suivante étudie ce second phénomène, et ses implications en termes de coûts et de prix.

Le conditionnement de la marchandise est également une source d'hétérogénéité des prix. On remarque par exemple que la variabilité des prix est plus importante pour le transport de vrac : il s'agit d'un domaine dans lequel les matériels de transport sont spécifiques aux marchandises transportées, et il est plus difficile de trouver du fret retour que, par exemple, pour le transport de palettes.

Enfin, il y a une interaction complexe entre taille d'envoi, taux de remplissage, et prix. Dans le modèle présenté dans cette section, le taux de remplissage est considéré comme fixe, et indépendant de la taille d'envoi. Or la réalité est plus complexe (F. COMBES, 2013b). Ainsi, un chargeur qui propose à un transporteur de prendre en charge un envoi qui fait 30% de la capacité d'un véhicule laisse un large champ d'opportunités au transporteur pour trouver d'autres envois qui permettront de bien remplir son véhicule. Si l'envoi fait 85% de la capacité du véhicule, le transporteur devra soit attendre un autre envoi dont la taille soit inférieure à 15% du véhicule, soit faire partir le véhicule. Le prix que le transporteur fera payer au chargeur pour cet envoi sera donc plus élevé que celui prédit par le modèle proposé ci-dessus, et proche du prix du transport pour un camion complet. A l'inverse les prix pour les petits envois pourront être un peu plus faibles.

On peut noter que pour obtenir ce résultat, il est nécessaire de modéliser le transport d'envois de tailles différentes comme des *marchés distincts*, caractérisés comme des alternatives substituables pour les chargeurs, et comme des produits *jointes* du point de vue des producteurs, c'est-à-dire les transporteurs². Dans ce cadre méthodologique, il n'est pas possible d'isoler le coût de transport d'un envoi : le coût de transport d'un envoi n'a de sens que si l'on considère l'opération de transport de l'envoi parmi toutes les autres opérations que réalise le transporteur. De façon plus générale, il faut retenir cette idée que chaque transporteur réalise un grand nombre d'opérations de transport, et qu'une opération de transport additionnelle peut être peu coûteuse ou très coûteuse selon qu'elle s'inscrit bien ou non dans le reste des opérations de transport. On retrouvera cette idée un peu plus loin avec la question du fret retour, dans la Section 3.2.1.

Coûts relatifs de différents modes de transport. Sur la base du modèle élaboré dans cette section, il est possible de comparer différents modes de

2. C'est particulièrement compliqué, car l'optimisation du remplissage des véhicules, qui est l'essence du processus de consolidation, même sous ses formes simples, est un problème complexe. Il s'agit du problème classique de recherche opérationnelle dit de *bin-packing*, et est rapidement très compliqué à résoudre si l'on pose des hypothèses un tant soit peu réalistes. Dans F. COMBES (2013b), le problème est fortement simplifié, afin de pouvoir construire un modèle micro-économique avec équilibre offre-demande tout en limitant la complexité mathématique.

transport. Afin que le raisonnement soit aussi simple que possible, on considère ici une situation de transport direct, de point à point, d'un unique chargement. Cela revient à adapter le système d'équations (3.4) en posant $d_a = 0$ (on ne distingue pas de distance d'accès spécifique), et $\lambda_s = 1$ (on ne prend pas en compte les possibilités de consolidation, λ_s n'a plus de signification). On distingue chaque mode par l'exposant m . Les coefficients b^m et c^m qui caractérisent les coûts du mode m sont donc :

$$\begin{cases} b^m &= 2t_l^m c_h^m, \\ c^m &= \frac{1}{\lambda_e^m K^m} \left(\frac{c_h^m}{v^m} + c_d^m \right) d. \end{cases} \quad (3.5)$$

Deux modes de transport n'auront pas les mêmes coefficients, et donc pas la même structure de coût. Si on compare un mode léger l et un mode lourd h (par exemple l'aérien et le maritime à l'international, ou le routier et le ferroviaire en transport terrestre), les coûts du mode léger seront en principe inférieurs à ceux du mode lourd³. Ce sera le cas du coût horaire ($c_h^l < c_h^h$) et du coût kilométrique ($c_d^l < c_d^h$). On peut s'attendre à ce que la vitesse du mode léger soit supérieure ($v^l > v^h$) mais, dans le cas du routier et du ferroviaire par exemple, ce n'est pas garanti. On s'attend également à ce que les temps de chargement du mode lourd soient supérieurs à ceux du mode léger $t_l^l < t_l^h$). Enfin, la capacité du mode lourd est généralement nettement supérieure à celle du mode léger ($K^l < K^h$).

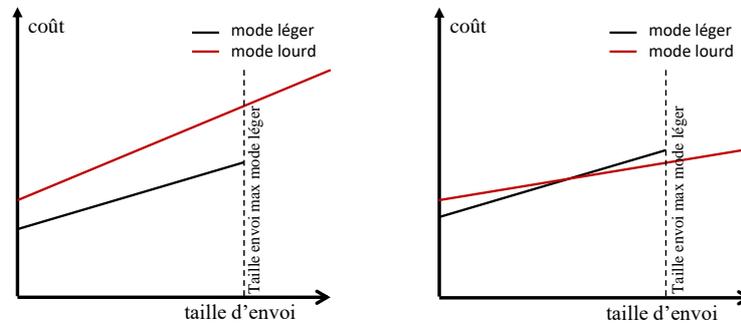
Dans ces conditions, la composante fixe (indépendante de la taille de l'envoi) du coût de transport sera systématiquement plus élevée pour le mode lourd que pour le mode léger $b^l < b^h$. Quant à la composante variable (dépendante de la taille de l'envoi), différents cas de figure sont possibles. Si le différentiel de capacité est suffisant pour compenser les différences entre les autres paramètres, alors on aura $c^l > c^h$, auquel cas, au delà d'une certaine distance et d'une certaine taille d'envoi, le mode lourd sera moins cher que le mode léger.

La Figure 3.4 illustre le raisonnement ci-dessus. Les deux premiers graphiques montrent deux configurations distinctes. Dans le premier cas, les deux coefficients b et c sont plus élevés pour le mode lourd que pour le mode léger, et le mode lourd n'est donc jamais moins cher, quelle que soit la taille d'envoi⁴. Dans le second cas, le coefficient c est plus élevé pour le mode léger que pour le mode lourd : au delà d'une certaine taille d'envoi, le mode lourd est moins cher. Le diagramme (b) montre quel mode est le moins cher en fonction de la distance et de la taille d'envoi, pour un certain jeu de paramètres : on constate

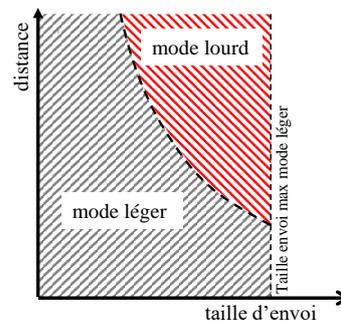
3. C'est une hypothèse relativement peu risquée pour les coûts de capitaux ; les modes lourds mettent en oeuvre des véhicules plus gros et plus chers. C'est un peu moins évident pour les coûts d'exploitation et d'accès aux infrastructures.

4. Il faut interpréter avec précaution ce qui se passe pour les envois dont la taille dépasse la contrainte de capacité du mode léger. Il est vrai qu'un envoi de 40t peut être transporté en ferroviaire mais pas en routier (à moins de le diviser en deux cargaisons de 20t, si c'est possible). En réalité, il ne faut pas considérer que la taille d'envoi est une variable exogène : elle est déterminée en même temps que le choix de mode. Le Chapitre 4 revient sur cette question.

que la taille d'envoi qui départage le mode léger et le mode lourd décroît quand la distance augmente. Cela dit, le prix n'est pas le seul critère de décision des chargeurs pour le choix du mode de transport ; on reviendra sur ce sujet dans le Chapitre 4.



(a) coûts des modes légers et lourds en fonction de la taille d'envoi dans deux configurations distinctes



(b) mode de coût minimal en fonction de la taille d'envoi et de la distance

FIGURE 3.4 – Coûts relatifs de deux modes en fonction de la taille d'envoi et de la distance

Il faut retenir de ces développements que la compétitivité d'un mode de transport ne peut pas se mesurer à son seul coût par tonne-kilomètre ; on ne peut pas non plus simplement départager les modes par des "distances pertinentes". Beaucoup d'autres paramètres entrent en jeu, dont un certain nombre dépendent de la géographie de la demande de transport.

3.2 Structure spatiale des opérations, structure des coûts

Dans la section précédente, on ne considère que des envois se déplaçant d'une zone A à une zone B (et les conducteurs non plus). En réalité, les véhicules ne peuvent pas éternellement aller de A vers B sans jamais en revenir. De façon générale, un des problèmes importants que doivent gérer les transporteurs est d'adapter le mieux l'offre à la demande, en plaçant les véhicules

aux bons endroits, aux bons moments. Du point de vue économique, c'est un problème de *production jointe*, comme indiqué dans le Chapitre 1. Cela a des conséquences très complexes en termes de coûts, et en termes de prix.

3.2.1 Fret retour : coûts joints, équilibre de marché

Dans cette section, un modèle très simple de fret retour illustre les mécanismes à l'oeuvre. Le modèle présenté ici est développé dans FELTON (1981). Il s'agit d'un modèle dans lequel un transporteur est présent sur une liaison entre deux zones A et B , et ses véhicules font l'aller retour entre les deux. On ne considère ici que des envois complets : chaque véhicule ne transporte qu'un envoi. La demande de transport de A vers B (resp. de B vers A) est la quantité $D_A(p_A)$ (resp. $D_B(p_B)$) où p_A (resp. p_B) est le prix de transport de A vers B (resp. de B vers A .)

On cherche l'équilibre de marché en concurrence parfaite dans ces conditions. Cela implique premièrement que le transporteur considère les prix comme donnés, deuxièmement que son profit marginal est nul, troisièmement que l'offre et la demande sont égales.

Avec ces hypothèses, la seule décision que peut prendre le transporteur est la quantité d'allers-retours qu'il peut opérer entre A et B . On considère que pour chaque envoi transporté correspond un coût de chargement c_l (qui comprend le mouvement d'approche, l'immobilisation du véhicule, le travail du conducteur, etc.) Le coût de la traction entre A et B est noté c_d .

Si le transporteur assure n allers-retours entre les deux zones et que l'offre et la demande sont équilibrés (et donc qu'aucun véhicule ne circule à vide), son profit sera :

$$\pi(n) = (p_A + p_B)n + (2c_l + 2c_d)n.$$

La condition de profit marginal nul donne donc :

$$p_A + p_B = 2c_l + 2c_d. \quad (3.6)$$

On constate que cette condition ne suffit pas à déterminer les prix, mais seulement la somme des deux. Pour résoudre complètement le problème, il est nécessaire de faire intervenir explicitement la condition d'égalité de l'offre et de la demande : puisque l'offre est égale à la demande dans chaque sens et que *l'offre est la même dans les deux sens du fait de la structure de production jointe* on obtient la seconde condition :

$$D_A(p_A) = D_B(p_B) \quad (3.7)$$

Les équations (3.6) et (3.7) déterminent ensemble l'équilibre de marché. La mécanique est la suivante : le transporteur ne peut pas produire une opération de transport de A vers B sans produire une opération de B vers A . Il n'y a donc pas de sens à isoler une de ces deux opérations et à en calculer le coût marginal : seul le coût marginal de l'aller-retour compte, et il faut que la

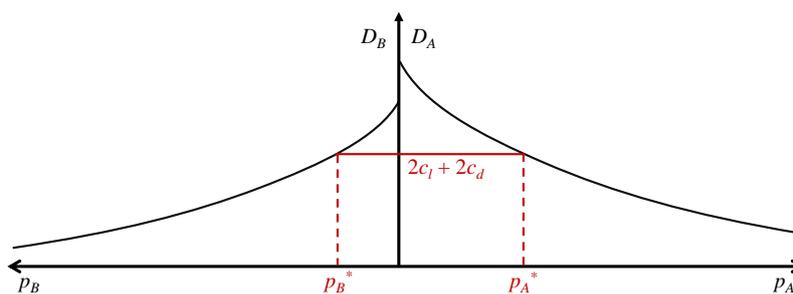


FIGURE 3.5 – Fret retour : prix et quantités à l'équilibre (à partir de FELTON, 1981)

recette perçue par le transporteur sur l'aller-retour couvre ses coûts. La Figure 3.5 illustre graphiquement la solution du problème.

On observe qu'il n'est pas nécessaire que le prix dans un sens soit égal au prix dans l'autre sens, bien au contraire : on constate d'ailleurs, même dans ce cas très simple, que du fait de la structure de production jointe du transport de fret, *la relation entre coûts et prix est complexe*.

3.2.2 Le retour à vide

Jusqu'ici, on a supposé que l'offre et la demande étaient toujours égales. Mais ce n'est pas forcément le cas : si les courbes de demande dans un sens et dans l'autre sont très asymétriques, alors on peut se retrouver dans une situation où l'offre est supérieure à la demande dans un sens : il y aura alors une proportion de véhicules qui reviendront sans transporter de marchandise⁵. On est alors dans un cas limite de la concurrence parfaite, plutôt atypique, où un prix est contraint par une borne inférieure, et où l'offre et la demande diffèrent sur un marché. Paradoxalement, le caractère de production jointe, d'une certaine façon, semble disparaître. Le transporteur doit ici prendre deux décisions : en supposant que la demande est plus forte au départ de A , il doit

5. De toute évidence, le modèle présenté dans cette section est une simplification à visée essentiellement pédagogique. Mais sur ce point précis il est utile d'expliquer qu'en réalité, en transport routier en particulier, on va rencontrer trois types de situation. La première correspond aux flux véritablement déséquilibrés, comme un flux de produit chimique transporté dans des citernes spécifiques d'une usine à une autre. Dans un tel cas les camions feront l'aller plein, et souvent le retour vide (on remarque d'ailleurs que dans un tel cas, le taux de parcours à vide des véhicules peut approcher les 50%. Il serait pourtant peu pertinent de conclure à l'inefficacité du transport : report modal ou mutualisation n'y changeraient strictement rien.). La seconde correspond aux transporteurs qui vont faire effectuer à leurs camions des détours à vide, les plus courts possibles, afin de trouver du "fret retour" ; ce détour pourra être plus ou moins grand et le coût associé plus ou moins élevé. La troisième configuration consiste à envoyer le camion vers une destination tierce, avec un chargement qu'il aura trouvé à proximité de sa destination immédiate. Dans le troisième cas il faut particulièrement prêter attention aux chauffeurs, au nombre de jours qu'ils vont passer sur la route avant de pouvoir rentrer chez eux, etc.

décider le nombre d'envois n_A qu'il va charger en A , sachant qu'il faudra autant de véhicules qui feront l'aller-retour. Puis il doit décider le nombre d'envois n_B qu'il va charger en B , un nombre nécessairement inférieur au nombre d'envois qu'il va charger en A . Son profit est alors :

$$\pi(n_A, n_B) = p_A n_A + p_B n_B - (2c_d + c_l)n_A - c_l n_B.$$

La condition de profit nul implique que les prix d'équilibre sont les suivants :

$$\begin{cases} p_A = 2c_d + c_l, \\ p_B = c_l. \end{cases} \quad (3.8)$$

L'offre S_A de A vers B , somme de l'ensemble des offres de l'ensemble des transporteurs, est bien égale à la demande $D_A(p_A)$, tandis que dans l'autre sens, puisque $n_B < n_A$ pour chaque transporteur, on obtient bien $D_B(p_B) < S_B$.

Pour récapituler, dans une telle configuration, la demande est tellement déséquilibrée qu'à l'équilibre concurrentiel, et en supposant que le prix ne tombera jamais en dessous du coût marginal c_l , alors un chargeur souhaitant expédier un envoi de A vers B devra payer la totalité de l'aller-retour. La demande de B vers A ne sera pas suffisante pour remplir l'ensemble des camions (il y aura donc des camions circulant à vide), et le prix dans ce sens correspondra uniquement au coût marginal du mouvement d'approche et du chargement. La Figure 3.6 illustre cette seconde configuration.

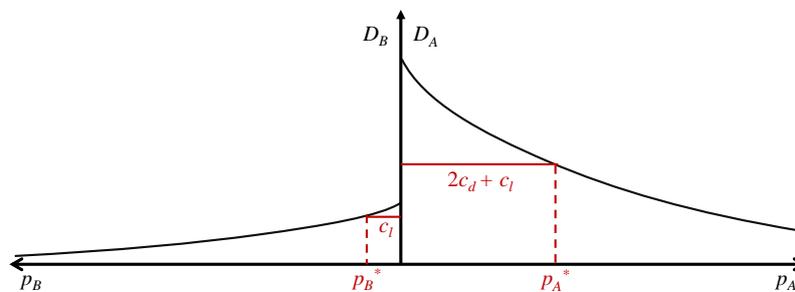


FIGURE 3.6 – Fret retour : demande asymétrique et retour à vide (à partir de FELTON, 1981)

L'influence qu'un déséquilibre de demande peut avoir sur les prix est bien illustrée par les prix de transport d'un conteneur depuis l'Asie vers les États-Unis d'Amérique et inversement (Figure 3.7). Le déséquilibre de la demande est accompagné d'un déséquilibre des prix qui peuvent être jusqu'à trois fois plus élevés pour transporter un conteneur de la Chine vers les États-Unis que dans l'autre direction, comme on l'observe à la fin des années 90. L'écart de prix est élevé, et relativement stable, à part dans les années 1995 à 1997 puis, plus récemment, en 2008, pendant la crise économique.

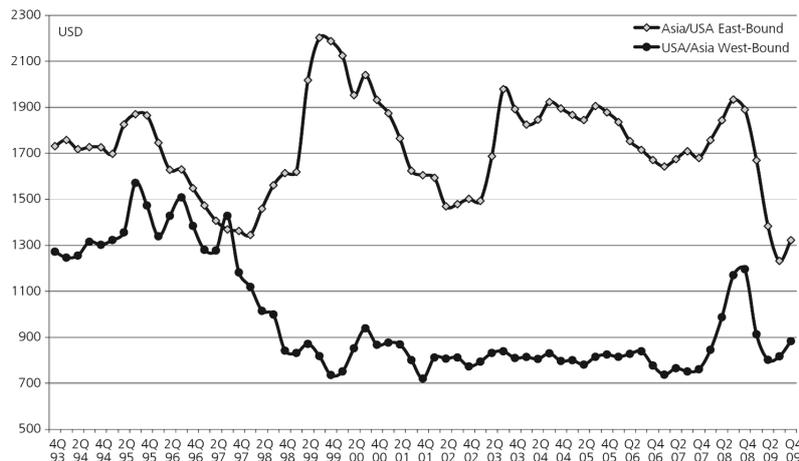


FIGURE 3.7 – Évolution des prix de transport d'un conteneur entre les États-Unis et l'Asie (HOFFMANN et ORTHLIEB, 2012)

3.2.3 Généralisation

Malgré ses mérites pédagogiques, le modèle ci-dessus reste très simplifié. Choisir des hypothèses plus réalistes nécessite de développer des modèles mathématiques bien plus complexes. On peut citer le travail de DE VANY et SAVING (1977), qui prend en compte le caractère aléatoire de la demande, et les temps d'attente des véhicules des transporteurs : combien de temps un transporteur va-t-il attendre qu'un fret retour soit disponible dans une zone avant de se résoudre à se déplacer à vide pour rejoindre une autre zone où la demande est plus forte ? Le modèle que les auteurs développent à l'appui de leur démonstration est mathématiquement complexe. On peut citer également l'ouvrage de JARA-DÍAZ (2007) qui étend le modèle précédent à un réseau entre trois zones A , B et C , entre lesquelles les transporteurs peuvent faire circuler leurs véhicules, et qui analyse la structure des coûts dans cette configuration.

Economies d'échelle et d'envergure, sous-additivité

Les concepts d'économie d'échelle et d'envergure et de sous-additivité sont utiles à l'analyse de la structure des coûts en économie, cette analyse étant nécessaire pour déterminer comment doit être régulé un secteur économique donné (par exemple, s'il doit être libéralisé ou non.) Les définitions rigoureuses sont les suivantes. Soit une combinaison de facteurs \mathbf{x} avec laquelle il est possible de fabriquer la combinaison de produits \mathbf{y} . Il y a économies d'échelle ou, de façon équivalente, rendements croissants si et seulement si pour tout réel $w > 1$ il existe un réel $v > w$ tel qu'avec $w\mathbf{x}$ il soit possible de produire $v\mathbf{x}$. Il y a économies d'envergure lorsqu'il est moins cher de produire différents biens ou prestations ensemble que séparément. Par exemple, avec deux biens en quantité y_1 et y_2 , et une fonction de coût C , il y a économie d'envergure quand $C(y_1, y_2) < C(y_1, 0) + C(0, y_2)$. La sous-additivité est une troisième propriété des fonctions

de coût : une fonction de coût est sous-additive si pour deux paniers de produits \mathbf{x} et \mathbf{y} on a $C(\mathbf{x} + \mathbf{y}) < C(\mathbf{x}) + C(\mathbf{y})$.

Lorsque, dans un secteur économique, les fonctions de coût sont sous-additives, il y a alors monopole naturel : une entreprise seule fera naturellement mieux que plusieurs entreprises, en particulier plusieurs entreprises en concurrence. Hors la sous-additivité des fonctions de coût est liée à la présence d'économies d'échelle et d'envergure (William J BAUMOL, 1977). Ces notions sont donc importantes dans la régulation des secteurs économiques. La Figure 3.8 ci-dessous présente (a) une fonction de coût mono-produit présentant des économies d'échelle, et (b) une fonction de coût multi-produit présentant des économies d'échelle et d'envergure. Ces deux fonctions sont sous-additives

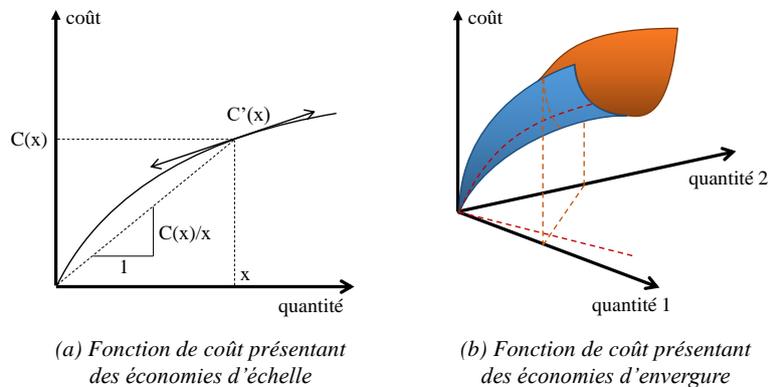


FIGURE 3.8 – Economies d'échelle, économies d'envergure

En transport, la présence d'économies d'envergure ne fait aucun doute : il est bien évidemment plus efficace qu'un transporteur fasse à la fois les allers-retour de A vers B et de B vers A que d'avoir deux transporteurs, chacun spécialisés dans une des deux directions, faisant le retour à vide. La question des économies d'échelle est plus complexe. Il y a certes des économies d'échelle très importantes en termes d'infrastructure, de taille de véhicule etc. mais, pour un mode de transport donné, et si le coût unitaire d'usage de l'infrastructure pour le transporteur est fixe, alors la fonction de coût du transporteur peut présenter des rendements constants. Par exemple, si l'on reprend l'équation (3.3) de coût de transport d'un envoi de taille s , on voit clairement que le coût de transporter deux envois identiques est deux fois le coût de transport d'un envoi. Cela peut paraître contre-intuitif : on pourrait affirmer que si les deux envois sont petits, il faut les mettre dans le même camion, et donc que les coûts d'exploitation du camion sont répartis sur les deux envois. Ce raisonnement n'est correct qu'en apparence : en réalité, les camions ne roulent pas vides (les transporteurs ne nous ont pas attendus pour optimiser l'utilisation de leurs véhicules), et s'ils roulent vides, ou pas complètement pleins, c'est le résultat de contraintes fortes qui empêchent les transporteurs de les remplir complètement. Il faut plutôt raisonner ainsi : s'il faut 10 camions pour transporter 100 envois, alors il en faudra 11 pour en transporter 110 : on est bien dans une situation de rendements constants, avec l'hypothèse

sous-jacente que le taux de remplissage est constant. De fait, plusieurs études tentant d'identifier la présence d'économies d'échelle dans le transport routier de marchandises concluent à leur absence (XU, WINDLE, GRIMM & CORSI, 1994).

Une autre difficulté intervient : par nécessité, les études portant sur la structure des coûts des transport, d'une part, traitent de façon globale des prestations qui sont en fait de natures très diverses ; d'autre part, ne prennent pas en compte les coûts portés par les chargeurs. En effet, comme cela a été expliqué dans le Chapitre 1, la structure des coûts du transport de fret a cette particularité que le transporteur ne porte pas l'ensemble des coûts ; une partie concerne directement le chargeur et n'apparaît pas dans la transaction. Il s'ensuit qu'il est possible qu'il n'y ait pas d'économie d'échelle dans la production du transport de marchandises, comme expliqué ici, mais *qu'il y ait des économies d'échelle une fois prise en compte la chaîne logistique dans sa globalité*. Ce phénomène et ses implications est analysé dans le Chapitre 5.

3.2.4 Ruptures de charge, aires de marché

Les modèles présentés jusqu'ici font l'hypothèse qu'un seul mode de transport est utilisé. Ils peuvent autoriser une forme limitée de consolidation dans laquelle les véhicules peuvent charger plusieurs envois à proximité de leur zone de départ avant de les livrer dans la zone de destination.

En réalité, pour les modes non routiers, il est rare qu'il soit possible de réaliser une opération de transport sans changement de mode. Qu'il s'agisse de transport ferroviaire ou de transport fluvial, les réseaux d'infrastructure ne maillent pas bien le territoire et il n'est pas rare que le camion soit utilisé sur une partie du trajet (en pré ou post-acheminement par exemple) pour que la marchandise puisse effectivement être acheminée de son point de départ à son point d'arrivée. Dans le domaine du transport sur longue distance, qu'il s'agisse de maritime ou d'aérien, il est également très souvent nécessaire d'acheminer les marchandises jusqu'aux ports et aéroports. Dans ces cas, différents modes de transport peuvent être mis en oeuvre.

Dans un tel cas, la structure spatiale des coûts est complexe et spatialement irrégulière. La théorie des aires de marché, développée dans NIÉRAT (1997), le démontre. Elle est présentée rapidement ci-dessous. On considère ici le cas d'une marchandise devant être acheminée d'un point A à un point B . Il y a deux options pour transporter cette marchandise :

- option *monomodale* l : un mode léger (peu cher mais de faible capacité) est utilisé de bout en bout,
- option *multimodale* $l + h$: un mode lourd (cher mais de plus forte capacité) est utilisé de A jusqu'à un point intermédiaire C . A cet endroit la marchandise est transférée sur un mode léger puis transportée jusqu'à la destination B .

On considère, pour simplifier, un envoi de taille fixée, correspondant à la capacité du véhicule léger K^l , sans consolidation. Le modèle de coût qui en résulte

est un cas particulier de l'équation (3.5). Il s'agit d'un modèle générique, plutôt bien adapté, par exemple à la comparaison du transport routier et du transport combiné rail-route⁶, mais qui a également une certaine portée pour d'autres types de concurrence entre monomodal et multimodal.

Le coût du transport par mode léger est alors fonction de la distance entre A et B :

$$c^l(A, B) = 2t_l^l c_h^l + \frac{1}{\lambda_e^l} \left(\frac{c_h^l}{v_l} + c_d^l \right) d_{AB}.$$

ou, pour simplifier (le taux de parcours en charge λ_e est délibérément conservé dans l'équation) :

$$c^l(A, B) = \beta_0^l + \frac{1}{\lambda_e^l} \beta_1^l d_{AB}. \quad (3.9)$$

Le coût de transport de l'option multimodale comporte trois composants : le coût du transport par le mode lourd, le coût de transport par le mode léger, et le coût de transfert modal (noté c_{trsf}) :

$$c^{l+h}(A, B) = 2t_l^h c_h^h + \frac{1}{\lambda_e^h} \left(\frac{c_h^h}{v_h} + c_d^h \right) d_{AC} + 2t_l^l c_h^l + \frac{1}{\lambda_e^{l'}} \left(\frac{c_h^l}{v_l} + c_d^l \right) d_{CB} + c_{trsf},$$

que l'on peut réécrire de façon simplifiée ainsi :

$$c^{l+h}(A, B) = \beta_0^{l+h} + \beta_2^{l+h} d_{AC} + \frac{1}{\lambda_e^{l'}} \beta_1^l d_{CB}. \quad (3.10)$$

On a clairement la propriété $\beta_0^{l+h} > \beta_0^l$: les coûts fixes (c'est-à-dire indépendants de la distance) sont supérieurs pour l'option multimodale que pour l'option monomodale, à causes des ruptures de charge plus nombreuses. Par ailleurs, comme l'indique NIÉRAT (1997), le taux de parcours en charge du mode léger est plus élevé dans le cas de l'option multimodale que dans le cas de l'option monomodale : $\lambda_e^{l'} < \lambda_e^l$: il souvent est plus difficile pour un transporteur de trouver du fret retour pour des opérations de pré- et post-acheminement de transport multimodal que pour du transport monomodal. En conséquence, et parce que $d_{AC} + d_{CB} > d_{AB}$, pour qu'il soit possible que le coût de l'option multimodale soit inférieur à celui de l'option monomodale il est indispensable d'avoir $\beta_2^{l+h} < \beta_1^l / \lambda_e^l$.

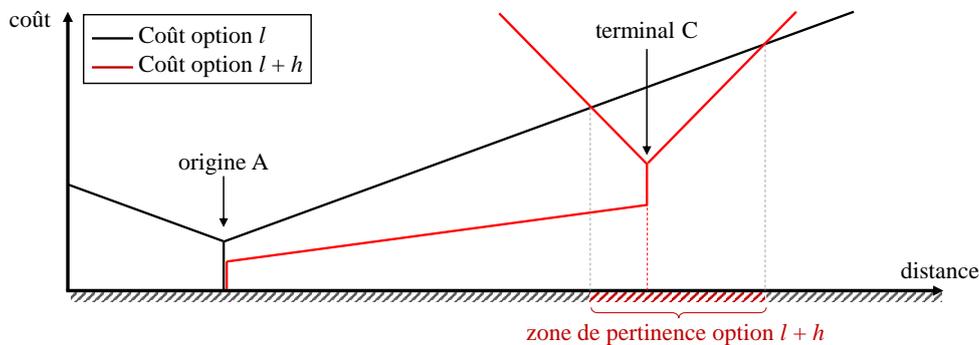
Si cette dernière condition se vérifie, et si la distance d_{AC} est suffisamment grande⁷, alors l'option multimodale est moins coûteuse que le transport

6. En toute rigueur il faudrait alors distinguer l'option monomodale d'une part et l'option *intermodale* d'autre part.

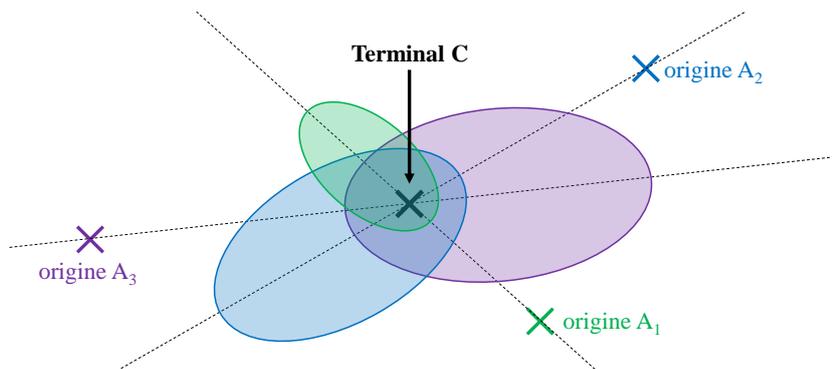
7. Précisément, il est nécessaire d'avoir $d_{AC} > (\beta_0^{l+h} - \beta_0^l) / (\beta_1 / \lambda_e^l - \beta_2^{l+h})$. En d'autres termes, plus les coûts liés aux ruptures de charge du transport multimodal sont élevés, plus est grande la distance en deçà de laquelle le transport multimodal n'est *jamais* pertinent. De même, si le coût kilométrique β_2^{l+h} du mode lourd n'est pas beaucoup plus faible que celui du mode léger β_1^l / λ_e^l alors la pertinence de l'option multimodale diminue.

monomodal dans certaines zones, autour du point de transfert C . Cette zone ressemble plus ou moins à une ellipse dont le grand axe est aligné avec la direction AC . Le point de transfert modal C n'est pas au centre de cette zone, et au-delà d'une certaine distance l'option de transport monomodale redevient pertinente.

La Figure 3.9 (a) illustre les coûts des deux options de transport en fonction de la distance et leurs zones de pertinence le long d'un axe passant par A et C , tandis que la Figure 3.9 b montre la forme des aires de marché. Elle montre en particulier que la forme de l'aire de marché dépend du point d'origine de la marchandise : l'aire de pertinence du terminal n'existe pas de façon autonome, elle dépend de la demande de transport.



(a) Zone de pertinence des deux options le long de l'axe AC



(b) Zone de pertinence depuis des origines différentes

FIGURE 3.9 – Zones de pertinence des différentes options de transport (à partir de NIÉRAT, 1997)

A partir du modèle présenté ci-dessus, on peut tirer plusieurs conclusions importantes du point de vue de la pertinence et de la compétitivité des orga-

nisations de transport multimodales :

- La pertinence d'un type de transport par rapport à un autre ne peut pas se résumer à un coût en euros par tonne-kilomètre, à une distance, ou à un rayon autour d'un terminal de transfert modal.
- Les zones de pertinence du transport multimodal sont localisées autour des terminaux, et dépendent de l'origine de la demande : la géographie de la pertinence du transport multimodal est complexe, et ne se résume pas à quelques paramètres de base comme, par exemple, un rayon théorique fixe d'attractivité des terminaux.
- La performance du transport en pré et post-acheminement est un déterminant essentiel de la compétitivité de la chaîne de transport multimodal. Or ce type de transport est plus contraint que le transport monomodal simple et son coût unitaire sera souvent plus élevé.

Il faut également rappeler que le modèle, par sa simplicité, présente de nombreuses limites dont certaines sont rappelées ci-dessous :

- Dans la chaîne de transport multimodale, seul le post-acheminement est pris en compte. En réalité, il peut y avoir pré-acheminement et post-acheminement : cela complique encore l'économie et la géographie de la compétitivité du transport multimodal.
- Le coût de transbordement est considéré comme fixe dans le modèle ; en réalité il comprend un coût *variable* d'exploitation (qu'il est acceptable de ramener à un coût fixe par opération) et un coût *fixe* de capital qui, s'il est ramené aux opérations, décroît avec le flux de marchandises traitées par le terminal. En d'autres termes, il y a un équilibre offre-demande dans lequel les économies d'échelle jouent un rôle. En termes d'aménagement du territoire, cela implique qu'il y a un équilibre à trouver entre un nombre trop faible de terminaux, qui limitent par construction le marché potentiel du transport multimodal, et un nombre trop élevé de terminaux, dont les coûts fixes vont menacer l'équilibre économique de l'ensemble.
- Le modèle ramène les coûts aux distances de façon très simplifiée. En réalité, les infrastructures de transport, temps de parcours, sillons etc. vont jouer un rôle déterminant dans les coûts des différents modes de transport et donc dans les zones de pertinence du transport monomodal et du transport multimodal.

Enfin, il faut rappeler qu'il ne s'agit ici que d'un simple modèle de coût, et que les chargeurs prennent plusieurs autres paramètres en compte, ainsi qu'expliqué dans le Chapitre 1. Le problème des préférences des chargeurs sera abordé dans le Chapitre 4. On se contentera de noter ici que les fréquences de service ont également leur importance dans les choix des services : il est important de proposer une fréquence élevée pour avoir une demande forte, or il faut pouvoir avoir une demande forte pour rentabiliser une fréquence élevée. Ici aussi, il y a un type d'équilibre offre-demande particulier, dans lequel les économies d'échelle jouent un rôle important. Il faut enfin prendre en compte les coûts d'infrastructure, qui ajoutent encore à la présence de rendements croissants

pour les modes concernés.

3.3 Massification : groupage, dégroupage, et tournées

Comme cela a déjà été expliqué dans les chapitres précédents, le transport de fret est soumis à un objectif double, et contradictoire, de performance et de réduction des coûts. La performance implique de pouvoir transporter des envois fragmentés vers des origines et destinations très dispersées, afin de correspondre au mieux aux besoins des chargeurs qui eux-mêmes souhaitent répondre au mieux aux besoins de leurs clients ; à l’opposé la réduction des coûts implique d’utiliser de gros véhicules et de les remplir au mieux. Le moyen pour les transporteurs de résoudre cette contradiction est la *massification* : il s’agit pour eux d’organiser leurs opérations de façon à ce que des petits envois n’allant pas aux mêmes endroits soient transportés ensemble.

Dans la Section 3.1 ci-dessus, une forme simple de massification a été présentée : un véhicule s’arrête à différents endroits d’une zone de départ donnée pour charger quelques envois, se déplace jusqu’à une zone de destination pour y livrer ces envois. Dans les faits, il existe des organisations plus complexes et plus efficaces pour les marchés qu’elles visent. On en présente ici de façon simplifiée les ressorts économiques fondamentaux, d’abord avec un modèle de coût des tournées en milieu urbain (Section 3.3.1) puis via une discussion qualitative des liens entre massification, structure des réseaux et aménagement du territoire (Section 3.3.2).

3.3.1 Modélisation des coûts du groupage-dégroupage

L’approche suivie ci-dessous consiste à développer un modèle très simple de coût de transport avec tournées de chargement et de livraison (organisation représentative, par exemple, du transport de colis ou d’envois de moins de 3 tonnes, par route ou par combinaison route-aérien). Dans le modèle, des envois d’une zone A sont rassemblés dans le cadre d’une ou plusieurs tournées, transportés vers une plateforme de groupage-dégroupage, triés puis chargés dans un véhicule qui les transportera vers une autre plateforme de groupage-dégroupage dans une zone B dans laquelle ils seront triés puis transportés à destination au cours d’une ou plusieurs autres tournées. Nous distinguons de façon classique (voir par exemple AMBROSINI, ROUTHIER et TOILIER, 2004) les mouvements d’approche (les mouvements réalisés par les véhicules qui rejoignent la zone de livraison ou qui en reviennent) et les mouvements intermédiaires dans les tournées (mouvements séparant deux livraisons ou chargements consécutifs).

La séquence des opérations est décrite dans la Figure 3.10. On y voit en rouge un envoi, qui va effectivement de l’origine à la destination. On y voit également, en gris, d’autres véhicules : les différents envois représentés dans la figure vont vers des destinations très diverses, c’est pour cela qu’ils sont triés

dans les plateformes de groupage-dégroupage, puis acheminés par des véhicules distincts. En effet, lorsqu'il y a massification, le transport d'un envoi ne peut pas s'appréhender seul : il s'agit d'une prestation réalisée en même temps que bien d'autres, dans le cadre d'un ensemble souvent vaste d'opérations.

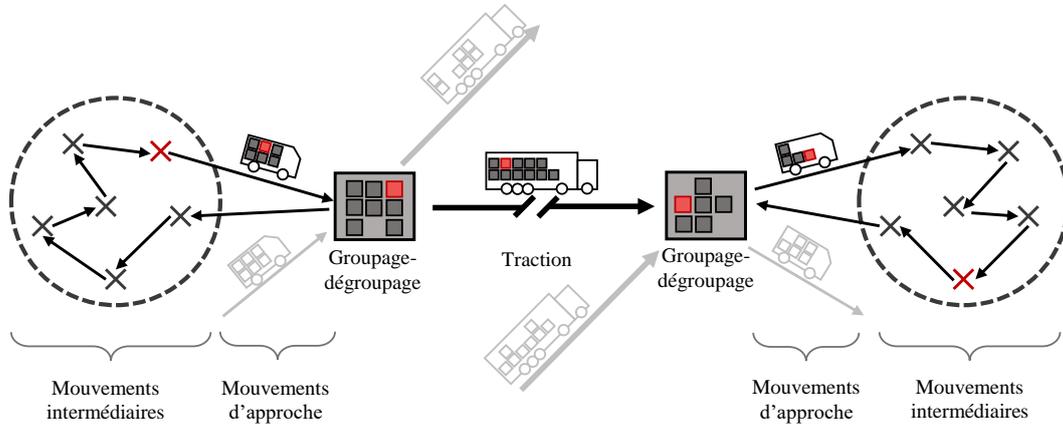


FIGURE 3.10 – Une organisation possible du transport avec groupage-dégroupage

Modélisation des coûts des tournées. Le modèle présenté ci-dessous a été développé dans F. COMBES (2016). Dans ce modèle, les envois sont d'abord chargés dans le cadre d'une tournée. Cette tournée passe par un certain nombre de points. Le nombre de ces points peut être limité par certaines contraintes :

- *Contrainte sur la durée de la tournée* : la tournée a une amplitude horaire limitée, due par exemple à la journée de travail du chauffeur. La tournée peut être limitée à une journée de travail pleine ou à une demi-journée de travail.
- *Contrainte sur le délai de livraison* : la tournée est limitée par le délai entre le moment où le client commande et celui où il est livré. S'il faut livrer en moins de deux heures, alors la tournée ne peut pas durer plus de deux heures, à moins d'être capable de charger le bon véhicule avec la bonne cargaison avant même que le client ait exprimé sa demande.
- *Contrainte sur la capacité du véhicule* : dans ce cas un peu différent, le nombre d'arrêts de la tournée est limité par le nombre d'envois que le véhicule peut transporter simultanément, soit en termes de poids, soit en termes de volume.

Par simplicité, on se concentre ici sur le premier cas : la tournée ne peut pas durer plus de H heures⁸. Considérons le cas d'une tournée de n opérations de chargement ou déchargement :

8. On laisse de côté la durée des opérations de chargement et déchargement à la plateforme de groupage-dégroupage. En réalité, il peut être nécessaire de prendre ce temps en compte si ce sont les conducteurs qui réalisent ces opérations, où s'ils doivent être présents pendant leur réalisation.

- *Durée des mouvements d'approche et de retour* : ce sont les mouvements qu'effectuent les véhicules entre la plateforme de groupage-dégroupage et la zone où se situent les points de chargement et de déchargement. Ils doivent parcourir une distance totale $2l$, à une vitesse v_a , pour un temps total de $2l/v_a$ aller-retour.
- *Déplacements entre deux opérations* : On note δ la distance moyenne entre deux lieux consécutifs de chargement ou déchargement dans une tournée. Ces mouvements sont parcourus à une vitesse moyenne⁹ v_z . Le temps total mobilisé par ces opérations est donc¹⁰ $n\delta/v_z$.
- *Chargements et déchargements* : les opérations elles-mêmes prennent du temps, même si les véhicules sont immobilisés. On note h la durée moyenne d'une opération. Le temps total dans la tournée est nh .

La durée de cette tournée est donc :

$$d = 2\frac{l}{v_a} + n\left(h + \frac{\delta}{v_z}\right).$$

Cette durée est contrainte et égale à H , le nombre d'opérations dans la tournée est donc :

$$n = \frac{H - 2l/v_a}{h + \delta/v_z}.$$

Nécessairement, $l \leq H v_a / 2$: sinon le véhicule n'a même pas le temps d'atteindre sa zone d'opération depuis la plateforme.

Il est maintenant possible de calculer le coût de la tournée. On en connaît la durée, il suffit d'en déterminer la longueur. Notons $H_r = H - 2l/v_a$ la durée "utile" de la tournée, celle que passe le véhicule dans sa zone d'opération. Notons également $h_o = \delta/v_z + h$ la durée unitaire d'une opération de chargement ou déchargement, y compris le mouvement associé. Alors $n = H_r/h_o$. Et la longueur d'une tournée est $L = 2l + n\delta$ c'est-à-dire :

$$L = 2l + \frac{H_r}{h_o}\delta.$$

Comme dans la Section 3.1, on distingue dans le coût du véhicule la composante horaire c_h et la composante kilométrique c_d . Le coût horaire de la tournée est simplement $c_h H$, tandis que le coût kilométrique est $c_d L$:

$$C_r = \left(2l + \frac{H_r}{h_o}\delta\right) c_d + c_h H.$$

9. On distingue donc la vitesse moyenne lors des mouvements d'approche de la vitesse moyenne inter-opération. L'idée est que les mouvements d'approche, plus longs, seront probablement effectués à plus grande vitesse car il sera possible pour les transporteurs d'utiliser les grands axes, tandis qu'il leur faudra emprunter des rues plus petites et sur lesquelles les vitesses sont plus faibles lorsqu'ils passeront d'un point de livraison à un autre, au cours de la tournée.

10. En toute rigueur il faudrait ne prendre en compte que $n - 1$ mouvements, toutefois cela alourdit les formules et n'apporte pas grand chose au modèle.

On peut également l'écrire sous forme d'un coût fixe et d'un coût proportionnel au nombre d'opérations H_r/h_o :

$$C_r = 2l \left(c_d + \frac{1}{v_a} c_h \right) + \frac{H_r}{h_o} \delta \left(c_d + \frac{1}{v_z} \right)$$

Il est instructif de se ramener à un coût unitaire, afin de comparer les coûts d'une organisation du transport de ce type avec d'autres organisations. Il s'agit du coût moyen $c_r = (h_o/H_r)C_r$, qui est égal au coût marginal¹¹ :

$$c_r = \frac{h_o}{H_r} 2l \left(c_d + \frac{1}{v_a} c_h \right) + \delta \left(c_d + \frac{1}{v_z} \right),$$

ou encore, en remplaçant h_o et H_r par les paramètres principaux du modèle :

$$c_r = \frac{h + \delta/v_z}{H - 2l/v_a} 2l \left(c_d + \frac{1}{v_a} c_h \right) + \delta \left(c_d + \frac{1}{v_z} \right) \quad (3.11)$$

Le coût unitaire est donc décroissant avec la taille de la tournée (le mouvement d'approche étant commun à toutes les opérations réalisées, plus celles-ci sont nombreuses, plus le coût unitaire décroît.) La taille de la tournée est elle-même régie par les paramètres du modèle.

De façon assez intuitive, on trouve que la sensibilité du coût de la tournée aux paramètres du modèle est la suivante :

- Le coût unitaire augmente avec la durée unitaire des opérations h , mais décroît avec la durée totale de la tournée H .
- Le coût unitaire augmente avec la distance inter-opérations δ , ainsi qu'avec la distance d'approche l .
- Le coût unitaire augmente avec les coûts d'exploitation du véhicule c_d et c_h .
- Le coût unitaire diminue avec les vitesses en approche v_a et en zone d'opération v_z .

On voit déjà se préfigurer des conclusions du point de vue de la pertinence économique de l'organisation en tournées. En particulier, il faut que la distance inter-opération δ soit suffisamment faible pour que la massification soit moins coûteuse que la trace-directe. On constate par ailleurs que puisqu'on a supposé que la contrainte de capacité était inopérante, la taille d'envoi n'influence pas le coût, à la différence du modèle de la Section 3.1. Ce modèle est étudié plus en détail dans le Chapitre 5, pour modéliser notamment le choix de localisation des entrepôts.

11. Il faut faire deux hypothèses pour avoir cette égalité. La première est que l'indivisibilité des ressources n'influence pas beaucoup le résultat. Compte-tenu du niveau de précision du modèle, il n'est pas très utile de chercher à relâcher cette hypothèse. La seconde hypothèse est que δ est constant : c'est un choix bien plus lourd de conséquence. En réalité, si la demande augmente, les chargements et déchargements seront plus nombreux dans une zone de taille donnée et δ diminuera. *Le coût marginal sera donc inférieur au coût moyen.* On revient spécifiquement sur les conséquences de ce résultat dans le Chapitre 5.

Pertinence économique du groupage-dégroupage : lorsque l'opération de transport d'un envoi implique du groupage-dégroupage, elle comporte typiquement cinq étapes dont deux passages dans des plateformes¹². Cela implique un coût supplémentaire.

En effet, notons c^X le coût de transport avec groupage-dégroupage. Le coût de la tournée a été calculé ci-dessous, et vaut c_r . Par simplicité, on suppose qu'il est le même dans la zone de départ et dans la zone d'arrivée. Notons c_m le coût complet de manutention dans la plateforme de groupage-dégroupage (qu'on suppose être un coût fixe par envoi) et c_t le coût de la traction.

Le coût complet de l'opération est alors :

$$c^X = 2c_r + 2c_x + c_t.$$

La question immédiate est : comment une telle opération peut-elle coûter moins cher que de ne pas passer par des plateformes de groupage-dégroupage ? En réalisant des opérations semblables à celles décrites dans la section 3.1, on ferait l'économie directe (et substantielle) de la construction et de la maintenance de ces plateformes, et du matériel et de la main d'oeuvre nécessaires aux opérations de manutention. Le coût d'une opération sans groupage-dégroupage est :

$$c^D = 2c_r^D + c_t^D$$

En réalité, deux configurations peuvent permettre d'obtenir $c_X < c_D$. La première est la *densité des opérations* : dans le cas sans rupture de charge (3.2), comme dans le cas avec rupture de charge (3.11), la distance entre deux points de chargement joue un rôle déterminant dans le coût de transport. Plus les opérations sont nombreuses, ou denses, dans le territoire concerné, plus le coût unitaire de transport sera réduit. Or la distinction majeure entre le cas sans rupture de charge et le cas avec rupture de charge est que dans le premier cas seule compte la densité des points de chargement des envois *qui vont vers une destination donnée*; tandis que dans le cas sans rupture de charge peu importe la destination. La densité d'opérations sera donc bien plus élevée dans le cas avec rupture de charge que dans le cas sans rupture de charge (Figure 3.11), avec ce que cela implique pour les coûts unitaires correspondants.

La raison pour laquelle les opérations avec groupage-dégroupage peuvent avoir un coût inférieur est que dans le cas avec rupture de charge, il est possible d'utiliser des véhicules différents pour les tournées de chargement et de déchargement et pour la traction, tandis que le même véhicule doit être utilisé pour l'ensemble des opérations lorsqu'il n'y a pas de rupture de charge. Ainsi, si l'on doit transporter de petits envois, il est possible, avec des ruptures de charge, de réaliser des tournées avec de petits véhicules, de trier et rassembler ces envois dans de grands véhicules qui achemineront les marchandises d'une plateforme à l'autre à un coût unitaire réduit grâce à leur grande capacité et à leur bon taux de remplissage. Dans le cas sans rupture de charge, un véhicule

12. On appelle ces plateformes les plateformes de *cross-docking*, ou *X-docking*, en anglais.

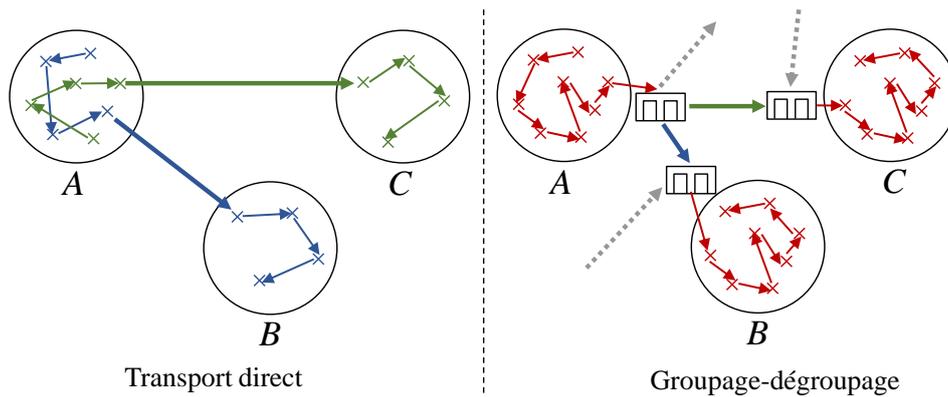


FIGURE 3.11 – Absence et présence d'opérations de groupage-dégroupage

d'une taille donnée doit être utilisé : il faut alors trouver un compromis entre la taille optimale pour les chargements et déchargement et pour la traction, compromis qui sera nécessairement moins adapté que ne le seront les différents véhicules du transport avec rupture de charge aux tâches auxquelles ils sont affectés.

L'organisation avec rupture de charge n'est cependant pas universellement meilleure que l'organisation sans rupture de charge. Les deux conditions qui vont naturellement rendre l'opération sans rupture de charge plus efficace économiquement sont :

- *Les gros envois* : pour que l'organisation avec groupage-dégroupage soit efficace, il faut qu'il y ait opportunité de consolidation. Plus les envois sont gros, moins l'avantage comparatif du groupage est élevé. A un certain point, le passage par une plateforme ne se justifie plus, il est moins cher de tout réaliser avec le même véhicule.
- *Les petites distances* : lorsque la distance entre l'origine et la destination est réduite, il peut être plus simple d'utiliser un petit véhicule pour faire directement le transport, plutôt que de passer par une plateforme de groupage-dégroupage. Les ruptures de charge rallongent les distances, et donc augmentent les coûts : ce surcroît de distance peut être acceptable économiquement lorsque la distance entre l'origine et la destination sont elles-mêmes éloignées, il l'est moins si elles sont proches. On peut par ailleurs imaginer qu'un envoi soit chargé et déchargé au cours de la même tournée, ou sans traction, si le transporteur est organisé de cette façon ; dans un tel cas les deux modèles se recouvrent.

La Figure 3.12 a été conçue à partir de l'enquête ECHO déjà citée précédemment. Elle montre 764 envois transportés par route en compte d'autrui, conditionnés en palettes, sacs ou colis¹³. Chaque envoi est repéré par la distance entre l'origine et la destination, en abscisse, et par le poids, en ordonnée. La couleur correspond au nombre de ruptures de charges : noir lorsqu'il n'y

13. Les deux autres conditionnements possibles : conteneurs, ou vrac, ont été éliminés car relevant de matériels de transport et d'organisations très différentes.

en n'a pas, rouge dans le cas où il y a une rupture de charge, vert s'il y en a plus. Selon cette figure, de façon générale, les envois plus légers sont transportés avec rupture de charge ; mais on semble observer un peu plus de transport sans groupage-dégroupage pour les petites distances. Ces observations sont cohérentes avec les explications données ci-dessus.

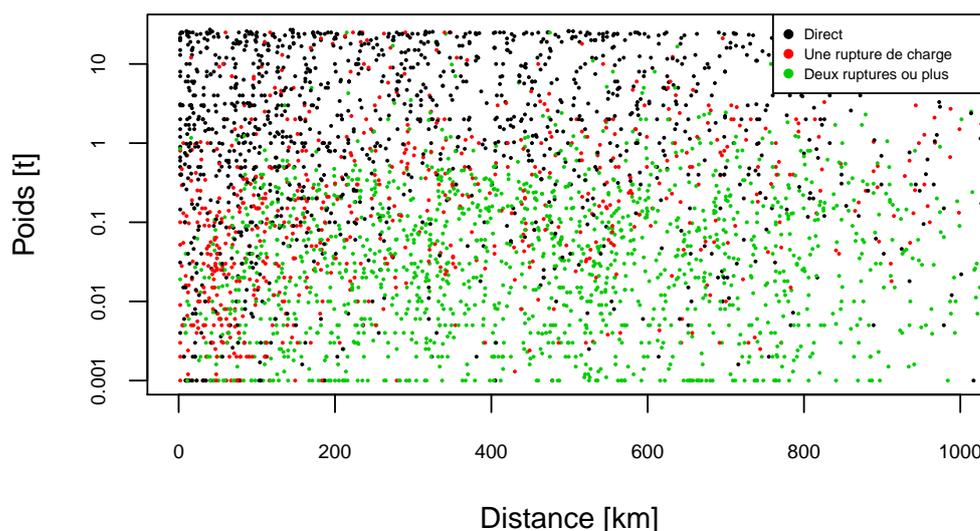


FIGURE 3.12 – Taille des envois, distance de transport, nombre de ruptures de charge. Données ECHO 2004-2005.

Dans cette section, nous n'avons pu qu'effleurer un sujet particulièrement complexe. Des variables de choix importantes pour les chargeurs n'ont pas été pris en compte, parmi lesquelles le temps de parcours, la fréquence, la flexibilité que les transporteurs sont capables d'offrir.

Les questions de tarification, et donc de coût perçus par les chargeurs, sont ici très importantes : les tarifs ne sont pas forcément simplement proportionnels aux poids et aux distances, au contraire¹⁴ (il n'est pas rare par exemple que, pour le transport de colis de moins de 30kg, il n'y ait qu'un tarif unique pour une large zone géographique). Les questions de structure des coûts des plateformes de groupage-dégroupage sont également importantes : des enjeux de coûts fixes, de coûts variables, de localisation, y sont liés.

Il faut retenir de cette analyse que l'organisation en groupage-dégroupage est un outil très performant de *massification* du transport de marchandises.

14. En toute rigueur, il n'y a pas bijection entre la présence de rupture de charge et le fait qu'il y ait eu opération de groupage-dégroupage. La base ECHO est déjà remarquable par le simple fait qu'elle décrit, *au niveau de l'envoi*, la séquence des opérations de transport qui ont été réalisées ; mais si la rupture de charge a eu lieu pour une autre raison que la réalisation d'une opération de groupage-dégroupage, cette information n'est pas disponible.

Les plateformes et les opérations de tri et de manutention qui y sont réalisées permettent aux transporteurs de transporter efficacement des envois de petite taille se rendant d'origines différentes vers des destinations différentes. C'est ce qui a permis au transport de marchandises, particulièrement routier, d'accompagner la mutation des chaînes logistiques (et la fragmentation des envois) sans dégrader significativement le taux de remplissage des véhicules, *tout en utilisant des véhicules de plus en plus grands*.

La massification est-elle toujours optimale ? Cette massification, globalement efficace, a cependant tendance à décorrélérer les distances effectivement parcourues par les marchandises des distances à vol d'oiseau entre origine et destination. Cela peut alors donner lieu à des phénomènes que l'on peut considérer, à première vue, comme économiquement irrationnels, comme le passage par Paris d'un groupe de quelques palettes chargées à Marseille pour être finalement déchargées à Montpellier. Mais en réalité, aurait-il été optimal de dédier un semi-remorque au transport de ces quelques palettes, sans rupture de charge, de Marseille à Montpellier ? En ne faisant pas passer les palettes par Paris, il n'y aurait probablement pas eu de trafic routier en moins, puisque des semi-remorques partent de Marseille pour aller à Paris y livrer des palettes qui iront dans toute la France ; et il aurait fallu mobiliser un véhicule spécialement pour transporter les quelques palettes de Marseille à Montpellier. C'est ainsi qu'une opération qui peut paraître à première vue économiquement irrationnelle peut, en réalité, trouver son sens économique si le système de transport dans lequel elle s'inscrit est examiné dans sa globalité¹⁵.

3.3.2 Massification, hiérarchie des réseaux, aménagement du territoire

Le groupage-dégroupage permet d'utiliser efficacement des grands véhicules pour transporter ensemble des petites quantités se rendant à des endroits différents. Pour ce faire, il est nécessaire d'avoir des lieux de rupture de charge, des *noeuds* du transport où il est possible de *déconnecter les mouvements des marchandises des mouvements des véhicules*. Mais ces noeuds coûtent cher à construire et à exploiter. Ils ne doivent pas être trop nombreux : il faut de la masse pour massifier, si tous les envois sont dispersés sur de trop nombreux noeuds alors les conditions de la massification ne seront pas réunies. Cela concerne tous les modes de transport. Sans souci d'exhaustivité, cela concerne

15. On trouve le même type de phénomène avec les circuits courts : pour le cas particulier des circuits courts alimentaires, où l'on cherche à ce que les produits soient déplacés sur les distances les plus limitées possibles entre producteurs et consommateurs, on s'attend intuitivement à ce que la réduction de ces distances s'accompagnent d'un moindre impact environnemental. Or en réalité, les faibles possibilités de massification font que l'impact environnemental des transports des circuits courts s'avère bien plus élevé que celui du transport routier classique sur grandes distances, qui est optimisé (BLANQUART, GONÇALVES, RATON & VAILLANT, 2015)

notamment, pour le routier, les plateformes de groupage-dégroupage ; pour le ferroviaire, les gares de triage ; pour le maritime, les ports ; et pour l'aérien, les aéroports. Une dimension multimodale complexe s'y rajoute : il faut souvent s'assurer que ces noeuds, non content de permettre la massification pour un mode de transport donné, permettent aussi le passage d'un mode à l'autre.

Pour un certain nombre de raisons, la position, le développement, et le financement de ces noeuds deviennent des enjeux d'aménagement du territoire, avec une importance particulière de la dimension économique internationale :

- *taille et économies d'échelle* : les noeuds plus grands peuvent être plus efficaces, mais sont forcément plus chers ; et il faut attirer du trafic pour que les investissements se traduisent par des coûts unitaires faibles et par des niveaux de service ou une richesse de l'offre qui permet de rentabiliser les investissements. Par ailleurs, seuls les noeuds les mieux équipés et les mieux dimensionnés peuvent transporter les véhicules les plus gros (cela concerne particulièrement les avions et les navires aujourd'hui mais cela pourrait concerner les camions demain en Europe si les réglementations changent)
- *grands véhicules et liaisons principales* : le transport de marchandise s'organise pour partie de façon hiérarchique, particulièrement pour les grandes distances. Les plus grands véhicules, navires et avions, franchissent les grandes distances, et sont alimentés par des véhicules et des réseaux secondaires (maritimes, fluviaux, ferroviaires, routiers), qui permettent de massifier les marchandises aux niveaux qui permettent que l'utilisation de ces grands véhicules soit effectivement économiquement pertinente. Cela donne une importance particulière aux noeuds principaux, ceux desservis par ces véhicules : véhicules et noeuds ensemble forment en quelque sorte les colonnes vertébrales des systèmes de transport.
- *accès aux marchés* : pour les entreprises il y alors un enjeu à être proche (en termes de coûts, de délais, de qualité de service) de ces noeuds qui sont, pour elles, l'interface avec le reste du monde économique ; et donc les points de passage obligés pour se fournir et pour exporter. La question de la proximité aux grands aéroports de transport de fret, ou aux hinterlands des grands ports, se pose alors de façon cruciale.
- *activité et compétitivité de la filière transport, impacts environnementaux* : au-delà de l'accès aux marchés, il y a aussi un enjeu pour les territoires d'activité économique et d'impacts environnementaux. La présence d'un noeud de transport majeur s'accompagne souvent d'une activité économique d'importance stratégique, avec potentiellement beaucoup d'emplois locaux et de la création de valeur ajoutée. Elle s'accompagne aussi d'impacts forts, de pollution, de bruit, de congestion. Il s'agit alors de trouver un compromis entre ces effets. Mais par exemple, dans la concurrence internationale pour conserver les grands hubs aériens de transport de fret, l'objectif de maîtrise du bruit par la limitation des vols de nuit, par exemple, peut passer au second plan, ou au moins

- ne pas être poursuivi avec la même assuidité.
- *dépendance au sentier, auto-renforcement* : dans l'activité capitalistique qu'est le transport, et en particulier pour le développement des infrastructures qui sont des investissements non seulement lourds mais aussi inamovibles et irréversibles, la présence sur un noeud d'un ou plusieurs grands opérateurs et d'une large gamme de services de transport va attirer les ressources financières qui vont permettre de développer ce noeud au dépend des autres. Cet auto-renforcement est à un quadruple niveau : il concerne les infrastructures et leurs capacités d'accueil ; les services, les fréquences, et les destinations desservies ; les infrastructures éventuellement multimodales de desserte des hinterlands, et même les installations d'entreprise. C'est ainsi, en particulier pour les ports, que va se développer et se maintenir une hiérarchie entre les très grands, qui jouent de multiples rôles parmi lesquels ceux de hub, et les autres, dont les fonctions sont limitées à la desserte de leurs hinterlands locaux et au transfert vers les hubs. Cette concentration ne peut pas aller jusqu'à tout rassembler sur un unique point du monde, mais l'augmentation de la taille des navires et des flux l'a maintenue pendant les dernières décennies. On peut cependant relativiser cet aspect d'autorenforcement, d'au moins deux façons : d'abord du fait que les anciens équipements peuvent devenir obsolètes, ce qui peut poser de grandes difficultés pour s'étendre voire se maintenir, et ensuite parce que les nouveaux opérateurs de transport et logistique ont plusieurs fois balayé les anciens, comme en maritime ou en aérien, par exemple.
 - *diversification* : un des effets qui peuvent freiner la tendance des opérateurs de transport à se concentrer sur un point donné peut être la volonté de ne pas dépendre d'un unique port, afin de pouvoir conserver un certain pouvoir de marché grâce à la disponibilité d'une option de sortie, et de ne pas être trop vulnérable en cas d'aléa rendant inutilisable un port par exemple.

Ces quelques éléments, présentés ici de façon rapide, expliquent en partie la structure complexe des systèmes de transport de fret. Cela rend les questions d'aménagement difficiles à traiter : les mécanismes d'autorenforcement brièvement évoqués ci-dessous font qu'il peut être extrêmement difficile de modifier une hiérarchie des systèmes en place, alors qu'il peut y avoir des enjeux économiques très importants, notamment d'accès aux marchés mondiaux pour les entreprises. De fait, les ports et aéroports, en particulier, sont des lieux stratégiques, soit points de passage obligés des marchandises, soit portes d'entrée des territoires, ou les deux (FRÉMONT, 2015).

Cela rend certains exercices de prévision également difficiles. Pour le cas du Canal Seine-Nord-Europe, par exemple, qui va rendre possible l'accès aux ports de la Rangée Nord par voie fluviale à des entreprises qui jusqu'à présent ne pouvaient accéder qu'aux ports de la Vallée de la Seine, comment prévoir l'impact sur la desserte de ces derniers par les armateurs ? Quel impact en termes de localisation d'entreprises ? Or toutes ces inconnues sont détermi-

nantes pour prévoir les conséquences de la réalisation de ce projet. De façon générale, de tels mécanismes font qu'on se trouve face à des systèmes à l'évolution qui peut être brutale, par grands paliers, et basculement d'équilibres, autant sinon plus que linéaire, continue et prévisible.

Dans tous les cas, ces phénomènes de structure de réseau, de capacité de véhicules, de massification, etc. sont à l'oeuvre dans la formation des coûts du transport de marchandises. La Figure 3.13 présente les prix en euro par tonne-kilomètre du transport de différents envois, en distinguant les modes principaux¹⁶ et les poids des envois. Les données ECHO ne comportent pas d'observation concernant le transport de marchandises directement issues d'industries extractives, comme le pétrole, les minerais, etc. Les droites colorées et inclinées sont issues de simples régressions linéaires du prix unitaire par mode en fonction de la distance.

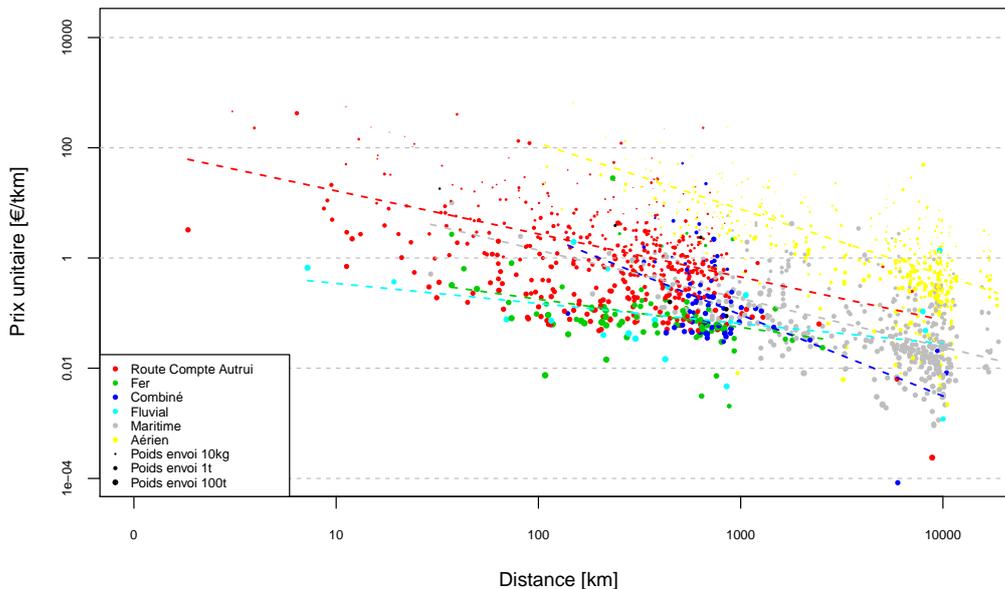


FIGURE 3.13 – Prix unitaire par mode de transport principal, fonction de la distance à vol d'oiseau et du poids, données ECHO 2004-2005

De cette figure, il est possible de dégager quelques constats :

- les modes légers coûtent un ou plusieurs ordres de grandeur plus cher que les modes lourds. Pourtant ils sont beaucoup utilisés : ce sera l'objet du prochain chapitre que d'expliquer pourquoi les chargeurs ne vont pas naturellement vers les modes les plus lourds, et pour le comprendre on

16. Le mode principal est défini selon une hiérarchie préétablie : lorsque plusieurs modes de transport ont été utilisés, si le maritime ou l'aérien sont utilisés alors ils sont les modes principaux ; dans les autres cas les modes lourds : fluvial, ferroviaire, ou combiné, sont prioritaires dans la définition du mode principal.

examinera le fonctionnement de leurs chaînes logistiques et les exigences de leurs clients.

- les prix unitaires décroissent avec la distance : on peut considérer de façon générale qu'une opération de transport implique toujours un coût fixe et un coût variable. Le coût fixe étant plutôt indépendant de la distance, il est normal que les prix unitaires décroissent avec les distances.
- les prix sont très dispersés : bien d'autres variables expliquent les différences de prix, dont les tailles d'envoi : les envois plus petits se traduisent par des prix unitaires plus élevés, comme prévu par les différents modèles théoriques présentés dans ce chapitre. Beaucoup d'autres facteurs peuvent expliquer ces variations (par exemple la présence de groupage-dégroupage en transport routier ou non).

Quoiqu'il en soit, cela confirme les conclusions déjà proposée à la fin de la Section 3.1 : premièrement, la structure des coûts du transport de marchandises est complexe, et cela se reflète dans la grande variabilité des prix ; deuxièmement, et par conséquent, on ne peut donc pas résumer la pertinence économique d'un mode à un coût moyen par tonne-kilomètre, car derrière ce coût moyen se trouvent une grande diversité de situations.

Il y a beaucoup d'autres dimensions qu'il faut garder en tête, parmi lesquelles les décisions d'implantation des entreprises, décisions dont l'impact n'est pas du tout neutre sur les systèmes de transport.

3.4 Dimensionnement de flotte, structure des coûts, partage des risques

Le transport de fret a une difficulté fondamentale, que l'on retrouve dans beaucoup d'industries capitalistiques, qui consiste à devoir s'équiper en actifs industriels chers et, dans certains cas, peu liquides, alors que la demande elle-même est imprévisible *et* souhaite à la fois de l'agilité et des prix bas. D'un point de vue économique, l'entreprise de transport (voire le chargeur lui-même, s'il se pose la question de réaliser son transport à compte propre) doit prendre une décision stratégique : quels actifs va-t-elle posséder ? Dans quelle mesure va-t-elle se reporter sur des alternatives telles que la sous-traitance, les alliances, etc. On observe une très grande diversité d'organisations sur le terrain, qui répondent à des problèmes très complexes. Il faut ajouter qu'en plus de cela, comme on l'a déjà indiqué précédemment, le recours à la sous-traitance peut avoir pour motivation de bénéficier de niches fiscales ou sociales (ceci dit, recourir à la sous-traitance peut engendrer des coûts de transaction qu'il ne faut pas négliger, même dans ces circonstances.)

Dans cette section, nous présentons un modèle simple de dimensionnement de flotte. La particularité du modèle par rapport aux sections précédentes est que la demande est ici considérée comme *aléatoire*. L'objectif du modèle est de montrer d'une part quelques ressorts simples de ce type de décision, d'autre part d'en tirer des conséquences en termes de structure des coûts. Il faut noter

qu'il est nécessaire de distinguer dans ce modèle coûts de capitaux et coûts d'exploitation, à la différence des modèles présentés dans le reste du chapitre. L'autre intérêt de ce modèle est qu'on y introduit (même si c'est de façon très simplifiée) une notion de *qualité de service* : il est possible pour le transporteur d'économiser sur la taille de sa flotte, mais au prix de peut-être décevoir son client.

On peut enfin noter que ce modèle peut se retrouver dans nombre de situations similaires, quand il y a dimensionnement d'une ressource pour répondre à une demande variable. Il s'agit d'un calcul très classique de stock optimal en logistique, qu'on appelle le problème du vendeur de journaux, ou *newsvendor problem*, modèle que l'on présentera dans le Chapitre 4. Sa solution, dite du *fractile critique*, a été proposée pour la première fois par ARROW, HARRIS et MARSCHAK (1951). On retrouve d'ailleurs, bien plus tard, un modèle similaire en économie des transports de voyageurs, quand un voyageur calcule l'avance qu'il doit prendre pour arriver à l'heure quand le temps de trajet est aléatoire (FOSGERAU & KARLSTRÖM, 2010).

3.4.1 Dimension optimale d'une flotte

Le modèle présenté ici représente un problème simple. On considère un transporteur qui doit déterminer la taille n de sa flotte. Chaque jour, ce transporteur doit transporter une quantité Q aléatoire d'envois. On considère pour simplifier que le transporteur ne peut transporter qu'un envoi par véhicule (on évacue de la façon la plus simple possible la question de la taille des envois et de la capacité des véhicules.)

La possession d'un véhicule engendre un coût de capital c_{cap} par jour, indépendamment de l'utilisation du véhicule ou non. L'utilisation du véhicule engendre un coût d'exploitation c_{exp} pour chaque envoi transporté. Pour chaque envoi transporté, le transporteur reçoit de son client une recette unitaire p fixée¹⁷. Dans le cas $Q > n$ où le transporteur n'a pas assez de véhicule pour transporter la demande, alors on peut envisager deux situations :

- il y a une solution de repli (sous-traitance ou utilisation d'un autre mode de transport), à niveau de service équivalent ou moindre pour le chargeur, ou bien avec risque (notamment risque de disponibilité : le jour où on en a besoin personne n'est disponible à l'heure dite) ;
- il n'y a pas de solution, la livraison doit être reportée, reroutée ou annulée, et le chargeur est insatisfait.

Dans tous les cas, on simplifie ici en supposant que cette situation implique un coût fixe a pour le transporteur, soit par pénalité, soit par le coût de la solution à mettre en oeuvre pour pallier le manque de véhicules dans la flotte, soit en perte d'image et de réputation, soit en perte de recette, ou bien une combinaison de tous ces facteurs. C'est ici qu'interviennent à la fois les relations

17. On évacue donc de l'analyse la question de la tarification. Il s'agit clairement d'une limitation importante, et c'est un axe de recherche intéressant de déterminer la façon dont on peut rendre endogènes les prix dans le modèle présenté ici.

inter-entreprises de transport et la dimension de niveau de service, même si elle est ici acrobatiquement simplifiée.

Compte-tenu des données ci-dessus, il est possible d'écrire le profit quotidien π réalisé par un transporteur possédant une flotte de n véhicules et devant transporter Q envois :

$$\pi(n, Q) = pQ - c_{cap}n - c_{exp} \min\{Q; n\} - a(Q - n)^+.$$

Par définition, $(x)^+ = \max\{x; 0\}$. La pénalité a n'est encourue que pour les $(Q - n)^+$ envois que le transporteur ne peut pas traiter. On peut réécrire l'équation ci-dessus de la façon suivante :

$$\pi(n, Q) = pQ - (c_{cap} + c_{exp})n + c_{exp}(Q - n)^- - a(Q - n)^+. \quad (3.12)$$

Par définition, $(x)^- = -\min\{x; 0\}$. Noter que $(x)^- > 0$.

Le profit est donc égal au chiffre d'affaire pQ que réalisera le transporteur, diminué des coûts d'exploitation et de capital de la flotte $(c_{cap} + c_{exp})n$; si la flotte est surdimensionnée alors le transporteur ne fera que l'économie des coûts d'exploitation $c_{exp}(Q - n)^-$; si la flotte ne permet pas de répondre à l'ensemble de la demande, le transporteur souffrira d'une pénalité $a(Q - n)^+$. Le profit est aléatoire.

On peut maintenant poser la question du dimensionnement optimal de la flotte. L'hypothèse est faite ici que le transporteur optimise son profit quotidien espéré. Notons ψ la fonction de densité de la demande quotidienne Q et Ψ sa fonction de distribution cumulée. Notons $\bar{q} = E(Q)$ et $\sigma^2 = V(Q)$ la moyenne et la variance de Q . Alors :

$$\begin{aligned} E\pi(n) &= p\bar{q} - (c_{cap} + c_{exp})n - a \int_n^{+\infty} (q - n)\psi(q) dq \\ &\quad + c_{exp} \int_{-\infty}^n (n - q)\psi(q) dq. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Pour identifier la valeur de n qui optimise ce profit espéré, on en calcule d'abord la dérivée :

$$\frac{\partial E\pi}{\partial n} = -c_{cap} - c_{exp} + a(1 - \Psi(n)) + c_{exp}\Psi(n).$$

Si $a \leq c_{cap} + c_{exp}$ alors l'espérance du profit est toujours décroissante : l'optimum est de ne pas avoir de flotte. Prenons le cas d'un chargeur considérant qu'un transporteur fera aussi bien voire mieux que lui-même avec sa propre flotte et pour un coût moindre : alors il est optimal de ne pas réaliser de transport à compte propre : le chargeur externalisera totalement son transport.

Dans le cas où $a > c_{cap} + c_{exp}$, alors l'espérance du profit atteint son maximum pour une taille de flotte optimale donnée par un certain fractile de la distribution de la demande, le *fractile critique* :

$$\Psi(n^*) = 1 - \frac{c_{cap}}{a - c_{exp}}.$$

En d'autres termes, pourvu que Ψ ait les bonnes propriétés, on obtient la taille de flotte optimale.

$$n^* = \Psi^{-1} \left(1 - \frac{c_{cap}}{a - c_{exp}} \right). \quad (3.14)$$

Afin d'en donner une lecture un peu plus intuitive, faisons l'hypothèse que la demande est gaussienne. Alors, en notant ϕ (resp. Φ) la densité (resp. la fonction de distribution cumulée) d'une normale centrée réduite, on a $\psi(q) = \phi((q - \bar{q})/\sigma)/\sigma$, et $\Psi(q) = \Phi((q - \bar{q})/\sigma)$. La taille de flotte optimale devient :

$$n^* = \bar{q} + \sigma \Phi^{-1} \left(1 - \frac{c_{cap}}{a - c_{exp}} \right).$$

On introduit la variable intermédiaire ξ , qui ne dépend que des coûts unitaires c_{cap} , c_{exp} et a :

$$\xi = 1 - \frac{c_{cap}}{a - c_{exp}}. \quad (3.15)$$

La taille de flotte optimale se réécrit alors comme suit :

$$n^* = \bar{q} + \sigma \Phi^{-1}(\xi). \quad (3.16)$$

On peut interpréter comme suit la taille de la flotte optimale : elle est égale à la demande quotidienne moyenne \bar{q} , corrigée à la hausse ou à la baisse en fonction des valeurs relatives de c_{cap} , c_{exp} et a , cette correction étant d'autant plus forte que la variabilité de la demande quotidienne σ est élevée.

De façon générale, la taille de flotte optimale a les propriétés suivantes :

- La taille de flotte optimale diminue avec le coût de capital c_{cap} . Plus le coût de *possession* des véhicules est élevé, plus le coût d'avoir sa propre flotte augmente. A l'inverse, si le coût de capital est nul, alors la taille de flotte optimale est égale à la demande maximale : les véhicules ne coûtant de l'argent que quand ils sont exploités, alors il n'est pas nécessaire de rationner le nombre de véhicules.
- La taille de flotte optimale diminue avec le coût d'exploitation, mais pas de la même façon qu'avec le coût de capital. Ainsi, si le coût d'exploitation est nul ou négligeable, alors la taille optimale de flotte est $\Psi^{-1}(1 - c_{cap}/a)$, elle n'est pas maximale.
- la taille de flotte optimale augmente avec la pénalité a : si le chargeur considère que l'absence de livraison est inacceptable, ou bien si les solutions alternatives quand la demande dépasse la taille de la flotte sont trop chères ou pas assez fiables, alors la taille de la flotte doit être dimensionnée en conséquence.

Bien que les modèles des sections précédentes n'aient pas explicitement traité cette question, la gestion des aléas joue un rôle central en transport de

fret. On l'a vu ci-dessus au sujet du dimensionnement des flottes, on en examine les conséquences en termes de coût et de profit dans la section suivante.

Il reste à calculer le profit espéré pour la taille de flotte optimale, résultat qui sera nécessaire dans la suite. En remplaçant n^* donné par l'équation (3.16) dans le profit espéré donné par l'équation (3.13) on obtient :

$$\begin{aligned} E\pi^* &= p\bar{q} - (c_{cap} + c_{exp})n^* - a \int_{\bar{q}+\sigma\xi}^{+\infty} \frac{q - \bar{q} - \sigma\xi}{\sigma} \phi\left(\frac{q - \bar{q}}{\sigma}\right) dq \\ &\quad + c_{exp} \int_{-\infty}^{\bar{q}+\sigma\xi} \frac{\bar{q} + \sigma\xi - q}{\sigma} \phi\left(\frac{q - \bar{q}}{\sigma}\right) dq \end{aligned}$$

Par un changement de variable $r = (q - \bar{q})/\sigma$ on obtient :

$$\begin{aligned} E\pi^* &= (p - c_{cap} - c_{exp})\bar{q} - (c_{cap} + c_{exp})\sigma\Phi^{-1}(\xi) \\ &\quad - a\sigma \int_{\xi}^{+\infty} (r - \xi)\phi(r)dr + c_{exp}\sigma \int_{-\infty}^{\xi} (\xi - r)\phi(r)dr \end{aligned}$$

Le profit réalisé par l'entreprise est donc linéaire en \bar{q} , d'une part, et σ , d'autre part : on peut encore simplifier grandement les notations en écrivant le profit sous une forme réduite :

$$E\pi^* = (p - c_{\bar{q}})\bar{q} - c_{\sigma}\sigma, \quad (3.17)$$

où les paramètres $c_{\bar{q}}$ et c_{σ} ne dépendent que des différents coûts unitaires.

Remarque sur la mesure de la productivité du transport de fret : comme cela a été indiqué ci-dessus, la taille de la flotte optimale augmente avec le paramètre a qui décrit l'exigence de service du chargeur, entre autres choses. Mécaniquement, si a augmente, la probabilité que la taille de la flotte dépasse la demande quotidienne Q augmentera également. Cela pourrait se traduire par une baisse du taux de remplissage ou du taux d'utilisation des véhicules concernés. On conclurait devant une telle évolution que la productivité du transport a diminué, alors qu'en réalité ce n'est que la manifestation d'une adaptation de l'organisation des transporteurs pour répondre à l'évolution des préférences des chargeurs. La nature multidimensionnelle et difficilement mesurable de la notion de niveau de service fait que les indicateurs classiques, intuitifs de la productivité du transport de fret sont en fait imparfaits et doivent être interprétés prudemment.

3.4.2 Dimensionnement et structure des coûts

Lorsque le caractère aléatoire de la demande est explicitement pris en compte, il n'est plus possible de n'exprimer la demande que sous forme de quantités fixes : les différents clients d'un transporteur doivent tous être distingués, chacun ayant une demande plus ou moins prévisible, et des exigences distinctes. Par conséquent il est difficile de raisonner en termes classiques comme celui de coût marginal par exemple.

Pour le montrer, nous allons considérer un exemple simple, celui d'un transporteur ayant déjà une activité. Cette activité prend la forme d'une quantité aléatoire Q_0 d'envois à transporter chaque jour, de moyenne \bar{q}_0 et écart-type σ_0 . La pénalité, s'il n'a pas de véhicule dans sa flotte pour transporter ces envois est uniforme et égale à a . La taille de flotte optimale est donc donnée par l'équation (3.17). Le profit quotidien espéré du transporteur est :

$$E\pi_0^* = (p - c_{\bar{q}})\bar{q}_0 - c_{\sigma}\sigma_0.$$

Imaginons qu'un nouveau chargeur se présente devant le transporteur, et demande qu'aux mêmes conditions de prix unitaire p et de pénalité a soit transportée une quantité aléatoire Q_1 de moyenne \bar{q}_1 et d'écart-type σ_1 , indépendante de Q_0 . Alors le nouveau profit pour le transporteur sera :

$$E\pi_1^* = (p - c_{\bar{q}})(\bar{q}_0 + \bar{q}_1) - c_{\sigma}\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_1^2}.$$

La différence de profit sera donc :

$$\Delta E\pi^* = (p - c_{\bar{q}})\bar{q}_1 - c_{\sigma}(\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_1^2} - \sigma_0)$$

Pour que prendre le nouveau contrat soit rentable pour le transporteur, il faut que le profit augmente. Or, le fait que le profit augmente ou non *dépend de l'activité de référence* du transporteur. En effet, prenons le cas d'un petit transporteur qui démarre son activité : alors il ne prendra le contrat que si :

$$\Delta E\pi^* = (p - c_{\bar{q}})\bar{q}_1 - c_{\sigma}\sigma_1 \geq 0.$$

Par contre, si le transporteur a déjà une forte activité, et que le nouveau contrat conduit à une modification marginale de cette activité (mathématiquement, on fait l'hypothèse que $\sigma_1 \ll \sigma_0$), alors¹⁸ la différence de profit sera positive si :

$$\Delta E\pi^* \simeq (p - c_{\bar{q}})\bar{q}_1 - c_{\sigma}\frac{\sigma_1^2}{2\sigma_0} \geq 0.$$

Il s'agit d'une condition bien moins contraignante : le gros transporteur acceptera bien plus facilement le nouveau contrat que le petit transporteur, et la raison fondamentale de cette différence de comportement est que le gros transporteur *a une plus grande capacité à en porter les risques associés*. Il s'agit d'une forme d'économie d'échelle, difficile à formaliser car, comme on l'a indiqué plus haut, quand on considère la demande d'un chargeur comme une variable aléatoire, alors on ne peut plus réduire les coûts des transporteurs à de simples fonctions des tonnages ou même des envois transportés. La présence de ces économies d'échelle est également difficile à identifier. Ici, toutes choses égales par ailleurs, si \bar{q} augmente sans que σ ne change, alors la taille de la

18. On a $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_0^2} - \sigma_0 = \sigma_0\sqrt{1 + (\sigma_1/\sigma_0)^2}$. Si $\sigma_1 \ll \sigma_0$ alors, en approximant au premier ordre, $\sqrt{1 + (\sigma_1/\sigma_0)^2} \simeq 1 + 1/2(\sigma_1/\sigma_0)^2$, donc $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_0^2} - \sigma_0 \simeq \sigma_1^2/2\sigma_0$.

flotte n^* va augmenter dans les mêmes proportions, pouvant donner l'illusion de rendements constants.

Notons que si le nouveau contrat apporte une demande Q_1 corrélée à l'activité pré-existante Q_0 alors cela aura un effet sur la différence de profit, effet qui sera en faveur des nouvelles activités négativement corrélées aux activités existantes des transporteurs¹⁹. En d'autres termes, on retrouve un comportement intuitif : le transporteur a intérêt à aller vers les marchés qui sont pour lui contra-cycliques, et qui lui permettent de lisser sa demande.

Rappelons qu'il s'agit d'un modèle très simplifié : un transporteur ayant différents contrats avec différentes exigences en termes de fiabilité pourra prioriser ces ressources et mettre en oeuvre des stratégies complexes. Par ailleurs, la question des prix et de leurs formations sur les marchés est, on le voit, beaucoup plus complexe à modéliser ; c'est une direction de recherche très intéressante à explorer.

Remarque sur la gestion de l'accès à l'infrastructure : la question se pose, pour un gestionnaire d'infrastructure, du niveau d'engagement qu'il faut demander aux transporteurs qui souhaitent accéder aux infrastructures : faut-il leur offrir une grande flexibilité, et leur laisser la possibilité de modifier leurs décisions jusqu'au dernier instant ou bien doit-on au contraire leur demander des engagements fermes et de long terme ?

Il s'agit ici aussi d'une question de répartition des risques : demander à un transporteur de s'engager longtemps à l'avance revient à le forcer à dimensionner son offre alors qu'il a lui-même une mauvaise connaissance de sa demande. Si le gestionnaire exige cet engagement, alors les transporteurs vont chacun devoir supporter un risque individuel, qui, mécaniquement, augmentera leurs coûts et diminuera leurs qualités de service. Par contre, si le gestionnaire ne demande pas cet engagement, alors il portera seul l'ensemble des risques : mais ces risques, dans une certaine mesure, se mutualisent, et l'augmentation de tarif unitaire que pourrait demander le gestionnaire d'infrastructure à ses transporteurs pour couvrir ces risques sera inférieur à l'augmentation des prix que chaque transporteur devra transmettre à ses clients chargeurs s'il doit porter seul le risque de la demande. En conséquence, ramener le risque sur le gestionnaire d'infrastructure en laissant de la flexibilité aux transporteurs peut améliorer la compétitivité globale du système de transport concerné, tout en donnant au gestionnaire d'infrastructure un rôle d'assureur du risque de demande. Ce raisonnement justifie donc les facilités de paiement ou de réservation dont les gestionnaires d'infrastructure feraient bénéficier les transporteurs.

19. Lorsque Q_1 et Q_2 sont corrélées, la variation de l'écart-type de l'activité du transporteur devient $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_0^2 + 2Cov(Q_0, Q_1)} - \sigma_0$. En notant $Cov(Q_0, Q_1) = a\sigma_0\sigma_1$, si $\sigma_1 \ll \sigma_0$ on obtient : $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_0^2 + 2a\sigma_0\sigma_1} - \sigma_0 \simeq a\sigma_1$, ce qui peut être un effet bien plus grand sur le profit du transporteur si a est significativement différent de zéro.

3.5 Conclusion

Ce chapitre a tenté d'illustrer certains aspects de la structure des coûts et de la formation des prix en transport de fret, via quelques modèles simples focalisés sur différents aspects. Nous rappelons ici quelques unes des principales conclusions :

- *La structure des coûts est complexe* : c'est le résultat, notamment, de la non divisibilité des ressources, du caractère de production jointe du transport, de la multiplicité des techniques et organisations possibles pour produire du transport de fret, et enfin du caractère aléatoire de la demande.
- La structure des prix est également complexe. Et, du fait de la structure spatiale de l'activité du transport, et de son caractère de production jointe, *le lien entre coût et prix est très complexe*. Or les chargeurs sont exposés aux prix, et non aux coûts.
- La massification, c'est-à-dire le transport dans les mêmes véhicules d'envois distincts allant dans des endroits différents, joue un rôle essentiel dans le fonctionnement des systèmes de transport. Cela leur permet de répondre aux besoins des chargeurs (et donc à une demande très fragmentée) tout en utilisant efficacement leurs ressources.
- L'hypothèse de *linéarité* des coûts et des prix, souvent nécessaire, faute de mieux, pour les analyses économiques et les modèles de trafic, paraît très rudimentaire. Des recherches supplémentaires sont nécessaires à la fois pour améliorer ces analyses, et pour évaluer l'erreur que provoque cette hypothèse, en fonction des applications.
- En ce qui concerne le transport multimodal, les zones de pertinence des différents modes dépendent de nombreux paramètres, et il n'est pas possible de définir simplement l'aire d'attraction d'un terminal multimodal, par exemple. Cela dépend de la demande, de la destination des marchandises, de l'offre de transport, du positionnement des terminaux, etc.
- *La répartition spatiale de la demande (la localisation des établissements, mais aussi les origines et destinations des flux) joue un rôle majeur dans la formation des coûts*, des prix, et dans la compétitivité des différents modes de transport. Par conséquent, agir sur la configuration spatiale de la demande est un levier potentiel pour modifier les zones de pertinence des différents modes de transport.
- *La demande de transport est aléatoire* : les transporteurs doivent gérer ces aléas, et fournir à leurs clients la flexibilité dont ceux-ci souhaitent bénéficier. En ce qui concerne la structure des coûts, c'est une source supplémentaire d'économies d'échelle : un gros transporteur est capable de supporter plus d'aléas qu'un petit.

Pour conclure ce chapitre, il faut rappeler que le prix n'est pas le seul paramètre de choix des chargeurs. Il est nécessaire de mettre en oeuvre la notion de coût total logistique évoquée dans le Chapitre 1.

Chapitre 4

Les préférences des chargeurs

Le système de transport de fret est la rencontre d'une offre et d'une demande. Le chapitre précédent a permis d'apporter un ensemble d'éclairages sur la structure des coûts des transporteurs, c'est-à-dire sur la formation de l'offre. On aborde maintenant la demande. Pour comprendre les choix des chargeurs et déterminer pourquoi ils vont préférer certaines prestations de transport à d'autres, il est utile de se pencher sur le fonctionnement des chaînes logistiques : le type de marchandise ne permet pas d'expliquer seul les choix des chargeurs. De ce point de vue, la théorie d'inventaire apporte un éclairage particulièrement riche (F. COMBES, 2013a).

Comme expliqué dans le Chapitre 1, la logistique consiste à fournir à un client les marchandises qu'il désire avec un niveau de service adéquat. Dans ce chapitre, on illustre concrètement ce principe à partir d'un certain nombre de modèles simples, en expliquant à chaque fois quel impact cela a sur les décisions des chargeurs en ce qui concerne le transport de marchandises.

La première partie du chapitre (Section 4.1) présente un modèle général de pilotage d'une chaîne logistique simple. Ce modèle permet d'illustrer les compromis fondamentaux que doit faire un chargeur responsable du pilotage d'une chaîne logistique : fréquence des envois versus coûts d'entreposage d'une part ; coûts d'entreposage versus risque de rupture de stock d'autre part. Il prend en compte la structure détaillée des coûts de transport et la façon dont ils évoluent avec la taille d'envoi, et il prend aussi en compte le caractère aléatoire de la demande, et la façon dont le chargeur doit gérer cet aléa. Ce modèle constituera la base des analyses présentées dans la suite du chapitre.

Dans la Section 4.2, le modèle de taille d'envoi optimale EOQ (*Economic Order Quantity*) est présenté, et les preuves de sa validité empirique sont apportées. Le lien entre taille d'envoi et choix modal est discuté. On rappelle que la taille d'envoi n'est généralement pas une variable exogène, dont dépend le choix de mode une fois qu'elle a été déterminée : choix de mode et choix de taille d'envoi sont des décisions simultanées et interdépendantes. Un modèle de choix de type de prestation de transport de fret prenant en compte les caractéristiques des chaînes logistiques est ensuite présenté. Par choix de type de prestation, on entend ici une version étendue du choix modal : cela comprend

non seulement le choix de mode, mais aussi le choix de chaîne, ou d'organisation, de transport, ou encore le choix de type de véhicule. Le modèle est capable d'associer des types de prestation de transport, et notamment la présence ou l'absence de ruptures de charge, aux caractéristiques des chargeurs. Le modèle montre que le flux annuel de marchandises entre le chargeur et le destinataire a autant d'importance pour expliquer le choix modal que le type de marchandise, ou sa valeur.

La Section 4.3 présente un modèle théorique simple de chaîne logistique dans un contexte de demande aléatoire. Ce modèle est utilisé pour obtenir la valeur du temps du chargeur. Il manque en effet au transport de marchandises une théorie satisfaisante de la valeur du temps telle que celle de BECKER (1965) en transport de voyageurs¹. L'explication selon laquelle la préférence des chargeurs pour que le transport aille vite est liée au coût d'opportunité du capital associé à l'immobilisation des marchandises n'est pas satisfaisante empiriquement. Le modèle présenté ici permet de proposer une théorie beaucoup plus large de la valeur du temps en transport de fret, et donne une grande importance à la sensibilité des clients du chargeur en termes de *niveau de service logistique*, ainsi qu'à l'imprévisibilité de la demande. Ce modèle formalise plusieurs des concepts importants discutés dans le Chapitre 1, en particulier en ce qui concerne la performance logistique, et il rend explicite les conséquences que cela implique sur le transport de marchandises. Le modèle est également étendu pour traiter le cas de l'utilisation simultanée de deux modes de transport, revenant ainsi sur le concept de synchronodalité également discuté dans le Chapitre 1.

En réalité, les chaînes logistiques sont d'une très grande complexité et d'une très grande diversité, alors que les modèles présentés dans ce chapitre sont d'une grande simplicité. Les éclairages empiriques apportés quand c'est possible ont pour objectif d'évaluer la robustesse des conclusions tirées de ces modèles.

4.1 Gestion des stocks : la méthode du point de commande

On considère dans cette section une chaîne logistique simple : une usine fabrique des produits qu'elle expédie sous forme d'envois à une destination donnée, par exemple un magasin, où ces produits sont vendus².

1. BECKER explique que les personnes ont une quantité limitée de temps chaque jour – leur dotation initiale – qu'ils allouent à différentes activités parmi lesquelles travailler pour gagner un salaire qui permet de consommer, ou les loisirs qui ont une valeur intrinsèque. Le transport est une diminution du temps disponible total et les voyageurs sont prêts à payer pour que le transport aille plus vite afin de pouvoir passer plus de temps soit à travailler, soit à leurs loisirs. JARA-DÍAZ (2007) présente précisément ce modèle ainsi que plusieurs de ses extensions.

2. On peut aussi considérer que le lieu de destination est une autre usine, où le client du chargeur consomme les marchandises pour en fabriquer d'autres : cela n'a pas d'importance

Dans ce contexte, nous posons trois hypothèses :

- *Non linéarité des coûts de transport* : on suppose en premier lieu que pour un mode de transport de fret donné, le coût du transport pour le chargeur comprend une part dépendante de la taille de l'envoi, et un *coût fixe* qui ne dépend pas de la taille de l'envoi (voir Section 3.1.) Par contre, on ne fait pas l'hypothèse d'une contrainte de capacité sur le mode de transport.
- *Caractère aléatoire de la demande* : à destination, la quantité du produit vendue par période est aléatoire : si on peut en connaître la valeur moyenne et la dispersion, il n'est par contre pas possible de prévoir exactement combien seront nécessaires à chaque période, et donc d'anticiper combien devront être livrés.
- *Insatisfaction des clients en cas de rupture de stock* : les clients du chargeur seront insatisfaits si la marchandise n'est pas présente quand se présentent au magasin pour en acheter. Il s'agit ici d'une question de *niveau de service* (voir Section 1.2.2). Nous faisons également l'hypothèse que dans le cas d'une rupture de stock, les clients reviendront jusqu'à ce que la commande soit honorée. Il n'y a pas d'annulation de commande.

Nous faisons également l'hypothèse qu'une commande peut être passée n'importe quand (hypothèse du temps continu), et que le temps de transport entre le point de départ des marchandises et leur point d'arrivée est fixe.

Ce problème est bien connu en théorie d'inventaire, et sa solution optimale (sous un certain nombre d'hypothèses en plus de celles décrites dans le corps de texte) est celle du point de commande, ou *(s,S) inventory policy* en anglais (JENSEN & BARD, 2003). Comme indiqué sur la Figure 4.1, l'inventaire à destination décroît en continu, au fur et à mesure que des clients se présentent et achètent le produit. Lorsque le chargeur applique la politique du point de commande, il attend que le stock atteigne une certaine certaine valeur limite s pour commander une quantité donnée S . Les quantités sont donc fixes, et l'aléa va se répercuter sur les intervalles de temps qui séparent deux commandes successives. Comme l'illustre la figure, le caractère aléatoire de la demande fait qu'il est possible qu'une rupture de stock se produise.

Il n'est pas question de décrire ici comment on détermine les paramètres (s, S) optimaux. Nous allons plutôt en discuter qualitativement les déterminants, puis les implications en termes des choix des chargeurs en termes de transport de fret. Décider des valeurs s et S revient en quelque sorte à déterminer les fréquences moyennes d'envoi et le stock de sécurité.

- *Fréquence d'envoi* : plus S est petit, plus les envois seront fréquents. Choisir une valeur élevée de S permet d'économiser sur les coûts de transport, puisque la partie du coût de transport indépendante de la taille d'envoi sera supportée à une moindre fréquence. Par contre cela va engendrer des coûts d'entreposage plus élevés. Ce compromis est étudié plus précisément dans la Section 4.2.

pour la suite du propos.

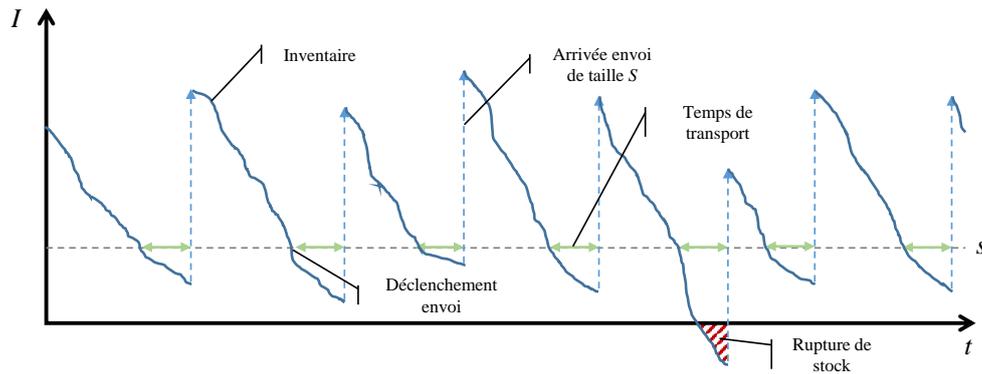


FIGURE 4.1 – La méthode du point de commande : évolution temporelle de l'inventaire à destination.

- *Stock de sécurité* : un stock de sécurité s plus élevé permet de s'assurer que les clients seront plus satisfaits : les ruptures de stocks seront moins fréquentes et, lorsqu'elles se présentent, les stocks seront réapprovisionnés plus rapidement.

Du point de vue des préférences du chargeur concernant le transport de fret, les implications sont les suivantes :

- *Capacité du véhicule* : en transport de marchandises, un véhicule a une capacité limitée³. Cela pose une contrainte sur la valeur S et peut avoir comme conséquence que le chargeur préfère tel mode de transport à tel autre.
- *Coûts de transport* : les coûts seront un facteur important dans la décision du chargeur. Sa décision porte sur la structure des coûts dans leur ensemble, et pas sur un unique indicateur moyen tel que le coût par tonne-kilomètre. C'est pour cette raison que la question de la structure des coûts a été discutée en détail dans le Chapitre 3 ; on verra ci-dessous la place de la structure des coûts dans les préférences des chargeurs. Il faut en tout cas noter ici qu'il s'agit des coûts *perçus par le chargeur* : cela comprend le prix des prestations qu'il achète auprès de transporteur, et le coût des moyens propres qu'il investit dans la réalisation de l'opération de transport.
- *Temps de transport* : il va jouer à deux titres. D'une part, plus le transport est long, plus la marchandise est immobilisée longtemps, ce qui engendre un certain nombre de coûts (opportunité du capital, déprécia-

3. Plus généralement, on peut dire qu'à un certain type d'opération de transport correspond une capacité maximale, souvent limitée par un des éléments de la chaîne de transport. Par exemple, si le mode routier et le mode ferroviaire sont combinés, alors la taille d'envoi maximale sera définie par la capacité du véhicule routier. Si on considère le cas du colis par exemple, la taille d'envoi maximale sera définie par le type de colis qui peut être traité dans les plateformes de tri automatique, typiquement 30kg ; dans un tel cas la plateforme est contraignante, pas les véhicules.

tion, etc.) qui font que le chargeur peut préférer un transport rapide. D'autre part, plus le transport est long, plus le stock de sécurité s doit être élevé, ce qui peut également inciter un chargeur à payer pour un transport plus rapide. Ces compromis sont étudiés plus précisément dans la Section 4.3.

- *Fiabilité du temps de transport* : le modèle présenté ci-dessus ne le prend pas en compte, mais on peut conjecturer la façon dont il s'étend au cas où le temps de transport n'est pas fiable. Dans un tel cas, la date à laquelle l'envoi transporté arrive n'est pas connue avec certitude ; cela engendre un risque supplémentaire de rupture de stock qui doit être compensé par une hausse de s . La fiabilité du temps de transport a donc de la valeur pour le chargeur, qui maîtrise mieux ses stocks et offre un meilleur niveau de service à ses clients.

On constate qu'avec un cadre conceptuel relativement simple, de nombreuses dimensions des comportements des chargeurs peuvent être étudiées. Par ailleurs, et c'est peut-être encore plus important, ce cadre permet de faire le lien explicitement entre les choix des chargeurs en termes de transport de fret et le niveau de service qu'offrent leurs chaînes logistiques à leurs clients.

4.2 Le modèle *Economic Order Quantity* : fréquence d'envoi et choix modal

Le modèle que l'on va présenter est connu en anglais sous le nom de modèle *Economic Order Quantity*, ou EOQ. Il modélise le compromis que fait un chargeur entre coût d'entreposage et coût de transport en déterminant la taille d'envoi (Section 4.2.1). Le modèle est ensuite étendu pour prendre en compte la contrainte de capacité des véhicules (Section 4.2.2). Il peut alors constituer la base d'un modèle de choix modal (Section 4.2.3) et même contribuer à expliquer le choix entre différents types de chaînes de transport.

4.2.1 Présentation du modèle EOQ

Le modèle EOQ est simple et ancien. Le contexte dans lequel il a été développé initialement est celui de la production industrielle (HARRIS, 1913). Il s'agissait de déterminer la quantité optimale d'une série à produire avec une machine capable de produire différentes séries, mais qu'il faut interrompre un certain temps pour la configurer afin de fabriquer un certain type de produit. Il faut alors faire un compromis : soit on reconfigure rarement la machine, et on produit beaucoup, mais il faut des grandes capacités de stockage pour entreposer les différents types de produit pour pouvoir honorer les demandes pendant les périodes où ils ne sont pas fabriqués, soit la machine est reconfigurée plus souvent, les besoins d'entreposage sont moindres mais la machine est moins productive.

Dans le cas du transport de fret, le modèle EOQ s'applique naturellement.

L'article de référence au sujet de la modélisation des choix des chargeurs fondée sur la théorie d'inventaire est W. J. BAUMOL et VINOD (1970). Le modèle EOQ modélise le choix de taille d'envoi comme le résultat d'un compromis, cette fois-ci entre coûts de transport et coût d'inventaire. On considère un chargeur transférant des marchandises d'un point A où elles sont produites à un point B où elles sont consommées ou vendues. Ces deux points sont séparés par une distance d . Il s'agit d'un flux continu de marchandises Q , en tonnes par an. Le chargeur expédie des envois de taille fixe s , transportées de A à B en un temps t , pour un coût qui sera détaillé plus loin.

Coûts d'inventaire : on en distingue deux, l'un lié aux coûts d'entreposage à proprement parler et l'autre aux coûts qu'engendre pour le chargeur le fait d'avoir en sa possession des marchandises⁴.

- *Coût d'entreposage* : noté a_w [€/t.an] il s'agit du coût du séjour des marchandises dans les entrepôts en A ou en B . Il correspond à la fois au coût d'exploitation mais aussi au coût de construction des entrepôts.
- *Coût d'immobilisation de la marchandise* : noté a [€/t.an], il s'agit de la somme que le chargeur est prêt à payer pour que le temps entre le moment où la marchandise est produite en A et le moment où elle est consommée en B . Ce coefficient correspond au coût d'opportunité du capital, à la dépréciation, à la péremption, etc.

Dans le modèle EOQ, l'inventaire croît continûment à un rythme Q en A , jusqu'au point où il atteint le niveau s . A ce moment un envoi de poids s est expédié, et l'inventaire retombe à zéro. L'évolution de l'inventaire dans le temps est indiqué dans la Figure 4.2, elle a une forme typique en dents de scie.

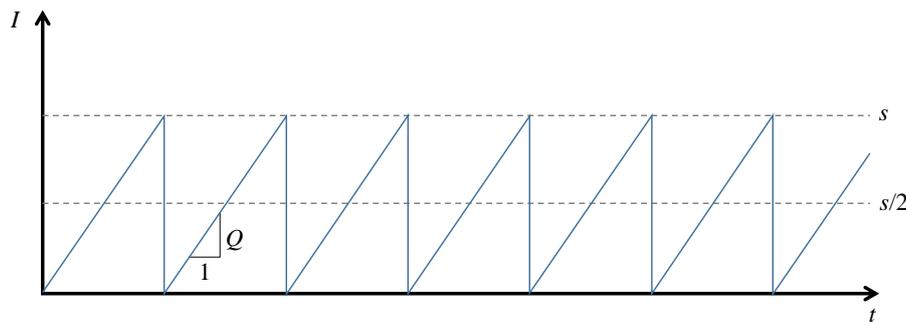


FIGURE 4.2 – Évolution dans le temps de l'inventaire à origine dans le cadre du modèle EOQ.

Comme on le constate sur le graphique, la quantité moyenne de marchandise présente par période de temps dans l'inventaire à l'origine est $s/2$. Elle

4. Les présentations classiques du modèle EOQ ne distinguent pas le coût d'entreposage et le coût d'immobilisation de la marchandise. Cette distinction est cependant utile pour analyser, comme on le fera plus loin, le choix modal.

est d'autant plus grande que les envois sont de grande taille. Le coût associé est, par période de temps, $(a + a_w)s/2$. Comme il y a un inventaire à destination avec un comportement symétrique, la somme des coûts associés aux deux inventaires est $(a + a_w)s$. On remarque que ce coût est indépendant du flux total Q .

Par ailleurs, chaque unité de marchandise passe un temps t dans le transport. C'est ce qu'on appelle l'inventaire en ligne (ou *pipeline inventory*). Sur l'année, le temps total passé par les marchandises dans le transport est Qt [t.an] et le coût associé pour le chargeur est aQt (le coût d'entreposage n'intervient pas ici.)

Le coût d'inventaire est donc :

$$c_{inv}(s) = (a + a_w)s + aQt. \quad (4.1)$$

Coût de transport : la caractéristique fondamentale du modèle EOQ consiste à prendre en compte le fait que le coût de transport *n'est pas proportionnel* à la taille de l'envoi. Le modèle EOQ fait l'hypothèse simple que le coût du transport pour un envoi pour le chargeur a la forme suivante :

$$c_{trpt}^s(s) = b + cs. \quad (4.2)$$

Cette hypothèse est cohérente avec les développements du Chapitre 3, et de la Section 3.1 en particulier.

Il faut cependant bien conserver à l'esprit le fait que l'on s'intéresse ici au coût du transport *supporté par le chargeur*, qui va donc souvent différer du prix payé par le chargeur au transporteur lorsqu'il y a transport pour compte d'autrui. Par exemple, si les employés du chargeur chargent les véhicules, si le chargeur loue ou achète des équipements nécessaires aux opérations de transport, les coûts associés ne sont pas présents dans le prix du transport mais ils entrent évidemment en ligne de compte dans la décision des chargeurs. Les coefficients b et c de l'équation ci-dessous ne sont donc pas les mêmes que ceux de l'équation (3.3).

Dans tous les cas, le coût de transport annuel pour le chargeur sera donc :

$$c_{trpt} = \frac{bQ}{s} + cQ. \quad (4.3)$$

On constate que la taille d'envoi n'a d'influence sur le coût de transport que via le coefficient b qui correspond à la part du coût de transport qui, dans la perspective du chargeur, *ne dépend pas* de la taille d'envoi. On observe également que plus les envois sont fréquents, plus le coût de transport annuel est élevé : ce composant de coût se comporte donc à l'inverse du coût d'inventaire c_{inv} et le chargeur devra trouver un compromis entre les deux.

Rappelons que dans le modèle de coût développé dans le Chapitre 3, seul le coefficient c dépend de la distance, comme l'indiquent les équations (3.4). Il en sera probablement de même pour le chargeur, sauf si l'augmentation de distance s'accompagne de l'augmentation de coûts de traitement, par exemple administratifs, liés aux douanes, etc. auquel cas b sera également dépendant de cette distance.

Fonction de Coût Logistique Total : les deux composants de coût supportés par le chargeur étant définis, il est maintenant opportun d'introduire la notion fondamentale permettant de modéliser les décisions des chargeurs relatives au transport de marchandises en prenant en compte les caractéristiques de leurs chaînes logistiques : il s'agit de la fonction de logistique totale, ou *Total Logistic Cost (TLC)*⁵.

La fonction *TLC* permet de modéliser les choix des chargeurs. Face à un ensemble d'alternative, un chargeur choisira l'option à laquelle est associée le *TLC* le plus faible. Bien entendu, la fonction *TLC* ne comporte que ce qu'il a été possible d'y introduire par la modélisation, et ce type d'approche est par essence limité. Cela dit, les méthodes statistiques, par l'introduction de termes aléatoires, permettent de rendre les modèles simples plus robustes, comme on verra quelques exemples dans ce chapitre.

Dans le cas du modèle EOQ, le *TLC* est tout simplement la somme du coût d'inventaire donné par l'équation (4.1) et du coût de transport donné par l'équation (4.3) :

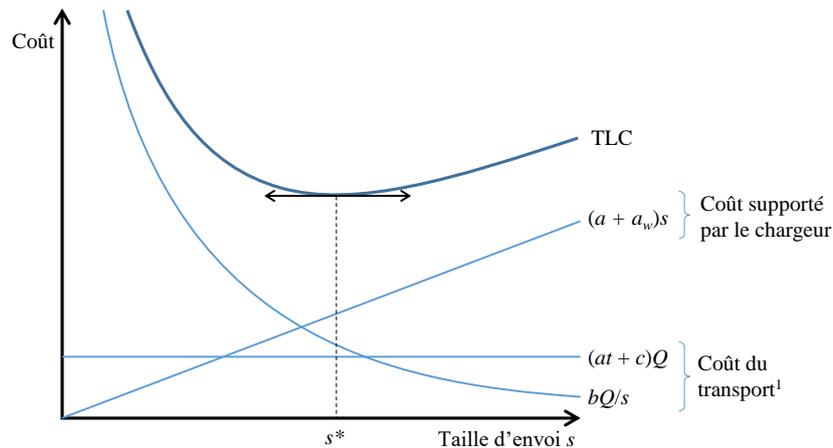
$$TLC(s) = (a + a_w)s + \frac{bQ}{s} + (at + c)Q. \quad (4.4)$$

Le *TLC* comprend deux termes dont l'un croît et l'autre décroît. Le comportement du *TLC* et des deux postes de coût est illustré par la Figure 4.4. On trouve donc ici un exemple du type de compromis discutés dans la Section 1.2.2 du Chapitre 1. Ce modèle illustre d'ailleurs un fait déjà discuté ailleurs dans cet ouvrage, mais sur lequel nous revenons étant donné sa grande importance : le chargeur peut être prêt à payer le transport *plus cher* car cela améliore la performance globale de sa chaîne logistique. L'implication immédiate est que la compétitivité relative de deux modes de transport ne peut pas se juger sur une simple comparaison des coûts. Nous y reviendrons dans la Section 4.2.3.

Taille d'envoi optimale : la détermination de la taille d'envoi s^* qui minimise le *TLC* est très simple. La dérivée du coût total logistique par rapport à la taille d'envoi est :

$$\frac{\partial TLC}{\partial s} = a + a_w - \frac{bQ}{s^2}.$$

5. Il est utile de dire ici un mot de la façon dont les préférences sont modélisées en ce qui concerne le transport de voyageurs. On parle usuellement de *coût généralisé* lorsque l'on fait référence aux fonctions d'utilité que les voyageurs associent à différentes options de transport. Les fonctions de coût généralisé peuvent comprendre beaucoup de variables, mais elles ont généralement un composant de prix (p_v), et un composant de temps (t_v) multiplié par une valeur du temps (a_v) : $g_v = p_v + a_v t_v$. Par analogie, on utilise la notion de coût généralisé en transport de fret, en transférant directement au fret la spécification utilisée pour les voyageurs : $g_f = p + a_f t$, où a_f est une certaine valeur du temps. Dans une certaine mesure, la notion de coût *total* logistique s'est construite en réaction à ce type d'approche : le message implicite est qu'en transport de fret, la spécification classique du coût généralisé "rate" beaucoup de choses.



¹simplification: le chargeur peut également devoir supporter une partie des coûts fixes b

FIGURE 4.3 – Le coût total logistique (TLC) dans le modèle EOQ.

Le TLC est convexe et sa dérivée s'annule donc pour une valeur unique de s . La taille d'envoi qui minimise TLC est :

$$s^* = \sqrt{\frac{bQ}{a + a_w}}. \quad (4.5)$$

On observe que cette taille d'envoi est croissante avec b : si la part du coût de transport ne dépendant pas de la taille d'envoi est élevée, alors le chargeur expédiera de grands envois. Les coûts d'immobilisation de la marchandise a et d'entreposage a_w ont l'effet inverse : plus ils sont élevés, plus le chargeur souhaite expédier les marchandises rapidement, et donc par petits envois. Enfin le flux annuel chargeur-destinataire Q a également une influence : plus il est élevé, plus les envois sont gros.

Coût total logistique à l'optimum : il est intéressant de calculer TLC pour la valeur optimale de taille d'envoi. On injecte l'équation (4.5) dans l'équation (4.4) pour obtenir :

$$TLC(s^*) = 2\sqrt{bQ(a + a_w)} + (at + c)Q. \quad (4.6)$$

Le coût total logistique est croissant avec les différents paramètres de coût a , a_w , b , et c , conformément à l'intuition. Il est également croissant avec le temps de transport t . La forme du coût total logistique a deux implications importantes : la première est que, même si la taille d'envoi s ne dépend ni de c ni de t , le chargeur est évidemment sensible à ces paramètres. S'il peut choisir un autre mode pour minimiser TLC , il le fera.

La deuxième est relative à la structure des coûts : TLC est croissant avec Q , mais pas linéairement. En réalité, lorsque Q augmente, le coût total logistique moyen décroît :

$$\frac{TLC(s^*)}{Q} = 2\sqrt{\frac{b(a + a_w)}{Q}} + (at + c). \quad (4.7)$$

Ce constat a deux implications. La première est relative au choix modal, et sera examinée dans la suite de ce chapitre (Section 4.2.3). La seconde est qu'il y a des économies d'échelles dans les chaînes logistiques des chargeurs, et donc potentiellement des externalités positives spécifiques au marché du transport de marchandises, qui ne sont pour l'instant pas connues ni, a fortiori, prises en compte. Ce sujet sera abordé dans le Chapitre 2.

Validité empirique du modèle EOQ

Le modèle EOQ a été initialement développé dans un contexte classique de recherche opérationnelle : une entreprise cherche à optimiser un problème de production, de logistique ou de transport dans son environnement, qu'elle connaît bien. Elle applique donc le modèle EOQ si les hypothèses du modèle sont vérifiées, et dans le cas contraire elle peut mettre en oeuvre l'une des innombrables variations de ce modèle, telles qu'on peut les trouver dans la littérature académique par exemple.

Dans cet ouvrage, nous ne nous intéressons pas à résoudre le problème particulier d'une entreprise, nous cherchons à comprendre dans sa globalité le comportement d'une population d'entreprises nombreuses et hétérogènes. Il s'agit donc de vérifier si un certain modèle, éventuellement assorti d'un ensemble de variables de contrôle, permet d'expliquer avec une précision satisfaisante les décisions prises dans des contextes très divers.

Les modèles économétriques expliquant la taille d'envoi sont rares. RAKOWSKI (1976) présente un modèle expliquant la taille d'envoi en fonction du mode de transport, mais il s'agit en réalité d'une tentative de mieux analyser le choix modal. Les modèles économétriques qui expliquent le choix modal en fonction de la taille d'envoi, ou qui expliquent simultanément choix modal et taille d'envoi seront discutés plus loin.

Quoi qu'il en soit, l'estimation d'un modèle de choix de type d'envoi est techniquement simple : si l'on en prend le logarithme de l'équation (4.5), on obtient l'équation linéaire suivante :

$$\ln s^* = \frac{1}{2} \ln b + \frac{1}{2} \ln Q - \frac{1}{2} \ln(a + a_w),$$

La difficulté principale pour pouvoir estimer les paramètres de cette équation est une difficulté de données. Premièrement, il faut des données dont l'unité d'observation est l'envoi (d'où l'importance d'avoir des bases de données adéquates, avec la bonne unité d'observation.) Il faut observer b , a , et Q . D'une certaine façon, b n'est pas un problème : il s'agit d'une constante, variant éventuellement avec le mode ou l'organisation du transport. La variable a est plus compliquée : mais elle est probablement fortement corrélée à la densité de valeur du produit transporté, que les enquêtes chargeurs observent souvent.

La difficulté principale concerne en réalité Q , le flux chargeur-destinataire, qui n'est que très rarement observée. A notre connaissance, cette variable n'est observée que dans l'enquête ECHO, et deux enquêtes réalisées très récemment en Allemagne et en France et dont les résultats sont seulement en cours d'analyse

ou bien ont donné des résultats très récents (PIENDL, LIEDTKE & MATTEIS, 2016). Il s'agit d'une variable explicative essentielle du choix de taille d'envoi (ainsi que, on le verra, du choix modal), pour laquelle il n'y a pas de bon proxy.

Si les données sont disponibles, il est alors simple de transformer l'équation obtenue ci-dessus en la spécification d'un modèle linéaire. En indexant par i les observations :

$$\ln s_i = \sum_m \beta_m X_m^i + \beta_Q Q_i + \beta_a a_i + \varepsilon_i.$$

C'est l'exercice qui a été mené dans F. COMBES (2012). Les X_m^i sont égaux à 1 si le mode m a été utilisé pour transporter l'envoi i . L'envoi est par ailleurs décrit par sa densité de valeur a_i en euros par tonne, et la variable Q_i est le flux annuel total du chargeur vers le destinataire de l'envoi. Les données ECHO ont été utilisées pour estimer le modèle, et les résultats obtenus sont présentés dans la Table 4.1 ci-dessous.

TABLE 4.1 – Estimation du modèle EOQ avec les données ECHO

Coefficients	Estimate	Std. Error	t-value	
β_Q	0.50	0.01	73.27	***
β_a	-0.44	0.01	-37.57	***
$\beta_{\text{routier compte d'autrui}}$	1.05	0.11	9.47	***
$\beta_{\text{routier compte propre}}$	1.46	0.11	12.87	***
$\beta_{\text{ferroviaire}}$	3.42	0.18	19.30	***
$\beta_{\text{combiné rail route}}$	2.09	0.20	10.31	***
β_{fluvial}	4.37	0.33	13.05	***
β_{maritime}	2.89	0.13	21.49	***
$\beta_{\text{aérien}}$	1.47	0.14	10.29	***
N	10462			
NA's	4741			
R^2	0.795			
Adjusted R^2	0.795			

Il est possible de constater que les données sont tout à fait cohérentes avec les prévisions du modèle EOQ, malgré la diversité des contextes, des entreprises, et des marchandises transportées. Les coefficients β_Q et β_a sont proches des valeurs théoriques attendues (1/2 et -1/2), et le pouvoir explicatif du modèle est élevé, avec un R^2 proche de 0,8. Il faut remarquer néanmoins le manque de variables manquantes : même si la base ECHO donne des informations cruciales pour valider empiriquement le modèle EOQ, dans bien des cas les variables explicatives sont absentes.

En ce qui concerne les constantes modales, sept modes sont distingués : transport routier pour compte d'autrui, pour compte propre, ferroviaire, combiné rail-route, fluvial, maritime et aérien. On observe que, conformément à l'intuition développée dans l'ensemble de l'ouvrage, la composante du coût du transport indépendante de la taille de l'envoi est bien d'autant plus grande que le mode mis en oeuvre est un mode lourd, capacitaire. C'est le cas pour les modes

terrestres d'une part (routier, ferroviaire, combiné, fluvial) et pour les modes intercontinentaux d'autre part (maritime et aérien.) Les implications en termes de choix modal sont discutées plus loin. F. COMBES (2012) présente un modèle plus fin et des analyses plus poussées mais les conclusions sont les mêmes : le modèle EOQ est une bonne base pour modéliser les choix de taille d'envoi des chargeurs de façon générale.

4.2.2 Introduction de la contrainte de capacité

Dans la section ci-dessus, aucune contrainte de capacité n'est prise en compte. Or, quelle que soit la façon dont le transport est produit, les envois ne pourront pas dépasser une certaine taille K . Cette contrainte de capacité peut être liée à la capacité de transport du véhicule. Si plusieurs véhicules sont utilisés, la capacité sera limitée par le véhicule le plus petit. Si des ruptures de charge ont lieu, la contrainte de capacité peut être due à la capacité de traitement des plateformes et entrepôts (par exemple, les installations de tri automatique des colis ne peuvent gérer que des colis d'une taille et d'un poids maximaux donnés.)

Le modèle EOQ n'est que peu modifié par l'introduction de la contrainte de capacité. La taille d'envoi optimale devient :

$$s^* = \min \left\{ \sqrt{\frac{bQ}{a + a_w}}; K \right\}. \quad (4.8)$$

En d'autres termes, si la taille d'envoi optimale non contrainte donnée par l'équation (4.5) est supérieure à K , alors la taille d'envoi sous contrainte de capacité K est simplement égale à K . La taille d'envoi est contrainte lorsque :

$$\sqrt{\frac{bQ}{a + a_w}} \geq K,$$

ce qu'on peut réécrire ainsi :

$$Q \geq Q_K$$

avec :

$$Q_K = \frac{a + a_w}{b} K^2. \quad (4.9)$$

Si la demande du chargeur vers le destinataire dépasse une certaine valeur critique Q_K , alors la contrainte de capacité sera saturée.

Le comportement du coût total logistique dépendra alors également de la valeur de Q , avec deux régimes distincts selon que Q est inférieur à Q_K ou supérieur :

$$TLC = \begin{cases} 2\sqrt{bQ(a + a_w)} + (at + c)Q & \text{si } Q \leq Q_K, \\ (a + a_w)K + \frac{bQ}{K} + (at + c)Q & \text{si } Q > Q_K. \end{cases} \quad (4.10)$$

L'évolution de la taille optimale d'envoi et du coût total logistique en fonction de Q est illustrée par la Figure 4.4.

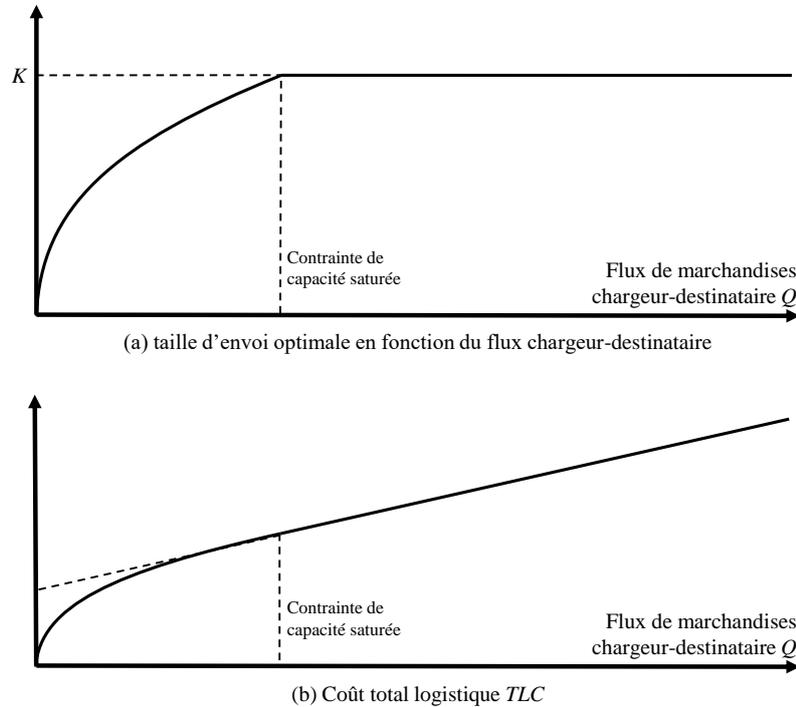


FIGURE 4.4 – Taille d'envoi optimale et TLC en fonction de Q , modèle EOQ avec contrainte de capacité.

La contrainte de capacité a un effet important sur la forme du coût total logistique : lorsque le flux Q dépasse une certaine valeur, la contrainte de capacité finit par jouer. A partir de ce moment, le coût total logistique se comporte de façon linéaire, et sa dérivée est constante. Cela dit, le coût total logistique unitaire (TLC/Q) est tout le temps décroissant ; nous revenons sur ce point dans le Chapitre 5.

4.2.3 Choix de taille d'envoi et choix modal

L'introduction du modèle EOQ en économie du transport de fret a deux intérêts : un intérêt théorique, qui est de montrer l'importance du contexte logistique des chargeurs dans leurs décisions, et un intérêt plus pratique, qui est la meilleure compréhension du choix modal.

Le point de départ pour analyser le choix modal à partir du modèle EOQ est l'équation (4.10) que l'on modifie simplement en distinguant le mode m de la façon suivante :

$$TLC_m = \begin{cases} 2\sqrt{b_m Q(a + a_w)} + (at_m + c_m)Q & \text{si } Q \leq Q_{K_m}, \\ (a + a_w)K_m + \frac{b_m Q}{K_m} + (at_m + c_m)Q & \text{si } Q > Q_{K_m}. \end{cases} \quad (4.11)$$

Le coût total logistique du mode m dépend donc, côté demande, des variables a et a_w de coût d'immobilisation de la marchandise et d'entreposage (le coût d'immobilisation de la marchandise interagissant avec le temps de trajet t_m , à la différence du coût d'entreposage), et du flux chargeur-destinataire Q . Côté offre, les variables dépendant du mode m sont les variables de coût b_m et c_m telles que perçues par le chargeur (cela peut surtout influencer b_m , s'il y a des installations fixes à financer par exemple, tel que des quais de chargement et déchargement etc.), la contrainte de capacité K_m et le temps de trajet t_m tel que perçu par le chargeur.

Dans le Chapitre 3, la structure des coûts de modes légers et lourds avait déjà été comparée qualitativement (voir la Figure 3.4 dans la Section 3.1.) La principale limite de cette comparaison des coûts était que les chargeurs ne fondent pas leurs décisions sur cette seule base. L'exercice va ici être reproduit, mais cette fois sur la base de la fonction TLC . On considère donc ici aussi deux modes, léger l et lourd h , tels que $b_h > b_l$, $c_h < c_l$, et $t_h > t_l$. Dans ce cas, le comportement des deux fonctions de coût total logistique pourra ressembler à ce qui se passe dans la Figure 4.5 ci-dessous.

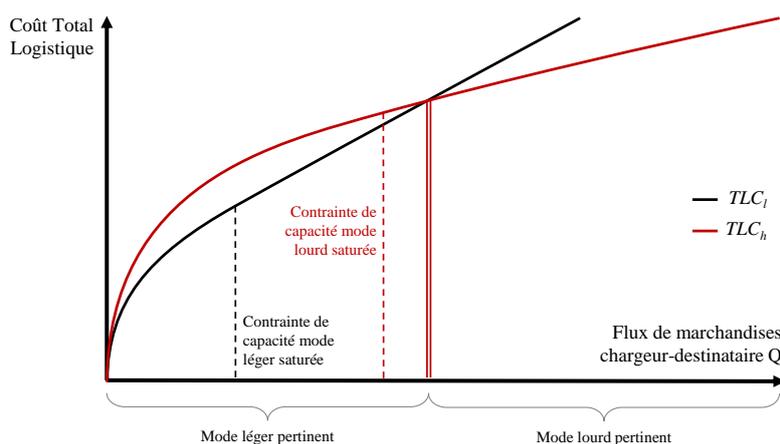


FIGURE 4.5 – Coûts totaux logistiques de deux modes, léger et lourd.

Lorsque les variables a et a_w sont données, le mode léger est systématiquement pertinent pour de petites valeurs de Q . Mais à mesure que le flux Q augmente, le mode lourd peut finir par devenir compétitif (ce n'est pas nécessairement le cas, comme on le verra plus loin). Dans la configuration illustrée par la Figure 4.5, lorsque le mode lourd devient pertinent, il y a longtemps que la contrainte de capacité est saturée sur le mode léger. Elle l'est également déjà pour le mode lourd quand il devient pertinent : dans ces conditions, il n'est jamais optimal d'expédier un envoi de taille inférieure à la capacité par le mode lourd. Cette observation et ses implications sont discutées un peu plus loin.

Pour étudier de façon plus systématique les zones de pertinence du mode léger et du mode lourd, l'analyse est simplifiée en faisant les hypothèses que la contrainte de capacité ne joue jamais, et que a_w est nul. Alors, pour un

flux de demande Q donné, le mode léger est préféré au mode lourd si le coût d'immobilisation de la marchandise a est supérieur à une certaine valeur seuil $\bar{a}(Q)$ définie par :

$$\bar{a}(Q) = \frac{c_l - c_h}{t_h - t_l} \left(1 - \frac{2}{1 - \sqrt{1 + 4(t_h - t_l)(c_l - c_h)Q / (\sqrt{b_h} - \sqrt{b_l})^2}} \right).$$

Qualitativement, si on place les zones de pertinence du mode léger et du mode lourd dans un plan (a, Q) , le mode lourd sera pertinent dans une zone où le flux Q est suffisant tandis que le coût d'immobilisation a est limité (en haut à gauche du graphique) tandis que le mode léger sera pertinent dans une zone où le flux Q est faible et le coût d'immobilisation de la marchandise élevé. Si a dépasse la valeur critique $(c_l - c_h)/(t_h - t_l)$ alors le mode lourd n'est jamais pertinent. La Figure 4.6 illustre ces zones de pertinence.

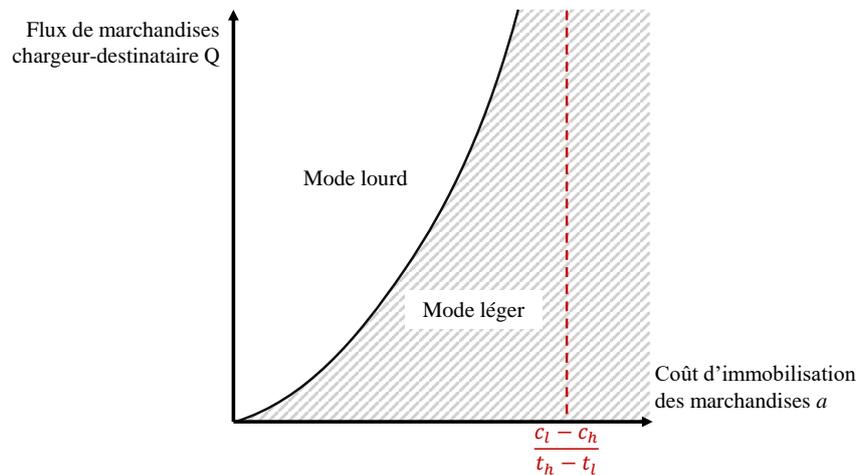


FIGURE 4.6 – Zones de pertinence de deux modes de transport léger et lourd.

Les modèles classiques d'économie des transports appliqués au fret ne reconnaissent pas le rôle de la variable Q . Seul un paramètre de coût d'immobilisation de la marchandise a est pris en compte, et on l'appelle généralement la valeur du temps du chargeur⁶ : c'est la somme que le chargeur est prêt à payer pour que la marchandise passe moins de temps dans les transports. Si on note g_m le coût généralisé du mode m en euros par tonne, avec $g_m = c_m + at_m$, c_m étant un paramètre unique de coût par tonne, et t_m le temps de trajet, et que l'on compare un mode lourd h et un mode léger l tels que $c_h < c_l$ mais $t_h > t_l$,

6. à distinguer de la valeur du temps du transporteur. Il s'agit alors de considérer que certains des coûts des transporteurs sont proportionnels aux temps de trajet, par exemple les coûts de ressources humaines ou encore les coûts de capitaux liés à l'acquisition des véhicules. Dans l'évaluation des projets d'infrastructure de transport, il y a lieu de prendre en compte à la fois les gains du temps du transporteur, qui vont se transformer en régime concurrentiel en baisses de prix au bénéfice des chargeurs, et la diminution des temps d'immobilisation des marchandises, également directement au bénéfice des chargeurs. D'où la distinction des deux valeurs du temps.

alors le choix de mode dépendra d'une valeur seuil $\bar{a} = (c_l - c_h)/(t_h - t_l)$. D'une certaine façon on retrouve le cas limite du modèle présenté dans ce chapitre, mais on constate surtout tout ce qui échappe à ce modèle simpliste : la prise en compte précise de la structure des coûts des différents modes de transport, non réduite à un simple coût kilométrique ; et le flux entre le chargeur et le destinataire, et pas seulement la nature de la marchandise. Ce modèle simple est pourtant aujourd'hui encore beaucoup utilisé, ce qui s'explique notamment par le manque de données permettant de faire des analyses plus fines.

Il faut également noter une autre implication très importante du modèle développé dans cette section : le choix modal et la taille d'envoi sont des décisions *simultanées*, et il ne faut donc pas considérer les caractéristiques de l'envoi comme des paramètres exogènes dont le choix modal dépendrait de façon uniquement causale. HALL (1985) avait déjà discuté ce problème, en expliquant d'un point de vue théorique pourquoi les tailles d'envoi sont très inégalement réparties, avec beaucoup d'envois dimensionnés pour remplir les véhicules, et certaines tailles d'envoi qui ne sont pas utilisées.

Sur la Figure 4.7 est illustrée l'évolution de la taille d'envoi optimale lorsque Q augmente, dans des conditions similaires à celle de la Figure 4.5. La Figure (a) représente l'évolution de la taille d'envoi avec Q , dans les conditions où le mode léger est utilisé. La taille d'envoi augmente comme indiqué par l'équation (4.5). Puis la contrainte de capacité agit, et pendant un certain temps les envois sont de la taille maximale autorisée par le mode utilisé. A un certain point, le mode lourd devient pertinent, la taille d'envoi change à nouveau. Quelle conséquence sur la répartition des tailles d'envoi ? La Figure (b) présente une densité de distribution hypothétique des flux Q , et la Figure (c) présente la répartition cumulée des tailles d'envoi qui en résulte. On observe en particulier qu'une partie de la distribution des tailles d'envoi est concentrée sur les valeurs limites K_l et K_h , comme discuté précédemment. Ce graphique contribue par ailleurs à illustrer le fait que taille d'envoi et choix de mode sont bien des variables déterminées simultanément, et qu'il n'y a pas lieu de considérer l'une comme variable explicative unique de l'autre.

En regard de cette figure théorique, on peut mettre les observations issues de l'enquête chargeurs ECHO réalisée en 2004-2005 en France (Figure 4.8). On y observe la distribution cumulée des tailles d'envois, et la distribution cumulée des tailles d'envoi pondérée par les poids. La première montre que beaucoup d'envois sont petits : la médiane se situe à 30kg, et 85% des envois font moins d'une tonne. On n'observe donc pas sur cette courbe la marche d'escalier visible sur la courbe de distribution théorique de la Figure 4.7 (c).

Par contre, sur la courbe pondérée par les poids des envois, cette marche d'escalier est visible. On constate ainsi que 40% des tonnages sont transportées au sein d'envois qui font entre 20 et 28 tonnes, c'est-à-dire sont très probablement contraints par les dimensions des semi-remorques (en poids et/ou en volume). Cette courbe montre une deuxième marche d'escalier pour les envois très lourds, de plus de 1000t, ce qui correspond à un train complet, en ordre de grandeur.

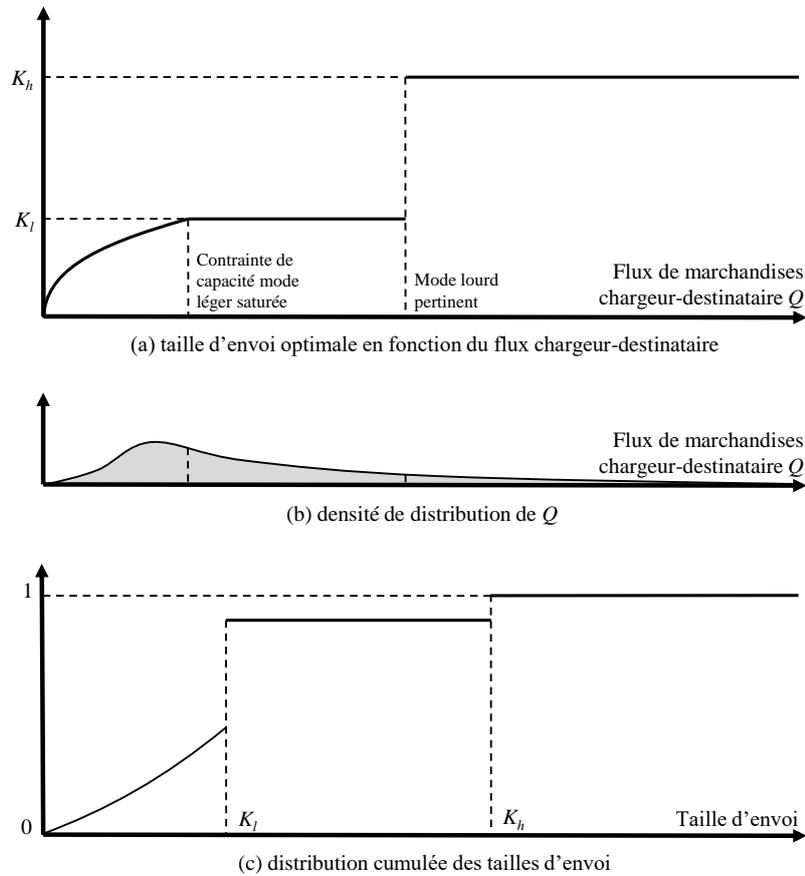


FIGURE 4.7 – Répartition des tailles d'envoi.

Validité empirique de la fonction TLC

Contrairement au modèle EOQ, qui est facile à vérifier économétriquement, comme décrit dans l'encadré p. 120, la fonction de coût total logistique ne se mesure pas, ou en tout cas pas facilement. On peut néanmoins tenter d'évaluer empiriquement le modèle présenté ci-dessus, en répondant à trois questions :

1. les comportements de choix modal des chargeurs et transporteurs observés sont-ils cohérents avec les prévisions du modèle (en particulier la Figure 4.6) ?
2. l'estimation d'un modèle de choix modal inspiré de la théorie d'inventaire, c'est-à-dire dont la spécification est construite à partir de l'équation (4.11) donne-t-elle de bons résultats (notamment un bon pouvoir explicatif et des résultats conformes à l'intuition) ?
3. l'estimation d'un modèle de choix modal inspiré de la théorie d'inventaire donne-t-il de meilleurs résultats qu'un modèle classique ne prenant pas en compte le flux chargeur-destinataire Q ?

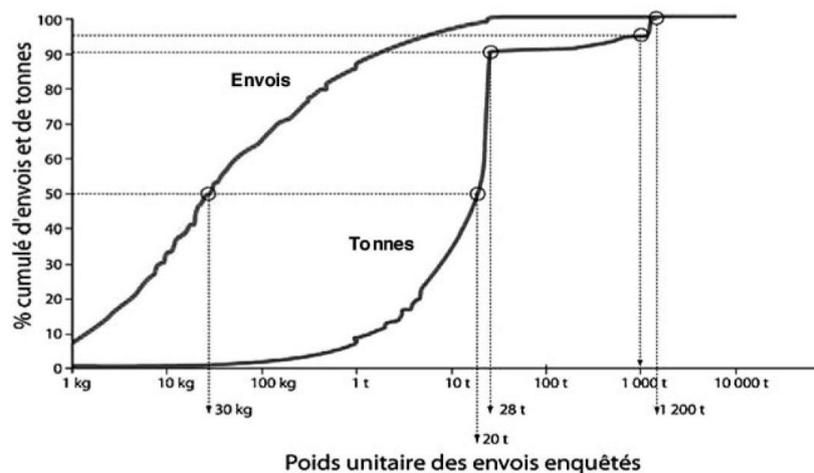


FIGURE 4.8 – Répartition des tailles d’envoi dans l’enquête ECHO (GUILBAULT & SOPPÉ, 2009).

Avant de répondre à ces questions, il faut rappeler qu’au contraire de l’estimation de modèles de choix de taille d’envoi, les modèles de choix modal et de choix joint de taille d’envoi et de choix modal sont bien plus nombreux. MIKLIUS (1969), FRIEDLAENDER et SPADY (1980) et JIANG, JOHNSON et CALZADA (1999) montrent statistiquement que le choix modal dépend bien des caractéristiques de l’envoi, mais font l’erreur de considérer les caractéristiques de l’envoi comme exogènes. MCFADDEN, WINSTON et BOERSCH-SUPAN (1985) ont développé un modèle séquentiel qui explique d’abord la taille d’envoi puis le choix de mode.

Parmi les modèles de choix simultanés de mode et de taille d’envoi, certains ne font pas référence à la théorie d’inventaire comme ABDELWAHAB et SARGIOUS (1992) et ABDELWAHAB (1998) qui mettent en oeuvre des modèles à variables latentes et plus tard J. HOLGUIN-VERAS (2002), ou encore, plus tard POURAB-DOLLAHI, KARIMI et MOHAMMADIAN (2013) qui couplent un modèle de choix de taille d’envoi et un modèle de choix de mode avec des fonctions Copula.

D’autres auteurs font spécifiquement référence à la théorie d’inventaire, selon l’idée initialement développée par W. J. BAUMOL et VINOD (1970). Une des tentatives les plus marquantes est de JONG et BEN-AKIVA (2007) : le projet des auteurs était de développer un modèle de transport de fret spatialisé reprenant intégralement les principes de la théorie d’inventaire, avec une représentation explicite des envois et des processus de consolidation dans les véhicules. Parmi les travaux de même nature, on peut citer WINDISCH, DE JONG, VAN NES et HOOGENDOORN (2010) et un peu plus tard ABATE et DE JONG (2014), ce dernier étant appliqué au choix de taille d’envoi et de véhicule.

Dans l’ensemble, ces travaux se sont tous heurtés à la même difficulté, l’absence de la variable Q des bases de données utilisées. Il est généralement impossible de trouver un proxy adéquat pour cette variable quand elle n’est pas observée. Les seuls travaux économétriques qui ont pu mettre à profit cette variable sont LLORET-BATLLE et COMBES (2013) avec les données françaises ECHO, et PIENDL et al. (2016) avec des données allemandes récentes.

LLORET-BATLLE et COMBES (2013) estiment un modèle de choix discret de choix de mode, mais les fonctions d'utilité associées à chaque mode sont construites sur la base des équations (4.7). Ce travail a permis de montrer qu'une spécification construite sur la base de la théorie d'inventaire avait un meilleur pouvoir prédictif que si une spécification classique linéaire était utilisée. Par ailleurs, il a également illustré graphiquement le lien entre a , Q , la distance origine-destination d et le mode de transport utilisé m , et cette illustration est reprise ci-dessous (Figure 4.9)

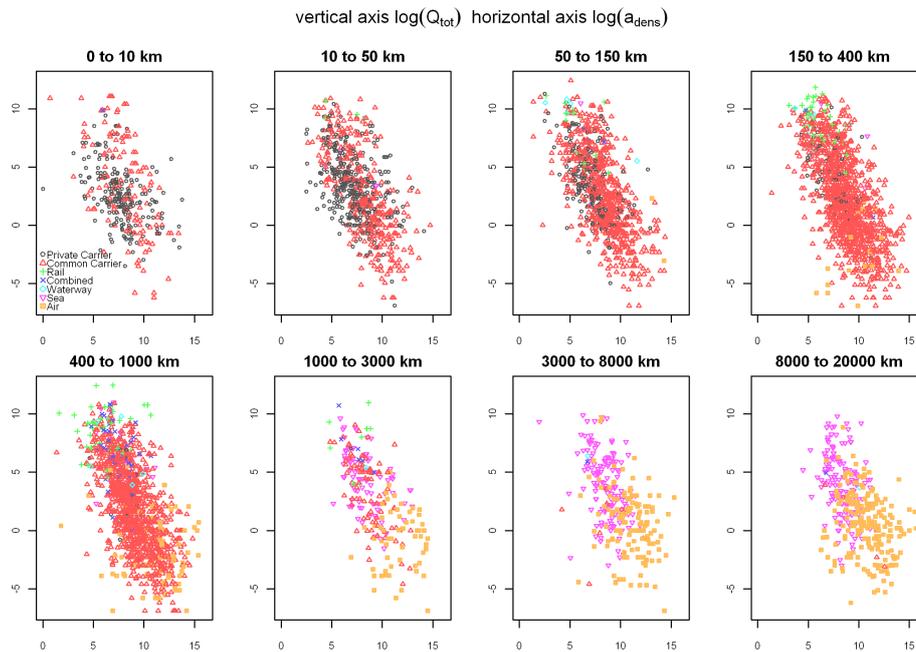


FIGURE 4.9 – Choix modal en fonction de la densité de valeur, du flux chargeur-destinataire, et de la distance

Sur cette figure, chaque point représente un envoi, et chaque graphe représente une bande de distance. L'image que l'on obtient est cohérente avec l'explication théorique illustrée par la Figure 4.6. On constate tout d'abord que le mode routier (noir pour le compte propre, rouge pour le compte d'autrui) est prépondérant, ce qui s'explique notamment par la faible taille des envois en routiers, tandis que les envois par les autres modes terrestres sont bien plus lourds et donc bien moins nombreux. On constate par ailleurs que les modes terrestres non routiers (vert pour le ferroviaire, bleu foncé pour le transport combiné et bleu clair pour la voie d'eau) n'apparaissent que pour des distances d'au moins 100 km. Enfin on observe que ces modes lourds sont effectivement présents dans les cadrants en haut à gauche des différents graphiques : les marchés pertinents de ces modes non routiers sont bien les flux massifs *de chargeur à destinataire* (la présence d'un flux massif de marchandises d'une région à une autre n'est pas une condition suffisante de la pertinence d'un mode lourd) de marchandises peu

chères. Le même constat s'impose pour l'intercontinental : la séparation entre aérien, en haut à gauche des trois derniers graphiques, et maritime, en bas à droite, est assez nette, et ici aussi conforme à la discussion théorique ci-dessus.

Ces différents éléments, ainsi que la validité empirique du modèle EOQ, confirme la cohérence de la théorie d'inventaire avec les données.

Choix de l'organisation de transport : les ruptures de charge. Dans la Section 3.3, nous avons développé un modèle de coût du transport avec consolidation et comparé ce modèle à celui du transport sans consolidation. Cette modélisation simplifiée avait le mérite, également illustré par la Figure 3.11, de montrer que la massification permettait d'augmenter substantiellement la densité des opérations, et donc de réduire les coûts, dans certaines conditions.

Cette modélisation avait néanmoins plusieurs limites : la taille d'envoi et la contrainte de capacité n'étaient pas prises en compte, et seul le coût de transport était considéré, et non pas l'ensemble des coûts logistiques des chargeurs. On revient sur ce problème ici, en essayant de dépasser ces limites. Les développements présentés ci-dessous sont assez proches de ceux exposés dans F. COMBES et TAVASSZY (2016).

En réalité, l'ensemble du raisonnement présenté ci-dessus s'étend très bien à la question du choix entre transport avec ou sans consolidation. Considérons le transport avec consolidation comme le mode léger l , et le transport sans consolidation comme le mode lourd h . Alors, la partie fixe du coût du transport du mode léger b_l est probablement inférieure à celle du coût du transport du mode lourd b_h (il est en tout cas nécessaire que les plateformes de groupage-dégroupages soient correctement dimensionnées et exploitées, afin que leurs coûts unitaires soient minimaux), tandis qu'il est possible que la partie variable du transport du mode léger c_l soit inférieure à celle du mode lourd c_h . Dans tous les cas, la taille maximale d'envoi dans l'organisation avec groupage-dégroupage K_l est nettement inférieure à celle sans consolidation K_h ce qui fait qu'il est probable que l'on se retrouve dans une configuration semblable à celle de la Figure 4.5. On s'attend donc à ce que le transport avec rupture de charge soit plutôt utilisé pour des flux peu massifs de marchandises de valeur plutôt élevée, tandis que le transport direct sera utilisé pour les autres flux.

Une exploitation de l'enquête ECHO permet de montrer que le développement théorique ci-dessus est cohérent avec l'observation. La Figure 4.10 montre le choix de mode et d'organisation de transport pour les envois dont la distance origine-destination est comprise entre 150km et 1000km. Par rapport à la Figure 4.9, le mode routier a été détaillé : sont colorés en rouge foncé les envois transportés par compte d'autrui sans rupture de charge, en rouge les envois transportés avec une rupture de charge et en orange ceux transportés avec deux ruptures de charge ou plus.

D'après cette figure, on retrouve bien le comportement prédit par la théo-

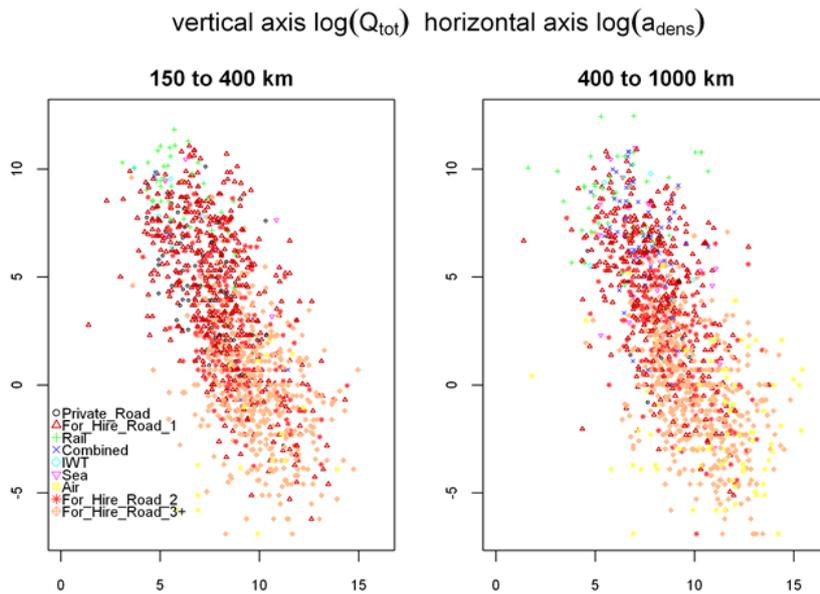


FIGURE 4.10 – Choix d’organisation de transport en fonction du flux chargeur-destinataire (ordonnée, en log) et de la valeur de la marchandise (abscisse, en log)

rie : les envois dont la densité de valeur a est la plus élevée et pour lesquels le flux chargeur-destinataire Q est le plus faible sont transportés avec plusieurs ruptures de charge.

Cela confirme la discussion déjà menée dans le Chapitre 3 : le transport de marchandises est organisé de façon à pouvoir, grâce à la massification, permettre aux chargeurs d’expédier des envois petits et fréquents tout en remplissant efficacement les véhicules. A chaque type de chaîne logistique correspond un certain type d’opération de transport ; et les transporteurs organisent leurs opérations afin de répondre à la demande. L’espace a alors une importance spécifique : le transport massifié implique des lieux de rupture de charge, qui sont des noeuds sur des réseaux mais aussi des endroits physiquement implantés dans les territoires, équipés de bâtiments, générateurs de flux, avec tout ce que cela implique en termes de fonctionnement des systèmes fonciers et d’aménagement du territoire.

4.3 Le modèle de réassort périodique : valeur du temps, synchronodalité

Comme expliqué en introduction du chapitre, le transport de marchandises manque d’une théorie adéquate pour expliquer pourquoi les chargeurs ont une certaine valeur du temps. Le sujet a déjà été un peu évoqué dans la Section 4.1, ce qui a permis de montrer le rôle des préférences des clients et de la structure

de la demande (notamment sa prévisibilité). Le modèle EOQ, présenté dans la section précédente, a de vraies qualités pour expliquer le choix modal, mais ne pose pas correctement la question de la valeur du temps. Dans cette section nous revenons sur ce problème, en présentant une version simplifiée du modèle du point de commande, et en analysant les gains pour le chargeur d'une dimension des temps de transport. Ces résultats ont été initialement développés dans F. COMBES (2010).

4.3.1 Cas monomodal

Le modèle que l'on présente ci-dessous est un modèle classique de gestion de chaîne logistique. Il s'agit pour un chargeur d'expédier une certaine quantité de marchandises d'une usine ou entrepôt à un magasin, à une fréquence fixée⁷. Nous allons donc calculer une fonction de coût total logistique TLC qu'il faudra ici aussi optimiser pour trouver un équilibre entre différents coûts. On verra que la fonction obtenue ici est nettement différente de celle obtenue dans le cas du modèle EOQ.

Cette section comprend trois parties : le modèle de coût est d'abord établi, puis le processus de gestion logistique optimal est présenté, enfin la valeur des gains de temps pour un chargeur est calculée.

Le modèle de coût : à chaque période de temps t , la demande à destination est D_t . D_t est une variable aléatoire, de moyenne d et d'écart-type σ_D ; les D_t sont indépendantes. La quantité livrée est celle qui a été expédiée l jours avant : s_{t-l} . L'inventaire au début de la période t est I_t , il devient à la période $t + 1$:

$$I_{t+1} = I_t + s_{t-l} - D_t.$$

S'il y a rupture de stock, certains clients ne peuvent pas être servis. On suppose alors qu'ils vont revenir le lendemain, mais sont mécontents. L'inventaire est alors négatif, il correspond au nombre de commandes en souffrance.

Dans ce modèle il est également nécessaire de prendre en compte l'inventaire "en ligne" I_p : il s'agit de la quantité de marchandises en cours de transport à un instant donné. L'évolution de cet inventaire en ligne est simplement :

$$I_{t+1}^p = I_t^p + s_t - s_{t-l}.$$

Dans ce modèle un certain nombre de coûts doivent être distingués pour chaque période de temps t :

7. C'est la principale différence avec le modèle EOQ : dans le modèle EOQ, la taille d'envoi, et donc la fréquence, sont endogènes. C'est également le cas dans le modèle du point de commande ; en fonction du choix des paramètres s et S , la fréquence moyenne d'envoi va varier. Ici elles sont considérées comme exogènes : il peut y avoir par exemple un envoi par jour, par semaine ou par mois, et cette variable n'est pas remise en question. Dans la grande distribution par exemple, il est courant que les livraisons aient lieu tous les jours ; ce sont les quantités de chacun des produits transportés qui vont varier. C'est aussi le e-commerce, qui implique le transport de nombreux colis.

- *Le coût de transport* : on suppose que le coût d'expédier un envoi s_t est $b + cs_t$. Un envoi est expédié à chaque période. Le coût de transport par période est donc :

$$C_t = b + s_t$$

- *Le coût d'inventaire en ligne* : ce coût est supposé proportionnel à la quantité de marchandises en cours de transport à l'instant t , qui est donc multipliée par un coût unitaire⁸ a . Ce coût est égal à :

$$C_p = aI_t^p,$$

où $I_t^p = \sum_{i=t-l}^{t-1} s_i$. est l'inventaire en ligne.

- *Le coût d'inventaire à destination* : comme dans la section précédente, sont pris en compte à la fois le coût d'immobilisation de la marchandise a et le coût d'entreposage a_w . Le coût correspondant n'est encouru que si l'inventaire est positif :

$$C_w = (a + a_w)(I_t)^+$$

- *Le coût de rupture de stock* : si l'inventaire est négatif, alors des clients n'ont pas pu être livrés et doivent attendre une période supplémentaire. Dans ce cas, ils sont mécontents. On suppose que cela implique un manque à gagner pour le chargeur proportionnel au nombre de commandes en souffrance, multiplié par un coût unitaire a_s . Le coût par période est donc égal à :

$$C_a = a_s(I_t)^-$$

A partir de ces quatre composants de coût, il est possible d'écrire la fonction de coût total logistique TLC_t correspondant à la période de temps t .

$$TLC = C_t + C_p + C_w + C_a,$$

c'est-à-dire :

$$TLC = b + cs_t + aI_t^p + (a + a_w)(I_t)^+ + a_s(I_t)^-. \quad (4.12)$$

Optimisation de la gestion de la chaîne logistique : on s'intéresse ici à une situation théorique où la chaîne logistique fonctionne de façon continue et stable. Malgré la simplicité de ce contexte, le problème reste complexe : le chargeur doit en effet expédier à la date t un envoi s_t sachant qu'il arrivera à la date $t + l$, qu'entre temps plusieurs clients exprimeront leurs commandes à destination, et que les envois expédiés entre $t - l$ et $t - 1$ arriveront.

8. Ce coût unitaire est ce qui se rapproche le plus de l'interprétation de la valeur du temps dans la littérature économique classique relative au transport de marchandises, à savoir le coût d'opportunité lié à son immobilisation.

Mathématiquement, la solution rigoureuse de ce problème a été apportée par KARLIN et SCARF (1958). Il s'agit en réalité de s'assurer que l'inventaire à destination vaille, en moyenne, une certaine valeur I_s , dite de *stock de sécurité* (on retrouve ici une partie du modèle général présenté dans la Section 4.1). Pour ce faire, il suffit que l'expéditeur envoie à chaque période t la quantité suivante de marchandises :

$$s_t = I_s + ld - I_t - \sum_{i=t-l}^{t-1} s_i. \quad (4.13)$$

Cette équation s'interprète très facilement : à l'instant t , le chargeur regarde ce qui va se passer à destination dans les l prochains jours : il y a une quantité I_t de marchandises déjà présentes ; les envois s_{t-l} jusqu'à s_{t-1} vont arriver, mais pendant ce temps une certaine quantité de marchandise sera vendue : en moyenne, $(l+1)d$ (en comptant la quantité de marchandise qui sera vendue pendant t .) Il faut donc envoyer la quantité s_t qui permettra, en moyenne, de maintenir l'inventaire à destination à la valeur cible I_s .

Le problème, bien sûr, est que la demande à destination est aléatoire. Si le chargeur applique précisément la règle donnée par l'équation (4.13), alors à tout instant t l'inventaire à destination sera égal à :

$$I_t = I_s + \sum_{i=t-l}^{t-1} (d - D_i). \quad (4.14)$$

Cette équation a une importance fondamentale : on constate que si l'inventaire, à destination, vaut bien I_s en moyenne, il est dispersé autour de cette moyenne. Or cette dispersion est d'autant plus grande que le temps de transport l augmente. Plus précisément, si la variance de la demande D_t est égale à σ_D , alors l'espérance et la variance de l'inventaire à destination sont :

$$\begin{cases} E(I_t) = I_s, \\ V(I_t) = l\sigma_D^2 \end{cases} \quad (4.15)$$

La variance augmente donc avec le temps de trajet, ce qui constitue un problème pour le chargeur. Pour aller plus loin dans l'analyse, il faut maintenant déterminer quel est le niveau optimal de stock de sécurité I_s . Il est utile d'introduire la variable aléatoire D_r :

$$D_r = \sum_{i=t-l}^{t-1} (d - D_i). \quad (4.16)$$

Il s'agit en quelque sorte de la déviation de l'inventaire à destination autour de sa valeur moyenne I_s : l'inventaire à destination est $I_t = I_s + D_r$. C'est une variable centrée, et elle a la même variance que I_t .

Notons F_r la fonction de distribution cumulée de l'inventaire à destination D_r et f_r la densité associée. Ces fonctions sont nécessaires pour exprimer explicitement les coûts d'inventaire à destination, qui dépendent à la fois de $(I_t)^+$

(coûts de stockage et d'immobilisation des marchandises) et de $(I_t)^-$ (coûts de rupture de stock). En effet :

$$E[(I_t)^+] = \int_{-I_s}^{+\infty} (I_s + x)f_r(x)dx,$$

et :

$$E[(I_t)^-] = - \int_{-\infty}^{-I_s} (I_s + x)f_r(x)dx,$$

Il est alors rapide de démontrer que le coût total logistique moyen devient, d'après l'équation (4.12) :

$$E(TLC) = b + cd + ald + (a + a_w) \int_{-I_s}^{+\infty} (I_s + x)f_r(x)dx - a_s \int_{-\infty}^{-I_s} (I_s + x)f_r(x)dx. \quad (4.17)$$

Il est intéressant de constater que seuls les composants du coût concernant l'inventaire à destination dépendent du niveau de stock de sécurité. La dérivée du coût total logistique par rapport au niveau de stock de sécurité est :

$$\frac{\partial E(TLC)}{\partial I_s} = a + a_w - (a + a_w + a_s)F_r(-I_s)$$

Le TLC est donc convexe et minimal pour une valeur donnée du stock de sécurité égale à :

$$I_s^* = -F_r^{-1}\left(\frac{a + a_w}{a + a_w + a_c}\right). \quad (4.18)$$

On retrouve un dimensionnement optimal (ici celui du stock de sécurité) donné par une équation de type *fractile critique*, déjà rencontré p. 105. Le stock de sécurité est le résultat d'un équilibre entre les différents coûts d'inventaire à destination. Si le coût de rupture de stock a_c augmente, alors le stock de sécurité optimal sera plus grand : il est plus important pour le chargeur de s'assurer que ses clients sont satisfaits que d'économiser sur les coûts de stockage et d'immobilisation de la marchandise ; il augmentera donc I_s , réduisant la probabilité de survenue d'une rupture de stock. Le stock de sécurité optimal I_s^* décroît au contraire si le coût d'immobilisation de la marchandise a ou le coût d'entreposage a_w augmentent.

On remarque par ailleurs que la probabilité de rupture de stock est par conséquent très facile à calculer : $P\{I_t < 0\} = P\{D_r < -I_s\} = F_r(-I_s)$, ou encore :

$$P\{I_t < 0\} = \frac{a + a_w}{a + a_w + a_c}. \quad (4.19)$$

Valeur du temps : l'effet d'une augmentation du temps de trajet l ou bien celui d'une augmentation (ou d'une diminution, via l'amélioration de techniques de prévision des ventes) de la dispersion σ_D de la demande par période D_t est difficile à lire dans l'équation (4.18) car ils se traduisent par une modification de la fonction de distribution cumulée F_r . Pour y voir un peu plus clair, faisons l'hypothèse que les D_t sont gaussiennes⁹ Notons alors Φ et ϕ les fonctions de distribution cumulée de densité correspondantes. On a alors, d'après notamment l'équation (4.15) :

$$F_r(x) = \Phi\left(\frac{x}{\sqrt{l}\sigma_D}\right), \quad (4.20)$$

$$f_r(x) = \frac{1}{\sqrt{l}\sigma_D}\phi\left(\frac{x}{\sqrt{l}\sigma_D}\right). \quad (4.21)$$

En remplaçant F_r dans l'équation (4.18) et en notant que $\Phi(-x) = 1 - \Phi(x)$, et donc $\Phi^{-1}(1-x) = -\Phi^{-1}(x)$, on obtient :

$$I_s^* = \sqrt{l}\sigma_D\Phi^{-1}\left(\frac{a_c}{a + a_w + a_c}\right). \quad (4.22)$$

Sous cette forme, il est plus facile d'interpréter l'effet du temps de trajet : si l augmente, le stock de sécurité augmente¹⁰. Si le temps de trajet augmente, la variance de la déviation de la demande D_r (équation 4.16) augmente aussi. Le chargeur s'y adapte en augmentant le stock de sécurité, mais, comme on va le voir immédiatement, cela engendre pour lui un coût. On peut faire le même constat pour la variance de la demande quotidienne σ_D^2 . Moins la demande quotidienne est prédictible¹¹, plus le stock de sécurité est élevé.

Mais connaître la manière dont I_s^* dépend de l ne suffit pas pour apprécier l'effet d'une modification des temps de trajet sur le coût total logistique du chargeur. Pour obtenir ce dernier résultat, il faut repartir de l'équation (4.17) et en calculer la dérivée par rapport à l , après avoir remplacé f_r par l'équation (4.21). On obtient, après quelques manipulations, et en normalisant, la valeur du temps α du chargeur (en euros par tonne par période) :

$$\alpha = \frac{1}{d} \frac{dE(TLC)}{dl} = a + \frac{\sigma_D}{d} \frac{\zeta}{2\sqrt{l}}. \quad (4.23)$$

9. On peut également faire l'hypothèse un peu plus souple que les D_t sont "suffisamment" gaussiennes ou bien que le temps de trajet l est suffisamment grand pour que, par le théorème central limite, D_r soit proche d'une gaussienne.

10. En toute rigueur, le stock de sécurité augmente *en valeur absolue*. On peut en effet imaginer des situations où le fait de faire attendre le client est moins gênant pour le chargeur que le fait de supporter des coûts d'entreposage etc. En d'autres termes, si $a_c < a + a_w$, alors $I_s^* < 0$. Dans un tel cas, quand l augmente, I_s^* décroît.

11. Dans le modèle présenté ici, il est supposé que les demandes quotidiennes D_t ont une valeur moyenne d constante. En réalité, ce n'est pas nécessaire. On peut tout à fait supposer que chaque demande quotidienne a une espérance d_t , qui peut différer de jour en jour. Il est très facile d'adapter le processus de pilotage de la chaîne logistique présenté ici à cette nouvelle situation. Fondamentalement, ce qui est important du point de vue du coût total logistique, c'est la partie non prévisible de la demande, c'est-à-dire sa variance σ_D^2 .

Le coefficient ζ est égal à $(a + a_c + a_w)\phi \circ \Phi^{-1}(a_c/(a + a_w + a_c))$, il ne dépend que des paramètres de coût unitaire a , a_w et a_c , et est croissant avec chacun de ces coûts (F. COMBES, 2010).

La valeur du temps α comporte deux composantes, qui correspondent chacune à une raison pour le chargeur de diminuer le temps de transfert :

- *l'immobilisation de la marchandise pendant le transport* : il s'agit du premier composant a , uniquement lié au fait que la marchandise est immobilisée pendant le transport. C'est, comme on l'expliquait dans l'introduction de cette section, l'intuition classiquement proposée de la valeur du temps pour le fret, et on rapproche a du coût d'opportunité du capital pour le chargeur, sans grand succès d'un point de vue empirique.
- *le niveau de service offert à destination* : Il s'agit du deuxième composant de l'équation (4.23). Il correspond aux coûts supportés par le chargeur à destination : coût d'immobilisation de la marchandise dans les stocks, coût d'entreposage, et coût des ruptures de stocks en termes d'insatisfaction client. Dans la valeur du temps α , ce composant est le produit de deux termes. Le premier est la variabilité relative de la demande σ_D/d : si la demande est parfaitement prévisible, alors ce composant s'éteint. Par contre, si la demande est très fortement imprévisible, alors il peut prendre une grande importance. Ce composant dépend par ailleurs également des trois paramètres de coût a , a_w et a_c à travers la variable intermédiaire ζ . Si les coûts d'entreposage ou d'immobilisation de la marchandise sont élevés, alors le chargeur souhaitera payer cher pour que le transport aille vite, afin de mieux contrôler ce qui se passe à destination. Mais par ailleurs, si la sensibilité des clients au niveau de service est très forte, le chargeur sera également prêt à payer très cher pour que le transport aille vite.

Ce modèle, malgré sa simplicité, a donc le mérite de proposer une intuition relativement globale des raisons pour lesquelles les chargeurs peuvent être prêts à payer très cher pour que le transport aille vite, qu'il s'agisse du choix modal entre transport routier et wagon isolé, par exemple, ou bien entre transport maritime et aérien. L'analyse des choix observés que propose ce modèle est complémentaire de l'analyse présentée dans la section précédente. Ici, la question des coûts de transport et des contraintes de capacité n'est pas posée ; par contre les coûts du chargeur et en particulier la question du niveau de service sont plus finement représentés. Le développement d'un modèle global, arrivant à intégrer les caractéristiques des deux modèles présentés dans ce chapitre est une direction de recherche à la fois importante et prometteuse.

Exemples numériques : afin d'illustrer le modèle, deux exemples numériques sont proposés. On considère le cas d'un chargeur expédiant un certain modèle d'ordinateurs portables depuis l'Asie vers un entrepôt particulier en Europe. Les hypothèses suivantes sont faites¹² : chaque ordinateur pèse 2kg

12. Il s'agit d'hypothèses presque totalement arbitraires, mais nous l'espérons relativement crédibles. En tout cas le modèle n'a pas fait l'objet d'un calage sur des bases de données

	Air	Sea
I_s^* [unité]	10.1	28.1
$E[(I_t)^-]$ [unité]	0.3	0.8
C_t [€/jour]	20.0	1.0
C_p [€/jour]	27.5	247.5
C_w [€/jour]	11.4	31.7
C_c [€/jour]	3.4	9.4
TLC [€/jour]	62.3	289.6
α [€/temps de transport en jours]	673.7	594.7

TABLE 4.2 – Modèle de réassort et choix modal : exemple de l'ordinateur portable

et vaut 1000€, le coût d'opportunité du capital et la dépréciation sont de 20% par an chacun, le coefficient a vaut donc 550€ par tonne et par jour. Le coût de stockage a_w est supposé égal à 0,05€ par tonne et par jour. Pour ce qui concerne le coût de la rupture de stock, l'hypothèse a été faite que le taux de rupture de stock est de 8% (selon SU et ZHANG (2009), ce taux est observé dans de nombreuses industries) ce qui permet de calculer a_c à partir de a et a_w , avec l'équation (4.19), et d'obtenir une valeur de 6000€ par tonne et par jour. Nous avons enfin supposé que la demande quotidienne est de 5 unités en moyenne (0,01 tonnes) et son écart-type de 3 unités (0,006 tonnes).

Deux options de transport sont considérées : la première combine l'aérien et le routier. Le temps de transport est supposé égal à 5 jours, le prix à 2000€ par tonne. La seconde combine le maritime et le routier. Le temps de transport est supposé égal à 45 jours, le prix à 100€ par tonne. Avec l'ensemble de ces hypothèses il est maintenant possible de calculer, pour chacune des deux options, le stock de sécurité optimal I_s^* , les différents composants de coût C_t, C_p, C_w, C_a , le coût total logistique, et la valeur du temps. Les résultats sont indiqués dans le Tableau 4.2.

Dans ce premier exemple, nous avons donc affaire à un produit à haute valeur ajoutée, de flux limité et pour lequel la variance de la demande est élevée. Le transport aérien coûte nettement plus cher que le transport maritime. Et pourtant, lorsque l'on prend en compte l'ensemble des coûts du chargeur, le transport maritime est nettement plus cher. En effet, le coût d'immobilisation de la marchandise pendant le transport pèse lourdement sur le chargeur. Par ailleurs, la longueur du trajet maritime fait que le chargeur doit augmenter fortement son stock de sécurité (il passe d'une dizaine à une trentaine d'unités) et les coûts de stockage et d'immobilisation de la marchandise augmentent en conséquence. Malgré cela, bien que la probabilité de rupture de stock reste stable, les clients attendent en moyenne plus longtemps lors d'une rupture de

représentatives.

	Air	Sea
I_s^* [unité]	12.7	20.7
$E[(I_t)^-]$ [unité]	0.6	0.91
C_t [€/jour]	2000.0	500.0
C_p [€/jour]	400.0	1400.0
C_w [€/jour]	265.3	433.2
C_c [€/jour]	89.6	146.4
TLC [€/jour]	2755.0	2479.6
α [€/temps de transport en jours]	25.9	23.6

TABLE 4.3 – Modèle de réassort et choix modal : exemple des voitures

stock (la valeur moyenne de l'inventaire conditionnelle au fait qu'il est négatif est multipliée par presque trois), donc l'augmentation du stock de sécurité ne permet pas de prévenir une dégradation du niveau de service pour le client. Dans cet exemple très contrasté, le chargeur est donc prêt à payer cher pour que le transport aille vite. Comme cela a été déjà observé plus haut, on constate d'ailleurs que la valeur du temps dépend du mode de transport choisi.

Prenons un deuxième exemple : des voitures sont produites en Europe puis acheminées à une plateforme à partir de laquelle elles sont réexpédiées vers des concessionnaires. Les concessionnaires sont ici considérés comme des clients, et sont donc insatisfaits si les livraisons ont du retard. Les hypothèses suivantes sont faites : chaque voiture vaut 25000€ et pèse une tonne. Le coût du capital est de 15%, donc $a_c = 20\text{€/jour}$. Le coût de stockage est de 0,5€ par jour. On suppose que $a = 8(a + a_w) = 160$, cela revient à supposer que les clients sont un peu moins sensible à une rupture de stock pour l'achat d'une voiture que pour l'achat d'un ordinateur. La demande quotidienne est supposée telle que $d = 10$ et $\sigma_D = 6$. Deux modes de transport sont considérés : le transport routier, qui prend deux jours et coûte 200€ par tonne ; et le transport ferroviaire, qui prend 5 jours et qui coûte 50€ par tonne. Le Tableau 4.3 présente les résultats numériques du modèle.

Dans ce deuxième exemple, le transport ferroviaire est préférable au transport routier : le surcoût d'immobilisation du capital, d'entreposage et d'insatisfaction client est plus que compensé par les économies de coût de transport. Le ferroviaire est cependant utilisé avec un stock de sécurité plus élevé. Enfin la valeur du chargeur est plus faible lorsqu'il utilise le mode le plus lent que lorsqu'il utilise le mode le plus rapide.

Commentaires complémentaires : pour aller plus loin, le résultat ci-dessus appelle quelques observations complémentaires :

- *Effet de la fragmentation des chaînes logistique :* l'évolution des chaînes logistiques a été caractérisée par une variété toujours croissante de produits à la durée de vie commerciale décroissante. Or on fait face en

logistique à la même difficulté que celle déjà évoquée p. 107 pour les transports : si on segmente un flux de moyenne d et variance σ_D^2 d'un produit donné en n variantes de moyennes d_i et variances $\sigma_{D_i}^2$, on aura bien $\sum d_i = d$, par contre on aura probablement $\sum \sigma_{D_i}/d_i > \sigma_D$. Qualitativement, cela veut dire qu'il est bien plus difficile de gérer la logistique de n variantes d'un produit que la logistique d'un unique produit générique. Si on examine l'équation (4.23), on voit que le second terme sera impacté : la fragmentation des chaînes logistiques s'est très probablement accompagnée d'une *hausse* des valeurs du temps, en plus du report vers les modes légers qui accompagne naturellement la baisse du flux chargeur destinataire Q dans le modèle EOQ¹³. Cela explique aussi tous les efforts menés dans le monde de la logistique pour que la variété croissante des produits et des références n'impacte pas trop lourdement les coûts, avec des solutions telles que, par exemple, la différenciation retardée¹⁴ (DORNIER & FENDER, 2007). Dans tous les cas, ces changements se produisent à *nature de marchandise constante*, par conséquent les modèles classiques de choix modal ne peuvent par construction pas les expliquer.

- *Fiabilité des temps de trajet* : les modèles présentés dans cet ouvrage n'ont pas permis de traiter analytiquement la question de la fiabilité. Nous n'allons pas le faire ici en détail, mais uniquement proposer quelques intuitions. Du point de vue du pilotage de la chaîne logistique, qu'un wagon arrive en retard ou que des commandes non prévues soient exprimées, les conséquences seront les mêmes. D'un certain point de vue, l'absence de fiabilité du transport est équivalent à une hausse de σ_D/d dans la valeur du temps α . Le problème que posent aux chargeurs les modes de transport non fiables est que cela peut réduire drastiquement le niveau de service proposé aux clients du chargeur, tout en causant des coûts d'entreposage et d'immobilisation des marchandises plus élevés¹⁵. Il faut noter qu'il y a aussi ici une question de partage des risques : le transporteur peut se donner des marges afin de garantir un temps

13. Mais ce report pourrait, au moins en théorie, être compensé par une meilleure massification par les transporteurs. Le phénomène discuté ici est d'un autre ordre. Il concerne d'ailleurs autant les questions de conception et de production que de transport : la pression sur les délais de production, et la mise en place de logistiques de juste-à-temps, participent de la double tendance à vouloir offrir un niveau de service très élevé aux clients et à leur proposer, en même temps, une large gamme de produits et de variantes.

14. La différenciation retardée est une solution qui peut être mise en oeuvre par une entreprise fabriquant un certain nombre de variantes d'un produit donné. Il s'agit alors de concevoir les produits de façon à ce qu'en termes de production, un maximum de pièces et d'étapes soient communes et afin que le moment où les variantes seront effectivement distinctes arrive le plus tard possible. Cela revient, en quelque sorte, à minimiser le σ_D/d dans une partie la plus grande possible de la chaîne logistique. Les imprimantes 3D en sont en quelque sorte la manifestation ultime. L'avenir dira la place qu'elles prendront dans les processus de production...

15. Cela a probablement été une des causes principales de la baisse du fret ferroviaire en France.

de trajet donné au chargeur, mais au prix d'une utilisation certainement moins intensive de ses moyens de production : le transporteur doit trouver un équilibre entre coûts et niveau de service.

- *Localisation des entreprises* : La question du contrôle de l'inventaire à destination et du niveau de service a également des retentissements du point de vue de la localisation des entreprises. Nous citons ici l'étude de EVANS et HARRIGAN (2005), qui modélise le choix pour une entreprise vendant des vêtements aux Etats-Unis d'Amérique de se localiser au Mexique ou en Asie. Les coûts du travail sont moindre en Asie, et les coûts de transport pas vraiment plus élevés. Mais le risque d'invendus ou au contraire d'insatisfaction des clients peut justifier de se positionner au Mexique, surtout pour des produits à faible durée de vie commerciale. En Asie, il faut déterminer une quantité à produire, la fabriquer, l'acheminer et la vendre. Si la quantité produite était trop forte ou trop faible, il ne sera pas possible d'acheminer une seconde vague de produits. Au Mexique, il est possible de n'envoyer qu'une partie des commandes, d'attendre pour observer comment se comporte le marché avant d'envoyer une seconde partie le cas échéant. Les risques d'invendus ou de pénurie sont nettement mieux contrôlés.

On peut enfin observer que, dans le modèle, la valeur du temps *dépend* de la durée du transport¹⁶. D'un point de vue théorique, il n'est donc pas possible de caractériser un type de marchandise par une valeur du temps : celle-ci dépend en réalité des choix du chargeur, et en particulier du choix modal. Cela peut avoir des implications en terme de modélisation des comportements des chargeurs, ainsi que pour l'évaluation des projets d'infrastructure de transport.

Le temps dans le transport de marchandises

Les modèles présentés ci-dessus ont leurs limites. En particulier, le temps y est représenté de façon très simplifiée, linéaire. Les coûts liés au temps peuvent avoir des formes très diverses en fonction des chargeurs, des marchandises, et des chaînes logistiques. C'est le cas par exemple des marchandises ayant une date de péremption fixée, qui ne perdent pas leur valeur de façon progressive mais par paliers.

Par ailleurs, il faut prendre en compte la question complexe de la coordination entre transporteurs et chargeurs : si un chargeur n'admet les livraisons qu'à partir de six heures du matin, et qu'un transporteur arrive déjà en début de fenêtre temporelle de livraison, faire gagner une heure de temps de trajet au transporteur n'est pas nécessairement utile. L'organisation des transporteurs et la façon dont elle prend en compte différentes contraintes (comme les horaires de travail des conducteurs, ou les horaires de départ et d'arrivée des services

16. C'est une propriété que l'on constate également dans certains modèles théoriques de la valeur du temps de transport dans le domaine des voyageurs, on renvoie ici à nouveau à JARA-DÍAZ (2007) par exemple.

lorsque plusieurs modes de transport sont utilisés) rend également compliquée l'évaluation de ce que peuvent tirer les chargeurs et les transporteurs d'une amélioration des temps de trajet. Ce problème est discuté en détail dans NIÉRAT (2011) pour le cas du transport. Le sujet de la coordination des expéditions et des réceptions des envois avec les opérations industrielles de production et de transformation est étudié longuement par DAGANZO (2005), qui montre aussi les complexités qui en résultent.

Enfin, une troisième dimension temporelle importante et peu discutée dans cet ouvrage est celle de l'évolution des temps de trajet dans la journée, en particulier avec la congestion dans les zones urbaines. De nombreux travaux portent aujourd'hui sur la question du décalage des horaires de livraison en ville, car cette piste a été identifiée comme une des plus prometteuses pour réduire les impacts du transport de marchandises en ville tout en maintenant (voire en améliorant) la productivité. Il y a plusieurs travaux sur la question, on peut citer Jose HOLGUIN-VERAS et al. (2011), qui présente le résultat d'une expérimentation menée à New-York sur ce sujet.

4.3.2 Cas à deux modes : synchronodalité

La notion de synchronodalité a été introduite dans le Chapitre 1, p. 25. Dans la section précédente, nous avons vu que l'approche par le coût total logistique permet d'expliquer comment les caractéristiques des chaînes logistiques — en particulier les niveaux de service attendu par les clients des chargeurs — peuvent déterminer le choix modal. Nous avons pu également constater que le choix entre un mode léger, cher mais rapide, et un mode lourd, moins cher mais lent, s'accompagne d'un choix sur l'organisation de la chaîne logistique (détermination du stock de sécurité) et a des implications sur différents postes de coût : transport, stockage, immobilisation du capital, dépréciation, insatisfaction du client, etc. Mais nous n'avons fait que considérer le choix *exclusif* entre deux modes, et pas la troisième voie qui consiste à essayer de les combiner.

L'idée de la combinaison de deux modes par le chargeur, qui correspond à la définition de synchronodalité proposée par DONG et al. (2017), est qu'il faut combiner les modes lourds et légers afin de profiter à la fois du faible coût du mode lourd et du contrôle de stock à destination que permet le mode léger. D'un point de vue mathématique, le problème est bien plus complexe que celui du cas monomodal présenté ci-dessus. Nous n'allons pas présenter les développements mathématiques dans ce chapitre, car ils n'ont que peu d'intérêt : la structure des coûts et les effets en jeu sont très similaires à ce qui a été présenté dans la section précédente.

Présentation qualitative du problème : plaçons nous dans le même cadre que pour le modèle monomodal ; une demande aléatoire est exprimée à une destination donnée, et un chargeur doit desservir cette destination depuis un point d'origine avec un ou plusieurs modes de transport caractérisés, entre

autres, par des temps de trajet différents. On l'a vu, le désavantage du mode de transport lourd est que lorsqu'il y a un aléa à destination (demande trop faible ou trop forte), il n'est pas possible de le rectifier rapidement ; pour que ces aléas n'aient pas de conséquences rédhibitoires en termes de niveau de service il est nécessaire de prendre des précautions suffisantes (un stock de sécurité élevé), et donc coûteuses. Le mode de transport rapide n'a pas cet inconvénient ; mais il est plus cher.

Tous les modèles de choix modal en transport de fret considèrent que les différents modes de transport sont des options mutuellement exclusives. Que ce passe-t-il si on considère la possibilité de les combiner ? Faisons un raisonnement simple : si la demande à destination D_t est aléatoire, mais qu'on sait qu'elle est toujours supérieure à une certaine valeur d_{inf} ; alors on peut expédier chaque jour d_{inf} par le mode lourd et seulement $D_t - d_{inf}$ par le mode léger, ce qui réduit déjà les coûts de transport, sans modifier le niveau de service.

On peut aller plus loin, en mettant un protocole logistique en oeuvre tel que la part modale du mode lourd soit plus élevée. Dans un tel cas, il n'est par contre pas possible d'espérer atteindre le même niveau de service qu'en utilisant exclusivement le mode léger (intuitivement, le mode lourd, avec son temps de transport élevé, introduit un aléa supplémentaire sur l'inventaire à destination, que le mode léger doit gérer ; la configuration est moins favorable que lorsque le mode léger seul est utilisé et le niveau de service sera nécessairement dégradé). Mais la perte de niveau de service peut être plus que compensée par des économies de coût de transport.

La Figure 4.11, inspirée de DONG et al. (2017) illustre le problème discuté ici : on y observe la demande exprimée à destination, et la part du transport effectuée par mode léger et par mode lourd.

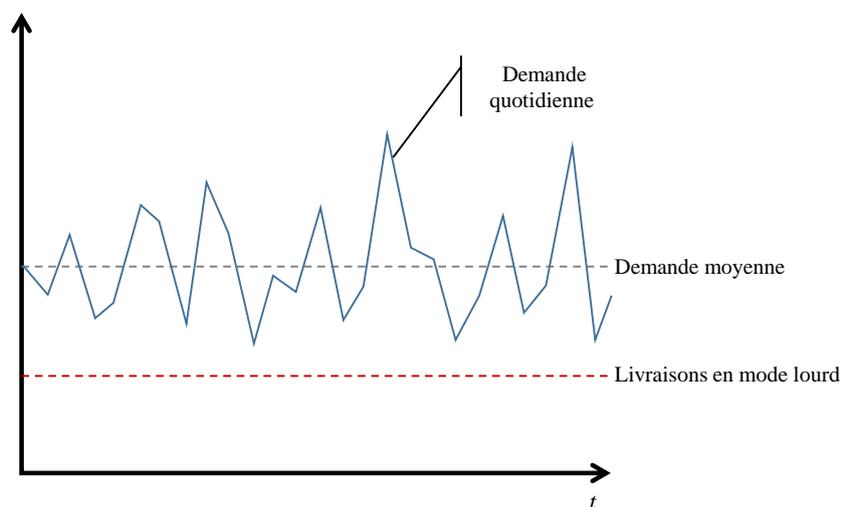


FIGURE 4.11 – Evolution temporelle de la demande à destination et part des différents modes de transport (à partir de DONG, BOUTE, MCKINNON et VERELST, 2017).

Si la part du mode lourd correspond à celle indiquée dans la figure, c'est-à-dire si elle est systématiquement inférieure à la demande, alors il n'y a pas de problème. Par contre, si on souhaite donner une part plus grande au mode lourd, arriveront en effet des cas où la quantité expédiée par le mode lourd sera plus élevée que nécessaire, avec pour résultat un moins bon contrôle de la chaîne logistique.

Exemples numériques : afin d'illustrer la possibilité d'utiliser deux modes de transport dans le cas d'une chaîne logistique bi-modale, ou synchronodale, nous reprenons les exemples numériques présentés dans la section précédente. On verra que deux situations distinctes se dégagent.

Dans le premier exemple, celui des ordinateurs portables, on examine toutes les combinaisons possibles de maritime et d'aérien, de 0 à 100% du mode maritime. On observe sur la Figure 4.12 l'évolution des différents coûts : comme attendu, plus la part du maritime augmente, plus le coût de transport diminue. Les coûts de stockage et de rupture de stock augmentent progressivement au début, puis plus rapidement lorsque l'on s'approche de 100% de maritime¹⁷. Par contre, le coût d'inventaire en ligne, du à l'immobilisation des marchandises dans le transport maritime, est ici rédhibitoire. Par conséquent le *TLC* est tout le temps croissant, et minimal quand la part du maritime est 0%. Le transport maritime est trop lent pour qu'il soit efficace d'utiliser un mix de maritime et d'aérien plutôt que de l'aérien pur. Bien que les contextes soient différents, on est dans une situation similaire à ce qui se passe dans la partie droite de la Figure 4.6 : le mode lent est beaucoup trop lent, le mode rapide sera privilégié par le chargeur.

Le second exemple, illustré ci-dessous par la Figure 4.13, est celui des voitures. On est ici dans la seconde situation : lorsque la part du ferroviaire augmente, le coût d'inventaire en ligne augmente certes, mais le coût de transport diminue plus fortement. Le *TLC* est donc décroissant, au moins jusqu'à un certain partage modal entre routier et ferroviaire. Au delà d'une certaine part du mode ferroviaire, par contre, la perte de contrôle sur l'inventaire à destination et les surcoûts engendrés en termes de stockage et de rupture de stock deviennent coûteux, et le *TLC* augmente à nouveau ; il n'est donc pas optimal de passer totalement au ferroviaire : la part optimale du ferroviaire s'établit ici environ à 75%.

Un troisième régime est possible, mais pas illustré ici car la méthode utilisée ne le permet pas : celui où l'utilisation du mode lourd à 100% est optimale, malgré le surcoût en termes de stockage et de niveau de service. Dans cette situation, le *TLC* est décroissant sur toute la plage de valeurs, et minimal pour

17. Ces exemples sont issus de F. COMBES (2011), où le processus de gestion de la chaîne logistique combinant deux modes est approximatif : plus on s'approche de 100% du mode lourd, plus le résultat est faux. L'algorithme développé par DONG et al. (2017) est pour sa part exact, et fournit qualitativement le même type de résultats. Il ne faut retenir ici que les conclusions qualitatives des exemples numériques, il n'est pas très grave que la méthode employée ici ne soit pas mathématiquement exacte.

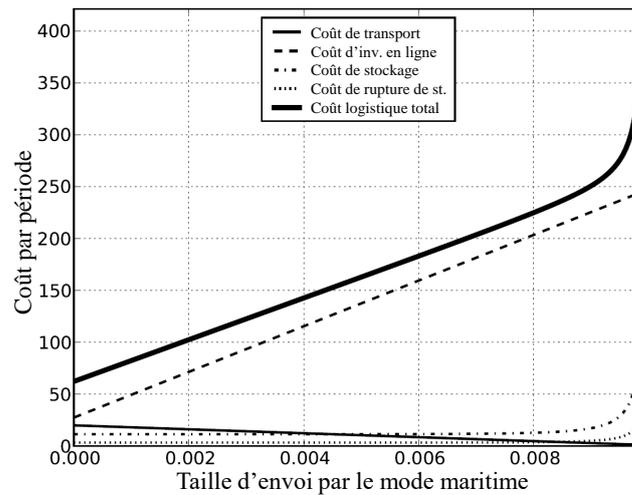


FIGURE 4.12 – Combinaison du transport maritime et du transport aérien dans l'exemple des ordinateurs portables : effet sur les coûts.

une utilisation exclusive du mode lourd.

Cette analyse a des implications de deux natures : du point de vue du partage modal, il faut envisager la possibilité que les chargeurs considèrent des modes de transport non pas comme substituables mais comme complémentaires. Certains le font déjà, comme cela a été indiqué plus haut, cette possibilité n'est donc pas une révolution. Mais cela ouvre un champ probablement intéressant : comment favoriser cette combinaison modale chez les chargeurs, Il ne s'agit pas uniquement d'agir sur les performances des différents modes et la façon dont ils s'inscrivent dans des chaînes logistiques existantes ; il s'agit ici de modifier les processus qui pilotent ces chaînes logistiques.

4.4 Conclusion

Ce chapitre a permis, avec la présentation d'un certain nombre de modèles, de présenter la place du transport de marchandises dans le fonctionnement des chaînes logistiques. Les chaînes logistiques sont d'une grande complexité et d'une grande variété, ce que les modèles présentés ci-dessus ne peuvent pas parfaitement refléter. Mais ils ont le mérite de mettre en lumière les liens entre transporteurs, chargeurs, et clients des chargeurs. Plus spécifiquement, voici quelques unes des conclusions principales de ce chapitre.

- Les choix des chargeurs dépendent du niveau de service attendu par leurs clients. Ce n'est pas le seul paramètre de choix, mais il a une grande importance.
- Le choix de mode et de type d'opération de transport ne dépend pas que des coûts du transport : une approche plus globale est nécessaire pour prendre en compte l'ensemble des paramètres qui déterminent le choix.

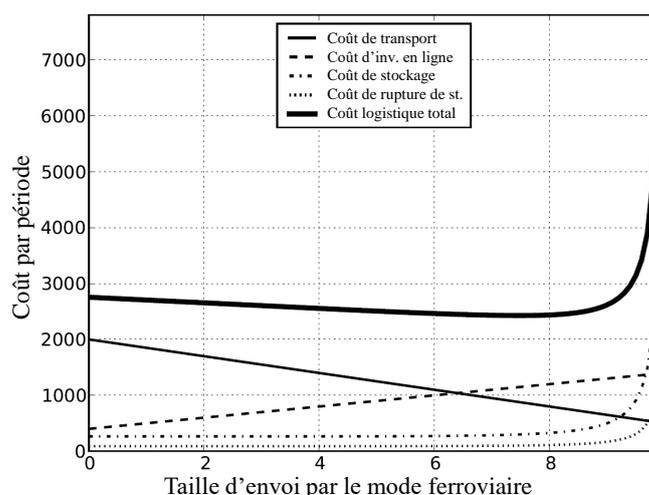


FIGURE 4.13 – Combinaison du transport maritime et du transport aérien dans l'exemple des voitures : effet sur les coûts.

- Dans la décision de choix modal, les chargeurs prennent en compte la structure des prix de transport, pas seulement un prix unitaire moyen.
- La gestion d'une chaîne logistique consiste entre autre à gérer des aléas. Les modes de transport rapides offrent un avantage aux chargeurs de ce point de vue, surtout si leurs clients sont à la fois imprévisibles et exigeants. L'immobilisation du capital n'est pas la principale raison pour laquelle les chargeurs ont une propension à payer pour que le transport soit plus rapide.
- Les modes de transport peuvent être combinés, afin d'offrir, dans le cadre d'une chaîne d'approvisionnement bi-modale, à la fois les faibles coûts d'un mode de transport lourd et la réactivité d'un mode de transport léger.
- Pour étudier ces sujets, des bases de données adaptées sont nécessaires : il s'agit d'enquêtes chargeurs observant non seulement les envois mais aussi les relations chargeur-destinataire.

Les modèles développés dans cette partie forment la base d'un ensemble de questions de recherche à étudier dans le futur. Parmi ces questions, on peut citer l'étude d'un modèle global rassemblant à la fois les caractéristiques du modèle EOQ et du modèle de réassort périodique ; l'étude approfondie des prix du transport pour mieux comprendre les choix des chargeurs via des approches de prix-périodiques ; une étude plus approfondie de la notion de synchronodalité, pour tenter d'en appréhender le potentiel (quelles pratiques aujourd'hui ? Quelles pistes de développement, s'il en existe ?)

Chapitre 5

Externalités positives du transport de fret et de la logistique

5.1 Introduction

Le transport de marchandises et la logistique sont largement connus pour les impacts négatifs qu'ils causent sur l'environnement et l'économie, via la pollution, la congestion, les accidents, les émissions de gaz à effet de serre, le bruit, etc. (Chapitre 2). La question d'éventuelles externalités positives dues à ce secteur est beaucoup moins traitée. L'objectif de ce chapitre, exploratoire, est d'étudier l'existence éventuelle d'externalités positives dans le transport de fret et la logistique, en s'appuyant sur les apports des chapitres précédents concernant la structure des coûts du transport (Chapitre 3) et celle des chargeurs (Chapitre 4). A travers deux modèles théoriques, que nous présentons ci-après, nous montrons qu'il est légitime de s'interroger sur cette question. Le travail présenté dans ce chapitre est à ce stade exploratoire.

Les seules références dont nous avons connaissance étudiant la présence d'externalités positives dans le fret et la logistique sont focalisées sur la mesure d'effets d'externalité d'agglomération dans l'économie. L'externalité d'agglomération est une externalité positive, car l'entreprise qui va s'installer là où beaucoup d'autres sont présentes pour bénéficier du surplus de productivité ne prend pas en compte le fait qu'elle même, en s'installant, accroîtra (ne serait-ce que marginalement) la productivité de toutes les autres. Il s'agit d'un concept essentiel d'économie géographique, qui participe à la compréhension des dynamiques de localisation des entreprises, des emplois et des gens, et aux caractéristiques économiques des villes et des territoires (P. P. COMBES, MAYER & THISSE, 2006).

En ce qui concerne le fret et la logistique, GRAHAM (2007) analyse les économies d'agglomération pour l'économie britannique. Il obtient une élasticité

de la productivité à la densité effective¹ égale à 0.041 pour les secteurs du commerce de gros et la distribution, et de 0.325 pour les services de transport. Il s'agit donc de coefficients plutôt élevés, surtout pour les transports. GRAHAM et KIM (2008) calculent également des élasticités d'agglomération par rapport à la densité effective pour différents secteurs de l'économie britannique, avec une segmentation moins fine, et obtiennent une élasticité de 0.014 pour la distribution, l'hôtellerie et la restauration d'une part, et de 0.265 pour le transport, le stockage et les communications d'autre part.

Les deux références donnent donc des conclusions relativement convergentes : il y a des externalités positives dans le transport et la distribution, et elles semblent élevées pour le transport. Mais ces articles ne discutent pas les causes de ces économies d'agglomération. Nous avons ici l'objectif d'en proposer quelques unes.

La première partie de ce chapitre (Section 5.2) analyse la présence d'économies d'échelle dans le modèle EOQ (présenté dans la Section 4.2), et son implication, notamment en termes d'évaluation de politique publique ayant un impact sur le coût du transport de marchandises. La seconde partie de ce chapitre reprend le modèle de coût des tournées développé dans la Section et élabore sur cette base un modèle de localisation d'entrepôt. Ce modèle est ensuite étudié sous l'angle de la structure des coûts, et ses implications, notamment en termes d'aménagement du territoire, sont analysées (Section 5.3). La Section 5.4 conclut le chapitre.

5.2 Économies d'échelle dans les chaînes logistiques : implications pour l'évaluation des politiques et projets de transport

Le modèle Economic Order Quantity présenté dans le Chapitre 4 décrit le choix de taille d'envoi par le chargeur comme un compromis entre les coûts de transport (plus les envois sont fréquents, plus le transport coûte cher) et les coûts de stockage (moins les envois sont fréquents, plus ils sont grands, et donc plus le stockage coûte cher.) Le modèle EOQ permet d'obtenir un optimum pour chaque niveau de flux expéditeur-destinataire Q .

A partir de là, il est possible de poser la question classique en économie de la structure des coûts. La base, pour étudier cette question, est la fonction de

1. Plusieurs approches sont possibles pour définir et calculer les économies d'agglomération. Une des principales consiste à chercher une relation causale entre densité géographique (par exemple densité d'emplois par unité de surface donnée) et productivité. Une autre consiste à utiliser le concept de densité effective, qui prend en compte non pas la présence d'emplois (ou d'autre chose) dans un périmètre physique donné, mais leur nombre dans un certain périmètre accessible par les transports. Il s'agit d'une sorte de moyenne des quantités d'emplois accessibles pondérés (ou plutôt pénalisés) par le temps qu'il faut pour y accéder. La seconde approche a pour qualité d'être sensible à la qualité de service des transports : une amélioration de l'offre de transport accroît la densité effective.

coût total logistique TLC construite dans la Section 4.2, et présentée, sous sa forme complète, par l'équation (4.10) reproduite ci-dessous :

$$TLC = \begin{cases} 2\sqrt{bQ(a+a_w)} + (at+c)Q & \text{si } Q \leq Q_K, \\ (a+a_w)K + \frac{bQ}{K} + (at+c)Q & \text{si } Q > Q_K. \end{cases}$$

Pour déterminer s'il y a des économies d'échelle, il suffit d'exprimer cette fonction sous forme unitaire (on notera ci-après $TLC_u = TLC/Q$ le coût unitaire) :

$$TLC_u = \begin{cases} 2\sqrt{\frac{b(a+a_w)}{Q}} + at + c & \text{si } Q \leq Q_K, \\ (a+a_w)\frac{K}{Q} + \frac{b}{K} + at + c & \text{si } Q > Q_K. \end{cases}$$

Le coût total logistique unitaire est très clairement décroissant en Q , que la contrainte de capacité soit saturée ou non : il y a donc bien des économies d'échelle, quelle que soit la valeur de Q .

La présence d'économies d'échelle dans un secteur a un ensemble des conséquences qui ne sont pas faciles à saisir, notamment car la modélisation des équilibres de marché et de l'établissement des prix devient autrement plus complexe que dans la situation classique, en économie, où l'on suppose que les rendements sont globalement constants ou décroissants. Afin d'étudier la question ici, une démarche simple est adoptée. Elle consiste à mesurer l'effet d'une modification des coûts de transport ou d'entreposage sur la collectivité. Dans un premier temps, un modèle simple est développé, où l'impact d'une variation d'une baisse des coûts et donc du paramètre c est étudiée (Section 5.2.1), pour le cas où la contrainte de capacité est saturée. Dans un second temps, l'analyse est généralisée (Section 5.2.2)

5.2.1 Cas simple : contrainte de capacité saturée

Nous examinons le cas d'une entreprise et de ses clients, dans une situation où la contrainte de capacité du transport est présumée saturée. Nous rappelons d'abord le cadre classique, sans économies d'échelle, afin d'ensuite le comparer au cas avec économies d'échelle pour identifier clairement les conséquences de leur présence.

Non prise en compte d'économies d'échelle : rappelons pour commencer la façon dont l'analyse se déroule dans le cadre usuel où l'on suppose l'absence d'économies d'échelle. Supposons, pour que le problème soit le plus simple possible, une demande de transport $D_t(Q_t)$ décroissante, et une offre de transport de coût généralisé $g = at + c'$ constant. L'équilibre offre-demande en concurrence parfaite est établi lorsque $D_t(Q_t^e) = g$. Le nombre d'entreprises n'intervient pas : les coûts étant supposés proportionnels à l'offre, peu importe le nombre et la taille des entreprises.

On examine l'impact d'une baisse des coûts (par exemple due à la mise en oeuvre d'un ou plusieurs projets de transport) sur la collectivité. Le bien-être social SW est défini comme le surplus social CS des consommateurs diminué des coûts de production :

$$SW = CS - Q_t(at + c'),$$

CS étant l'aire sous la courbe de demande :

$$SW = \int_0^{Q_t^e} D_t(q) dq.$$

La variation Δc du coût de transport engendre alors une modification du trafic et un impact pour la collectivité égal à :

$$\Delta SW = -Q_t^e \Delta c + \int_{Q_t^e}^{Q_t^{e'}} (D_t(q) - g - \Delta c) dq,$$

Le raisonnement est illustré par la Figure 5.1.

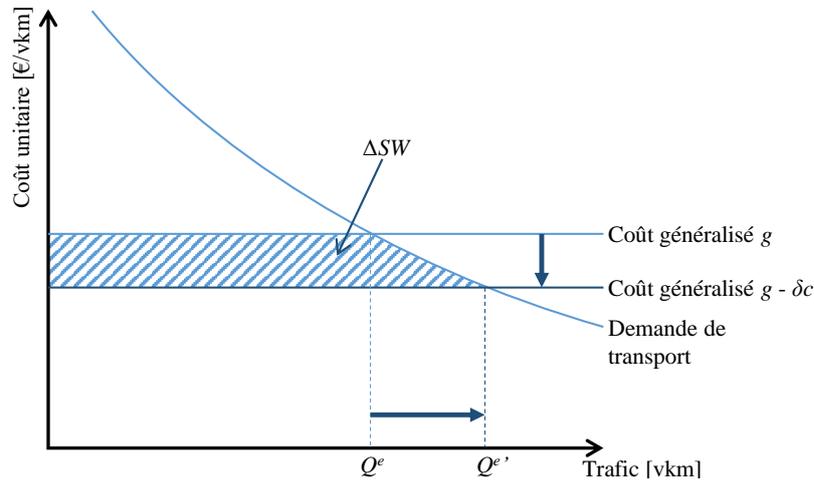


FIGURE 5.1 – Effet d'une baisse des coûts du transport.

S'il n'y a pas d'économie d'échelles, alors le gain pour la collectivité est, au premier ordre, donnée par le produit de la variation de coût dc par le trafic concerné Q_t^e :

$$dSW = -Q_t^e dc. \quad (5.1)$$

Ce résultat est le principe de base pour l'évaluation des projets d'infrastructure et les politiques publiques, notamment pour la réalisation d'analyses coût-bénéfice (voir, par exemple, DE RUS, 2010).

Prise en compte des économies d'échelle : le cas de l'entreprise.

Nous introduisons maintenant les économies d'échelle. Comme cela a été expliqué précédemment, introduire les économies d'échelle dans les analyses économiques est souvent techniquement complexe du point de vue de la modélisation. Nous allons faire ici un ensemble d'hypothèses de travail fortement

simplificatrices ; déterminer la façon dont on peut relâcher ces hypothèses ou leur impact en terme de validité du modèle devra faire l'objet de recherches ultérieures.

Nous considérons d'abord une entreprise, opérant dans un marché concurrentiel sans barrière à l'entrée, avec plusieurs concurrents. Cette entreprise vend ses produits dans un lieu de distribution donné à un prix p , en quantité Q . Il faut bien noter qu'ici, Q est la demande exprimée *pour l'entreprise*, et pas, comme ci-dessus, pour le marché. Pour acheminer ses produits depuis leur lieu de production, elle utilise des véhicules de capacité K , et il est optimal pour elle de les remplir. Le coût total logistique unitaire est donc :

$$TLC_u = (a + a_w) \frac{K}{Q} + \frac{b}{K} + at + c$$

Ces produits sont par ailleurs fabriqué à un coût unitaire (et marginal) fixe mc . Le profit de l'entreprise est donc :

$$\pi(Q, p) = (p - mc - TLC_u)Q$$

Nous allons maintenant simplifier drastiquement le problème, en ne nous intéressant pas à la façon dont sont fixés Q et p . Nous ferons uniquement l'hypothèse que puisqu'il y a libre entrée sur le marché, et si l'entreprise est active ($Q > 0$), alors, à l'équilibre de marché, le profit de l'entreprise est nécessairement nul ($\pi = 0$), c'est-à-dire que le prix doit couvrir les coûts moyens :

$$p = mc + (a + a_w) \frac{K}{Q} + \frac{b}{K} + at + c. \quad (5.2)$$

Quel est alors l'impact d'une variation dc ? Il faut ici prendre en compte la réaction de la demande Q : une variation des prix va engendrer une variation des quantités produites, qui elle même aura un effet sur les prix. On différencie l'équation (5.2) :

$$dp = -(a + a_w) \frac{K}{Q^2} dQ + dc.$$

La demande Q dépend elle-même du prix : $dQ = \varepsilon_Q^p dp$, où ε_Q^p est l'élasticité-prix de la demande pour l'entreprise. La variation de prix devient donc :

$$dp = -(a + a_w) \frac{K}{Q^2} \varepsilon_Q^p dp + dc,$$

et donc l'effet final d'une variation de c sur p est :

$$dp = \frac{dc}{1 + (a + a_w) \frac{K}{Q^2} \varepsilon_Q^p}. \quad (5.3)$$

Sachant que l'élasticité prix de la demande est négative, on a donc $|dp| > |dc|$: du fait de la présence d'économies d'échelles, l'effet sur les prix d'une modification du coût du transport dc est ajusté par un coefficient multiplicateur.

Il s'agit en quelque sorte d'une forme d'effet Mohring appliqué aux transports de marchandise (MOHRING, 1972) : la présence d'économies d'échelle dans la part des coûts supportés par l'utilisateur (ici le chargeur, et par suite, ses clients) a des implications complexes sur l'effet des projets et politiques de transport.

En effet, dans de telles conditions, comme nous l'indiquons dans le Chapitre 2, lorsqu'il y a plus de demande pour un service donné, le coût unitaire de production décroît. Cependant, le prix que le voyageur marginal sera prêt à payer pour utiliser le service ne prend pas en compte cette baisse de coût unitaire, dont tous les autres profiteront. Coût marginal et prix ne pourront s'égaliser, il y a distorsion de marché. C'est un phénomène exactement inverse de celui de la congestion. En termes de politique économique et de régulation, savoir si un secteur est caractérisé par des économies d'échelle et d'envergure pose les questions cruciales de présence de monopole naturel ou de concurrence imparfaite et de nécessité de régulation.

Cela dit, nous n'avons ici étudié que le cas d'une entreprise. Pour l'évaluation de politique publique, il s'agit d'évaluer l'effet d'une politique de transport sur un marché, un secteur, ou un territoire pris dans leur ensemble.

Prise en compte des économies d'échelle : le cas du marché. Pour passer du cas de l'entreprise au cas du marché, il n'est en principe pas possible de faire les raccourcis réalisés précédemment. En toute rigueur, il faut modéliser l'équilibre global sur le marché, le nombre d'entreprises à l'équilibre de marché et la quantité offerte par les entreprises à leurs clients. Nous n'allons pas ici dérouler l'ensemble du raisonnement, qui reste à établir².

Nous allons ici procéder à une série de raccourcis. Nous faisons l'hypothèse que n^e entreprises identiques se disputent le marché à l'équilibre. Elles offrent toutes un prix identique p^e . Il est ici nécessaire de distinguer clairement la quantité échangée sur le marché, qui sera notée Q^e , et la quantité produite par chaque entreprise, notée Q_u , et égale à l'équilibre à $Q_u^e = Q^e/n^e$. Pour calculer l'effet d'une variation dc du coût du transport sur le marché global, le raisonnement développé précédemment reste valide, si ce n'est qu'il faut remplacer dans l'équation (5.3) Q par Q_u^e (la quantité vendue par une entreprise à l'équilibre), et ε_Q^p (l'élasticité de la demande de l'entreprise par rapport au prix pratiqué par l'entreprise³) par $\varepsilon_{Q_u}^{p^e}$ qui est donc l'élasticité de la quan-

2. Il existe plusieurs pistes pour modéliser les marchés concurrentiels avec prise en compte d'économies d'échelle. nous n'allons pas toutes les lister ici. L'une d'elle consiste notamment à considérer que les produits offerts par les concurrents ne sont pas identiques mais sont des variantes pour lesquelles différents clients auront des préférences différentes. Cette différenciation horizontale des produits et l'hétérogénéité des produits permet de modéliser le fait que les entreprises tarifent leurs biens au dessus du coût marginal à l'équilibre, et peuvent donc couvrir leurs coûts moyens. On peut également faire l'hypothèse de libre entrée sur les marchés, auquel cas le profit des entreprises à l'équilibre est effectivement nul. Les principes généraux d'une approche de ce type sont présentés par exemple dans ANDERSON et al. (1992).

3. On peut d'ailleurs remarquer ici que nous avons laissé dans le flou la question du comportement des entreprises concurrentes dans la définition de cette élasticité : varier-

tité produite par entreprise à l'équilibre lors d'une variation globale du prix d'équilibre :

$$dp^e = \frac{dc}{1 + (a + a_w) \frac{K}{Q_u^2} \varepsilon_{Q_u}^{p^e}}. \quad (5.4)$$

Avant de conclure sur l'effet de la baisse de coût dc , il faut noter que l'élasticité de la quantité unitaire Q_u au prix d'équilibre p_e est la somme de deux élasticités : $\varepsilon_{Q_u}^{p^e} = \varepsilon_{Q^e}^{p^e} - \varepsilon_{n^e}^{p^e}$: si l'augmentation du prix d'équilibre p^e fait augmenter le nombre d'entreprises à l'équilibre n^e plus rapidement que la quantité échangée à l'équilibre Q^e alors $\varepsilon_{Q_u}^{p^e} < 0$, et l'effet d'une baisse du coût du transport dc sur les prix sera amorti : $|dp| < |dc|$. En quelque sorte, l'inverse de l'effet Mohring se déclenche, et on se trouve face à une externalité négative et non positive.

Dans le cas où $\varepsilon_{Q_u}^{p^e} > 0$, l'effet d'une variation dc sur le marché est effectivement amplifié par les changements dans les chaînes logistiques des diverses entreprises concernées. L'augmentation des fréquences d'envoi fait baisser les coûts logistiques unitaires TLC_u des entreprises. En ce cas, la variation du bien-être social peut être approximée au premier ordre ainsi :

$$dSW = - \frac{dc}{1 + \frac{(a+a_w)K}{Q_u^2} \varepsilon_{Q_u}^{p^e}} Q^e. \quad (5.5)$$

Si l'effet de correction du prix est faible devant l'effet initial alors, en première approximation⁴, la variation du bien-être collectif SW est la combinaison de deux effets : l'effet direct de la variation des coûts dc sur les prix et donc sur le surplus des consommateurs, et enfin l'effet indirect de la variation des coûts et des quantités transportées sur les coûts totaux logistiques :

$$dSW \simeq dSW^I + dSW^{II}, \quad (5.6)$$

avec :

$$\begin{cases} dSW^I & = -dcQ^e. \\ dSW^{II} & = \frac{(a+a_w)K}{Q_u^2} \varepsilon_{Q_u}^{p^e} Q^e. \end{cases}$$

Le résultat de la prise en compte de cet effet est illustré sur la Figure 5.2.

Comme indiqué en début de chapitre, ce raisonnement ouvre une question de recherche plutôt qu'elle n'y répond. La première conclusion qu'il faut en

elles leurs prix lorsque l'entreprise étudiée varie sont prix ? Et avec quel effet sur la demande pour l'entreprise étudiée ?

4. Ici, nous faisons également l'hypothèse que le surplus du consommateur est toujours calculé de façon classique. Selon la façon dont le marché est modélisé, ce n'est plus forcément valide. En particulier, si l'on fait l'hypothèse que les biens offerts par les différentes entreprises sur le marché sont différenciés horizontalement, il faut prendre en compte la préférence pour la variété de la demande : si le nombre d'entreprises n^e augmente à l'équilibre, alors le nombre de variétés disponibles sur le marché augmente, ce que augmente le surplus des consommateurs, toutes choses égales par ailleurs.

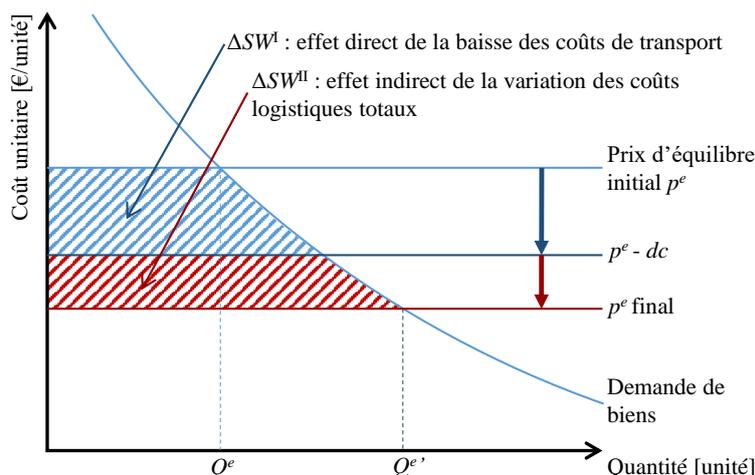


FIGURE 5.2 – Effet d’une baisse des coûts du transport : prise en compte du coût total logistique.

retenir est que la structure des coûts du transport de fret et de la logistique, par leur non-linéarité et par le fait que les chargeurs portent une partie des coûts, a des implications complexes, notamment en ce qui concerne l’évaluation de politique publique. La présence d’économies d’échelle, en particulier, doit être étudiée plus précisément : dans quelle mesure les évaluations socio-économiques de politique de transport, qui ignorent généralement ce phénomène, sont-elles loin du compte ?

5.2.2 Généralisation

Dans cette section, nous présentons rapidement deux généralisations du raisonnement présenté ci-dessus. La première consiste à ne pas considérer qu’une seule variation des coûts de transport variables par envoi c mais une variation plus générale de l’ensemble des paramètres de performance des transports : le coût fixe par envoi b , le coût variable par envoi c , et le temps de transport t .

Dans un premier temps, nous restons dans le cas où la contrainte de capacité des véhicules est saturée. Il faut donc différencier l’équation (5.2) adaptée de façon adéquate, ce qui donne :

$$dp^e = -(a + a_w) \frac{K}{Q_u^2} \varepsilon_{Q_u}^{p^e} dp^e + \frac{db}{K} + adt + dc,$$

à partir de quoi on déduit rapidement l’effet sur le bien-être d’une variation de l’un des trois paramètres, ou des trois ensemble :

$$dSW = -\frac{db/K + dc + adt}{1 + \frac{(a+a_w)K}{Q_u^2} \varepsilon_{Q_u}^{p^e}} Q_t^e, \quad (5.7)$$

ce qui donne une équation plus complexe que l’équation (5.5) mais fondamentalement très similaire.

Si l'on considère maintenant le cas où la contrainte de capacité n'est pas saturée, les choses deviennent un peu plus compliquées. Le coût total logistique unitaire est :

$$TLC_u = 2\sqrt{\frac{b(a + a_w)}{Q}} + at + c,$$

et le prix d'équilibre :

$$p^e = mc + 2\sqrt{\frac{b(a + a_w)}{Q}} + at + c.$$

En différenciant cette équation on obtient :

$$dp^e = \frac{\sqrt{(a + a_w)/Q}bdb + adt + dc}{1 + \sqrt{(a + a_w)b/Q} \varepsilon_{Q_u}^{p^e} \varepsilon_{Q_u}^{p^e}}$$

L'effet d'une modification des paramètres décrivant l'offre de transport sur le bien-être social est alors donné par l'équation ci-dessous :

$$dSW = -\frac{\sqrt{(a + a_w)/Q}bdb + adt + dc}{1 + \sqrt{(a + a_w)b/Q} \varepsilon_{Q_u}^{p^e} \varepsilon_{Q_u}^{p^e}} Q^e \quad (5.8)$$

Les équations (5.7) et (5.8) donnent l'effet marginal sur le bien-être social d'une modification d'un des paramètres b , c ou t qui décrivent l'offre de transport. Les conclusions qualitatives de la section précédente demeurent : la présence d'économies d'échelle dans les chaînes logistiques relatives aux quantités de marchandise transportées par entreprise a un effet indirect sur la valeur pour la société de projets ou de politiques de transport. Mais cela dépend de beaucoup de choses, notamment si l'on est en régime contraint ou non contraint (la forme de l'équation en est significativement modifiée), et du type de paramètre impacté.

5.3 Logistique urbaine : localisation des entrepôts, économies d'échelle et conséquences pour l'aménagement

Dans le Chapitre 3, la Section 3.3.1 présente un modèle de coût de tournées. Ce modèle a été initialement développé dans F. COMBES (2016) afin d'étudier la localisation des entrepôts, et plus généralement le sujet de l'étalement logistique. Le modèle de coût établi dans la Section 3.3.1 ne porte effectivement que sur la phase finale des livraisons, et conclut sans surprise que plus le mouvement d'approche du véhicule pour atteindre la zone de livraison est grand, plus le coût unitaire de livraison unitaire augmente. Il est possible d'insérer ce

modèle dans un modèle plus large, représentant la localisation des entrepôts comme un compromis entre coûts de transport et coûts fonciers. C'est ce qui va être présenté ici.

La Section 5.3.1 fait un point très rapide sur la question de l'étalement logistique. Ensuite, la Section 5.3.2 présente le modèle de choix de localisation des entrepôts. Enfin, les conséquences en termes de structure de coûts et d'action publique sont rapidement évoquées dans la Section 5.3.3.

5.3.1 L'étalement logistique

L'étalement logistique est le phénomène selon lequel, dans les grandes métropoles, les entrepôts et les centres de distribution s'éloignent de la ville plus rapidement que la ville elle-même ne croît. L'interprétation classique en est que la cherté du foncier chasse les activités des zones denses, avec comme contre-coup une augmentation des trafics pour acheminer les marchandises dans ces zones et donc des impacts générés par ces trafics (pollution, congestion, bruit, et.) qui fait l'objet aujourd'hui d'une littérature académique croissante. DABLANC et al. (2016) résume les connaissances actuelles sur ce phénomène.

De fait, l'étalement logistique a été étudié dans au moins une vingtaine de territoires. Par exemple, ANDRIANKAJA (2014) étudie la relocalisation des terminaux de messagerie à Paris entre 1974 et 2010, et conclut que la distance moyenne de ces terminaux au centre de la ville est passé de 6.4km à 18.1km sur cette période. SAKAI, KAWAMURA et HYODO (2015) étudient le cas de Tokyo et identifie une tendance similaire, mais de plus faible intensité. Ils montrent par ailleurs que ce n'est pas le loyer, mais le gradient spatial de loyer qui explique la localisation, quelque chose que le modèle théorique développé plus loin dans cette section retrouvera. Le cas Nord-Américain est étudié par DABLANC, OGILVIE et GOODCHILD (2014) et DABLANC et ROSS (2012), qui identifient également des tendances analogues à Los Angeles et Atlanta, mais pas à Seattle. Selon les auteurs, le cas de Seattle pourrait s'expliquer par des règles d'aménagement inhabituellement contraignantes, sans pouvoir toutefois éliminer d'autres explications potentielles.

5.3.2 Localisation des entrepôts : le modèle de coût

Dans la Section 3.3.1 a été établi un modèle du coût de transport pour des tournées de durée fixe H , desservant des points distants les uns les autres d'une distance moyenne δ , à partir d'un entrepôt localisé à une distance l du centre de la ville. Dans le cadre de ce modèle la contrainte de capacité des véhicules n'est pas prise en compte. Le coût unitaire de livraison obtenu est donné par l'Equation (3.11) reproduite ci-dessous :

$$c_r(l) = \frac{h + \delta/v_z}{H - 2l/v_a} 2l \left(c_d + \frac{1}{v_a} c_h \right) + \delta \left(c_d + \frac{1}{v_z} \right).$$

Pour intégrer les coûts de localisation dans le modèle, il faut intégrer le coût d'entreposage c_w (c'est-à-dire à la fois les coûts relevant du bâtiment lui-même,

mais aussi les coûts des opérations de manutention réalisées à l'intérieur). Dans ce modèle, ces coûts seront supposés proportionnels au nombre d'opérations réalisés (une par livraison) mais décroissants avec la distance au centre l . Le coût unitaire d'entreposage est donc supposé égal à $c_w(l)$, décroissant avec la distance au centre.

Il est désormais possible d'écrire une fonction de coût total logistique unitaire TLC_u qui dépendra de la distance au centre l :

$$TLC_u(l) = c_w(l) + c_r(l),$$

c'est-à-dire :

$$TLC_u(l) = c_w(l) + \frac{h + \delta/v_z}{H - 2l/v_a} 2l \left(c_d + \frac{1}{v_a} c_h \right) + \delta \left(c_d + \frac{1}{v_z} \right). \quad (5.9)$$

Si l'entrepôt se rapproche du centre ville, les coûts unitaires de transport diminuent : il est possible de faire plus de livraisons dans le cadre d'une tournée donnée, et donc la distance parcourue et le temps passé par arrêt sont moindres. A l'inverse, le coût du foncier augmente. Le coût logistique total comporte donc deux composants, l'un qui diminue, l'autre qui augmente. Dans certaines conditions, un compromis entre les deux se dégage, comme illustré par la Figure 5.3.

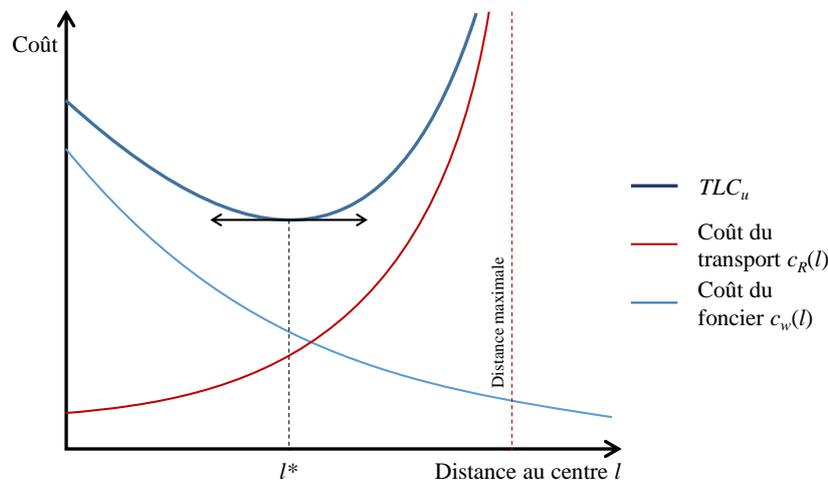


FIGURE 5.3 – Coût total logistique unitaire en fonction de la distance au centre de l'entrepôt.

On observe que la distance au centre ne peut pas dépasser la valeur limite $v_a H/2$: il s'agit du temps nécessaire pour que le véhicule fasse l'aller-retour. Si l'entrepôt est plus loin, alors il n'est pas possible de réaliser les livraisons dans le cadre de tournées de durée H . Dans le modèle, le coût de transport unitaire c_r croît vers l'infini lorsque l'on se rapproche de cette valeur limite.

Si certaines conditions mathématiques, portant notamment sur la forme de la fonction c_w , sont réunies, la localisation optimale de l'entrepôt vérifie la

condition suivante :

$$\frac{\partial TLC_u}{\partial l} = 0,$$

condition que l'on peut réécrire ainsi (voir F. COMBES, 2016 pour les détails) :

$$c'_w + 2c_l \frac{h_o}{H_r} + 2(c_{dl} + c_h H) \frac{h_o}{H_r^2 v_a} = 0. \quad (5.10)$$

On constate donc dès à présent que c'est le gradient du coût du foncier c'_w qui intervient dans l'équation, et non pas le coût du foncier lui-même. L'intuition derrière ce résultat est simple : éloigner l'entrepôt augmente les coûts de transport, donc cela n'a d'intérêt que si l'on économise sur le foncier. Si le foncier est très cher, mais très cher partout, alors autant se mettre au centre des zones à desservir (si c'est possible) et faire payer les clients.

Par ailleurs, l'équation (5.10) ne permet pas d'écrire sous forme close la distance optimale au centre de l'entrepôt, mais ce n'est pas très grave, car nous nous intéressons surtout ici à son comportement qualitatif. Il est par contre possible d'écrire la différentielle totale de cette équation afin de déterminer dans quel sens le changement d'un des paramètres fait changer la localisation optimale. Nous ne rappelons pas les détails, assez fastidieux, ils sont disponibles en annexe de F. COMBES (2016). A partir de ces calculs, il est possible d'établir les conclusions suivantes :

- La distance optimale *décroît* avec les paramètres de coût unitaire c_l et c_h : une augmentation des coûts d'utilisation des véhicules (qui peut venir de normes ou de réglementations sur les véhicules moins polluants par exemple) s'accompagne d'une tendance à un rapprochement des entrepôts.
- La distance optimale *décroît* avec la durée des opérations h : plus les livraisons sont lentes, moins il est possible de faire de livraison par tournées. Par conséquent, il est plus rentable de rapprocher les entrepôts.
- La distance optimale *croît* avec la durée de la tournée H : la limitation de la durée des tournées donne plus de poids aux mouvements d'approche et de retour dans le coût unitaire de livraison, et si cette contrainte se relâche, alors les entrepôts peuvent s'éloigner des villes.
- La distance optimale *croît* avec les vitesses d'accès v_a et inter-opération v_z : plus les vitesses sont élevées, plus il est possible de réaliser d'opération pendant une tournée, entraînant une baisse des coûts unitaires et donc une diminution de la nécessité d'être proche de la zone à desservir.
- La distance optimale *décroît* avec la distance inter-opération δ : plus les livraisons sont éloignées les unes des autres, plus chaque opération est coûteuse. Il devient alors préférable de rapprocher les entrepôts. A l'inverse, si les opérations sont très proches les unes des autres, cela peut engendrer un éloignement des entrepôts.

Malgré sa simplicité, ce modèle permet d'identifier un certain nombre de mécanismes intéressants. Il s'agit bien sûr d'une première approche, et un

travail de recherche et d'observation conséquent sera nécessaire pour l'affiner, le valider, ou le corriger si nécessaire. Parmi les pistes les plus importantes pour améliorer le modèle, la principale est l'introduction de la notion de niveau de service. Ici, la fréquence et les délais de livraisons sont exogènes. Or il s'agit, comme on l'a discuté dans le Chapitre 1, de deux dimensions essentielles de la logistique, peut-être avec encore plus d'intensité en urbain. Dans la suite de cette section, nous allons discuter brièvement quelles implications les résultats présentés ci-dessus ont en termes de politique publique. Ces conclusions sont à considérer comme temporaires, tant que cette dimension de niveau de service n'a pas été pleinement intégrée dans l'analyse.

Qu'en conclure en termes de politique publique ? Lorsque nous identifions, d'un point de vue théorique, une tendance vers un rapprochement des entrepôts, il est clair que nous faisons abstraction des questions pratiques d'aménagement, de disponibilité du foncier, etc. Mais ce n'est pas parce que le raisonnement est partiel et théorique qu'il faut le rejeter en son entier : si les entrepôts ont "envie" de se rapprocher et qu'ils ne le peuvent pas, cela implique que le surcoût pour les chaînes logistiques sera d'autant plus grand, et ce surcoût, manifestation d'une inefficacité dans le processus de distribution des marchandises, sera *in fine* supporté par les habitants.

En ce qui concerne les livraisons, cela ouvre un champ de travail très important sur la question de la gestion de la voirie et du stationnement. Ainsi, en Ile-de-France par exemple, les livraisons sont souvent faites en double file, illégalement, et les sanctions sont peu dissuasives, et peu appliquées (voir notamment BEZIAT, 2017). Mais si l'on se mettait à appliquer plus fortement la réglementation en Ile-de-France, cela aurait un surcoût immédiat significatif pour les opérateurs de transport, et une telle politique pourrait être très coûteuse de façon globale si elle n'était pas accompagnée, par exemple, d'une augmentation ou d'une meilleure gestion des aires de livraison.

La question de la durée des tournées est plus complexe, notamment du fait de la part de la sous-traitance dans le transport. Avant de considérer qu'il s'agit d'un levier d'action publique, il faut améliorer les connaissances sur les déterminants de cette contrainte. S'agit-il d'un problème de niveau de service (les tournées font moins de 4h parce qu'il faut livrer en moins de 4h) ? Auquel cas le modèle présenté ici n'est pas adapté pour répondre à la question, et il s'agit d'ailleurs d'un vrai sujet de recherche que de l'étendre afin d'incorporer la vitesse de livraison comme un paramètre explicite de niveau de service logistique. S'agit-il d'un problème de régulation du temps de travail ? C'est difficile à dire, compte-tenu de la part de sous-traitance dans le secteur de la logistique urbaine. Enfin s'agit-il d'un problème de coordination de différents processus industriels ? (les magasins ouvrent de telle à telle heure, acceptent les livraisons sur telles plages horaires, les transporteurs reçoivent les marchandises du reste du territoire à telle heure du soir, de la nuit, du matin, etc.) Dans ce dernier cas le problème est plus compliqué, mais de la coordination et des mesures incitatives peuvent modifier certaines pratiques, si cela s'avère pertinent.

Par ailleurs, se pose la question des externalités : comme indiqué ci-dessus, des entrepôts situés loin du centre des villes causent probablement plus d'externalités que s'ils étaient plus proches. Se pose aussi la question des lieux où les impacts de ces externalités se réalisent. Des travaux de recherche sont déjà en cours sur ce sujet. (voir par exemple DABLANC et al., 2016 p.43–68)

Enfin, le dernier point portant sur la distance inter-opération est particulièrement intéressant à deux titres. Premièrement, lorsque la quantité d'opérations augmente, alors leur densité augmente, de façon mécanique : la simple augmentation du nombre d'opérations se traduisant par une baisse de la distance moyenne inter-opération, et donc par une baisse de la nécessité d'installer les entrepôts à proximité des zones à desservir. Par conséquent, là où, intuitivement, on pourrait mettre sur le compte de l'évolution de l'occupation du sol et des coûts du foncier l'éloignement des entrepôts dans les grandes métropoles, le phénomène est peut-être au moins autant l'effet de la grande augmentation des livraisons issues notamment du développement du e-commerce. La deuxième implication relève de la structure des coûts et des implications en termes de politique publique, et est discutée juste après.

5.3.3 Structure des coûts, implications en termes d'aménagement.

Dans la section précédente, nous avons commencé à analyser l'effet de la distance inter-opération sur les coûts de livraison et sur la localisation des entrepôts. Nous revenons sur cette question plus précisément. En effet, dans tout l'ouvrage, cette distance a été considérée comme un paramètre exogène. En réalité, ce n'est pas le cas : plus il y a d'opérations à réaliser dans une zone donnée, plus la distance inter-opérations sera faible.

Peut-on quantifier ce phénomène simplement ? En principe, la modélisation des coûts des tournées est complexe, car les données nécessaires sont rarement disponibles et, même si elles l'étaient, simuler des tournées n'est pas un exercice de modélisation simple. Un ensemble de solutions approximatives permettant de contourner ces difficultés a été proposé par DAGANZO (2005). Par exemple, si F points sont aléatoirement répartis dans une zone d'aire A , alors, la distance moyenne entre deux points le long du plus court chemin qui les relie tous est approximativement égal à :

$$\delta = k\sqrt{\frac{A}{F}}, \quad (5.11)$$

où k est un coefficient multiplicatif donné. On peut retrouver le résultat intuitivement en raisonnant sur les unités : si on multiplie l'aire par 4 et le nombre de points est inchangé, alors la distance moyenne entre chaque point devrait être multipliée par 2. A l'inverse, comme l'illustre la Figure 5.4, si l'aire A reste inchangée mais que le nombre de point est multiplié par 4 alors la distance inter-opération devrait être divisée par 2.

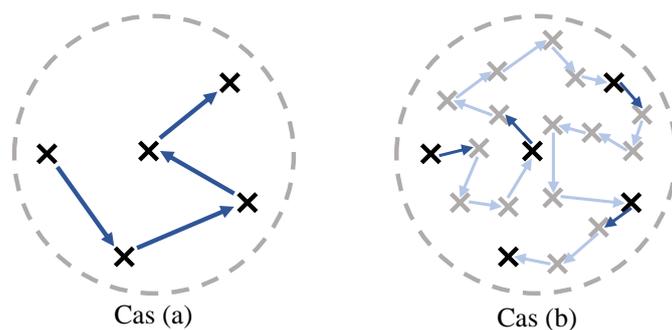


FIGURE 5.4 – Effet du hausse du nombre d'opérations : baisse des distances inter-opérations.

Mathématiquement, si l'on remplace δ par l'équation (5.11) dans l'équation (5.9) on obtient :

$$TLC_u = c_w(l) + \frac{2c_l l + c_h H}{H_r} h + \left(\frac{1}{v_z} \frac{2c_l l + c_h H}{H_r} + c_l \right) k \sqrt{\frac{A}{F}}$$

On observe que le coût unitaire décroît quand la demande globale F augmente : il y a donc des économies d'échelle, d'une nature différente de celle analysée dans la Section 5.2. La situation est cependant similaire : les acteurs privés doivent supporter leurs coûts, ils tarifient donc au minimum au coût moyen, et le prix d'équilibre sera nécessairement supérieur au prix optimal⁵ (qui est, en théorie, égal au prix marginal). Les quantités échangées seront donc inférieures à l'optimum, en d'autres termes, les gens ne se font pas livrer assez fréquemment !

Quelle conclusion en tirer en termes de politique publique ? Derrière la conclusion apparemment provocatrice se cache une vraie question. Dans le domaine des transports en commun par exemple, la présence d'économies d'échelle est plutôt largement acceptée comme un des arguments justifiant que l'on ne facture aux voyageurs qu'une partie des coûts moyens du transport, parmi d'autres comme la décongestion routière et plus généralement le report modal. L'idée est bien que si le système de transport collectif devait s'autofinancer, trop peu de gens l'utiliseraient. La logistique urbaine, et en particulier les livraisons, si elles sont trop peu fréquentes, engendrent des inefficacités en termes de niveau de service. Cela peut provoquer plusieurs conséquences, qui peuvent aller de la disponibilité d'une gamme de produits moins large à des

5. En réalité, derrière cette affirmation se cache un ensemble de questions économiques très importantes et intéressantes, parmi lesquelles la discrimination et la péréquation tarifaire auxquelles peuvent se livrer des grands acteurs du transport et de la logistique. Les acteurs profitent alors de leurs pouvoirs de marché et de l'hétérogénéité de la demande pour pratiquer des prix qui peuvent s'éloigner fortement des coûts marginaux, avec comme conséquence que certains segments de la demande peuvent en segmenter d'autres. Étudier et comprendre ces mécanismes et leurs impacts en logistique urbaine est une thématique de recherche certainement importante et très intéressante.

coûts de stockage plus élevés, ou tout simplement à des prix plus élevés pour les consommateurs.

Si l'on accepte qu'il y a sous-offre de logistique urbaine, la solution classique proposée par l'économiste est alors la subvention : il faut couvrir la différence entre coût moyen et coût marginal, afin d'atteindre les quantités optimales. On peut concevoir qu'il soit difficile de mettre en oeuvre une telle politique, tant financièrement que du point de vue de l'acceptabilité sociale. Mais il est possible d'aborder le problème de façon différente, sous l'angle de l'aménagement. On l'a vu, la localisation des entrepôts est une décision endogène, résultat d'un arbitrage entre coûts fonciers et coûts de transport. Il est alors possible d'influencer les coûts totaux logistiques en travaillant sur l'offre foncière, par exemple en mettant à disposition des surfaces réservées aux usages logistiques, sur un marché propre et non substituable avec d'autres usages comme le logement ou les bureaux. Dans ce cas, et si les prix du foncier ne montent pas trop (ce qui implique de proposer une offre suffisante), alors les coûts totaux logistiques pourront atteindre le niveau optimal qui assure que les quantités échangées soient également optimales.

Ce raisonnement demande lui aussi à être confirmé par des recherches complémentaires. Il faut cependant en retenir deux choses importantes. D'une part, dans l'action publique concernant la logistique urbaine, se pose la question de la performance et du niveau de service (malheureusement mal représentée dans le modèle actuel) : une baisse de la performance sera supportée par les habitants. Il faut donc garder un équilibre entre cet objectif et les objectifs de réduction d'impact tels que la pollution ou le bruit, par exemple. Deuxièmement, le foncier est un outil qui peut être mis en oeuvre pour accompagner des objectifs de politique publique. C'est particulièrement intéressant car la complexité de la structure des coûts a des implications qui ne peuvent pas facilement être traités par les instruments classiques de l'économie des transports.

5.4 Conclusion

Les quelques analyses exploratoires présentées dans ce chapitre montrent que la complexité de la structure des coûts du transport et de la logistique ont probablement des implications importantes en termes d'élaboration et d'évaluation des politiques publiques. Nous rappelons ci-dessous quelques résultats importants de ce chapitre :

- Pour étudier les éventuelles externalités positives liées au transport de marchandises et à la chaîne logistique, il est important de bien prendre en compte les coûts supportés par les chargeurs, et pas seulement les coûts des transporteurs.
- D'un point de vue technique, l'étude de la structure des coûts des chaînes logistiques est rendue complexe par le fait qu'il faut modéliser la façon dont les marchés se comportent : en effet les économies d'échelle dans les chaînes logistiques ne se manifestent pas par rapport

aux quantités globales échangées sur les marchés mais par rapport aux flux chargeurs-destinataires individuels.

- La relation entre coûts du transport et localisation des activités est très importante. Il s'agit d'un résultat fondamental de l'économie spatiale, mais examiné ici avec plus de détail que ce que l'on trouve habituellement dans la littérature académique relative à l'économie spatiale.
- Pour aller plus loin, les externalités analysées dans ce chapitre peuvent faire l'objet d'action publique relevant non pas des outils habituels de la politique des transports, mais de l'aménagement du territoire. Se pose alors la question des actions à mettre en oeuvre concernant la destination des sols et les loyers afin d'améliorer le fonctionnement global du transport de fret et de la logistique, et de la coordination des acteurs pour élaborer et mettre en oeuvre ces politiques.

De façon générale, un message important de ce mémoire est que dans l'action publique relative au transport de fret et de la logistique, il faut traiter de façon équilibrée les impacts négatifs (pollution, congestion, etc.) et la performance logistique (et donc les impacts sur l'activité et la compétitivité des entreprises, mais aussi les niveaux de service proposés aux consommateurs.) Ce sujet est d'autant plus important s'il y a des externalités, en particulier des externalités positives, liées à la structure des coûts. Dans ces conditions, une politique limitant l'activité du transport de fret et de la logistique aura un impact que les méthodes actuelles d'évaluation ne permettent pas de prendre en compte, ne serait-ce que qualitativement.

Conclusion

Le transport de fret et la logistique sont des fonctions essentielles du monde économique. Ce sont également des systèmes complexes, fortement intégrés l'un à l'autre, ainsi qu'au monde économique et aux territoires. Ils sont au coeur d'un système de contraintes fortes et largement contradictoires : ils doivent fournir le niveau de performance très élevés que les consommateurs attendent, tandis que ces mêmes consommateurs, également citoyens, en refusent les impacts. Les acteurs publiques et la collectivité doivent donc chercher à maintenir un équilibre, et pour cela influencer le fonctionnement de systèmes très complexes à appréhender. Cet équilibre doit être trouvé à plusieurs échelles : locale, métropolitaine, régionale, nationale et internationale ; entre plusieurs impacts : congestion, pollution, bruit, émissions de gaz à effet de serre, conflit d'usage avec les voyageurs, retombées économiques ; pour une fonction économique essentielle à l'ensemble du tissu économique, mais aux services d'utilisateurs très variés placés dans des contextes géographiques très divers ; et tout cela dans un cadre décisionnel complexe et mobilisant de nombreux acteurs.

Ce mémoire s'est efforcé d'éclairer ces deux mondes que sont le transport de marchandises et la logistique : d'abord en présentant les acteurs, et en plaçant le consommateur au sommet d'une chaîne économique et organisationnelle qui s'organise afin de répondre à ses besoins ; ensuite en identifiant les différents enjeux que soulève ce fonctionnement. La notion de niveau de service a été explicitée en détail, pour montrer d'une part que le transport de marchandises n'est pas un domaine homogène et uniforme, d'autre part que le transport de marchandises est en général au service de chaînes logistiques qui elles-mêmes doivent fournir une certaine qualité de service. C'est en particulier important pour l'évaluation de politiques publiques car l'effet d'une politique peut être une réduction de niveau de service et donc de performance économique, et il ne faut pas occulter une telle conséquence du débat.

Au centre de ce travail se place la question de la structure des coûts : c'est une question fondamentale, il faut, pour comprendre le transport de marchandises et l'utilisation qui en est faite dans les chaînes logistiques, savoir quelles ressources sont mises en oeuvre et comment. Il faut dans cette approche donner autant d'importance à l'offre (les transporteurs) qu'à la demande (les chargeurs), et ce pour deux raisons : d'abord parce que les chargeurs participent à la production du transport, et donc engagent eux-mêmes des ressources, ensuite parce que les décisions des chargeurs découlent de la façon dont les clients de ces chargeurs souhaitent disposer des produits qui leurs seront remis. Il s'agit

d'un problème systémique, qu'il faut donc aborder de façon globale, mais aussi d'un problème technique, et une approche lointaine et trop simplificatrice peut conduire à des conclusions erronées. Les modèles présentés dans ce mémoire restent d'une grande simplicité, et ne peuvent donc pas prétendre à reproduire l'infinie complexité du fonctionnement du fret et de la logistique. Ils sont pourtant plus fins que beaucoup de modèles que l'on peut retrouver dans la littérature et qui sont utilisés dans des contextes opérationnels de prévision de trafic, d'analyse coût-bénéfice de projets d'infrastructure voire d'évaluation de politiques publiques. Et ils montrent que beaucoup des variables dont il faudrait disposer pour améliorer les méthodes opérationnelles ne sont tout simplement pas observées.

L'approche privilégiée dans ce mémoire a été le développement de modèles théoriques relativement simples, quelquefois validés empiriquement. L'objectif a été de mettre en lumière quelques uns des mécanismes complexes qui régissent le fonctionnement du transport de marchandises d'une part, et les chaînes logistiques d'autre part, et la relation entre les deux. Ces modèles ont été développés avec des méthodes des sciences économiques, et exploités pour répondre à des questions de nature économique, mais aussi des questions de nature géographique : pertinence des modes, localisation des noeuds, hiérarchie des réseaux, massification, etc. Le transport de fret et la logistique sont des objets géographiques complexes, et leur fonctionnement et leur gestion posent des questions fondamentales d'aménagement du territoire, à propos desquelles nous espérons que ce mémoire propose quelques clés d'analyse pertinentes et utiles. Ces éléments de compréhension sont nécessaires à l'élaboration d'une politique publique, si cette élaboration a pour cadre une démarche qui comprend la compréhension et l'anticipation des effets sa mise en oeuvre.

Au delà du constat que tout cela est très compliqué, que conclure ? Du point de vue de l'action publique, le transport de marchandises et plus encore la logistique sont des sujets complexes car transversaux. Une question pratique se pose aujourd'hui à de nombreux acteurs publics : comment élaborer une politique publique de la logistique ? Et comment la mettre en oeuvre ? Cet ouvrage n'a pas la prétention de répondre à cette question complexe. Mais nous pouvons déjà rappeler que beaucoup des outils existent : la difficulté est dans la définition d'objectifs, démarche fondamentalement politique, puis dans la mise en oeuvre, qui pose de véritables problèmes de coordination, compte-tenu de la segmentation des échelles, des territoires et des acteurs dans les territoires. Il s'agit en effet que chacun, avec ses compétences et son territoire de référence, s'approprie des enjeux qui, en toute rigueur, le dépassent, mais qui doivent tout de même être pris en compte. Il s'agit également, et la question est probablement encore plus complexe, d'arbitrer lorsque différents acteurs ont des stratégies ou des objectifs contradictoires.

Les pistes présentées dans cet ouvrage ouvrent de nombreuses directions de recherche, plus qu'elles ne répondent aux questions. Méthodologiquement, ces travaux emprunteront à l'économie des transports, l'économie spatiale et aussi l'économie industrielle, mais aussi la géographie et l'aménagement du

territoire, l'observation des comportements (notamment des comportements d'achat), ce qu'il faut de gestion pour comprendre le fonctionnement des entreprises et leurs décisions, et les sciences politiques. Les approches devront être différenciées en fonction des territoires et des échelles, et prendre en compte par exemple les enjeux de l'urbain, ou ceux des chaînes logistiques internationales et intercontinentales. Des données nouvelles seront à recueillir pour éclairer pleinement ces enjeux, et différents protocoles d'observation, qualitatifs et quantitatifs, devront être combinés. Le travail qu'il reste à accomplir pour disposer d'une vision globale des enjeux et phénomènes relatifs au transport de marchandises et à la logistique est considérable.

Bibliographie

- ABATE, M. & DE JONG, G. (2014). The optimal shipment size and truck size choice—The allocation of trucks across hauls. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 59, 262–277.
- ABDELWAHAB, W. M. (1998). Elasticities of Mode Choice Probabilities and Market Elasticities of Demand : Evidence From a Simultaneous Mode Choice/Shipment-Size Freight Transport Model. *Transportation Research Part E*, 34(4), 257–266.
- ABDELWAHAB, W. M. & SARGIOUS, M. A. (1992). Modeling the Demand for Freight Transport : New Approach. *Journal of Transport Economics and Policy*, 26(1), 49–72.
- ALICE. (2014). Corridors, hubs and synchromodality : Research and innovation roadmap. Récupérée à partir de <http://euetpl-kirechlik.savviihq.com/wp-content/uploads/2015/08/W26mayo-kopie.pdf>
- AMBROSINI, C., ROUTHIER, J. L. & TOILIER, F. (2004). How do urban policies work on urban goods transport flows? In *Proceedings of World Conference on Transport Research*. Istanbul.
- ANDERSON, S. P., de PALMA, A. & THISSE, J.-F. (1992). *Discrete Choice Theory of Product Differentiation*. Cambridge, Massachusetts, London, England : MIT Press.
- ANDRIANKAJA, D. (2014). *Le “desserrement logistique”, quelle responsabilité dans l’augmentation des émissions de CO2 des activités de messagerie* (thèse de doct., IFSTTAR/Université Paris Est).
- ARROW, K. J., HARRIS, T. & MARSCHAK, J. (1951). Optimal inventory policy. *Econometrica : Journal of the Econometric Society*, 250–272.
- BALDWIN, R. & LOPEZ-GONZALEZ, J. (2015). Supply-chain Trade : A Portrait of Global Patterns and Several Testable Hypotheses. *The World Economy*, 38(11), 1682–1721.
- BALLOT, E., MONTREUIL, B. & MELLER, R. D. (2014). *The Physical Internet : The Network of Logistics Networks*. PREDIT.
- BAUMOL, W. J. [W. J.] & VINOD, H. D. (1970). An Inventory Theoretic Model of Freight Transport Demand. *Management Science*, 16(7), 413–421.
- BAUMOL, W. J. [William J]. (1977). On the Proper Cost Tests for Natural Monopoly in a Multiproduct Industry. *American Economic Review*, 67(5), 809–22.
- BECKER, G. S. (1965). A theory of the allocation of time. *The Economic Journal*, 75(299), 493–517.

- BEZIAT, A. (2017). *Approche des liens entre transport de marchandises en ville, formes urbaines et congestion - Le cas de l'Île-de-France* (thèse de doct., IFSTTAR/Université Paris Est).
- BLANQUART, C., GONÇALVES, A., RATON, G. & VAILLANT, L. (2015). Vecteurs et freins d'une logistique plus durable dans les circuits courts : le cas du Nord-Pas-de-Calais. In *ASRLDF*.
- CAPGEMINI & LANGLEY, D. C. (2016). *2016 Third-Party Logistics Study : The state of logistics outsourcing*.
- CARBONE, V. (2004). *Rôle des prestataires logistiques en Europe, intégration des chaînes logistiques et alliances logistiques* (thèse de doct., Ecole Nationale des Ponts et Chaussées).
- CARBONE, V., ROUQUET, A. & ROUSSAT, C. (2017). The rise of crowd-logistics : a new way to co-create value. *Journal of Business Logistics*. Forthcoming.
- CGEDD ET CGEIET. (2016). *Comment mieux observer la logistique en France ? Mieux connaître les performances pour mieux agir : Rapport CGEDD 010353-01 et CGEIET 2015/37/CGE/SG établi par Lionel Arcier et Hervé de Tréglodé*.
- CHRISTOPHER, M. (1992). Logistics and Supply Chain Management – Strategies for reducing costs and improving services. (p. 229). London, England : Pitman Publishing.
- COMBES, F. (2009). *The choice of shipment size in freight transport* (thèse de doct., Université Paris-Est).
- COMBES, F. (2010). Logistic imperatives and mode choice. In *ETC 2010 : European Transport Conference, Glasgow, UK, 11-13 October 2010*.
- COMBES, F. (2011). The simultaneous use of two transport modes on one shipper-receiver relationship. In *European Transport Conference*. Récupérée à partir de <http://abstracts.aetransport.org/paper/index/id/3781/confid/17>
- COMBES, F. (2012). Empirical evaluation of economic order quantity model for choice of shipment size in freight transport. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (2269), 92–98.
- COMBES, F. (2013a). Inventory theory and freight transport modelling. In L. TAVASSZY & G. DE JONG (Éds.), *Modelling freight transport* : (Chap. 5). Elsevier.
- COMBES, F. (2013b). On Shipment Size and Freight Tariffs Technical Constraints and Equilibrium Prices. *Journal of Transport Economics and Policy (JTEP)*, 47(2), 229–243.
- COMBES, F. (2016). A theoretical analysis of the cost structure of urban logistics. In *6th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, ILS Conference, June 1-4*. Bordeaux, France.
- COMBES, F. & DE PALMA, A. (2016). The Impact of Information Availability on Destination Choice. *Journal of Economics and Management Strategy*, 25(3), 678–687. doi :10.1111/jems.12152

- COMBES, F. & LEURENT, F. (2009). Representation of the freight transport system. In *European Transport Conference*. Leuvenhoorst, NL.
- COMBES, F. & LEURENT, F. (2013). Improving road-side surveys for a better knowledge of road freight transport. *European Transport Research Review*, 5(1), 41–51.
- COMBES, F. & TAVASSZY, L. A. (2016). Inventory theory, mode choice and network structure in freight transport. *European Journal of Transport and Infrastructure Research (EJTIR)*, 16 (1) 2016.
- COMBES, P. P., MAYER, T. & THISSE, J.-F. (2006). *Economie Géographique*. Economica.
- COMES, F. & COMBES, F. (2017). *Les enquêtes chargeurs en transport de marchandise*. Cerema.
- COMITÉ DES CONSTRUCTEURS FRANÇAIS D'AUTOMOBILES. (2014). *L'industrie automobile française – Analyse et statistiques*.
- COMMISSARIAT GÉNÉRAL À LA STRATÉGIE ET À LA PROSPECTIVE. (2013). *évaluation socio-économique des investissements publics : rapport de la mission présidée par Emile Quinet*.
- COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE. (2012). *SitraM-I : Le champ d'application des données à partir de 2009*. Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie. Récupérée à partir de http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Themes/Transports/Transport_de_marchandises/Tous_modes/Resultats_detailles/metadonnees.pdf
- COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE. (2015). *Les comptes des transports en 2014 : Tome 1, 52^e rapport à la Commission des comptes des transports de la Nation*. Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie.
- COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE. (2016a). *Les comptes des transports en 2015 : Tome 1, 53^e rapport à la Commission des comptes des transports de la Nation*. Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie.
- COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE. (2016b). *Projections de la demande de transport sur le long terme*.
- COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE. (2017). *La messagerie au quatrième trimestre 2016*.
- CONSEIL DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES. (1992). Directive 92/106/CE du Conseil du 7 décembre 1992 relative à l'établissement de règles communes pour certains transports combinés de marchandises entre États membres.
- COUNCIL OF SUPPLY CHAIN MANAGEMENT PROFESSIONALS. (2013). *Supply Chain Management Terms and Glossary*.
- DABLANC, L., BLANQUART, C., COMBES, F., HEITZ, A., KLAUENBERG, J., KONING, M., ... SEIDEL, S. (2016). *Observatory of Strategic Developments impacting Urban Logistics : CITYLAB Deliverable D2.1, Projet H2020*. Récupérée à partir de www.citylab-project.eu

- DABLANC, L., OGILVIE, S. & GOODCHILD, A. (2014). Logistics Sprawl : Differential Warehousing Development Patterns in Los Angeles, California, and Seattle, Washington. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (2410), 105–112.
- DABLANC, L. & ROSS, C. (2012). Atlanta : a mega logistics center in the Piedmont Atlantic Megaregion (PAM). *Journal of transport geography*, 24, 432–442.
- DAGANZO, F. F. (2005). *Logistics Systems Analysis* (Fourth). Berlin : Springer.
- DE RUS, G. (2010). *Introduction to cost-benefit analysis : looking for reasonable shortcuts*. Edward Elgar Publishing.
- DE VANY, A. S. & SAVING, T. R. (1977). Product Quality, Uncertainty, and Regulation : The Trucking Industry. *The American Economic Review*, 67(4), 583–594.
- de JONG, G. & BEN-AKIVA, M. (2007). A Micro-simulation Model of Shipment Size and Transport Chain Choice. *Transportation Research Part B*, 41, 950–965.
- DEIGHTON, J. (1992). The consumption of performance. *Journal of consumer research*, 19(3), 362–372.
- DINALOG. (2015). Synchronomodal transport. Récupérée à partir de <https://www.dinalog.nl/en/themes/synchronomodal/>
- DIRECTION GÉNÉRALE DES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT ET DE LA MER. (2016). *Le transport léger non établi de marchandises en France : Caractérisation et perspectives*. Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie.
- DONG, C., BOUTE, R., MCKINNON, A. & VERELST, M. (2017). Investigating synchronomodality from a supply chain perspective. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*.
- DORNIER, P.-P. & FENDER, M. (2007). *La logistique globale et le Supply Chain Management* (Second). Paris, France : Eyrolles.
- ELIASSON, J. & PROOST, S. (2015). Is sustainable transport policy sustainable? *Transport policy*, 37, 92–100.
- EVANS, C. & HARRIGAN, J. (2005). Distance, Time, and Specialization : Lean Retailing in General Equilibrium. *The American Economic Review*, 95(1), 292–313.
- FALLY, T. (2012). *Production staging : measurement and facts*. Boulder, Colorado, University of Colorado Boulder, May.
- FELTON, J. R. (1981). Impact of ICC rate regulation upon truck back hauls. *Journal of Transport Economics and Policy*, 15(3), 253–267.
- FORRESTER, J.-W. (1961). *Industrial Dynamics*. New York : Wiley Editions.
- FOSGERAU, M. & KARLSTRÖM, A. (2010). The value of reliability. *Transportation Research Part B : Methodological*, 44(1), 38–49.
- FRÉMONT, A. (2015). Les portes internationales des métropoles. Ports maritimes et aéroports. In L. DABLANC & A. FRÉMONT (Éds.), *La métropole logistique. Le transport de marchandises et le territoire des grandes villes* : (Chap. 2, p. 45–78). Paris, France : Armand Colin.

- FRIEDLAENDER, A. F. & SPADY, R. H. (1980). A derived demand function for freight transportation. *The Review of Economics and Statistics*, 432–441.
- GRAHAM, D. J. (2007). Agglomeration, productivity and transport investment. *Journal of transport economics and policy (JTEP)*, 41(3), 317–343.
- GRAHAM, D. J. & KIM, H. Y. (2008). An empirical analytical framework for agglomeration economies. *The Annals of Regional Science*, 42(2), 267–289.
- GUILBAULT, M. et al. (2006). *Enquête ECHO, Premiers Résultats d'Analyse*. INRETS.
- GUILBAULT, M. & SOPPÉ, M. (2009). *Apports des enquêtes chargeurs. Connaissance des chaînes de transport de marchandises et de leurs déterminants logistiques*. INRETS.
- HALL, R. W. (1985). Dependence Between Shipment Size and Mode in Freight Transportation. *Transportation Science*, 19(4), 436–444.
- HARRIS, F. W. (1913). How Many Parts to Make at Once. *Factory, the Magazine of Management*, 10(2), 135–136. 152.
- HELPMAN, E. & KRUGMAN, P. R. (1985). *Market Structure and Foreign Trade*. MIT Press.
- HOFFMANN, J. & ORTHLIEB, M. (2012). Logistics of international trade. In C. JAFFEUX (Éd.), *Essentials of logistics and management* : (Chap. 6, p. 138–172). epfl Press.
- HOLGUIN-VERAS, J. [J.]. (2002). Revealed Preference Analysis of Commercial Vehicle Choice Process. *Journal of Transportation Engineering*, 128(4), 336–346.
- HOLGUIN-VERAS, J. [Jose], OZBAY, K., KORNHAUSER, A., BROM, M., IYER, S., YUSHIMITO, W., ... SILAS, M. (2011). Overall impacts of off-hour delivery programs in New York City Metropolitan Area. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (2238), 68–76.
- INSEE. (2008). Nomenclature d'Activités Française - rév. 2. Récupérée à partir de http://recherche-naf.insee.fr/SIRENET_Template/Accueil/template_page_accueil.html
- JARA-DÍAZ, S. (2007). *Transport economic theory*. Elsevier.
- JENSEN, P. A. & BARD, J. F. (2003). The (s,Q) Inventory Policy. In *Operations research models and methods : T. 1*. (Chap. 5). John Wiley & Sons Incorporated.
- JIANG, F., JOHNSON, P. & CALZADA, C. (1999). Freight demand characteristics and mode choice : an analysis of the results of modeling with disaggregate revealed preference data. *Journal of transportation and statistics*, 2(2), 149–158.
- KARLIN, S. & SCARF, H. (1958). Inventory models of the Arrow-Harrison-Marschak type with time lag. In K. J. ARROW, S. KARLIN & H. SCARF (Éds.), *Studies in the Mathematical Theory of Inventory and Production* (p. 155–178). Palo Alto, CA : Stanford University Press.

- KONING, M., COMBES, F. & COULOMBEL, N. (2017). External marginal costs and optimal taxation of passenger and freight transport in large urban areas : the case of Paris, France. In *ITEA Annual Conference, Barcelona, Spain, 21-23 June 2017*.
- LANCASTER, K. J. (1966). A New Approach to Consumer Theory. *The Journal of Political Economy*, 74(2), 132–157.
- LLORET-BATLLE, R. & COMBES, F. (2013). Estimation of an inventory theoretical model of mode choice in freight transport. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (2378), 13–21.
- McFADDEN, D., WINSTON, C. & BOERSCH-SUPAN, A. (1985). Joint estimation of freight transportation decisions under non-random sampling. In A. DAUGHETY (Éd.), *Analytical Studies in Transport Economics*. Cambridge University Press.
- MIEBACH CONSULTING. (2017). *Nearshoring and onshoring as a competitive advantage : Increasing complexity of the Global Supply Chain*.
- MIKLIUS, W. (1969). Estimating freight traffic of competing transportation modes : an application of the linear discriminant function. *Land Economics*, 45(2), 267–273.
- MOHRING, H. (1972). Optimization and scale economies in urban bus transportation. *The American Economic Review*, 62(4), 591–604.
- NIÉRAT, P. (1997). Market area of rail-truck terminals : pertinence of the spatial theory. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 31(2), 109–127.
- NIÉRAT, P. (2011). Report modal : un problème de réseaux ou une question de services? *Recherche Transports Sécurité*, 27(4), 273–282.
- ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT – INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM. (2016). *Logistics Development Strategies and Performance Measurement – Roundtable Report 158*.
- ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT – INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM. (2017). *ITF Transport Outlook 2017*. doi :<http://dx.doi.org/10.1787/9789282108000-en>
- PIENDL, R., LIEDTKE, G. & MATTEIS, T. (2016). A logit model for shipment size choice with latent classes–Empirical findings for Germany. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 102, 188–201.
- PIPAME. (2009). *La logistique en France : indicateurs territoriaux*.
- POURABDOLLAHI, Z., KARIMI, B. & MOHAMMADIAN, A. (2013). Joint model of freight mode and shipment size choice. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (2378), 84–91.
- RAKOWSKI, J. P. (1976). Competition between railroads and trucks. *Traffic Quarterly*, 30(2).
- RÈME HARNAY, P., CRUZ, C. & DABLANC, L. (2014). La sous-traitance de la messagerie urbaine : logiques économiques et rapports de dépendance? *Économies et Sociétés : Série "Socio-Économie du Travail"*, AB, 36(9), 1473–1512.

- RODRIGUE, J.-P. (2017). *The Geography of Transport Systems*. Hofstra University, Department of Global Studies and Geography. Récupérée à partir de <http://people.hofstra.edu/geotrans>
- ROUTHIER, J.-L., SEGALOU, E. & DURAND, S. (2002). *Mesurer l'Impact du Transport de Marchandises en Ville : le Modèle de Simulation FRETURB v1*.
- ROYAL, S., MACRON, E. & VIDALIES, A. (2016). *France Logistique 2025, une stratégie nationale pour la logistique*.
- SAKAI, T., KAWAMURA, K. & HYODO, T. (2015). Locational dynamics of logistics facilities : Evidence from Tokyo. *Journal of Transport Geography*, 46, 10–19.
- SAMARCANDE AND SCET. (2012). *Le renouvellement du parc d'entrepôts en Île-de-France : Rapport final de l'étude*. Direction Régionale et interdépartementale de l'Équipement et de l'Aménagement.
- SAVY, M. (2015). *La logistique en France, état des lieux et pistes de progrès*. Rapport établi avec le concours du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, et du ministère de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique, et de la Commission nationale des services.
- SAVY, M. (2017). *Le transport de marchandises : Économie du fret, management logistique, politique des transports* (2nde édition). Presses polytechniques et universitaires romandes.
- SCHOR, J. (2014). Debating the sharing economy. Récupérée à partir de <http://www.greattransition.org/publication/debating-the-sharing-economy>
- SIRKIN, H. L., ZINSER, M., HOHNER, D. et al. (2011). *Made in America, again : Why manufacturing will return to the US*. Boston Consulting Group Chicago, IL.
- SU, X. & ZHANG, F. (2009). On the value of commitment and availability guarantees when selling to strategic consumers. *Management Science*, 55(5), 713–726.
- SUPPLY CHAIN MAGAZINE. (2017). *Newsletter quotidienne, n°2523, 27 juin 2017*.
- THE WORLD BANK. (2016). *Connecting to Compete : Trade Logistics in the global economy – the Logistics Performance Index and its indicators*.
- TRAN, N. K. & HAASIS, H.-D. (2015). An empirical study of fleet expansion and growth of ship size in container liner shipping. *International Journal of Production Economics*, 159, 241–253.
- VARGO, S. L. & LUSCH, R. F. (2008). Service-dominant logic : continuing the evolution. *Journal of the Academy of marketing Science*, 36(1), 1–10.
- WINDISCH, E., DE JONG, G., VAN NES, R. & HOOGENDOORN, S. (2010). A disaggregate freight transport model of transport chain and shipment size choice. In *ETC 2010 : European Transport Conference, Glasgow, UK, 11-13 October 2010*. Association for European Transport (AET).
- XU, K., WINDLE, R., GRIMM, C. & CORSI, T. (1994). Re-evaluating returns to scale in transport. *Journal of Transport Economics and Policy*, 8(3), 275–286.

- YAN, T., CHOI, T. Y., KIM, Y. & YANG, Y. (2015). A Theory of the Nexus Supplier : A Critical Supplier From A Network Perspective. *Journal of Supply Chain Management*, 51(1), 52–66. doi :10.1111/jscm.12070
- ZETES. (2017). *Comprendre le rôle du magasin physique dans un environnement de vente omnicanal.*