



HAL
open science

Le véhicule autonome va-t-il transformer en profondeur le transport de marchandises ?

El Mehdi Aboukacem, François Combes

► To cite this version:

El Mehdi Aboukacem, François Combes. Le véhicule autonome va-t-il transformer en profondeur le transport de marchandises ?. [Rapport de recherche] IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. 2019, 91p. hal-03173640

HAL Id: hal-03173640

<https://hal.science/hal-03173640>

Submitted on 25 Mar 2021

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

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

UNIVERSITÉ PARIS-EST
IFSTTAR
DÉPARTEMENT AMÉNAGEMENT MOBILITÉ TRANSPORT
SPLOTT

LE VÉHICULE AUTONOME VA-T-IL TRANSFORMER
EN PROFONDEUR LE TRANSPORT DE
MARCHANDISES ?

Rapport de recherche

El Mehdi ABOULKACEM

François COMBES

23 novembre 2019

Convention 17-MTI/SAGS-12-01

Table des matières

Résumé	9
1 Contexte, objectifs, méthode	13
1.1 Introduction	13
1.1.1 Véhicule autonome en transport de marchandises	13
1.1.2 Implications pour le transport de marchandises et pour la logistique	15
1.2 Questions de recherche	16
1.3 Méthode	16
1.3.1 Approche retenue	17
1.3.2 Architecture de la chaîne de modèles	18
1.4 Limites	21
1.5 Plan du rapport	23
2 Structure des coûts	25
2.1 Introduction	25
2.2 Description qualitative simplifiée des opérations de transport	26
2.3 Modèle micro-économique : cas FTL	27
2.3.1 Modèle théorique	27
2.3.2 Calibration	28
2.4 Modèle micro-économique : cas LTL	30
2.4.1 Modèle théorique	30
2.4.2 Calibration : modèle de tournée	31
2.4.3 Calibration : modèle LTL complet	33
2.5 Scénarios	35
3 Modèles de prix	39
3.1 Introduction	39
3.2 Données	39
3.2.1 Un rapide panorama des données de transport routier de marchandises.	40
3.2.2 Les enquêtes "chargeur" de l'IFSTTAR.	41
3.2.3 Variables et statistiques descriptives	42
3.3 Spécifications et estimations	46
3.4 Application des scénarios	51

4	Modélisation des chargeurs	53
4.1	Introduction	53
4.2	Quelques principes de théorie d'inventaire	54
4.2.1	La fonction de coût total logistique	54
4.2.2	Coût total logistique et choix de type d'opération de transport	58
4.3	Calibration de la fonction TLC	59
4.4	Modèle de choix FTL/LTL	66
4.4.1	Spécification du modèle	66
4.4.2	Estimation du modèle	67
4.4.3	Construction de la courbe ROC, choix de la valeur seuil .	69
5	Effets du véhicule autonome	71
5.1	Introduction	71
5.2	Effet sur les poids d'envoi	72
5.3	Parts d'envoi transportés en LTL/FTL	75
5.4	Effet sur les coûts logistiques	79
5.5	Discussion	82
	Conclusion	87

Table des figures

1.1	Architecture de la chaîne de modèles	20
1.2	Mise en oeuvre de la chaîne de modèles	21
2.1	Différentes organisations de transport (simplifiées)	26
2.2	Coûts de transport en fonction de la distance et du type de prestation	35
2.3	Coûts de transport en fonction de la distance, du type d'opération, du scénario, pour un envoi de 1.5t	38
3.1	Distribution des poids et des prix des envois, redressés en tonnage	47
4.1	Economic Order Quantity : inventaire	55
4.2	Composants de la fonction de coût total logistique	56
4.3	Taille d'envoi en fonction de a et Q	57
4.4	TLC en fonction de a et Q	58
4.5	Taille d'envoi et Coût Total Logistique, FTL vs LTL	60
4.6	Statistiques descriptives des coûts logistiques, par NST et type d'opération de transport, pondérés en tonnage	63
4.7	Valeurs du temps chargeur par NST et type d'opération	65
4.8	Courbe ROC du modèle retenu.	68
5.1	Distribution cumulée poids d'envoi sous chaque scénario	73
5.2	Variations des poids d'envoi en tonnes sous chaque scénario (pondération en tonnage), par NST	74
5.3	Parts des envois transportés en FTL et LTL dans les différents scénarios, par NST (pondération en tonnage)	76
5.4	Bascules d'une organisation de transport vers l'autre par NST, scénario PLA1 (pondération en tonnage)	77
5.5	Bascules d'une organisation de transport vers l'autre par NST, scénario PLA2 (pondération en tonnage)	78
5.6	Variations relatives des coûts logistiques sous chaque scénario (pondération en tonnage), par NST	80

Liste des tableaux

2.1	Paramètres du modèle de coût, cas FTL	30
2.2	Paramètres du modèle de coût de tournée, cas LTL	33
2.3	Autres paramètres du modèle de coût, cas LTL	34
2.4	Scénarios véhicule autonome pour le fret	37
3.1	Statistiques descriptives : enquête ECHO, envois routiers (sans pondération)	43
3.2	Statistiques descriptives : enquête ECHO, envois routiers (sans pondération)	43
3.3	Statistiques descriptives : contraintes de manutention	44
3.4	Statistiques descriptives : conditionnement	44
3.5	Statistiques descriptives : destination (France ou Europe)	45
3.6	Statistiques descriptives : nombre de ruptures de charge.	45
3.7	Modèles de prix FTL	49
3.8	Modèles de prix LTL	50
4.1	Statistiques descriptives des coûts logistiques normalisés, pondération en tonnage	62
4.2	Valeurs du temps chargeur : statistiques descriptives	64
4.3	Valeurs du temps chargeur, par NST, redressées en tonnage	65
4.4	Coefficients du modèle de choix.	67
4.5	Matrice de confusion.	70
5.1	Variations des poids d'envoi en tonnes sous chaque scénario (pondération en tonnage)	72
5.2	Variations des coûts totaux logistiques sous chaque scénario (pondération en tonnage)	79

Résumé

Le transport routier de marchandises est une activité dont une grande partie de l'économie dépend. L'apparition possible à moyen terme de véhicules partiellement ou totalement autonomes est susceptible de modifier profondément les équilibres économiques actuels, tant du côté de l'offre (les transporteurs) que de celui de la demande (les chargeurs). Les transporteurs réorganiseront leur production ; les chargeurs réorganiseront leurs chaînes logistiques. Les coûts pourraient diminuer de façon très importante, mais hétérogène en fonction des secteurs.

Pour mieux apprécier les effets éventuels de cette révolution technologique, ce projet de recherche propose d'en modéliser les impacts par une approche fondée sur la théorie d'inventaire. Cette approche permet de modéliser la façon dont les chaînes logistiques vont réagir à une modification de l'offre de transport, avec une prise en compte des coûts directs (ici le transport.) et des coûts indirects (ici, les coûts d'inventaire).

Une chaîne de modélisation est développée spécifiquement dans cet objectif. Un modèle micro-économique de la structure des coûts de transport est développé. Il distingue les diverses ressources et contraintes des transporteurs, et sert de base pour le développement de scénarios hypothétiques de véhicule autonome. Ensuite un modèle économétrique de prix de transport est spécifié et estimé. Un modèle du comportement des chargeurs est également développé ; les choix des chargeurs sont modélisés comme le résultat de la minimisation d'une fonction de coût total logistique. Cela permet de simuler l'effet des scénarios de véhicule autonome sur les chargeurs à trois niveaux : choix du poids des envois (quantités de marchandises remises par un expéditeur donné à un transporteur pour être remis à un destinataire donné), choix du type d'opération de transport (sans rupture de charge ou avec rupture de charge), et coût total logistique.

Ces modèles sont calés sur la base des données issues des enquêtes dites "chargeurs". Ces données comprennent des informations détaillées sur un certain nombre d'envois. En particulier, les variables suivantes sont renseignées : le poids de l'envoi, le conditionnement, la nature de la marchandise, la valeur, le prix de transport, le flux annuel entre le chargeur et le destinataire, etc. Ces informations concernent des envois individuels, et permettent donc d'estimer des modèles désagrégés. La disponibilité de ces données est essentielle à la mise en oeuvre de la méthode retenue dans le cadre de cette recherche.

La calibration des différents modèles de la chaîne de modélisation met en

oeuvre différentes méthodes, de la calibration manuelle à l'estimation statistique. En particulier, pour calibrer la fonction de coût total logistique, il est nécessaire d'inférer une valeur du temps chargeur pour chaque observation. Un résultat de ce travail est donc de proposer des distributions de valeur du temps "chargeur" pour chaque catégorie de marchandise, ce qui peut s'avérer utile pour la modélisation et l'évaluation du transport de marchandises de façon générale.

Deux scénarios de poids lourd autonome sont analysés. Par rapport à la classification SAE, il s'agit de deux scénarios de niveau 5, qui sont distingués par rapport à leurs ODD (*Operational Domain Design*). Le premier suppose que les poids lourds peuvent circuler sans chauffeur sur autoroute, mais sur les autres réseaux routiers. Le second suppose que les véhicules sont totalement autonomes. Dans le premier scénario, le véhicule est similaire à un poids lourd classique mais coûte plus cher. Dans le second scénario, le véhicule n'ayant plus besoin d'être conçu de façon à pouvoir accueillir un humain à bord, il coûte moins cher et a une plus grande capacité. Les niveaux SAE 1-4 ne sont pas simulés, car la présence d'un opérateur attentif à bord aura un coût proche de celui du SAE 0. Ces niveaux intermédiaires paraissent donc relativement peu intéressants d'un point de vue économique, par rapport au niveau 5. Le platooning n'est pas pris en compte dans cette recherche.

Le premier scénario donne des résultats globalement positifs mais hétérogènes. De façon générale, le transport coûte un peu moins cher et bénéficie donc aux chargeurs. Mais l'adaptation des chargeurs à la nouvelle structure des coûts de transport engendre des besoins de stockage accrus et donc une hausse des coûts d'inventaire. Dans certains cas, cette hausse est telle que la baisse des coûts de transport ne suffit pas à la compenser. Les effets de ce scénario sont variés en fonction des secteurs ; de façon générale les gains sont plus forts dans les secteurs agricoles et industriels, et tendent à faiblir pour les produits situés plus en aval des chaînes de valeur.

Le second scénario a des effets beaucoup plus forts, et les chargeurs bénéficient à la fois d'une baisse très forte des coûts de transport et d'une forte baisse des coûts d'inventaire. Les coûts totaux sont approximativement divisés par deux. Les effets sont relativement homogènes, tous les secteurs en bénéficient, et la quasi-totalité des chargeurs en bénéficient. Les gains dégagés par ce scénario sont bien plus élevés que ceux dégagés dans le scénario précédent, d'autonomie partielle.

De façon générale, les quelques conclusions suivantes peuvent être tirées de ce travail de recherche. D'abord, alors que les niveaux d'autonomie vus par les ingénieurs et techniciens (niveaux SAE) sont présentés sous la forme d'un ensemble toujours plus grand de fonctions toujours plus sophistiquées, les bénéfices économiques majeurs pour le transport routier de marchandises ne semblent se manifester que pour les toutes dernières étapes. Ensuite, il semble possible de postuler que les pays et territoires d'agriculture et d'industrie lourde bénéficieront plus de l'autonomie partielle que les territoires dont l'économie est plus pointue ou tertiarisée. Enfin, pour bien analyser ces béné-

fices économiques, il faut raisonner non seulement en termes de fonctions mais aussi en termes de domaines d'opération.

L'autonomie totale pourrait engendrer une réorganisation profonde du transport routier de marchandises et des chaînes logistiques. Les chargeurs profiteraient des véhicules autonomes pour augmenter encore l'agilité des chaînes logistiques, de façon à diminuer encore les niveaux de stock, ou à améliorer les niveaux de service pour leurs clients, et les clients de leurs clients. Les bénéfices économiques seraient donc importants et toucheraient à l'ensemble de la sphère économique. Mais cela soulèverait des enjeux de politique publique majeurs, notamment en termes de pollution et d'émission de gaz à effet de serre (en fonction de la motorisation de ces véhicules et des effets – probablement substantiels – de hausse de trafic) ainsi que de congestion, voir d'aménagement du territoire (avec la relocalisation d'activités économiques).

Chapitre 1

Contexte, objectifs, méthode

1.1 Introduction

La logistique correspond à la planification, à l'exécution et au contrôle efficaces des flux directs et inverses et des stocks de matériaux, services et informations entre le point d'origine et le point de consommation de façon à respecter les attentes des clients¹. Le transport de marchandises est l'activité économique qui consiste à déplacer les marchandises.

Le transport de marchandises et la logistique ont une place très importante dans l'économie. L'économie reste très matérielle, et les flux de marchandises sont, à l'échelle mondiale, en constante croissance (ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT – INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM [OECD/ITF], 2017a). Il est difficile de quantifier l'importance de ces secteurs dans les économies, du fait de l'existence du compte propre, tant en transport qu'en logistique : il s'agit des emplois et activités qui sont, concrètement, du transport ou de la logistique, mais qui sont réalisés au sein d'entreprises dont ce n'est pas l'activité économique principale, et qui ne sont donc pas mesurés dans les statistiques économiques classiques. On peut néanmoins estimer que le transport et la logistique représentent, en France, entre 10 et 15% de l'emploi. Pour ce qui concerne la part de ces secteurs dans le PIB, on peut estimer qu'elle est de 10% dans les pays développés ; elle peut atteindre 18% dans les pays en développement (RUSHTON, CROUCHER & BAKER, 2014).

1.1.1 Véhicule autonome en transport de marchandises

Comme de nombreux domaines liés à la mobilité, le domaine du transport de marchandises est susceptible d'être très fortement impacté par le déploiement de véhicules autonomes. Des efforts colossaux ont été investis par de

1. *"Logistics management is that part of supply chain management than plans, implements and controls the efficient, effective forward and reverse flow and storage of goods, services and related information between the point of origin and the point of consumption in order to meet customers requirements"*, (COUNCIL OF SUPPLY CHAIN MANAGEMENT PROFESSIONALS [CSCMP], 2013)

nombreux opérateurs pour développer ces véhicules autonomes. La variété des sociétés (notamment des start-ups) engagées dans le domaine, ainsi que celle des prototypes qu'on a pu voir circuler dans diverses circonstances montrent que le sujet est approché de très nombreuses manières différentes, chacune visant une certaine zone de pertinence.

On peut ainsi citer quelques initiatives sans prétendre à l'exhaustivité :

- Pour le transport de marchandises interurbain (et donc plutôt les gros véhicules tels que les semi-remorques), certaines sociétés développent des kits d'automatisation qui s'installeraient sur des véhicules existants, en retrofit. C'est le cas, par exemple, de la startup Otto rachetée par Uber en 2016.
- Plus radicalement, certaines sociétés tentent de mettre au point des semi-remorques totalement autonomes, et donc sans cabine. On peut citer le cas du véhicule Vera développé par Volvo, électrique, qui semble être capable de déplacer une semi-remorque. Etant sans cabine, ses dimensions sont fortement réduites par rapport à un tracteur routier classique.
- Certaines sociétés développent des véhicules de taille intermédiaires, comme Renault avec le EZ-PRO (annoncé en 2018) ; proche en dimension d'un véhicule utilitaire léger, il offrirait le même type de performances.
- De l'autre côté du spectre, beaucoup de sociétés développent des robots de transport de marchandise en milieu urbain, de capacité relativement limitée (quelques kilogrammes, ou quelques dizaines de kilogramme ; certains peuvent transporter plusieurs commandes simultanément ; certains peuvent opérer en mode "suiveur", c'est-à-dire qu'ils suivent un humain se déplaçant à pied). On peut citer le cas de TwinsWheel, véhicule à deux roues partageant un même axe, dont la charge utile est de l'ordre de quelques dizaines de kilogrammes, et qui fait moins d'un mètre de haut. Un autre exemple est le robot développé par la société Nuro, plus imposant, ayant quatre roues, et comprenant plusieurs compartiments séparés.
- Il faut citer également les solutions hybrides, c'est-à-dire combinant différentes techniques. C'est le cas par exemple de Ford qui a présenté en 2017 le concept Autolivery pour le transport de marchandise en ville. Un van autonome se positionne à proximité de la destination, et le colis est acheminé, localement, par drone.
- Certains concepts s'appuient sur des voitures autonomes classiques ; c'est le cas de Ford qui a testé en 2017 la livraison de pizzas en véhicule autonome, en partenariat avec Dominos Pizza.

En réalité, il est important de garder à l'esprit qu'en transport de marchandises comme en logistique, l'automatisation n'est pas nouvelle. Ainsi, les opérations automatisées sur site fermé existent depuis longtemps et sont relativement répandues, même si on est bien loin d'avoir fait disparaître tout besoin de main d'oeuvre. Il faut citer le cas des Véhicules à Guidage Automa-

tique (AGV - *Automated Guided Vehicle*) qu'on trouve typiquement dans les usines. On peut donc voir le développement des véhicules autonomes comme une extension de leurs domaines d'opération. Les premiers développements de véhicules autonomes en transport de marchandises, opèrent, d'ailleurs, en milieu fermé : c'est ainsi le cas de Volvo, qui a développé des véhicules autonomes transportant du calcaire entre une mine et un port voisin, en Norvège, depuis 2018.

Il est également important de noter ici que la notion de véhicule autonome regroupe des concepts très variés. Ainsi, le convoi automatique ou *platooning* est considéré comme une forme d'autonomisation partielle. La *Society of Automobile Engineers* a également proposé de distinguer six niveaux d'autonomie (de 0 à 5). Pour ce qui concerne ce rapport, nous ne considérons que des scénarios d'autonomie suffisants pour supprimer la nécessité de la présence d'un conducteur à bord du véhicule pour toute ou partie des opérations. Nous estimons que les scénarios où l'humain doit toujours être présent et attentif ne changent que très peu la donne du point de vue de la structure des coûts et des contraintes opérationnelles, et que leur intérêt est donc assez faible d'un point de vue économique.

1.1.2 Implications pour le transport de marchandises et pour la logistique

En transport de marchandises, la présence d'un véhicule autonome est susceptible de modifier fondamentalement le secteur. Il y a deux raisons à cela. D'abord, en transport de marchandises, la main d'oeuvre représente une part substantielle des coûts (de l'ordre d'un tiers pour le transport interurbain de fret). Ensuite, la présence de conducteurs à bord des véhicules engendre un grand nombre de contraintes opérationnelles liées, notamment, à la régulation des temps de travail, des temps de conduite et des temps de repos ; mais aussi au fait que les conducteurs doivent rentrer chez eux, sinon tous les soirs, du moins régulièrement ; et enfin du fait que les véhicules sont conçus de façon à pouvoir accueillir des opérateurs humains alors même que leur vocation première est de transporter des marchandises.

Du point de vue des chaînes logistiques, les conséquences seraient indirectes, mais importantes. D'une part, une forte modification de l'organisation et des contraintes des transporteurs se traduirait selon toute probabilité par une forte modification des prix. Cela réduirait les coûts de transport des chargeurs, mais par ailleurs, cela les inciterait à modifier leurs pratiques.

Par ailleurs, il est connu que le transport de marchandises n'est qu'une des nombreuses décisions qui doivent être prises en ce qui concerne une chaîne logistique. En particulier, il y a une interaction forte entre prix du transport et fréquence des expéditions ; et il y a aussi une interaction forte entre choix en termes de transport et choix en termes de stockage. Le mécanisme est simple : les fréquences d'expédition plus élevées se traduisent par des coûts de transport plus élevés ; en contrepartie les chargeurs bénéficient de niveaux de

stock plus faibles. Ce mécanisme a été théorisé par BAUMOL et VINOD, 1970. Mais si l'ensemble des prix varie substantiellement, les chargeurs pourront être amenés à réviser les choix qu'ils ont fait, avec un effet sur leurs pratiques et leurs coûts logistiques qui dépasse le simple périmètre du transport. Il est probable, de ce fait, que selon les caractéristiques des véhicules autonomes, les bénéfices relatifs de différents secteurs soient assez contrastés.

1.2 Questions de recherche

Le présent rapport a pour objectif d'étudier l'impact que pourrait avoir le déploiement de véhicules autonomes dans le transport de marchandises, et dans les chaînes logistiques, d'un point de vue économique. Comme expliqué ci-dessus, il s'agit d'une modification non triviale du système, car les contraintes opérationnelles avec lesquelles les opérateurs doivent composer pourraient s'en trouver fondamentalement changées.

Il faut dès lors se poser plusieurs questions :

- Quelles seraient les caractéristiques économiques du véhicule autonome en transport de marchandises ?
- Comment la structure des coûts d'un transporteur serait-elle modifiée par l'utilisation d'un véhicule autonome à la place d'un véhicule classique ?
- Comment les caractéristiques et les prix des prestations proposées par les transporteurs seraient-elles modifiées à leur tour ?
- Les chargeurs modifieraient-ils leurs pratiques ? Comment le marché du transport en serait-il affecté ?
- Quels effets globaux le déploiement du véhicule autonome aurait-ils en termes de coûts de transport et de coûts logistiques ?

Méthodologiquement, il s'agit d'accorder une importance centrale à la structure des coûts, et d'analyser ces coûts sur un périmètre élargi et pas seulement réduit au transport de marchandises à proprement parler. Le remplacement d'une ressource existante (le véhicule classique) par une nouvelle ressource (le véhicule autonome) est susceptible d'engendrer des conséquences en cascades. L'objectif est ici d'étudier l'enchaînement de ces conséquences.

1.3 Méthode

Le transport de marchandises peut, à tort, apparaître comme un domaine économique relativement homogène, à la structure des coûts simple. Il s'agit en réalité d'un marché différencié, où de nombreux opérateurs co-existent voire collaborent pour proposer aux chargeurs des prestations de caractéristiques variées. Il faut citer bien sûr les modes de transport (route, fer, fleuve, etc.) ainsi que les diverses combinaisons modales (transport combiné, autoroutes ferroviaires et maritimes, etc.) Mais la diversité est aussi très grande au sein d'un mode, comme on l'observe dans le cas du transport routier, avec un large

spectre de prestations (colis, messagerie, lot partiel, lot complet, transport exceptionnel) ; et une segmentation par type de marchandise ou de contrainte de manutention (animaux vivants, marchandises dangereuses, température dirigée). A chaque marché correspondent des techniques et des organisations : la complexité du domaine ne doit pas être sous-estimée.

L'examen des impacts d'une nouvelle technologie est rendu difficile par cette complexité. Idéalement, une telle analyse implique une connaissance fine de la structure des coûts. La structure des coûts est le concept qui établit le lien entre les prestations offertes par les transporteurs aux chargeurs et les ressources que ces transporteurs doivent engager. La notion de structure des coûts est également pertinente pour les chargeurs, pour comprendre comment ils décident d'organiser et de gérer leurs chaînes logistiques de façon à satisfaire leurs clients tout en contrôlant leurs coûts. Dans tous les cas, la structure des coûts est le reflet d'un état des techniques, ainsi que des contraintes opérationnelles avec lesquelles les transporteurs et les chargeurs doivent composer. On peut citer par exemple la vitesse maximale de circulation des poids lourds, leur charge et volume utiles ; ou encore les temps de conduite des chauffeurs routiers, ou le fait qu'ils doivent rentrer chez eux dormir régulièrement, sinon tous les jours.

1.3.1 Approche retenue

L'approche retenue dans cette recherche, pour proposer des éléments de réponse quantitatifs aux questions de recherche listées ci-dessus, est de mettre au point un modèle micro-économique représentatif du transport de marchandises en France, permettant d'estimer quantitativement l'effet de différents scénarios de véhicule autonome, en distinguant les secteurs, et en prenant en compte l'hétérogénéité intra-sectorielle. Plus précisément, la méthode s'appuiera sur les principes ci-dessous :

- Approche par la modélisation quantitative : des scénarios quantifiés de véhicule autonome seront élaborés, et leurs effets sur les coûts de transport et les coûts logistiques seront estimés quantitativement.
- Prise en compte du caractère différencié du marché du transport routier de marchandises : les différentes prestations offertes par les transporteurs ne sont pas moyennées dans un modèle de coût simplifié². la diversité des opérations est explicitement prise en compte, bien que de façon relativement simplifiée.
- Approche micro-économique : le véhicule autonome modifie les coûts et contraintes des transporteurs. Pour apprécier ces changements, il faut un modèle structurel explicite du lien entre ressources et prestations, afin d'analyser l'impact de l'utilisation d'un véhicule autonome,

2. Dans un modèle classique de transport de marchandises, il est courant de considérer que les coûts sont proportionnels aux t.km (voir par exemple TAVASSZY et DE JONG, 2013). La diversité des prestations est généralement réduite au choix modal : pour un mode de transport, la structure des coûts est supposée à rendements d'échelle constants.

en termes de coûts mais aussi de prix.

- Approche économétrique : un modèle micro-économique analytique est nécessaire mais pas suffisant pour représenter la diversité des prestations de transport. L'approche proposée consiste, à partir d'une base de données désagrégée de prix, à estimer un modèle statistique de prix dont les paramètres seront modifiés manuellement.
- Enquêtes chargeurs : les données utilisées dans cette recherche sont issues des enquêtes chargeurs réalisées par l'IFSTTAR, qui sont similaires aux *Commodity Flow Surveys* réalisées aux États-Unis d'Amérique. Il s'agit d'enquêtes réalisées auprès des clients des transporteurs et non, comme on le fait en général, auprès des transporteurs eux-mêmes.
- Théorie d'inventaire : enfin, pour étendre l'analyse aux coûts logistiques des entreprises et dépasser le cadre du transport de marchandises à proprement parler, nous proposons un modèle de coût logistique prenant en compte non seulement les coûts de transport mais aussi divers coûts d'inventaire.

D'un point de vue pratique, il s'agit donc d'une chaîne de modèles, dont l'architecture est décrite ci-dessous.

1.3.2 Architecture de la chaîne de modèles

La chaîne de modèles élaborée dans le cadre de cette recherche (figure 1.1) comprend quatre maillons :

1. *Modèle micro-économique de coût* : le premier modèle permet d'établir le lien entre le coût des ressources utilisées par un transporteur et les prestations qu'il produit. Les ressources utilisées par le transport sont groupées en deux catégories : celles dont la quantité nécessaire dépend des distances parcourues (comme le carburant) et celles dont la quantité nécessaire dépend de la durée des opérations (comme la présence d'un véhicule, ou d'un conducteur). Ce modèle prend en compte les contraintes opérationnelles (capacité d'un véhicule, présence ou non d'une personne, etc.) Les caractéristiques des prestations sont la quantité transportée et la distance origine-destination. Le modèle distingue deux types de prestation selon qu'il s'agit d'un gros envoi transporté sans rupture de charge, ou d'un petit envoi transporté avec rupture de charge³.
2. *Modèle économétrique de prix* : le second modèle permet d'établir le lien entre les caractéristiques des prestations réalisées par les transporteurs

3. En principe, il faudrait distinguer plus finement, par exemple la messagerie (envois de l'ordre de 100kg) et le colis (envois inférieurs à 30kg), mais, pour diverses raisons, ce niveau de détail n'est pas retenu. En effet, une segmentation plus fine rend plus complexe l'exercice de modélisation. Par ailleurs le manque de données permettant d'établir les modèles micro-économiques ne permet pas de proposer à la fois une segmentation fine et un calage robuste. Enfin les scénarios de véhicule autonome sont encore très futuristes, il n'est pas nécessaire de mettre un modèle exagérément fin en face d'hypothèses nécessairement très peu contrôlées.

et leurs prix. Ce modèle est calé économétriquement sur la base de données produites par l'IFSTTAR qui seront décrites en détail plus loin dans le rapport. Il s'agit de données désagrégées portant sur des envois⁴ et comprenant des informations concernant l'expéditeur, le destinataire, la relation chargeur-destinataire, et quelques informations relatives à la façon dont l'envoi a été transporté. Plusieurs variables de contrôle sont prises en compte, notamment le type de marchandise, mais aussi sa valeur, et diverses variables relatives au conditionnement et à la manutention (fragilité, caractère dangereux, etc.)

3. *Modèle de coût total logistique* : le troisième modèle représente le chargeur, qui doit décider de la fréquence des envois et de la façon dont ils seront transportés afin d'approvisionner un destinataire donné. Le modèle proposé ici est inspiré de la théorie d'inventaire, et consiste en une fonction de coût total logistique (TLC - *Total Logistic Cost*). Il s'agira en réalité de deux modèles, conditionnels au type d'opération de transport. Ces modèles ne peuvent pas être calibrés directement. L'hypothèse sera donc faite ici que la taille d'envoi observée est optimale, afin d'inférer une partie des paramètres de ces fonctions de coût. Ces modèles, une fois calibrés, pourront être utilisés en simulation pour modéliser la réaction des chargeurs face à une modification des conditions économiques.
4. *Modèle de choix de type d'opération de transport* : le dernier maillon de la chaîne permet de modéliser le choix pour un chargeur de passer par une opération de transport sans rupture de charge ou avec rupture de charge. Il s'agit d'un modèle de choix discret (voir par exemple BEN-AKIVA et LERMAN, 1985) standard, avec deux alternatives. Chaque alternative est représentée par une variable latente qui s'appuiera sur les coûts totaux logistiques calculés à l'étape précédente.

Le choix de combiner une approche micro-économique et une approche économétrique doit être expliqué un peu plus précisément. L'approche micro-économique est indispensable. En effet, les données à partir desquelles le modèle économétrique est calibré ne comportent pas assez d'informations sur la façon dont le transport a été produit pour savoir comment les prix seraient modifiés si l'on remplaçait un véhicule classique par un véhicule autonome. Il manque, en quelque sorte, des éléments de comptabilité analytique, qu'il faut donc reconstruire. L'élaboration du modèle micro-économique répond à ce besoin.

A l'inverse, le modèle micro-économique ne peut suffire pour l'ensemble de l'analyse. En effet, le modèle ne permet pas de reproduire la grande diversité des prestations et des prix observés. Il n'est pas possible d'intégrer les différentes variables de contrôle dont nous disposons, par ailleurs, dans les données.

4. Suivant GUILBAULT et SOPPÉ (2009), l'envoi est défini comme une quantité de marchandises données remise à un transporteur afin d'être acheminée jusqu'à un destinataire unique en une seule opération.

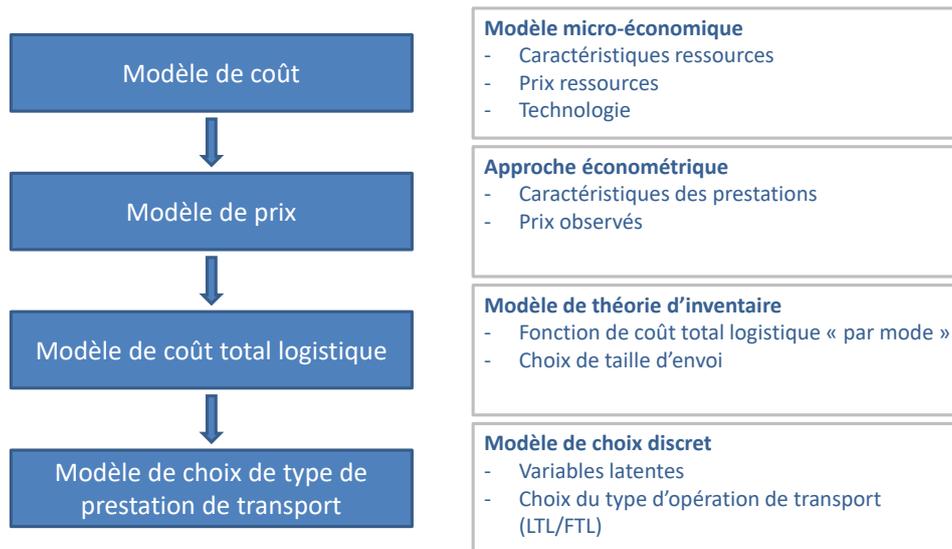


FIGURE 1.1 – Architecture de la chaîne de modèles

L'approche retenue ici consiste donc à estimer économétriquement un modèle de prix relativement fin. Le modèle de coût sera utilisé afin de calculer des variations de coefficients qui seront appliquées au modèle de prix. Nous verrons cependant que certains choix doivent être faits, pour lesquels il n'est pas facile de déterminer quels sont les meilleures alternatives. Cette approche hybride comprend une certaine part d'arbitraire.

La figure 1.2 décrit la mise en oeuvre de la chaîne de modèle en simulation. Un scénario de véhicule autonome est injecté dans le modèle de coût. Les paramètres du modèle sont modifiés en conséquence ; ces modifications engendrent des modifications des prix. Celles-ci sont transférées au modèle économétrique de prix de la façon la plus pertinente possible. Ainsi, les chargeurs sont confrontés dans le troisième maillon de la chaîne à des grilles tarifaires modifiées. Cela a deux conséquences. D'abord, les chargeurs modifient les tailles d'envoi ; ensuite, leur coût total logistique est modifié.

Enfin, le choix de type de prestation de transport est déterminé. Cela suppose que le coût total logistique a, en amont, été calculé pour chaque alternative, c'est-à-dire celle effectivement choisie par le chargeur, mais aussi pour celle qu'il n'a pas choisie. Le modèle de choix discret détermine sur la base des coûts des deux solutions laquelle est finalement retenue. La simulation, réalisée pour chaque observation de l'échantillon, est complète après cette étape. Il est alors possible d'analyser d'une part les modifications des choix des différents agents, d'autre part les effets en termes de coût, non seulement de transport, mais aussi logistiques.

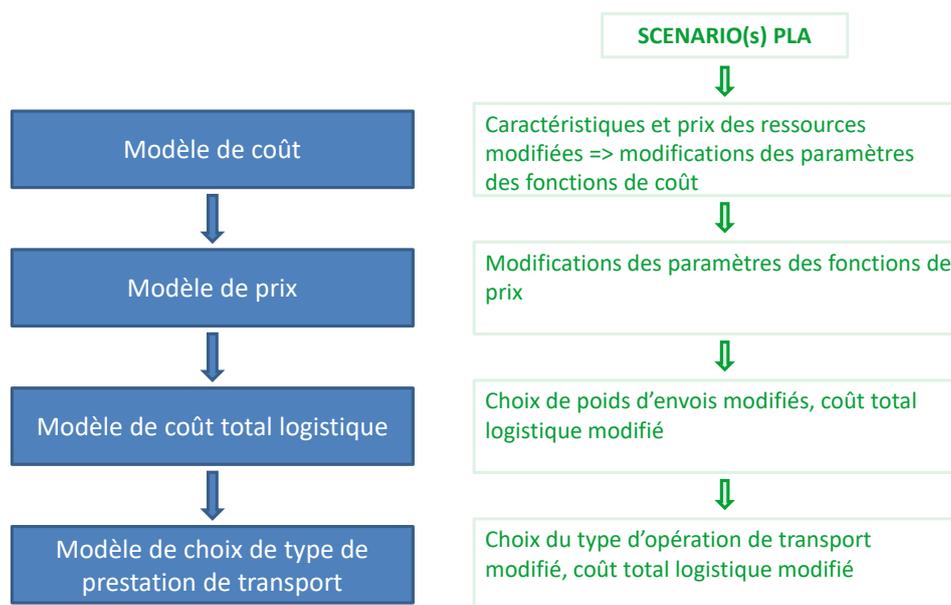


FIGURE 1.2 – Mise en oeuvre de la chaîne de modèles

1.4 Limites

Le sujet des impacts du véhicule autonome en transport de marchandises est large ; il est nécessaire d'expliquer précisément le périmètre de cette recherche. Les limites (c'est-à-dire les questions et enjeux intéressants mais qui ne pourront être abordés) sont détaillées ici.

Par ailleurs, cette recherche est limitée au transport routier de marchandises. Il s'agit du mode de transport principal actuellement en France ainsi que dans beaucoup d'autres pays, en ce qui concerne le transport intérieur (voir par exemple COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE [CGDD], 2018), avec une part modale à 89% en 2017. Mais le sujet du véhicule autonome en transport de marchandises dépasse clairement celui du transport routier et concerne probablement l'ensemble des modes. Une recherche plus globale mériterait d'être engagée pour analyser ce périmètre élargi. La question des ruptures de charge multimodales devrait alors être examinée en détail.

Comme cela a déjà été expliqué, ce rapport n'examine pas les niveaux d'autonomie qui requièrent la présence d'un opérateur humain attentif à bord des véhicules. Il nous semble que d'un point de vue économique, les niveaux d'autonomie SAE de 0 à 4 n'auront pas d'impacts substantiels sur la structure des coûts et les pratiques des opérateurs. Par contre, des scénarios sont élaborés distinguant différents domaines d'opérations. Le platooning n'est pas pris en compte ici, il s'agit d'un sujet bien particulier, nécessitant des approches spécifiques, traité dans d'autres recherches⁵.

En réalité, un déploiement massif de véhicules autonomes dans le trans-

5. voir, par exemple, le projet H2020 ENSEMBLE, en cours ; <https://platooningensemble.eu/>.

port de marchandises aurait également d'importantes conséquences sur l'emploi ainsi que sur l'environnement. Malgré l'importance de ces questions, elles ne constituent pas le coeur du sujet de ce rapport et ne seront que brièvement discutées. Le sujet de l'emploi a été traité précisément dans OECD/ITF (2017b). Il faut noter en tout cas, malgré les développements de l'automatisation dans les entrepôts, une augmentation 70% des effectifs en entreposage et manutention entre 2000 et 2017 — et de 15% dans le transport routier de marchandises, sur la même période (CGDD, 2018).

La question des impacts environnementaux et de la façon dont ils seraient modifiés par le déploiement massif de véhicules autonomes est, bien sûr, une préoccupation fondamentale. Malheureusement elle pose plusieurs questions méthodologiques compliquées qui n'ont pu être traitées ici. Il s'agirait de rajouter un maillon dans la chaîne de modèles décrite ci-dessus, faisant le lien entre le type de prestation de transport et ses impacts environnementaux. Sur ce point un certain nombre de travaux existent (voir par exemple RIZET, CRUZ et de LAPPARENT, 2014a.) Il s'agirait aussi d'être capable de prévoir les caractéristiques des véhicules autonomes en termes d'impacts environnementaux, en privilégiant une approche en analyse de cycle de vie, et malheureusement ces travaux n'ont pu être menés dans le cadre de cette recherche.

Une autre question qui préoccupe les opérateurs est celle des effets sur les marchés, les marges, et la compétitivité de façon générale. Il s'agit ici aussi d'un enjeu important mais complexe à appréhender et ce rapport n'apportera pas d'éléments à ce sujet. La difficulté principale est qu'il est difficile d'établir un lien direct entre coûts et marges : ce n'est pas parce que le véhicule autonome permettrait une baisse substantielle des coûts qu'un transporteur en tirerait mécaniquement un gain symétrique en termes de bénéfice. Par le jeu de l'offre et de la demande et de la concurrence, il est probable que les prix s'adapteront ; et une situation dans laquelle la marge des transporteurs est la même à la fin qu'au début est parfaitement envisageable.

Plus complexe encore est la question des structures de marché. Le transport routier de marchandise est fortement concurrentiel ; il est aussi caractérisé par une forte diversité des opérateurs. On trouve ainsi beaucoup d'artisans chauffeurs routiers, beaucoup de PME, et un certain nombre de grands groupes. Les relations entre tous ces opérateurs sont complexes, et forment un mélange difficilement compréhensible de concurrence, coopération, sous-traitance. Ce rapport, avec les méthodes qui ont été mis en oeuvre, n'offre malheureusement pas d'éclairage sur l'évolution possible de cet état de fait.

Il faut enfin noter que l'analyse menée ici n'est pas une analyse coût-bénéfice globale. Il ne s'agit donc pas de répondre à la question "le véhicule autonome apporte-t-il un bénéfice socio-économique à la collectivité ?", comme d'autres travaux ont pu le traiter. Une telle approche aurait pour objectif de mettre en balance les coûts privés et bénéfices privés apportés par le déploiement des véhicules autonomes, mais aussi les coûts publics (ce serait le cas si des investissements publics étaient requis), des bénéfices publics (par exemple des recettes supplémentaires de taxe sur le carburant, le cas échéant) ou des

externalités (pollution, congestion, accidents, bruit, etc.) La recherche présentée dans ce rapport est réalisée avec le point de vue des acteurs privés, il s'agit d'un exercice différent, même si de nombreuses questions sont communes.

1.5 Plan du rapport

Le rapport comprend quatre chapitres en plus de celui-ci. Le chapitre 2 présente les modèles micro-économiques de structure des coûts des transporteurs, ainsi que les scénarios de poids lourd autonome qui seront simulés dans ce travail. Le Chapitre 3 présente un modèle économétrique désagrégé de prix, ainsi que les données à partir desquelles il a été calibré, et les méthodes de calibrage. Le Chapitre 4 présente l'approche en coût total logistique, d'un point de vue théorique ainsi que la calibration. Une section spécifique de ce chapitre est dédiée au calcul de la valeur du temps des chargeurs par une approche indirecte spécifique et originale. Enfin, les scénarios sont simulés et leurs conséquences quantifiées dans le Chapitre 5.

Chapitre 2

Modèles micro-économiques des coûts de transport et scénarios de véhicule autonome

2.1 Introduction

Ce chapitre présente le premier maillon de la chaîne de modèles présentée dans le Chapitre 1. Comme expliqué précédemment, l'objectif est ici de construire des modèles micro-économiques analytiques représentant suffisamment explicitement les ressources et contraintes des transporteurs pour pouvoir développer des scénarios suffisamment fins et contrastés de ce que pourrait être la place du véhicule autonome dans le transport de marchandises. Ce chapitre présentera aussi deux scénarios de véhicule autonome, l'un partiel, l'autre total.

Les modèles présentés ici sont inspirés de ceux développés par le Comité National Routier (www.cnr.fr). Le CNR distingue les coûts dépendant de la distance couverte par une opération de transport et les coûts dépendant de sa durée. Ces modèles distinguent aussi de nombreux postes de coût, parmi lesquelles le véhicule, le chauffeur, l'énergie, les péages, etc. L'objectif suivi ici est donc d'obtenir un modèle de coût dépendant des caractéristiques de l'opération de transport (distance, poids d'envoi, type d'opération de transport), et des coûts et caractéristiques des différentes ressources mises en oeuvre pour réaliser cette opération.

La Section 2.2 pose les bases de la modélisation micro-économique, en expliquant qualitativement comment nous considérons que les opérations de transport de marchandises sont produites. Ensuite, deux modèles micro-économique sont développés, respectivement en Section 2.3 et 2.4. Pour chacun, la structure analytique est d'abord développée, puis le calibrage numérique est présenté. Enfin, la Section 2.5 présentent deux scénarios de véhicule autonome pour le transport de marchandises.

2.2 Description qualitative simplifiée des opérations de transport

Les opérations de transport peuvent s'organiser de différentes manières. Pour une présentation plus générale, voir notamment LAUNAY (2018). Pour simplifier, nous en distinguons deux, illustrés par la figure 2.1. La première catégorie est celle des opérations qui ne nécessitent pas de rupture de charge, que nous noterons par abus de langage *FTL*, pour *Full Truckload*. Une opération FTL ne concerne strictement qu'un envoi transporté seul, et qui remplit, en principe, la remorque. On l'appelle également lot complet. Mais il y a également le cas du PTL — *Partial Truckload* — qui consiste à regrouper quelques envois dans un véhicule, à les transporter ensemble. On parle aussi de lot partiel. Nous les regroupons ensemble et les nommons, pour simplifier, FTL. Du point de vue de la modélisation, comme on le verra plus loin, ces opérations sont similaires.

La seconde catégorie est celle des opérations qui nécessitent une rupture de charge. Il s'agit des cas où les marchandises doivent être déchargées, triées et rechargées dans différents véhicules. Ces organisations, typiques de la messagerie et du colis, permettent par la massification de dégager suffisamment d'économies d'échelle pour transporter à la fois rapidement et à moindre coût des quantités petites voire très petites. Nous considérons qu'il s'agit ici d'un segment homogène, noté LTL, pour *Less Than Truckload*. Pour plus de détails sur le transport routier de marchandises, voir par exemple LAUNAY (2018).

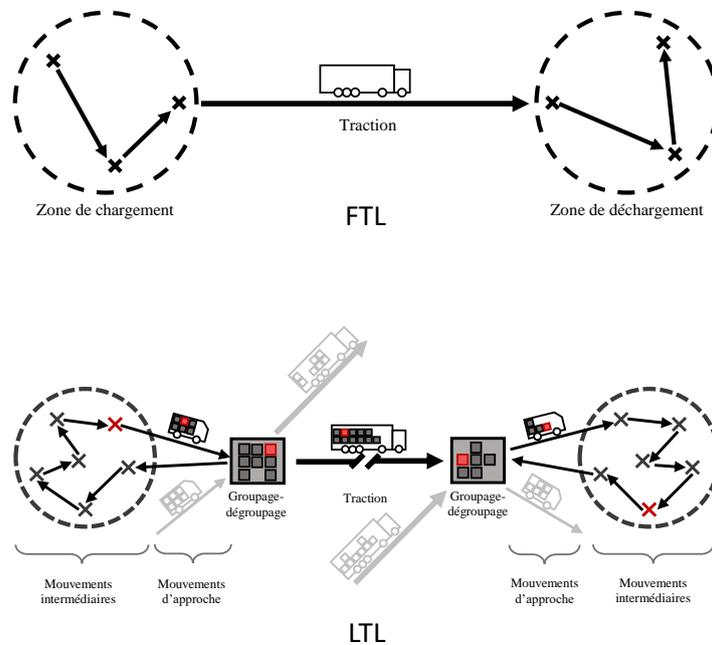


FIGURE 2.1 – Différentes organisations de transport (simplifiées)

2.3 Modèle micro-économique des coûts d'une prestation de transport FTL

Le modèle présenté ci-dessous est tiré de COMBES, 2018. Il est relativement simple analytiquement, tout en offrant suffisamment de flexibilité pour être compatible avec les approches par théorie des coûts d'inventaire qui seront présentées ultérieurement ; et pour pouvoir prendre en compte une diversité de scénarios relatifs au véhicule autonome. Le modèle théorique est d'abord présenté, son calage numérique ensuite.

2.3.1 Modèle théorique

Considérons le transport d'un envoi de poids s , sur une distance d . Le transporteur va transporter un ou plusieurs envois d'une zone donnée au départ, vers une zone donnée à destination. Chaque opération de transport va engendrer un déplacement d'approche à l'origine pour rejoindre les lieux de chargement et de déchargement, sur une distance moyenne d_a , à une vitesse moyenne v_a , ainsi qu'un chargement qui prendra un temps t_l . Les mêmes opérations seront nécessaires à destination. Ces opérations sont spécifiques à chaque envoi : supprimer un envoi permet de supprimer les opérations¹. Ensuite, un mouvement de traction sera réalisé pour rejoindre la zone de destination. La distance parcourue est d , la vitesse moyenne est v_t .

Il est nécessaire d'introduire les différents postes de coût. Deux sont distingués ici :

- *Les coûts dépendant de la distance* : sont pris en compte les prix du carburant, les coûts d'entretien et de maintenance, les péages, etc. Ces coûts sont regroupés dans un coefficient c_d en €/km.
- *Les coûts dépendant de la durée* : sont pris en compte les coûts complets des conducteurs, les coûts de capital correspondant au véhicule², et les coûts fixes de structure. Ils sont regroupés dans deux coefficients $c_{h,a}$ et $c_{h,t}$ (car, en fonction des scénarios, ils pourront différer en déplacement d'approche et en traction).

Il faut enfin prendre en compte la contrainte de capacité K du véhicule, et encore introduire deux coefficients supplémentaires : le taux de chargement lorsque le véhicule est chargé λ_s^{FTL} , et le taux de parcours en charge λ_e (qui est le complément à 1 du taux de parcours à vide, et qui sera supposé commun aux modèles LTL et FTL).

Une remarque doit être faite sur le taux de chargement : les dimensions des envois sont mesurées en tonnes, comme l'est la contrainte de capacité

1. Pour simplifier, et parce que l'absence de données adéquates ne permet de toute façon pas d'aller au delà, les problématiques combinatoires de tournées ne sont pas prises en compte ici.

2. Il faut noter que le CNR ramène les coûts de capital à la journée et pas à l'heure ; c'est l'une des trois composantes de leur modèle dit trinôme qui calcule le coût d'une prestation en fonction de la distance, de la durée de l'opération en heures, et aussi de sa durée en jours.

des véhicules. En réalité, le volume est au moins aussi souvent contraignant que le poids, et d'autres contraintes s'appliquent, ce qui peut expliquer qu'un véhicule soit plein tout en roulant nettement en dessous de sa charge maximale théorique en tonnage (COMBES et LEURENT, 2013.)

La distance parcourue lors du mouvement d'approche est d_a . Le durée du mouvement d'approche et du chargement est $d_a/v_a + t_l$. Il faut considérer le fait qu'il y a un mouvement d'approche à l'origine, et un à destination. Le coût de ces opérations est spécifique à chaque envoi, et supposé indépendant de la taille de l'envoi. Ce coût est noté b_{FTL} et vaut :

$$b_{FTL} = 2 \left(\frac{d_a}{v_a} + t_l \right) c_{h,a} + 2d_a c_d. \quad (2.1)$$

La distance parcourue lors de la traction est d . La durée de la traction est d/v . Le coût de la traction est donc $c_{h,t}d/v_t + c_d d$; il est proportionnel à la distance. Ce coût est commun aux différents envois transportés. Par simplicité, on suppose que ce coût est alloué aux différents envois proportionnellement à leurs poids, et corrigé par les coefficients de capacité et de taux de chargement et de parcours en charge³. Ainsi, le coût de la traction pour un envoi de taille s sur un envoi d est $c_{FTL}ds$, avec :

$$c_{FTL} = \frac{1}{\lambda_e \lambda_s^{FTL} K} \left(\frac{c_{h,t}^{FTL}}{v_t} + c_d \right). \quad (2.2)$$

Ces deux composants forment le coût marginal de transport d'un envoi de taille s sur une distance d :

$$C_{FTL}(s) = b_{FTL} + c_{FTL}ds. \quad (2.3)$$

On y retrouve un composant proportionnel aux tonnes-kilomètres transportées, ainsi qu'un coût fixe, indépendant de la distance et de la taille d'envoi. L'intuition en est simple : il est clair que transporter de grandes quantités sur de grandes distances va engager plus de ressources, et donc coûter plus cher que de transporter de petites quantités sur de petites distances. Cela dit, il est également clair que si on demande à un semi-remorque de faire un détour de 10km et de s'arrêter pendant une demi-heure ou une heure pour charger un envoi de quelques dizaines de kilogrammes, cela engendre un coût qui est lié à l'existence même de l'opération, et qui n'est que peu corrélé aux caractéristiques de l'envoi.

2.3.2 Calibration

Le calage empirique du modèle est difficile car aucune base de données accessible ne permet d'en estimer directement les paramètres avec la spécification

3. En réalité, c'est plus complexe : le prix évolue non linéairement avec le poids de l'envoi, par le résultat d'une interaction complexe entre structure des coûts et de la demande. Par ailleurs, on considère ici le taux de remplissage comme une variable exogène, alors qu'il s'agit d'une variable endogène, au centre de l'interaction entre offre et demande (COMBES, 2013).

qui a été présentée dans la section précédente. Or, conserver cette spécification est indispensable. L'approche proposée ici comporte donc une part d'arbitraire et une incertitude substantielle ; néanmoins elle combine trois principes : utiliser les valeurs du CNR quand c'est possible et pertinent ; choisir des ordres de grandeur réalistes quand c'est nécessaire ; obtenir un modèle acceptable en termes d'ordre de grandeur.

Les valeurs du CNR permettent de caler directement les paramètres c_d , $c_{h,a}$, et $c_{h,t}$. Nous regroupons dans le paramètre c_d les coûts d'entretien et de maintenance estimés par le CNR à 0,08€/km et les coûts de carburant et péage à 0,43€/km. Dans le coût horaire, sont repris le coût du travail, estimé à 22€/h par le CNR ; et le terme dit journalier qui regroupe les coûts de capital du véhicule et les frais de structure. Ce terme est estimé à 85€/jour par le CNR et est ramené ici à 8€/h. Ce passage du jour à l'heure est difficile à fonder solidement, car il repose en fait sur le nombre d'heures d'utilisation des camions par jour, en moyenne en prenant en compte les temps de chargement et de déchargement, informations dont nous ne disposons pas.

Le CNR fournit des informations concernant la capacité de chargement, prise à 27t. Nous conservons donc cette hypothèse, pour le coefficient K . Le CNR propose également un taux de parcours en charge à 86,7% et un taux de chargement sur parcours en charge de 86,3%. Nous ne prenons en compte ces coefficients que dans le calcul du coût de la traction, il faut donc modifier un peu le premier. Nous retenons $\lambda_e = 0,90$ et $\lambda_s^{FTL} = 0,86$.

La dernière information proposée par le CNR est la vitesse moyenne de circulation des véhicules, à 65,9 km/h. Cette vitesse ne distingue pas traction et mouvements d'approche. Nous retenons une valeur de 70 km/h pour la traction, qui doit être effectuée, en moyenne, un peu plus vite que les autres mouvements, puisque réalisée en grande partie sur autoroute.

Enfin, il est nécessaire de décrire les caractéristiques des mouvements d'approche. Ici, ce sont des ordres de grandeur a priori raisonnables qui ont été retenus : la durée moyenne de chargement t_l est prise égale à 1h ; la distance d'approche est prise égale à 10km, et la vitesse moyenne est prise égale à 25km/h. Cela implique que le temps moyen pour aller d'un expéditeur à l'autre dans la zone d'origine ou dans la zone de destination est d'un peu plus de vingt minutes. Pour étayer ces paramètres, il faudrait disposer de données longitudinales sur un échantillon de véhicules, décrivant la séquence des opérations réalisées. Cette approche n'a pas été explorée plus précisément.

Pour récapituler, les valeurs retenues pour les différents paramètres sont reprises dans le Tableau 2.1.

Le modèle de coût calibré est :

$$C_{FTL}(s) = b_{FTL} + c_{FTL}ds \quad (2.4)$$

$$b_{FTL} = 94.2\text{€} \quad (2.5)$$

$$c_{FTL} = 0.045\text{€/tkm} \quad (2.6)$$

Variable	Notation	Valeur	Unité
Coût horaire en traction	$c_{h,t}^{FTL}$	30	€/h
Coût horaire en approche	$c_{h,a}$	30	€/h
Coût kilométrique	c_d	0,51	€/km
Vitesse moyenne pendant la traction	v_t	70	km/h
Vitesse moyenne en approche	v_a	25	km/h
Distance d'approche	d_a	10	km
Durée chargement	t_l	1	h
Taux de chargement	λ_s^{FTL}	0,9	1
Taux de parcours en charge	λ_e	0,86	1
Capacité	K	27	t

TABLE 2.1 – Paramètres du modèle de coût, cas FTL

2.4 Modèle micro-économique des coûts d'une prestation de transport LTL

Comme ci-dessus, on présente d'abord un modèle analytique avant d'expliquer comment les valeurs des paramètres ont été choisies. Avant d'entrer dans le coeur du sujet, il faut rappeler que derrière ce que nous avons appelé ici LTL se trouvent des prestations de nature assez variées, avec des envois dont l'unité est plutôt la palette, d'autres le gros carton, ou encore le petit colis. Un seul modèle est présenté, avec l'espoir qu'il sera le moins mauvais compromis entre toutes ces réalités du transport de marchandises.

2.4.1 Modèle théorique

Le modèle théorique développé ici met en équation le processus illustré dans la partie inférieure de la figure 2.1. On fait donc l'hypothèse ici que le transport d'un envoi de taille s sur une distance d est le résultat de cinq opérations :

- Ramassage de l'envoi dans la zone d'origine par un véhicule relativement petit ramassant de nombreux autres envois.
- Déchargement de l'envoi dans une plateforme de groupage-dégroupage, tri, et chargement dans un semi-remorque.
- Traction entre plateformes, par le semi-remorque.
- Déchargement de l'envoi dans une plateforme de groupage-dégroupage, tri, et chargement dans un véhicule relativement petit.
- Livraison de l'envoi dans la zone de destination, par un véhicule livrant de nombreux autres envois.

La modélisation du coût de la traction ne pose pas particulièrement de problème, ni le coût de passage par une plateforme. Le problème le plus délicat est posé par les tournées à l'origine et à la destination. Il faut juste noter que le coût horaire en traction est supposé différent en LTL par rapport au FTL, car il s'agit plus souvent de transport de nuit et/ou avec relai, donc plus cher

en main d'oeuvre.

Considérons que la tournée comprend n arrêts ; couvre une distance d^l entre deux arrêts en moyenne ; que la vitesse moyenne entre deux arrêts successifs est v^l et que le temps de livraison ou de chargement est t_l^l . Considérons qu'elle est effectuée avec un véhicule léger, dont le coût horaire est c_h^l et le coût kilométrique c_d^l .

Considérons également que cette tournée comprend un mouvement d'approche, que le véhicule parcourt entre le moment où il quitte le dépôt et celui où il rejoint la zone de livraison. La distance parcourue à l'aller comme au retour est notée d_a^l , et cette distance est parcourue à une vitesse v_a^l .

Alors le coût moyen d'un envoi dans la tournée est ⁴ :

$$c_a^l = \left(\frac{d^l}{v^l} + t_l^l \right) c_h^l + c_d^l d^l + \frac{2}{n_l} \left(\frac{d_a^l}{v_a^l} c_h^l + d_a^l c_d^l \right) \quad (2.7)$$

Le coût de traitement dans la plateforme de cross-docking est supposé indépendant du poids de l'envoi s , et est noté c_X . Le coût de la traction pour le trajet entre deux plateformes est donné par l'équation (2.2). Le coût complet pour l'opération LTL est donc :

$$C_{LTL}(s) = b_{LTL} + c_{LTL} ds \quad (2.8)$$

$$b_{LTL} = 2c_a^l + 2c_X \quad (2.9)$$

$$c_{LTL} = \frac{1}{\lambda_e \lambda_s^{LTL} K} \left(\frac{c_{h,t}^{LTL}}{v_t} + c_d \right) \quad (2.10)$$

2.4.2 Calibration : modèle de tournée

Calibrer le modèle LTL est un peu plus ardu pour deux raisons. Premièrement, il n'y a pas de source équivalente au CNR. Deuxièmement il y a une hétérogénéité importante des prestations de transport dans cette catégorie ⁵.

La première question est celle du coût de ramasse et de dépose, au niveau de la tournée. Il s'agit de caler le coefficient c_a^l (équation 2.7), et sa décomposition, ici aussi afin de disposer d'une plateforme permettant des scénarios de véhicule autonome aux caractéristiques contrastées. Sur ce point, il n'y a guère de statistiques. Les discussions avec différents opérateurs du domaine laissent imaginer que le coût complet d'une tournée est compris entre 200€ et 400€.

4. Il s'agit d'un modèle très simplifié. Un modèle plus complet, tout en restant analytique, est développé dans COMBES (2019), en appliquant les méthodes d'approximation présentées dans DAGANZO (2005). Ensuite il y a toute la très vaste littérature de recherche opérationnelle sur la question. Cela dit, ici aussi, l'absence de données et le choix de représenter avec un unique modèle une grande diversité de situations fait qu'il serait inutile d'aller dans de tels raffinements.

5. Par exemple, cette hétérogénéité est bien illustrée par BEZIAT, LAUNAY et TOILIER (2015), sur la base des enquêtes Transport de Marchandises en Ville conçues par le LAET (ROUTHIER, SEGALOU & DURAND, 2002).

D'autres estiment que la livraison d'un colis est dans une fourchette de 1,5€ à 3,5€. Pour une livraison d'un peu plus grande taille, l'ordre de grandeur peut augmenter fortement, et s'approcher plutôt de la dizaine d'euros.

Nous allons nous caler sur des livraisons de taille moyenne, typique de la messagerie, de l'ordre de la centaine de kilogrammes. Un seul modèle micro-économique sera proposé. On verra dans le chapitre suivant que le modèle économétrique propose plusieurs variables de contrôle, cohérentes, dans une certaine mesure, avec les ordres de grandeur discutés ci-dessus.

Caractéristiques de la tournée. En supposant que la partie utile de la tournée dure 6 heures, que 25 opérations sont réalisées, cela implique un temps de 15 minutes par opération en moyenne. En supposant que la livraison elle-même dure en moyenne 5 minutes, alors le temps de trajet entre deux opérations est en moyenne de 10 minutes. On suppose par ailleurs une distance inter-arrêts de l'ordre de 2,5km, ce qui correspond à peu près à une vitesse de circulation moyenne de 15 km/h. Cela correspondrait à une longueur totale de tournée de 60 km environ, hors distance d'accès et de retour. Pour les mouvements d'approche, une distance moyenne de 20km, parcourus à une vitesse moyenne de 20km/h, semble acceptable. La longueur totale de la tournée serait alors de 80km environ, en moyenne.

Coût horaire. Le chauffeur travaille 5 jours par semaine et effectue donc 20 tournées par mois. Pour atteindre un revenu de 1 500€ net mensuel, il faut donc réaliser une marge brute de l'ordre de 2 500€ sur la même période. Le coût du chauffeur est alors de 16€ par heure, environ.

Pour ce qui concerne le coût de possession du véhicule : le CNR estime le coût annuel de possession d'un porteur à 13% de la valeur à neuf. Le ratio n'est pas disponible pour les véhicules utilitaires légers, nous le conserverons donc. Prenons l'hypothèse d'un véhicule neuf à 40 000€. Le coût annuel serait donc de 5 200€. A cela il faut rajouter l'assurance. Il est assez difficile de chiffrer ce poste, nous retenons une hypothèse à 1 000€ par an (contre 1 852€ par an d'après le CNR, pour un porteur.) Avec des hypothèses, là aussi, indicatives tout au plus, de 230 jours de travail par an et de 8 heures par tournée, alors ces coûts se montent, ensemble, à 3,4€ de l'heure.

Cela donne un coût horaire d'environ 19€/h.

Coût kilométrique. La consommation, en urbain plutôt congestionné, doit être de l'ordre de 15L pour 100km⁶. A un coût de carburant de 1 € par litre, le coût kilométrique dû au carburant est donc de l'ordre de 0,15€/km. Il n'y a pas de coûts de péage.

En ce qui concerne les coûts d'entretien, nous devons nous contenter d'une extrapolation fragile à partir du cas du porteur selon le CNR. En ce qui

6. La moyenne globale est plutôt à 9L pour 100km, d'après <https://fr.statista.com/statistiques/487198/consommation-carburant-moyenne-vehicules-utilitaires-legers-france/>.

concerne le porteur, d'après le CNR, la circulation moyenne est de 74 000 km par an, et les coûts d'entretien et de pneumatiques se montent à 10% de la valeur du véhicule, soit 9 000 €. Il n'y a pas de bonne façon de passer du porteur au fourgon ; nous retenons la valeur de 3 000 € par an. Pour une distance annuelle de 15 000 km⁷), on obtient un coût kilométrique de 0,2 €/km.

Le coût kilométrique total est donc 0,35 €/km.

Coefficients retenus. Pour récapituler, ce premier jeu de paramètres est repris dans le tableau ci-dessous (Tableau 2.2). Les variables indiquées en italique ne sont pas des paramètres mais résultent des choix pour les autres paramètres ; il faut les considérer comme des variables de contrôle. Ces valeurs sont faibles

Variable	Notation	Valeur	Unité
Distance entre deux opérations	d^l	2,5	km
Vitesse de circulation en tournée	v^l	15	km/h
temps de chargement en tournée	t_l^l	0,083 3	h
Distance d'accès	d_a^l	20	km
Vitesse d'accès	v_a^l	20	km/h
Coût horaire en tournée	c_h^l	19,4	€/h
Coût kilométrique en tournée	c_d^l	0,35	€/km
Nombre d'opérations par tournée	n_l	25	envois/tournée
<i>Coût unitaire de la tournée</i>	c_a^l	7,03	€/envoi
<i>Coût complet tournée</i>	-	175	€/tournée

TABLE 2.2 – Paramètres du modèle de coût de tournée, cas LTL

compte-tenu des quelques ordres de grandeurs présentés précédemment ; elles sont également faibles en comparaison des estimations économétriques qui seront présentées dans le chapitre suivant, comme on le verra ci-dessous. Mais il n'est pas possible de faire beaucoup mieux avec les rares données disponibles, ce calage sera donc retenu comme base pour la suite de l'exercice. Améliorer cette partie de la chaîne de modèle est, en soi, une direction de recherche intéressante et importante.

2.4.3 Calibration : modèle LTL complet

Une fois déterminé une valeur pour le coût marginal de tournée c_a^l , restent à choisir des valeurs pour le coût de transfert c_X et pour le coût de la traction. Une fourchette communément retrouvée pour le coût de passage d'une palette par une plateforme est de 3 € à 5 €. Pour un envoi de plus petite taille, les données manquent. Certaines raisons peuvent laisser penser que le coût de passage sera plus faible : la surface d'entrepôt, notamment, et le nombre de quais et de quais déchargement augmentent moins vite avec le nombre d'envois

7. <https://fr.statista.com/statistiques/484426/distance-parcourue-en-moyenne-par-vehicule-utilitaire-leger-france/>.

à traiter lorsqu'il s'agit de colis ou de cartons que lorsqu'il s'agit de palettes. Par contre, d'autres raisons peuvent laisser penser que le coût sera, en fait, plus élevé : il faudra manutentionner, trier, former des palettes, etc. ; ce qui requiert plus de temps et de main d'oeuvre, voir des équipements spécifiques. Nous ferons donc ici une hypothèse de coût de transfert de 3€ par envoi.

Enfin, le modèle de coût de traction est donné par l'équation (2.10). Les paramètres en sont les mêmes que pour le modèle FTL à part pour le taux de remplissage λ_s^{LTL} typiquement plus faible, car le volume est souvent plus contraignant que le tonnage ; nous le prendrons égal à 0.5 ; et pour le coût horaire, car dans ce secteur le transport est souvent la nuit et en relai. Le coût horaire sera donc augmenté à $c_{h,t}^{LTL} = 35\text{€}$.

Variable	Notation	Valeur	Unité
Coût de passage par plateforme	c_X	3	€/envoi
Coût horaire en traction	$c_{h,t}^{LTL}$	35	€/h
Coût kilométrique	c_d	0.51	€/km
Vitesse moyenne en traction	v_t	70	km/h
Taux de chargement	λ_s^{LTL}	0.5	1
Taux de parcours en charge	λ_e	0.9	1
Capacité	K	27	t

TABLE 2.3 – Autres paramètres du modèle de coût, cas LTL

Le modèle de coût calibré est :

$$C_{LTL}(s) = b_{LTL} + c_{LTL}ds \quad (2.11)$$

$$b_{LTL} = 20.05\text{€} \quad (2.12)$$

$$c_{LTL} = 0.083\text{€/tkm} \quad (2.13)$$

La Figure 2.2 illustre la structure des coûts avec quelques exemples, et une comparaison en fonction des caractéristiques de l'envoi et du type de prestation. Plus précisément, on observe d'une part, sans surprise, que les coûts augmentent avec les quantités ainsi qu'avec la distance. On observe également que cette relation n'est pas linéaire. Il y a effectivement un coût fixe, imputable dès que l'opération de transport est mise en oeuvre, indépendamment des caractéristiques de l'envoi. On constate que ce coût fixe est plus élevé pour le transport FTL, qui met en oeuvre un véhicule lourd sur l'ensemble de l'opération, que pour le transport LTL où les derniers maillons de la chaîne de transport sont réalisés par de petits véhicules et avec une forte mutualisation des moyens.

A l'inverse les coûts augmentent plus rapidement en LTL qu'en FTL, avec la distance et avec le poids. C'est le reflet des moyens, in fine, plus importants, mis en oeuvre en LTL qu'en FTL pour les mêmes quantités. On retrouve ici une caractéristique classique des réseaux de transport : par la massification, ils arrivent à transporter efficacement des petites quantités avec des moyens

relativement lourds. Mais cet effet trouve ses limites à un certain point, au delà duquel, si un chargeur arrive à assurer relativement facilement le remplissage d'un véhicule, alors le transport direct est plus efficace. Cela dit le coût de transport n'est pas le seul facteur explicatif des choix des chargeurs, le chapitre 4 reviendra sur ce point en présentant la théorie des coûts d'inventaire.

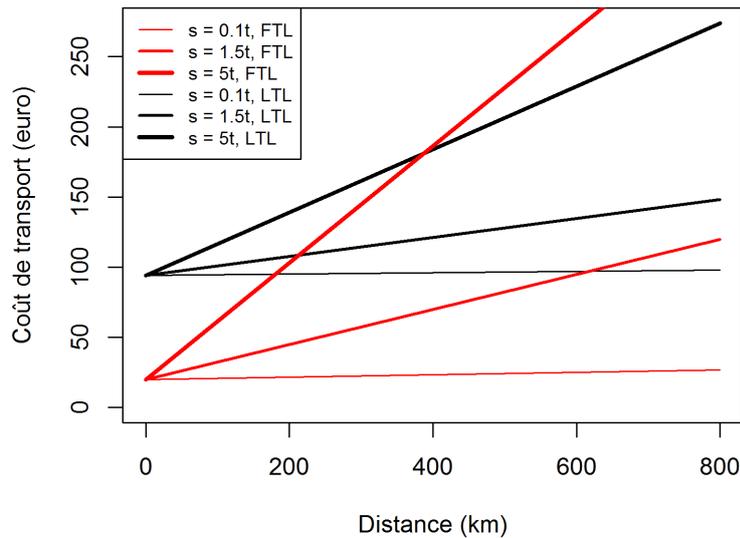


FIGURE 2.2 – Coûts de transport en fonction de la distance et du type de prestation

2.5 Scénarios de véhicule autonome pour le transport de marchandises

Une fois établie la base de modélisation, il est possible de spécifier des scénarios de véhicule autonome. Les modèles micro-économiques introduits au début de ce chapitre permettent de concevoir des scénarios relativement détaillés et avec des effets contrastés. Dans le cadre de cette recherche, deux scénarios sont distingués : un partiel, et un total.

Scénario PLA1 : autonomisation partielle, hors urbain. Dans ce scénario, on considère que les zones d'origine et de destination (les cercles noirs dans la figure 2.1) sont dans des milieux tels que l'automatisation n'est pas faisable.

Dans le cas FTL, un même véhicule doit pouvoir opérer en approche et en traction. Il s'agit donc d'un véhicule qui doit pouvoir être opéré par un humain. Il conserve donc l'ensemble des équipements nécessaires à la présence

d'un opérateur humain à bord, en particulier la cabine. Il comprend en plus les équipements qui lui permettent de circuler en autonomie. Le véhicule est donc plus cher, à l'achat et en maintenance et entretien. Le chauffeur est supposé présent pour les mouvements d'approche, mais pas pour les tractions. On suppose ici que la part dans le coût horaire et le coût kilométrique dû au véhicule augmente de 25%.

Pour le cas LTL, la tournée n'est pas modifiée : on fait l'hypothèse qu'on reste sur le modèle actuel de logistique urbaine. La traction est modifiée, car elle est supposée réalisée sans opérateur humain à bord du véhicule.

Scénario PLA2 : autonomie complète. Dans le second scénario, on suppose une autonomie totale. Les coûts de main d'oeuvre disparaissent totalement. Les véhicules sont des capacités différentes, car la disparition de la nécessité d'avoir un opérateur humain à bord permet de supprimer de très nombreux équipements. Ainsi, on peut imaginer un semi-remorque sans cabine.

Cela diminue les coûts d'achat et de maintenance des véhicules ; cela permet également de gagner en capacité, puisque le tracteur sera allégé. On suppose une baisse du coût du véhicule de 25%.

Pour le cas LTL, la relaxation de la contrainte horaire sur la tournée⁸ permet de réaliser plus d'opérations par tournée (on fait une hypothèse de +33% ici, en imaginant que les tournées pourront être effectuées sur une fenêtre horaire de 8h à la place de 6h). Le coût unitaire de la tournée en est diminué.

Récapitulatif des hypothèses. Les hypothèses sont récapitulées dans le tableau ci-dessous (Tableau 2.4). La première colonne rappelle la valeur en référence. Les deux suivantes présentent les scénarios. Les cases sont laissées vides quand les variables ne sont pas modifiées, pour faciliter la lecture. Les lignes du bas du tableau présentent les effets, en relatif, sur les coefficients b et c des modèles de coût. Ce sont ces variations relatives qui seront appliquées aux modèles économétriques dans la suite du rapport.

Commentaires. Les deux scénarios ont des effets relativement contrastés. Le scénario PLA1 est une représentation possible d'une situation où le poids lourd autonome peut circuler sur le réseau magistral en rase campagne, mais où les autres milieux, avec toutes leurs contraintes et ses aléas, reste trop complexe et n'est pas accessible à cette technologie. Ce scénario est globalement

8. Ce sujet est en réalité très complexe : est-il possible d'élargir la fenêtre temporelle pendant laquelle les livraisons sont possibles ? Cela dépend certainement des secteurs. Qu'en sera-t-il du point de vue de la réglementation ? Par ailleurs, les nombreuses innovations actuellement en cours d'élaboration ou en test pour la livraison urbaine montrent que de nombreux modèles sont, sinon possibles en pratique, du moins imaginés. Ainsi, un VUL pourrait être remplacé par de nombreux robots, etc. Enfin, il faut noter que des modifications de matériels et de coûts peuvent aussi conduire à des modifications de niveau de service, comme des réductions des délais de livraison par exemple ; cette question importante dépasse malheureusement le cadre de cette recherche.

Variable	Notation	Réf.	PLA1	PLA2	Unité
Coût h. en traction	$c_{h,t}^{FTL}$	30	10	6	€/h
Coût h. en approche	$c_{h,a}$	30	32	6	€/h
Coût kilométrique	c_d	0,51	0,53	0,49	€/km
Vitesse moy. en traction	v_t	70			km/h
Vitesse moy. en approche	v_a	25			km/h
Distance d'approche	d_a	10			km
Durée chargement	t_l	1			h
Taux de chargement	λ_s^{FTL}	0,9			1
Taux de parcours en ch.	λ_e	0,86			1
Capacité	K	27		30	t
Distance entre deux op.	d^l	2,5			km
Vitesse en tournée	v^l	15			km/h
Tps. de charg. en tournée	t_l^l	0,0833			h
Distance d'accès	d_a^l	20			km
Vitesse d'accès	v_a^l	20			km/h
Coût horaire en tournée	c_h^l	19,4		2,5	€/h
Coût km en tournée	c_d^l	0,35		0,26	€/km
Nmb. d'op. par tournée	n_l	25		33	envois/tour.
<i>Coût unitaire en tournée</i>	c_a^l	7,03		1,63	€/envoi
<i>Coût complet tournée</i>	-	175		54	€/tournée
Coût de pas. par plat.	c_X	3			€/envoi
Coût h. en traction	$c_{h,t}^{LTL}$	35	10	6	€/h
Taux de chargement	λ_s^{LTL}	0,5			1
Δb_{FTL}			+6,4%	-71,8%	
Δc_{FTL}			-28,3%	-44,8%	
Δb_{LTL}			=	-53,8%	
Δc_{LTL}			-35,3%	-48,7%	

TABLE 2.4 – Scénarios véhicule autonome pour le fret

gagnant du point de vue des coûts de transport, mais pas systématiquement. Le renchérissement des véhicules fait que pour certains utilisateurs, il pourrait même avoir du sens de rester sur des véhicules classiques, intégralement opérés par des conducteurs humains.

La figure 2.3 illustre les effets sur les prix des différents scénarios, pour un envoi de poids donné, en fonction de la distance. Les courbes noires (resp. rouges) illustrent les prix FTL (resp. LTL) en fonction de la distance, en référence (trait plein), et pour chaque scénario (PLA1 en tirés ; PLA2 en pointillés).

Les effets sont hétérogènes si l'on examine d'une part les parts fixes et les parts variables des coûts (respectivement les origines et les pentes des droites). Ainsi pour les opérations FTL, la part fixe augmente marginalement ; cela dit les gains se manifestent pour des envois suffisamment lourds ou transportés sur de suffisamment grandes distances. Le cas LTL est différent car le coût fixe

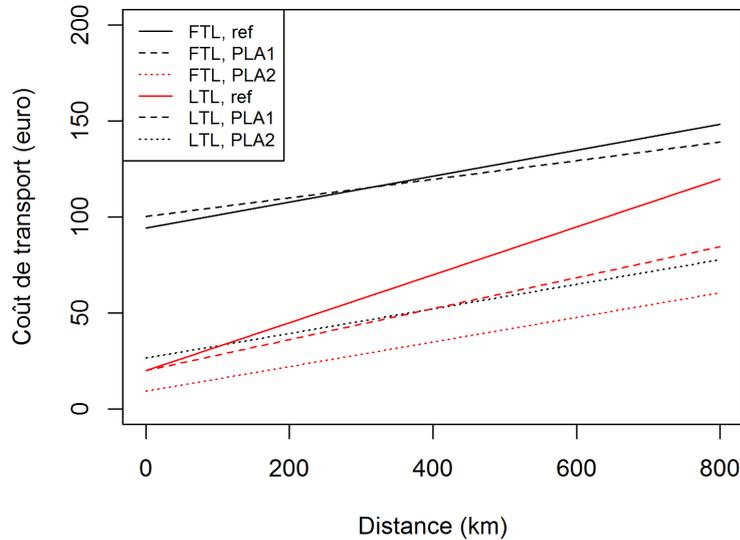


FIGURE 2.3 – Coûts de transport en fonction de la distance, du type d’opération, du scénario, pour un envoi de 1.5t

trouve sa source ailleurs, et n’est pas du tout impacté dans le cas du scénario PLA1.

Le scénario PLA2 correspond à une configuration possible du système de transport de marchandises dans le cas où les humains ne sont plus nécessaires à son fonctionnement (en tout cas à bord des véhicules). Dans ce cas, compte-tenu de l’importance du coût de main d’oeuvre dans les coûts, l’effet à la baisse est très important, et concerne toutes les prestations, toutes les gammes de taille d’envoi, et toutes les distances. Il s’agit d’une baisse tant en part fixe, qu’en part variable. Et, pour des raisons de difficulté technique, n’ont pas été pris en compte le fait qu’un scénario PLA2 engendrera certainement des gains en levant un certain nombre de contraintes opérationnelles que les transporteurs doivent aujourd’hui gérer, comme les pauses des conducteurs ou le fait qu’ils doivent rentrer chez eux.

Ces variations de coût substantielles, si elles se manifestent, feront réagir les chargeurs. Ils réexamineront leurs choix logistiques, et notamment les tailles d’envoi, ainsi que le choix de type de prestation de transport. C’est cette dimension du problème qui sera examinée dans les chapitres suivants. Mais d’abord, il s’agit maintenant d’estimer des modèles économétriques de prix plus fins que les modèles analytiques développés ci-dessus. C’est l’objet du prochain chapitre.

Chapitre 3

Modèles de prix

3.1 Introduction

Comme expliqué au début du rapport, les modèles de coût présentés dans le chapitre précédent sont nécessaires pour l'établissement des scénarios de véhicule autonome; mais ils sont trop imprécis pour être utilisés tels quels dans un modèle quantitatif. La solution alternative, retenue dans ce travail de recherche, consiste à estimer statistiquement un modèle de prix à partir de données désagrégées. Plus précisément, deux modèles distincts sont estimés. Le premier correspond aux envois transportés par une opération FTL, le second aux envois transportés par une opération LTL. La différence entre ces opérations est établie sur la base du nombre de ruptures de charge dans l'opération de transport.

L'approche retenue est très simple : il s'agit d'estimation par moindres carrés ordinaires et par moindres carrés pondérés. Différentes spécifications ont été testées. Seules les spécifications retenues sont présentées.

Les données sont présentées en Section 3.2. Les spécifications retenues et paramètres estimés sont présentés en Section 3.3. La façon dont les modèles sont modifiés en application des scénarios de véhicule autonome est présentée en Section 3.4.

3.2 Données

Le principe de modélisation retenu dans cette recherche est celui d'une approche qui combine la modélisation explicite de la production des prestations de transport (à l'inverse d'une approche classique consistant à caler une fonction de production de forme flexible — type translog — à un jeu de données quelconque) et la théorie d'inventaire. Il faut donc disposer d'une part de données sur la production des prestations de transport (donc le côté transporteur), d'autre part de données sur les caractéristiques de la demande (donc le côté chargeur).

3.2.1 Un rapide panorama des données de transport routier de marchandises.

Les jeux de données combinant des informations relatives à la fois aux transporteurs et aux chargeurs sont rarissimes. En Europe, le mode de production standard de données concernant le transport de marchandises, piloté par Eurostat, ne s'intéresse qu'à l'aspect transport : des véhicules échantillonnés aléatoirement sont observés pendant une semaine. Les observations portent essentiellement sur les caractéristiques des véhicules, les distances parcourues, et les marchandises transportées.

Chaque pays produit les données concernant le parc de véhicule immatriculé chez lui, et ces différents jeux de données nationaux sont mis en commun afin de produire quelques indicateurs d'intérêt général. En France, il s'agit de l'enquête TRM (Transport Routier de Marchandises), composante de SitraM-I, système qui regroupe différentes bases de données afférentes au transport de marchandises (CGDD, 2012). Une difficulté particulière concerne la classification des types de marchandises. Une nomenclature a été conçue à cet effet (INSEE, 2008).

Il est à noter que, compte-tenu du caractère désagrégé et suivi dans le temps des données telles que produites par les instituts statistiques des différents pays, il est probable que le potentiel de ces données pour l'observation et l'analyse du transport de marchandises soit très nettement sous-exploité. Les contraintes de secret statistique expliquent en partie cet état de fait. Dans tous les cas, ces données n'offrent aucune information relative à la demande de transport.

D'autres jeux de données permettent de connaître les flux de marchandises, parmi lesquelles les enquêtes origine-destination, les comptages de trafic, les données des douanes, etc. Le déploiement des systèmes d'information chez les transporteurs s'est accompagné de la création de gisements de données très riches ; mais ils ne sont à notre connaissance pas intégrés dans les statistiques publiques dont on attend, entre autre, la représentativité¹.

En ce qui concerne les chargeurs, seuls quelques pays réalisent des enquêtes régulières, parmi lesquels les Etats-Unis, la Suède et le Japon (COMES & COMBES, 2017). Ces données sont communément connues sous le nom de *Commodity Flow Surveys*, ou CFS. Ces enquêtes portent sur des envois, déjà définis plus haut. Les échantillons peuvent concerner des millions d'observations. Intéressantes car les quantités transportées sont une information primordiale pour la bonne compréhension du transport de marchandise, ces enquêtes ont cependant leurs limites. Ainsi, la façon dont l'opération de transport est réalisée n'est pas observée en détail. On ne sait pas si l'envoi a été acheminé directement ou si son transport a fait l'objet d'une séquence d'étapes et de

1. Le système d'information d'un transport ne comporte que les données relatives à son activité. Cela soulève deux problèmes : premièrement ces données peuvent être erronées (cela dit le même problème se pose pour les statistiques publiques) ; deuxièmement il n'est pas possible de savoir si un transporteur est représentatif de l'ensemble des transporteurs, ou non. A priori on peut s'attendre au contraire.

ruptures de charge. On ne sait pas non plus s'il a été acheminé seul ou avec plusieurs autres envois, ni dans quel(s) véhicule(s) il a été transporté. Enfin, la relation chargeur-destinataire n'est pas connue. Il faut noter que récemment, les données CFS américaines ont été mises à disposition librement à un niveau relativement désagrégé, ce qui a permis une explosion des travaux de recherche sur le sujet, comme en témoigne par exemple le nombre de publications sur ce thème au congrès annuel du *Transportation Research Board*, à Washington, en 2019.

3.2.2 Les enquêtes "chargeur" de l'IFSTTAR.

L'IFSTTAR a la particularité de produire des enquêtes dites "chargeur" spécifiques, car elles combinent, partiellement, les qualités des enquêtes routières classiques. Ces enquêtes ont été réalisées en 1988, en 2004-2005, et de façon régulière depuis 2017 (mais sur un format très réduit). Le principe en est simple : un ensemble d'établissements localisés en France sont échantillonnés. Pour chacun de ces établissements, trois parmi les vingt derniers envois sont échantillonnés aléatoirement. Pour chacun de ces envois, l'enquête examine ses caractéristiques (nature, poids, conditionnement, valeur, etc.), la façon dont il a été transporté (mode, séquence des opérations de transport, prix du transport, taux de remplissage, etc.), les caractéristiques de l'expéditeur (activité économique, chiffre d'affaire, localisation, etc.), et enfin les caractéristiques de la relation expéditeur-destinataire (dont le flux annuel de marchandises échangées entre les deux outils.) Des informations contractuelles sont également recueillies. Des techniques d'échantillonnage spécifiques ont été mises en oeuvre pour que tous les modes de transport soient observés².

Pour la vague de 2004 (très précise, mais maintenant ancienne), l'échantillon n'est pas très grand (une dizaine de milliers d'observations) mais plusieurs centaines de variables sont renseignées (GUILBAULT et al., 2006 ; GUILBAULT & SOPPÉ, 2009). Ce type d'enquête est très coûteux : il faut recueillir des informations auprès de l'expéditeur, des informations concernant le destinataire, mais aussi des informations concernant les transporteurs et leurs sous-traitants. Les enquêtes récentes bien moins riches en information (échantillons d'un millier d'observations, quelques dizaines de variables observées, peu de détail concernant les opérations de transport.)

Cette source de données est quasiment unique au monde. C'est la seule source de données qui, à notre connaissance, a permis de tester directement les prévisions théoriques³ fondées sur la théorie d'inventaire et développées par BAUMOL et VINOD (1970). Ainsi, la prévision de taille d'envoi a été vérifiée par COMBES (2012) ; le lien entre coût total logistique et le choix de mode

2. Il y a énormément d'envois transportés chaque année ; et une grande proportion d'entre eux sont des envois relativement petits transportés par camion sur des distances relativement courtes. Pour observer un échantillon suffisant d'envois transportés à l'international ou bien par un autre mode de transport que la route, il a été nécessaire de recourir au suréchantillonnage.

3. Elles seront rappelées dans le prochain chapitre.

par LLORET-BATLLE et COMBES (2012) ; le lien entre coût total logistique et choix de type de prestation de transport par COMBES et TAVASSZY (2016). Il faut noter qu'une enquête plus récente mais plus réduite a été réalisée en Allemagne récemment (elle est décrite et utilisée dans PIENDL, LIEDTKE et MATTEIS (2016), par exemple.)

Plusieurs autres travaux sont fondés sur la théorie d'inventaire, notamment en modélisation du transport de fret. L'effort le plus important pour développer un modèle spatialisé multimodal de transport de marchandises est probablement le modèle ADA (pour *Aggregate-Disaggregate-Aggregate*) développé par de JONG et BEN-AKIVA (2007). Les autres ne seront pas listés ici ; un inventaire non exhaustif en est disponible dans TAVASSZY et DE JONG (2013). Dans tous les cas, l'absence de la variable relative au flux annuel chargeur-destinataire cause une forte perte de pouvoir explicatif ; qui n'est que faiblement compensée par les proxys employés dans ces travaux.

3.2.3 Variables et statistiques descriptives

Les modèles présentés ci-après ont été estimés à partir de la base de données ECHO de 2004-2005. Cette base de données comprend 10 462 observations. Parmi ces observations, seuls les envois transportés par route uniquement sont retenus. Cela correspond à 8 366 observations. Il faut par ailleurs noter que le champ d'échantillonnage de l'enquête ECHO ne couvre pas tout à fait l'ensemble du transport de marchandises. En particulier certaines activités extractives ont été exclues. Il n'est malheureusement pas possible de pallier ce problème, et les résultats présentent, de ce fait, un biais difficile à corriger.

La table 3.1 présente les statistiques descriptives principales concernant le poids des envois et la distance sur laquelle ils ont été transportés. Les chiffres sont présentés sans pondération (chaque observation est prise en compte avec un poids égal) et avec pondération en tonnage (chaque observation est prise en compte avec un poids qui correspond à sa part dans l'ensemble des tonnes transportées⁴). Comme on peut l'observer, le choix de la pondération a un effet substantiel sur les statistiques descriptives.

En ce qui concerne les natures des marchandises transportées, la table 3.2 en présente la répartition, ici aussi dans l'échantillon, et redressé en tonnage. La répartition par NST retenue ici est un peu particulière ; elle est alignée sur celle utilisée dans GUILBAULT et al. (2006), mais globalement cohérente avec

4. Une pondération en envoi pourrait également être prise en compte. Le choix de la pondération est très impactant. Ainsi, si l'on considère une population de 1 001 envois, 1 000 pesant une tonne et le dernier pesant mille tonnes, alors leur poids moyen est 1,998 tonnes ; mais leur moyen pondéré après pondération par tonnage est 500,5 tonnes. En d'autres termes, un envoi pris au hasard pèsera bien, en moyenne, deux tonnes (en fait, il a de très bonnes chances de peser une tonne) ; mais une tonne de marchandise prise au hasard aura une chance sur deux de faire partie d'un envoi de une tonne, ou d'un envoi de mille tonnes. Le point de vue privilégié dans ce rapport est le second, pour une raison bien précise : si certains de ces résultats ont vocation à alimenter des modèles de prévision de la demande de transport de marchandise, alors c'est la seconde perspective qui doit être privilégiée.

	Sans pondération					Pond. en tonnage					
	Moy.	Q1	Med.	Q3	95%	Moy.	Q1	Med.	Q3	95%	%NA
Distance (km)	294	54	184	416	773	177	46	104	197	599	1.2%
Poids (km)	5,1	0,0	0,5	6,0	24,7	13,1	1,1	12,3	25,0	25,0	0%
Prix (€)	537,8	20,0	84,0	280,0	1 000,0	1 499,6	50,0	175,0	571,0	6 560,0	41,3%
<i>N</i>	8 366										

TABLE 3.1 – Statistiques descriptives : enquête ECHO, envois routiers (sans pondération)

la nomenclature pré 2007, les différences étant l'absence de la NST2 et la fusion des NST 7 et la 8. Il faut retenir de ce tableau que les quatre principaux types de marchandises disponibles dans l'échantillon sont : les produits agricoles et agroalimentaires ; les matériaux de construction ; les produits manufacturés ; et dans une moindre mesure les produits chimiques. Dans la suite du rapport les résultats seront présentés pour toutes les NST selon la segmentation retenue ici. Mais ceux concernant les NST3B, 4, et 5 devront être considérés avec précaution. Il faut noter que l'enquête ECHO a été réalisée de façon un peu particulière et que l'ensemble du transport de marchandises n'entre pas dans son champs. Cela explique, en partie, et entre autres, la faible part des matériaux de construction (NST5).

	NST0	NST1	NST3B	NST4	NST5	NST6	NST7-8	NST 9
Répart. (échantillon)	5,4%	18,7%	1,4%	0,5%	4%	3,8%	10,1%	56,0%
Répart. (redr. tonnage)	3,0%	13,7%	2,5%	0,0%	3,4%	38,6%	6,6%	32,2%

NST0 : Agricole ; NST1 : Agro-alimentaire ; NST3B : Produits pétroliers ;

NST4 : Minerais ; NST5 : Produits métalliques ; NST6 : Matériaux de construction ;

NST7-8 : chimie et engrais ; NST9 : produits manufacturés.

Pas de valeurs manquantes.

TABLE 3.2 – Statistiques descriptives : enquête ECHO, envois routiers (sans pondération)

Les statistiques descriptives relatives aux contraintes de manutention sont présentées dans la table 3.3. La contrainte la plus fréquente dans l'échantillon est la contrainte de fragilité, mais cela ne concerne qu'une part réduite des tonnages transportés. A l'inverse, après redressement, en termes de tonnages transportés, les contraintes les plus prégnantes sont en fait d'abord la contrainte de température, ensuite les matières dangereuses.

Le conditionnement des envois est décrit dans la table 3.4. Les quatre modalités sont le vrac, les palettes, le conteneur, et enfin la catégorie "Autres" qui comprend notamment les sacs et colis. On constate que dans l'échantillon, les envois transportés par palette sont les plus importants. Il s'agit typique-

	Sans pondération		Pond. en tonnage	
	Oui	Non	Oui	Non
Contrainte de volume	5,9%	94,1%	2,1%	97,9%
Contrainte de température	8,5%	91,5%	10,4%	89,6%
Contrainte de fragilité	10,8%	89,2%	1,8%	98,2%
Matière dangereuse	3,3%	96,7%	4,0%	96,0%

^a : cette catégorie inclut les sacs et colis.

Pas de valeurs manquantes.

TABLE 3.3 – Statistiques descriptives : contraintes de manutention

ment d'envois de taille intermédiaire (de l'ordre de quelques tonnes). Les envois transportés en vrac sont typiquement bien plus lourds, mais transportés sur des distances plus faibles. De façon générale, plusieurs variables expliquent que les répartitions soient fortement modifiées entre échantillon non redressé et échantillon redressé. Dans l'échantillon redressé, qui nous intéresse, les catégories les plus importantes sont le vrac, les palettes, et la catégorie "Autres". Les conteneurs ne représentent qu'une faible partie, ce qui est normal : un envoi transporté en conteneur a vocation à être transporté par un autre mode de transport que par la route, et un tel envoi est donc hors du champ de l'échantillon retenu pour la présente étude.

	Vrac	Palette	Conteneur	Autres ^a	%NA
Répartition (échantillon)	14,6%	45,4%	3,3%	19,5%	1,9%
Répartition (redressée en tonnage)	45,9%	33,8%	0,7%	36,7%	2,6%

^a : cette catégorie inclut les sacs et colis.

TABLE 3.4 – Statistiques descriptives : conditionnement

Les destinations sont décrites dans la table 3.5. Il s'agit ici simplement de distinguer les envois dont la destination est en France, en Europe, ou dans le reste du monde. Pour rappel, l'origine des envois est nécessairement en France, car c'est ainsi qu'a été constitué l'échantillon. Par ailleurs, la base de données complète comprend beaucoup d'envois à destination hors Europe. On en retrouve très peu ici, car ces envois sont très généralement transportés par les voies aériennes ou maritimes, et donc hors du champ de la présente étude. On verra d'ailleurs que la catégorie "reste du monde" n'apparaît pas dans les modèles présentés dans la suite du rapport, par manque de données.

On constate que dans l'ensemble, les envois sont plutôt transportés au sein du territoire national. La part des envois transportés hors Europe par la route uniquement s'avère, de fait, infinitésimale.

Les dernières statistiques descriptives à présenter concernent le nombre de

	France	Europe	Reste du monde
Répartition (échantillon)	93,4%	6,6%	0,0%
Répartition (redressée en tonnage)	88,7%	10,8%	0,5%

Pas de valeurs manquantes.

TABLE 3.5 – Statistiques descriptives : destination (France ou Europe)

ruptures de charge⁵ dans le transport des envois (table 3.6). Il s'agit en effet d'une variable cruciale dans cette étude puisqu'elle fonde, dans la suite, la distinction entre les envois transportés en FTL et en LTL. D'un point de vue théorique, dans le chapitre précédent n'ont été distingués que deux modalités : le transport sans rupture de charge (FTL) et le rupture avec deux ruptures de charge (LTL). La réalité est plus diverse, et le nombre de ruptures de charges s'étend, dans l'échantillon, de 1 à 8. Par contre l'effet poids est très important, ce qui est complètement conforme aux prédictions théoriques (voir chapitre 4) : les envois les plus lourds ayant vocation à être transportés en FTL, et les petits en LTL, la part des envois faisant l'objet de plusieurs ruptures de charge est très faible une fois redressée en tonnage. Si on redressait par rapport à leur valeur monétaire, par exemple, on obtiendrait quelque chose de très différent. On observe par ailleurs que, malheureusement, cette variable est souvent non renseignée.

	0	1	2	3+	%NA
Répartition (échantillon)	62,0%	13,6%	11,9%	12,5%	47,6%
Répartition (redressée en tonnage)	81,0%	18,8%	0,2%	0,0%	

TABLE 3.6 – Statistiques descriptives : nombre de ruptures de charge.

Pour des raisons qui seront expliquées un peu plus loin (p. 48), la simplification suivante est faite : les envois transportés sans rupture de charge sont supposés avoir été transportés en FTL, les autres en LTL. La figure 3.1 ci-dessous illustrent la répartition des poids (a) et des prix des envois ?? par type de marchandise et selon qu'ils ont été distribués en FTL (en rouge) ou en LTL (bleu).

De façon générale, on observe des poids d'envoi nettement plus élevés pour les transports en FTL qu'en LTL, à quelques exceptions près. En se concentrant sur les NST principales (agricole et agro-alimentaire, chimie et produits manufacturés), on observe que les envois sont les plus lourds pour les produits

5. On définit ici la rupture de charge comme le transfert d'un envoi d'un véhicule dans un autre. Il peut être direct ou indirect – c'est-à-dire avec passage par plateforme, et il n'est pas nécessairement multimodal. L'enquête ECHO contient une variable sur le nombre de trajets n_{traj} ; le nombre de ruptures de charge est $n_{traj} - 1$.

chimiques, et les plus faibles pour les matériaux. Pour ces catégories, la hiérarchie est généralement respectée : les envois en FTL sont plus lourds que les envois en LTL, mais avec du recouvrement (le raisonnement théorique fonctionne toutes choses égales par ailleurs, mais dans ce simple graphique, l'effet des covariantes n'est pas contrôlé.)

On observe, en ce qui concerne les prix, une grande dispersion des valeurs. Il est ici plus difficile d'identifier des régularités et de commenter leurs causes possibles. On observe des prix plus faibles pour les produits agricoles que pour les produits agro-alimentaires, par exemple ; mais on observe des prix plus forts pour l'agro-alimentaire que pour les produits manufacturés, ce qui pourrait surprendre. Ici, de très nombreuses variables entrent en jeu ; leur contribution est examinée quantitativement dans les sections suivantes de ce chapitre.

Il s'agit ici d'un bref résumé des commentaires qu'il faudrait faire à propos de cette base de données. Une discussion bien plus approfondie est disponible notamment dans GUILBAULT et al. (2006), GUILBAULT et SOPPÉ (2009).

3.3 Spécifications et estimations

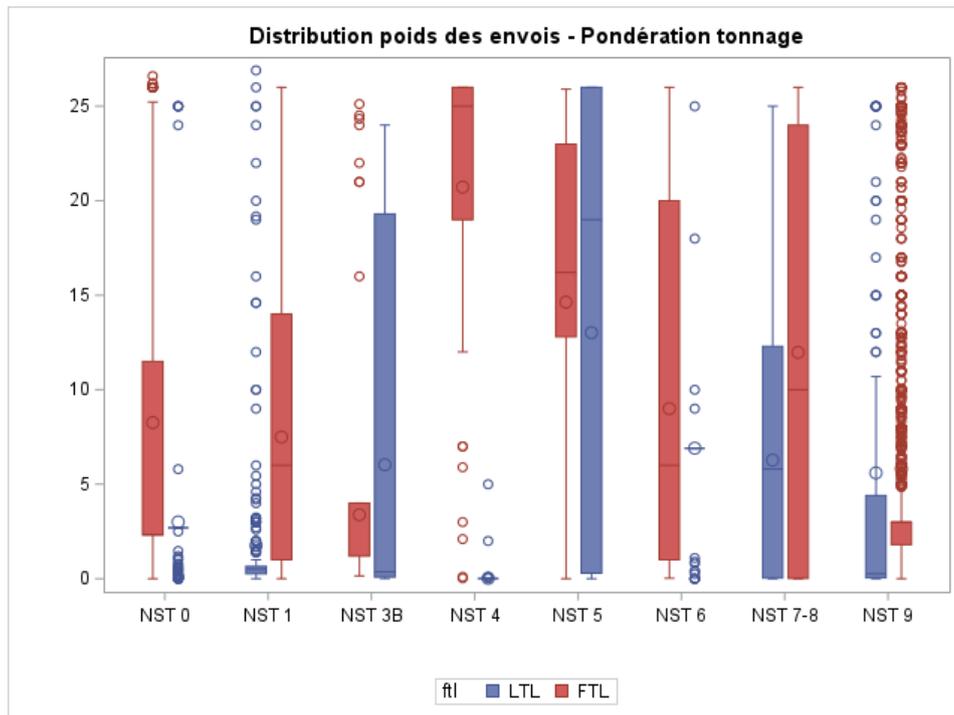
Les modèles de prix sont des modèles linéaires, qui expliquent les prix d'un certain nombre de variables. La spécification retenue (commune au cas FTL et au cas LTL) est la suivante :

$$p_i = \beta_0 + \beta_d d_i + \beta_s s_i + \beta_{sd} s_i d_i + \sum_{j \in J_C} (\beta_{C_j d} X_{C_j} d_i + \beta_{C_j s} X_{C_j} s_i) + \sum_{j \in J_O} \beta_{O_j} X_{O_j} + \varepsilon_i \quad (3.1)$$

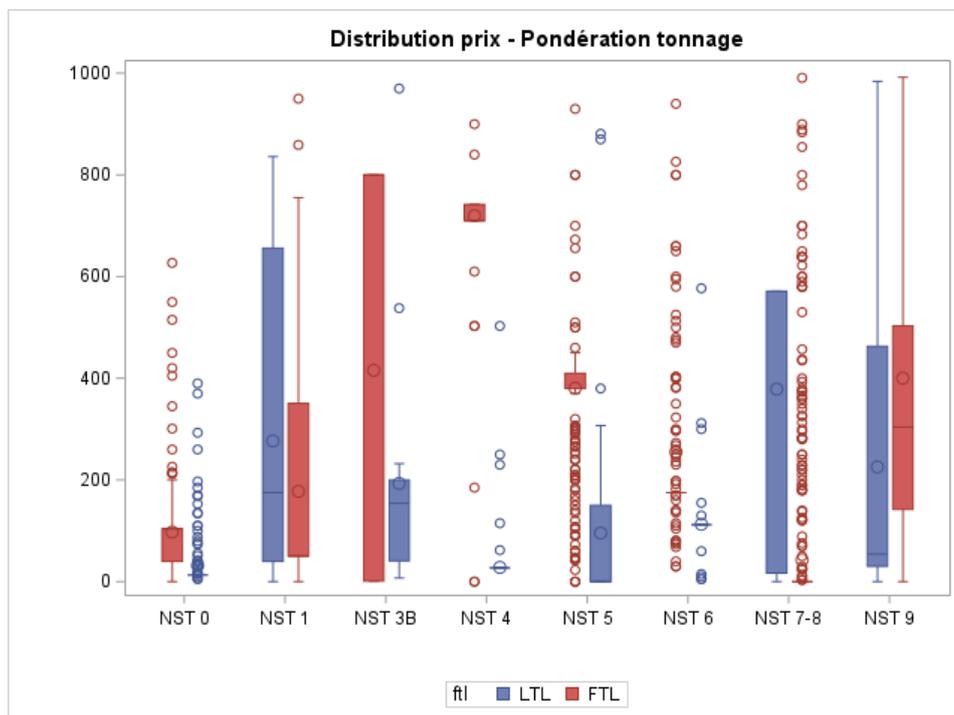
L'indice i dénote l'observation. Les variables X_Y valent 1 lorsqu'une certaine caractéristique est présente, 0 sinon. Les termes de l'équation sont :

- le prix p_i ,
- la distance origine-destination d_i (mesurée à vol d'oiseau, entre le centroïde de la commune de départ et celui de la commune de destination) ;
- le poids s_i de l'envoi⁶ ;
- La présence de contraintes particulières portant sur la manutention de l'envoi (ces contraintes étant : le caractère volumineux de l'envoi, la nécessité de le transporter sous température dirigée, sa fragilité, ou le caractère dangereux de la marchandise). J_C dénote l'ensemble de ces contraintes.

6. Le choix de mesurer l'envoi par son poids n'est pas anodin ; il est clair que le volume peut jouer autant voire beaucoup plus que le poids dans la formation des coût puisque pour plusieurs types de marchandises la contrainte opérationnelle est le volume (voir par exemple COMBES et LEURENT, 2013). C'est un problème en soi, pour cette recherche et pour la modélisation du transport de marchandises en général, mais il ne sera pas utilisé ici. Il est très imparfaitement pris en compte ici par une variable représentant la présence d'une contrainte de volume.



(a) Poids des envois, fonction des NST et du type de transport



(b) Prix de transport, fonction des NST et du type de transport

FIGURE 3.1 – Distribution des poids et des prix des envois, redressés en tonnage

- Le conditionnement (palette, vac, conteneur, autre — dont sacs et colis)

- La destination (nationale ou européenne). J_O dénote l'ensemble de ces variables (conditionnement et destination).
- Le terme d'erreur ε_i .

Plusieurs autres variables auraient pu être prises en compte⁷. De nombreuses spécifications ont été testées. Celle retenue représente un compromis entre simplicité, pouvoir explicatif, et compatibilité avec le modèle micro-économique⁸. Pour compléter la présentation du modèle, il faut noter que d'une part, l'interaction entre poids et distance est prise en compte ; d'autre part que l'effet des contraintes de manutention est uniquement pris en compte en interaction avec la distance et le poids. Enfin, il faut noter que plusieurs de ces contraintes peuvent être présentes simultanément.

La distinction FTL/LTL. Les modèles micro-économiques présentés dans le chapitre précédent distinguent deux types d'opération : FTL (sans rupture de charge) et LTL (avec deux ruptures de charge). La distinction n'est pas si simple en pratique. L'approximation suivante est faite ici : s'il n'y a pas eu de rupture de charge, alors l'envoi est supposé avoir été transporté en FTL. S'il y a eu rupture de charge, alors l'envoi est supposé avoir été transporté en LTL. Il s'agit d'un proxy, avec de nombreuses exceptions ; il a le mérite de la simplicité et a été retenu pour cette recherche.

Le modèle de prix FTL. L'estimation de ce modèle est présentée par la table 3.7. Les deux premières colonnes montrent les résultats de l'estimation par moindres carrés ordinaires ; les deux secondes par moindres carrés pondérés. L'estimation par moindres carrés pondérés permet de résoudre le problème d'homoscédasticité que pose l'estimation par moindres carrés ordinaires. C'est donc le second modèle qui est retenu.

L'examen des coefficients significatifs montrent que les signes sont tels qu'attendus. Ainsi, il y a un effet positif de la distance, du poids, et de leur produit sur le prix, en cohérence avec le modèle micro-économique présenté dans le chapitre précédent. Par ailleurs, les variables de contrôle relatives aux contraintes de manutention peuvent donner les effets attendus (prix accru pour le transport des matières dangereuses, en interaction avec le poids) ou des effets contrastés et un peu plus difficilement explicable (effet positif de la contrainte

7. En particulier, on pourrait se demander pourquoi la nature de la marchandise n'a pas été prise en compte, comme on le fait traditionnellement en modélisation du transport de marchandises. Nous estimons, en ligne avec plusieurs travaux récents (dont PIENDL et al., 2016 ; KONING, COMBES, PIENDL et LIEDTKE, 2018, que le type de marchandise est en fait un proxy de variables plus porteuses de sens, telles que celles utilisées ici, relatives aux caractéristiques physiques des envois et à la façon dont ils peuvent être transportés, stockés, manutentionnés, etc.

8. En particulier, des modèles log-log ont été testés. La part de variance expliquée est plus élevée. Mais les scénarios de véhicule autonome élaborés dans la Table 2.4 sont très difficiles à appliquer à des modèles log-log, alors qu'ils sont beaucoup plus faciles à appliquer à des modèles linéaires, même si, comme on le verra plus loin, il y a des choix à faire pour lesquels il est impossible d'éviter totalement l'arbitraire.

	MCO		MCP	
	Estimateur	Sign.	Estimateur	Sign.
Constante	140,35	***	139,79	***
Distance (km)	0,33	***	0,31	***
Poids (t)	2,47	**	3,10	***
Poids*Distance (tkm)	0,03	***	0,0278	***
Distance*C_vol ^a	0,35	***	0,40	***
Distance*C_ref ^a	-0,26	**	-0,25	**
Distance*C_frag ^a	-0,12	.	-0,097	
Distance*C_TMD ^a	-0,026		-0,075	
Poids*C_vol ^a	-3,61	*	-3,47	**
Poids*C_ref ^a	6,09		8,7	**
Poids*C_frag ^a	0,47		0,56	
Poids*C_TMD ^a	8,70	**	9,56	**
Vrac ^b	12,79		-3,34	
Conteneur ^b	145,71	***	87,17	*
Autre cond. ^b	-103,58	***	-83,69	***
Europe ^c	114,71	***	55,18	**
R^2	0,52		0,53	
Homoscédasticité	Non		Oui	
N	1 006			

Significativité (p -value) : *** <0,001 ; ** <0,01 ; * <0,05 ; . <0,1

^a : C_vol : volumineux ; C_ref : réfrigéré ; C_frag : fragile ; C_TMD : matière dangereuse

^b : Référence = palette

^c : Référence = destination en France

TABLE 3.7 – Modèles de prix FTL

de volume en interaction avec la distance mais négatif en interaction avec le poids ; effet négatif de la contrainte de température en interaction avec la distance, mais positif en interaction avec le poids.)

Un envoi en sac ou colis (la catégorie "autre conditionnement") sera moins cher à transporter qu'un envoi en palettes (le niveau de référence). Enfin, un envoi à destination d'Europe coûtera plus cher à transporter qu'un envoi à destination de la France ; cela peut traduire à la fois des contraintes opérationnelles particulières (découché du chauffeur par exemple) ou administratives (et donc assimilables à des coûts de transaction.)

Le modèle de prix LTL. La spécification du modèle de prix LTL est identique à celle du modèle FTL. Les résultats de l'estimation sont présentés dans la table 3.8.

Comme pour le modèle FTL, les coefficients ont globalement les signes attendus. Plus intéressante est la comparaison des grandeurs. La discussion suivante est fondée sur les modèles MCP. On observe ainsi que la constante du modèle LTL est plus faible, mais que les pentes par rapport au poids et au

	MCO		MCP	
	Estimateur	Sign.	Estimateur	Sign.
Constante	83,46	***	73,77	***
Distance (km)	0,084	***	0,048	***
Poids (t)	5,77	**	4,73	**
Poids*Distance (tkm)	0,045	***	0,058	***
Distance*C_vol ^a	0,10	.	0,14	***
Distance*C_ref ^a	-0,048		-0,036	
Distance*C_frag ^a	0,056		-0,016	
Distance*C_TMD ^a	0,014		-0,045	
Poids*C_vol ^a	15,52	*	15,61	***
Poids*C_ref ^a	13,48	.	90,94	***
Poids*C_frag ^a	1,59		1,11	
Poids*C_TMD ^a	19,73	**	59,49	***
Vrac ^b	-30,88		-2,95	
Conteneur ^b	-5,92		26,48	
Autre cond. ^b	-75,30	***	-52,75	***
Europe ^c	100,27	***	44,32	***
R^2	0,39		0,39	
Homoscédasticité	Non		Oui	
N	1 071			

Significativité (p -value) : *** <0,001 ; ** <0,01 ; * <0,05 ; . <0,1

^a : C_vol : volumineux ; C_ref : réfrigéré ; C_frag : fragile ; C_TMD : matière dangereuse

^b : Référence = palette

^c : Référence = destination en France

TABLE 3.8 – Modèles de prix LTL

produit du poids de la distance. A l'exception du coefficient distance, on trouve donc bien un résultat intuitivement correct : les prestations de transport LTL sont moins chères pour les petits envois ; mais plus l'envoi est lourd, moins la prestation LTL est compétitive en comparaison de la prestation FTL.

L'effet distance est un peu plus complexe à discuter. Qualitativement, l'argument principal qu'on peut avancer est qu'en FTL, la distance est un déterminant majeur des coûts, puisque les consommations énergétiques et les temps de trajet en dépendent directement. En LTL, la prestation de transport est supportée par un réseau hiérarchisé de plateformes reliées par des tractions régulières. Ce fait, mal représenté par le modèle théorique présenté dans le chapitre précédent, explique peut-être la plus faible influence de la distance sur le prix dans le cas LTL que dans le cas FTL.

Les autres paramètres n'appellent pas de commentaire particulier.

3.4 Application des scénarios de véhicule autonome

Les scénarios développés dans le Chapitre 2 le sont sur la base de modèles microéconomiques qui s'écrivent (équations 2.3 et 2.8) sous la forme :

$$p = b + csd. \quad (3.2)$$

Ainsi, après calibration et élaboration des hypothèses, les deux scénarios de véhicule autonome PLA1 et PLA2 sont présentés sous la forme de variations relatives des coefficients b et c (Table 2.4).

Or, les spécifications des modèles économétriques développés dans ce chapitre sont de la forme (équation 3.1) :

$$p = \beta_0 + \beta_d d + \beta_s s + \beta_{sd} sd + \sum_x \beta_x X_x \quad (3.3)$$

Le choix d'affecter les variations prévues de b et c aux différents coefficients du modèle économétrique est résumé ci-dessous :

$$\Delta\beta_0 = \Delta b; \quad (3.4)$$

$$\Delta\beta_s = \Delta b; \quad (3.5)$$

$$\Delta\beta_x = \Delta b, \quad \forall x; \quad (3.6)$$

$$\Delta\beta_d = \Delta c; \quad (3.7)$$

$$\Delta\beta_{sd} = \Delta c. \quad (3.8)$$

La justification en est la suivante : le coefficient b correspond aux coûts marginaux engendrés par le déclenchement de l'opération de transport ; le coefficient c correspond aux coûts marginaux dépendant de la distance couverte par l'opération de transport. Il est clair que d'autres choix auraient pu être réalisés. Ici aussi, compte-tenu du caractère prospectif de l'exercice et de la nécessité de prendre une décision, le parti pris semble acceptable.

Chapitre 4

Modélisation du comportement des chargeurs : l'approche en Coût Total Logistique

4.1 Introduction

Les Chapitres 2 et 3 ont permis de poser les bases de ce que pourraient donner, côté offre, deux scénarios contrastés de véhicule autonome, PLA1 et PLA2. L'approche retenue, celle de modèles microéconomiques et économétriques désagrégés a notamment consisté à retenir l'envoi comme unité de décision. Lorsqu'on aborde le côté demande du marché du transport de marchandises, il faut donc garder la même approche, et la même unité de décision. Cela offre l'avantage de permettre de mobiliser les outils de théorie d'inventaire, qui permettent de prendre en compte, du point de vue du chargeur, non seulement les coûts de transport, mais aussi d'autres coûts logistiques.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les éléments de théorie d'inventaire qui seront mobilisés dans le cadre de cette recherche. Il s'agit essentiellement d'introduire une fonction de coût total logistique qui peut s'apparenter au coût généralisé qu'on rencontre classiquement dans les modèles spatialisés de demande de transport de marchandise ou même de voyageurs. La spécification retenue dans cette recherche permet simultanément de calculer la taille d'envoi optimale en fonction de différents paramètres parmi lesquels les prix de transport, et le coût total logistique associé.

La calibration de la fonction de coût total logistique pose des problèmes particuliers, car ses paramètres ne sont pas tous connus. Une méthode est ici proposée pour quantifier certains de ces paramètres. Bien que ce ne soit pas l'objet premier de ce travail, ces résultats pourront être utiles à la modélisation du transport de marchandises puisqu'ils consistent, d'une certaine façon, à inférer des valeurs du temps.

Dans un premier temps, le coût total logistique est conditionnel au choix d'un certain type d'opération de transport (FTL ou LTL). Mais une fois les coûts totaux logistiques calculés pour chaque option, il devient possible d'éta-

blir un modèle de choix de type d'opération de transport, ce qui est l'étape ultime dans la chaîne de modélisation développée dans cette recherche.

La structure du chapitre est donc la suivante : la Section 4.2 présente les principes de théorie d'inventaire mobilisés dans le cadre de cette recherche. La Section 4.3 présente la calibration de la fonction de coût total logistique. Enfin la Section 4.4 montre comment le modèle de choix de type d'opération de transport est calibré.

4.2 Quelques principes de théorie d'inventaire

L'approche utilisée dans ce chapitre a été initialement imaginée par BAUMOL et VINOD (1970). Elle part d'un constat simple. Imaginons un chargeur expédiant à un destinataire 1 000 tonnes de marchandises par an. Pour assurer le transport de ce flux de marchandises, on peut envoyer 100 tonnes dix fois par an, ou bien environ 3 tonnes chaque jour. Le premier cas permet de bénéficier d'économies d'échelle dans le transport, et donc de réduire les coûts unitaires de transport. Mais le second cas permet de réduire les stocks (tant chez l'expéditeur que chez le destinataire), et la durée entre la production de la marchandise et son utilisation ou sa vente. Le compromis entre les deux postes de coût ressemble beaucoup au modèle EOQ, originellement développé par HARRIS, 1913 pour résoudre un problème de production (faut-il produire de longues séries pour réduire les coûts de reconfiguration des machines ou de courtes séries pour réduire les stocks?). Ce compromis est très dépendant du type de technique de transport envisagé. Ainsi, mode de transport et choix de taille d'envoi sont interdépendants. Ci-dessous sont rapidement présentés ces principes (Section 4.2.1) puis la question du choix de type d'opération de transport est traitée spécifiquement (Section 4.2.2).

4.2.1 La fonction de coût total logistique

Dans le modèle présenté ici, on considère un chargeur expédiant un flux stable de marchandises vers un destinataire donné, en quantité de Q tonnes par an. Le chargeur doit déterminer la taille s des envois qu'il va expédier. Dans le modèle, il est supposé que la marchandise est produite en continu au départ : l'inventaire croît donc linéairement à un rythme Q jusqu'à la quantité s auquel moment, un envoi étant expédié, l'inventaire tombe à zéro¹. La quantité de marchandises dans l'inventaire de départ est donc, en moyenne $s/2$ (figure 4.1).

Notons c_w le coût de stockage par unité de marchandise et par unité de temps, et a la propension du chargeur pour réduire la durée d'immobilisation

1. Dans le modèle de BAUMOL et VINOD (1970), ainsi que dans la plupart des modèles de gestion de stock, un stock de sécurité est pris en compte : comme la demande, ou l'offre, ou le transport, peuvent être aléatoires, et comme il ne faut pas que le stock tombe en dessous de zéro, un certain stock de sécurité est prévu. Cela rend la modélisation considérablement plus difficile, et nécessite de toute façon des données dont nous ne disposons pas. Ce terme est donc ignoré.

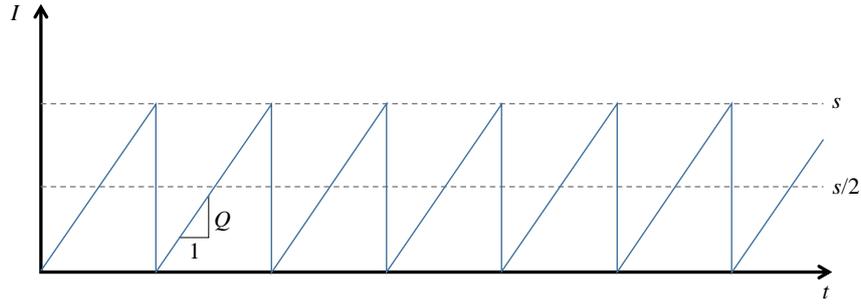


FIGURE 4.1 – Economic Order Quantity : inventaire

de la marchandise, le coût d'inventaire à l'origine est donc $(c_w + a)s/2$. Le coût d'inventaire à destination étant le même, sur le périmètre qui nous intéresse, le coût d'inventaire total est :

$$C_I = (c_w + a)s. \quad (4.1)$$

Le coût de transport dépend de la taille d'envoi. Dans la présentation du modèle EOQ pour la modélisation du transport de marchandises, il est usuel d'utiliser une spécification du type $p(s) = b + cs$. Ici nous partirons directement des spécifications des modèles économétriques (équation 3.3). Par souci de lisibilité les variables catégorielles seront omises.

Dès lors, si les envois sont de taille s , alors le nombre d'envoi expédié par an est Q/s . Le coût de transport annuel est donc :

$$C_t = \frac{Q}{s} (\beta_0 + \beta_d d + \beta_s s + \beta_{sd} s d),$$

ou encore :

$$C_t = (\beta_0 + \beta_d d) \frac{Q}{s} + (\beta_s + \beta_{sd} d) Q. \quad (4.2)$$

Le troisième poste de coût est le coût d'inventaire en ligne. En notant t le temps de trajet, ce coût noté C_P pour *pipeline inventory* est tout simplement :

$$C_P = atQ \quad (4.3)$$

Et sur la base des équations (4.1), (4.2) et (4.3), il est possible d'écrire la fonction de coût total logistique $TLC = C_I + C_t + C_P$ qui sera utilisée dans la suite :

$$TLC = (c_w + a)s + (\beta_0 + \beta_d d) \frac{Q}{s} + (\beta_s + \beta_{sd} d + at)Q. \quad (4.4)$$

Une fois donnée la fonction TLC , la taille d'envoi apparaît clairement comme un compromis entre deux coûts de natures différentes : le coût d'inventaire d'une part, qui augmente lorsque la taille d'envoi augmente ; et le

coût de transport d'autre part, qui augmente lorsque la taille d'envoi diminue² Un compromis s'établit pour une certaine valeur, autour de laquelle les gains marginaux de coût d'inventaire réalisés en réduisant la taille d'envoi sont exactement compensés par la hausse marginale des coûts de transport (Figure 4.2).

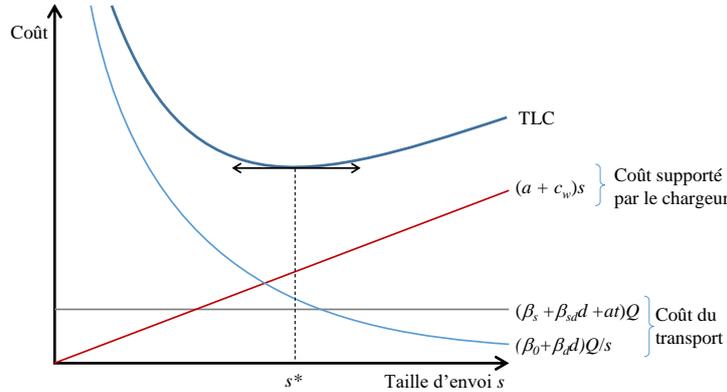


FIGURE 4.2 – Composants de la fonction de coût total logistique

Le poids d'envoi optimal s'obtient en minimisant TLC :

$$s^* = \sqrt{\frac{Q(\beta_0 + \beta_d d)}{a + c_w}}. \quad (4.5)$$

La façon dont la taille d'envoi optimale évolue avec les paramètres a et Q est illustrée par la figure 4.3 ci-dessous, pour un certain jeu de paramètres en ce qui concerne l'offre de transport. Les valeurs n'ont pas d'importance ici ; la figure illustre simplement que, toutes choses égales par ailleurs, la taille d'envoi diminue avec la valeur du temps a et augmente avec le flux chargeur-destinataire Q . Les courbes de niveau sont des droites du fait de la forme de la fonction de taille d'envoi optimale. Elles ne passent pas par zéro car $c_w > 0$.

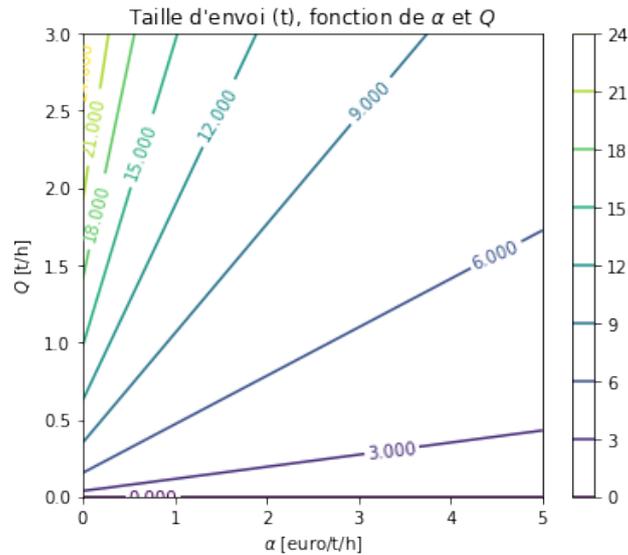
Il est également nécessaire de calculer le coût total logistique optimal (c'est-à-dire pour $s = s^*$). Ce coût, noté TLC^* , est :

$$TLC^* = 2\sqrt{(\beta_0 + \beta_d d)(c_w + a)Q} + (\beta_s + \beta_{sd}d + at)Q. \quad (4.6)$$

La fonction de coût total logistique est non linéaire en a et Q . Les courbes de niveau de cette fonction sont illustrés par la Figure 4.4 ci-après. Ces courbes montrent d'une part que la fonction TLC croît avec chacune de ces deux variables ; d'autre part qu'il s'agit d'une fonction concave.

Validité empirique de l'approche. L'approche présentée ci-dessus peut sembler exagérément simplifiée et théorique. En réalité, plusieurs travaux en

2. Précisément : les coûts de transport diminuent avec la taille d'envoi, *par opération*. Mais les coûts unitaires augmentent lorsque la taille d'envoi diminue. Donc, lorsqu'on fait le bilan sur une *période de temps* et non par opération, les coûts de transport augmentent.

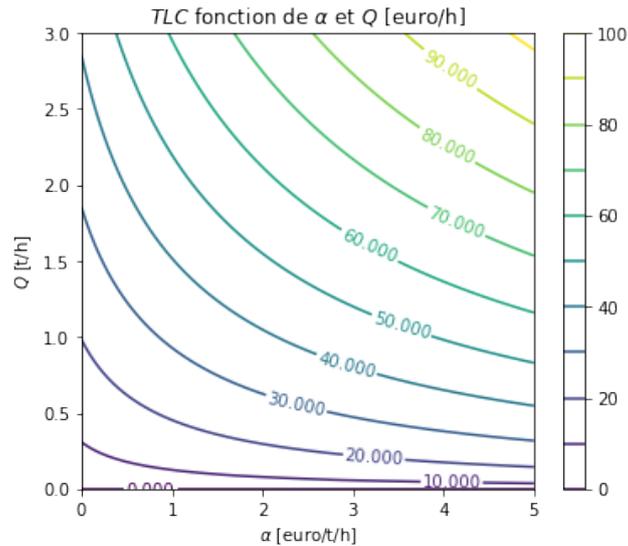
FIGURE 4.3 – Taille d'envoi en fonction de a et Q

valident la cohérence avec les comportements des chargeurs observés dans les faits. Pour ne citer que ceux d'entre eux qui mobilisent l'enquête ECHO³. COMBES (2012) montre que le modèle EOQ de prévision de taille d'envoi a un bon pouvoir explicatif, puisqu'une simple spécification log-log permet d'expliquer la moitié de la variance en retrouvant les coefficients attendus en théorie⁴. LLORET-BATLLE et COMBES (2013) montrent qu'une spécification de fonction de coût total logistique fondée sur l'équation (4.4) explique mieux le choix modal qu'une simple spécification en coût généralisé classique (coût et temps multiplié par une valeur du temps). COMBES et TAVASSZY (2016) étendent le raisonnement pour montrer qu'une spécification en coût total logistique permet aussi de prédire le nombre de ruptures de charge, ce qu'il faut considérer comme une validation empirique solide du bien fondé de la démarche mise en oeuvre dans ce rapport. Enfin, KONING et al. (2018) contribuent également à valider ces modèles, même si ce n'est pas l'objet premier de leur recherche ; ils en examinent la transférabilité entre territoires et périodes différentes (France en 2004, Allemagne en 2015), avec des résultats satisfaisants.

Quelques limites. En toute rigueur, il faudrait prendre en compte les coûts de transport supportés par l'expéditeur et le destinataire, non compris dans le prix du transport (par exemple : infrastructures tels que les quais de char-

3. Les autres travaux ont leur intérêt mais, du fait de données souvent inadaptés — très généralement l'absence de la variable Q ils nécessitent souvent de faire un écart important entre le modèle théorique et le modèle empirique.

4. Lorsqu'on prend le logarithme de l'équation (4.5), on obtient $\ln s^* = 0,5 \ln Q - 0,5 \ln(a + c_w) + \dots$. Ces coefficients 0,5 et -0,5 sont retrouvés presque exactement (à 10% près) avec les modèles empiriques, dans lesquels la densité de valeur de l'envoi (prix divisé par poids) est pris comme proxy pour la variable $a + c_w$. Ce proxy résiste très bien au passage au logarithme.

FIGURE 4.4 – TLC en fonction de a et Q

gement, personnel pour charger et décharger les marchandises, etc.) Nous ne sommes pas en mesure de le faire ici, par manque de données. Cela a un certain nombre d'implications.

De même, il faudrait prendre en compte une contrainte de capacité dans le problème de taille d'envoi (la taille de l'envoi s ne peut pas dépasser la capacité K de traitement du véhicule qui va le transporter, par exemple). Cela aussi engendre des difficultés et, dans le cadre de ce travail, cette contrainte est laissée de côté⁵.

4.2.2 Coût total logistique et choix de type d'opération de transport

Considérons maintenant que le chargeur a le choix entre plusieurs organisations de transport. On considère ici que chaque option m est caractérisée par les coefficients b_m , c_m , et t_m . Les options peuvent être des modes de transport distincts (route et ferroviaire) ou bien des organisations de transport distinctes (lot complet ou groupage.)

Prenons le cas lot FTL versus LTL : alors l'un des modes sera caractérisé par une capacité élevée, par un coût variable relativement faible mais par un coût fixe élevé : il ne sera pertinent économiquement que si le chargeur l'utilise dans les conditions qui conviennent, c'est-à-dire que les flux sont suffisamment

5. La contrainte de capacité, sous sa forme la plus simple, consiste à imposer $s \leq K$, avec K une certaine grandeur. La contrainte de capacité est atteinte sous certaines conditions. Par exemple, si $Q \geq Q_K$ avec $Q_K = (a + a_w)K^2 / (\beta_0 + \beta_d d)$, alors $s^* = K$. La forme de la fonction TLC^* est également modifiée : si $Q \geq Q_K$ alors $TLC^* = (a + c_w)K + (\beta_0 + \beta_d d)Q/K + (\beta_s + \beta_{sd}d + at)Q$. Plusieurs implications sont discutées dans HALL (1985). De nombreuses contraintes, plus générales, et leurs implications, sont discutées dans DAGANZO (2005).

intenses pour assurer une utilisation efficace des ressources (par exemple un taux de remplissage correct des véhicules). A l'inverse, la deuxième option a un coût variable relativement élevé, mais un coût fixe plus faible : l'organisation du transporteur permet au chargeur de bénéficier de taux de remplissage élevés sans que le chargeur soit lui-même obligé de fournir les flux qui permettent de fait d'atteindre ces taux de remplissage. En d'autres termes, l'organisation en groupage permet la massification qui, par ricochet, permet au chargeur d'envoyer de petites quantités sans que le surcoût en terme de transport soit trop élevé. Formellement, les relations entre les coefficients pourraient être les suivantes :

$$\begin{cases} b_{LTL} < b_{FTL} \\ c_{LTL} > c_{FTL} \end{cases}$$

mais avec des incertitudes et des variations, en particulier sur le temps de transport t . Par ailleurs, ici aussi la question de la capacité n'a pas été traitée⁶.

Lorsque deux organisations sont des options pour le chargeur, chacune aura sa zone de pertinence : l'option lourde (dans l'exemple ci-dessus, le lot complet) pour Q grand et a petit, et l'option légère (dans l'exemple ci-dessus, le groupage) dans la zone inverse. La figure 4.5a montre la zone de pertinence de chaque option dans un cas numérique ; on voit que la différence entre TLC_{FTL} et TLC_{LTL} est négative pour de faibles valeurs de Q et de grandes valeurs de a , c'est-à-dire en bas à droite de la figure, dans la zone bleue. La figure 4.5b montre la fonction de TLC après prise en compte des deux options : on devine la ligne de rupture au passage d'une organisation de transport à l'autre, qui traverse la figure en diagonale. Enfin, la figure 4.5c donne le poids d'envoi optimale en fonction de a et Q , on observe qu'en cohérence avec la discussion ci-dessus, les envois sont beaucoup plus petits dans la zone où le groupage est pertinent que dans la zone du lot complet.

4.3 Calibration de la fonction de Coût Total Logistique

Pour modéliser l'effet et la réaction des chargeurs à des modifications de l'offre de transport, il faut disposer des fonctions (4.5) et (4.6). La variable Q et les différentes variables de contrôle sont observées directement dans la base de données. Les coefficients des modèles de prix ont été estimés dans le chapitre 3. Mais un élément important manque : la valeur de la variable $a + c_w$.

Pour poursuivre, nous proposons ici d'inférer cette variable en faisant l'hypothèse que le choix, par le chargeur, de le poids d'envoi observé est effectivement exactement gouvernée par l'équation (4.5). Il s'agit, en quelque sorte,

6. Voir la note de bas de page 5. Le choix entre les deux modes ou types d'opération de transport est en réalité fondée sur la spécification des fonctions TLC présentée dans cette note, et la capacité peut avoir une influence très importante. Il s'agit d'une limite de ce travail de recherche ; limite techniquement assez difficile à lever.

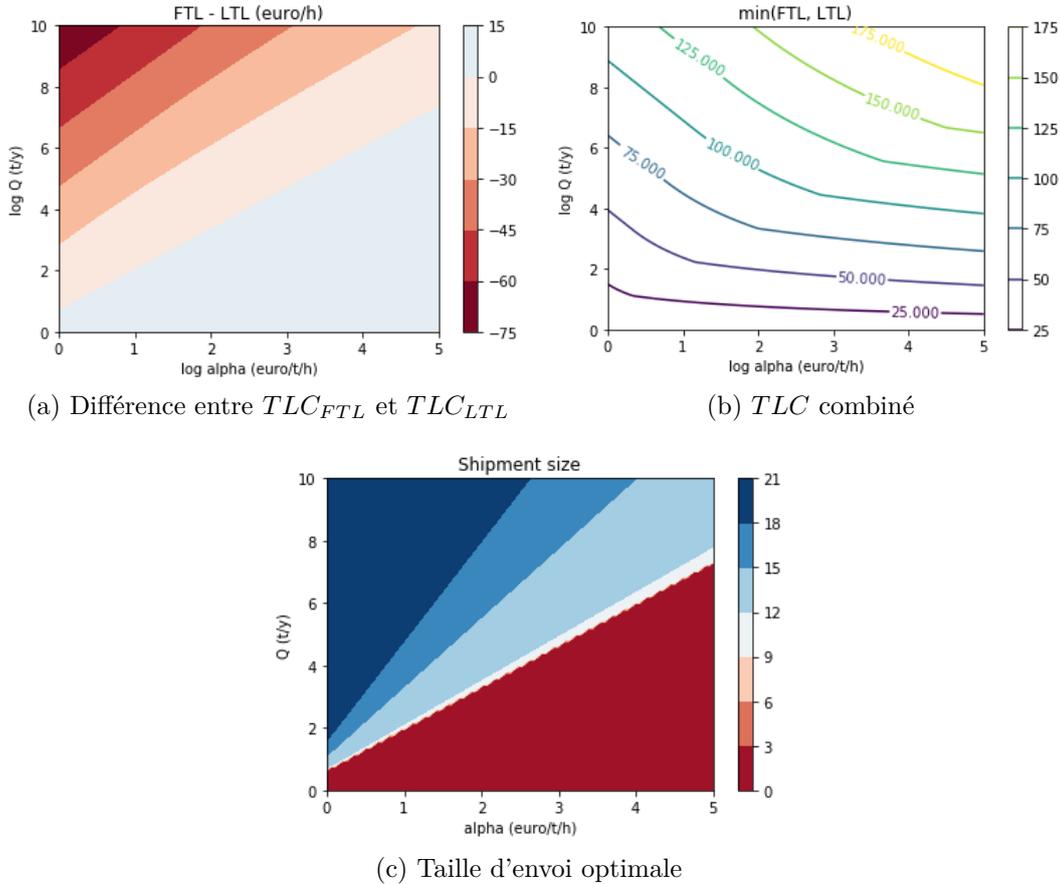


FIGURE 4.5 – Taille d'envoi et Coût Total Logistique, FTL vs LTL

d'une application de la méthode des prix hédoniques (ROSEN, 1974) : puisqu'envoyer des petits envois est coûteux du point de vue du transport, les chargeurs doivent bien y trouver un bénéfice ailleurs. On fait ici l'hypothèse que ce bénéfice relève de gains d'inventaire. Mais en réalité, la nature de ce bénéfice n'est pas si importante ; même si sa source est autre que des gains sur les coûts d'inventaire, le raisonnement tient, et les simulations réalisées par la suite aussi. Les phénomènes de nature à mettre ce raisonnement en défaut sont : la non prise en compte de contraintes portant sur le choix de taille d'envoi (dont les contraintes de capacité, évoquées plus haut) ; l'interdépendance entre décisions de choix de fréquence d'envois de nature ou de destinations différentes par un même expéditeur ; la non-optimalité de la décision observée ; et bien sûr les erreurs de mesure.

Quoiqu'il en soit, une fois admise l'hypothèse, il est possible de calculer directement $a + c_w$ après une simple manipulation de l'équation (4.5) :

$$a + c_w = \frac{(\beta_0 + \beta_d d)Q}{(s^*)^2} \quad (4.7)$$

Il faut noter que le fait d'ignorer la contrainte de capacité implique que,

dans les cas concernés, les valeurs ainsi calculées sont en réalité surestimées⁷. A l'inverse, la présence de coûts supportés par le chargeur et absents des prix aurait tendance à causer une sous-estimation des valeurs⁸. Dans tous les cas, une fois calculés ces coefficients, l'essentiel de la fonction *TLC* est connu.

Il manque le dernier terme, l'inventaire en ligne C_P . La donnée manquante est ici le temps de trajet t . Les données concernant cette variable sont malheureusement de mauvaise qualité dans l'enquête ECHO. Par ailleurs, cette variable est essentiellement exogène dans le cadre de cette recherche et n'est pas appelée à être beaucoup modifiée entre les scénarios de référence, PLA1 et PLA2. Le choix est donc fait ici de ne pas prendre en compte ce poste de coût. Le seul point au niveau duquel ce choix peut poser problème dans la chaîne de modélisation est pour le choix FTL/LTL. L'approche économétrique retenue permet de pallier partiellement le problème.

La table 4.1 présente quelques statistiques descriptives relatives aux deux postes de coût de la fonction *TLC*. Afin d'en améliorer la lisibilité, les coûts ont été normalisés, c'est-à-dire ramenés à la tonne. Dans chaque cas, les statistiques sont données pour l'échantillon pondéré en tonnage. Les statistiques sont également données de façon globale, puis en fonction du type d'opération de transport (FTL/FTL). On observe, de façon générale, la forte asymétrie des distributions. On constate également que les deux postes de coût (transport et inventaire) sont d'ordres de grandeur relativement comparables (ce qui semble fortuit ; en tout cas la théorie présentée ci-dessus ne permet pas d'établir la moindre prédiction sur ce point.) Enfin on observe comme attendu que les coûts unitaires sont plus élevés (plus précisément : les distributions sont décalées vers la droite) pour les envois transportés en LTL par rapport au FTL.

L'examen par type de marchandise est illustré par la figure 4.6. La figure (a) représente les coûts totaux logistiques annuels, pour information. Ces coûts peuvent être très élevés. Toutes les autres figures sont normalisés, par tonne, ce qui facilite la comparaison. Ainsi, la figure (b) montre que les coûts totaux logistiques unitaires sont très dispersés d'une NST à l'autre. Ils ont tendance à être plus élevés en LTL qu'en FTL, car les flux sont plus faibles, ce qui ne permet pas de disposer des multiples économies d'échelle côté transport et stockage. Par ailleurs, on observe que les coûts les plus élevés concernent plutôt les produits chimiques, puis, sans qu'il soit très facile de les hiérarchiser, les produits agro-alimentaires et manufacturés. Les coûts des produits industriels sont plus faibles. Quoiqu'il en soit, les distributions se recouvrent fortement.

La décomposition des coûts totaux logistiques unitaires entre coûts de transport et coûts d'inventaire est illustrée par les figures (c) et (d). La hiéar-

7. En effet, dans un tel cas, la seule chose on peut être certain est que $\partial TLC / \partial s < 0$ pour $s = K$. cela implique que $K < s^*$, clairement, mais aussi que $a + c_w < (\beta_0 + \beta_{ad})Q/K^2$: on surestime donc la valeur du temps en appliquant la formule sans plus de précaution. A ce stade, le problème reste sans solution.

8. Supposons que le vrai coût fixe supporté par le chargeur (y compris le prix) est $\bar{\beta}_0 + \bar{\beta}_{ad}$; ce vrai coût est remplacé dans l'équation (4.7) par $\beta_0 + \beta_{ad}$, estimés sur la seule base des prix. Très probablement, $\bar{\beta}_0 + \bar{\beta}_{ad} \geq \beta_0 + \beta_{ad}$, et il en est de même pour les valeurs du temps calculées.

	Moy.	Q1	Med.	Q3	95%
C_t/Q	528	24	52	101	1 551
C_t/Q [FTL]	427	23	52	78	537
C_t/Q [LTL]	1 267	35	234	393	3 076
C_i/Q	518	13	49	87	1 542
C_i/Q [FTL]	418	11	49	74	532
C_i/Q [LTL]	1 249	16	210	365	3 056
TLC/Q	1 273	42	101	189	3 133
TLC/Q [FTL]	906	40	101	151	1 075
TLC/Q [LTL]	3 957	52	506	925	35 201

Unité : €/t/an.

[FTL]/[LTL] : observations prises en compte.

TABLE 4.1 – Statistiques descriptives des coûts logistiques normalisés, pondération en tonnage

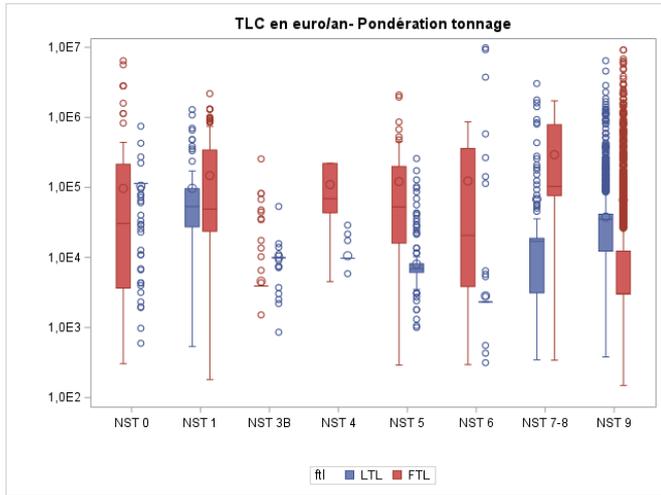
chie entre les catégories de marchandise n'est pas fondamentalement bousculée. Ce que l'on peut par contre observer, pour plusieurs catégories de marchandises, c'est que, d'une certaine façon, le ratio entre coûts de transport et coûts d'inventaire est plutôt favorable aux premiers dans le cas FTL et aux seconds dans le cas LTL. C'est cohérent avec la théorie du choix entre les deux types d'opération de transport présentée ci-dessus (Section 4.2.2), même s'il ne faut pas oublier que la comparaison n'est pas ici toutes choses égales par ailleurs.

La valeur du temps en transport de marchandises.

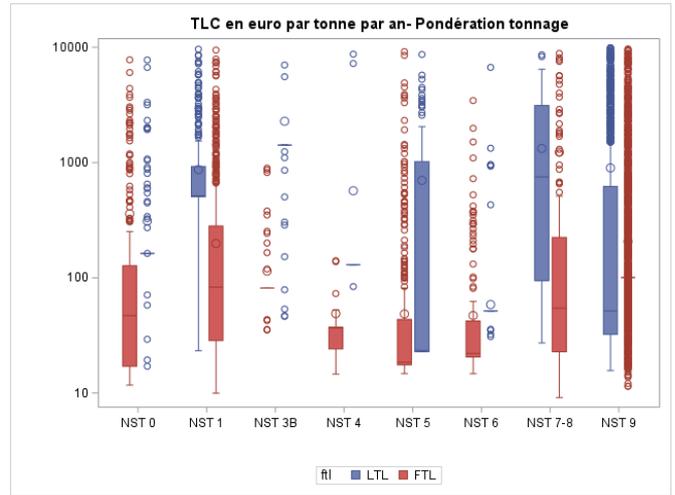
Il est usuel, en transport de marchandises, de distinguer deux valeurs du temps : la valeur du temps dite du transporteur et la valeur du temps du chargeur (voir, par exemple, COMMISSARIAT GÉNÉRAL À LA STRATÉGIE ET À LA PROSPECTIVE [CGSP], 2013.). La valeur du temps du transporteur représente les gains de facteurs de production que réalise le transporteur lorsqu'on lui permet de gagner du temps sur une opération de transport. Il s'agit des coûts de capital relatifs aux véhicules, ainsi que la main d'oeuvre, repris dans les coefficients $c_{h,t}^{FTL}$, $c_{h,t}^{LTL}$, $c_{h,a}$, c_h^l des modèles du Chapitre 2.

La valeur du temps du chargeur représente ce que le chargeur est prêt à payer pour qu'une opération de transport soit réalisée plus rapidement, toutes choses égales par ailleurs. En transport de voyageur, il existe une théorie sur cette valeur du temps, issue de BECKER (1965), discutée dans de nombreuses références, parmi lesquelles JARA-DÍAZ (2007) : le temps est une ressource limitée, et l'allouer à une activité (par exemple se déplacer) empêche de l'allouer à une autre (par exemple le travail ou un loisir), d'où le coût d'opportunité.

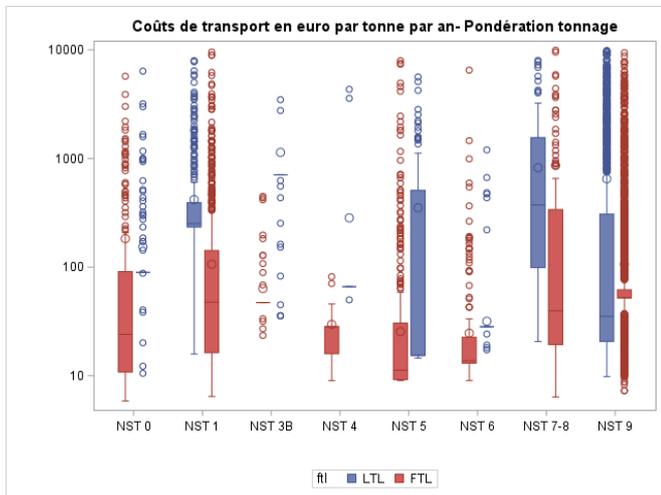
Une telle théorie n'existe pas pour le transport de marchandises, et l'analogie ne fonctionne pas. On évoque souvent la périssabilité des produits, leur obsolescence, ou bien le coût d'opportunité du capital immobilisé, mais sans



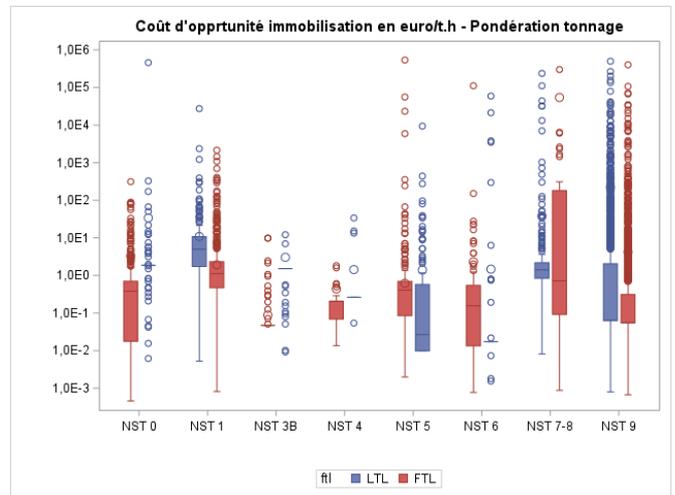
(a) Coût total logistique annuel



(b) Coût total logistique annuel unitaire



(c) Coût de transport annuel unitaire



(d) Coût d'inventaire annuel unitaire

FIGURE 4.6 – Statistiques descriptives des coûts logistiques, par NST et type d'opération de transport, pondérés en tonnage

pouvoir proposer de preuve empirique très satisfaisante. La théorie développée ci-dessus (pour rappel, issue de BAUMOL et VINOD, 1970), illustre la très grande importance de s'intéresser au fonctionnement des chaînes logistiques pour mieux comprendre pourquoi les chargeurs accordent de la valeur aux (faibles) temps de trajet. D'autres explications de la valeur du temps en transport de marchandises sont présentées dans COMBES (2010), à partir de ARROW, HARRIS et MARSCHAK (1951). Ces travaux montrent par une approche théorique le fait que des temps de trajet plus réduits réduisent l'exposition des chaînes logistiques à la volatilité de divers éléments, dont la demande. En d'autres termes, il y a dans la valeur du temps du chargeur une composante qu'on pourrait appeler la "valeur de l'agilité".

Dans tous les cas, les travaux menés dans le cadre de la recherche ici présente ne permettent pas d'éclairer la contribution des différentes causes. Mais le fait d'être capable de calculer le paramètre $a + c_w$ pour chaque observation permet de s'approcher d'un calcul de la valeur du temps chargeur à un niveau désagrégé. Au sens strict, seul le coefficient a nous intéresse ; c'est bien la valeur du temps chargeur dans l'équation (4.6), plus précisément $(1/Q)\partial TLC/\partial t$, où t est, pour rappel, le temps de transport. Mais (en attente de confirmation par d'autres travaux de recherche) il semble que le coefficient c_w soit en général nettement plus faible que le coefficient a (le coefficient c_w est de l'ordre de quelques euros ou dizaines d'euros par tonne et par mois). En tout cas l'hypothèse est faite ici que $a + c_w \simeq a$. En tout cas, ces résultats intéressent suffisamment l'économie du transport de marchandises pour mériter cet encadré.

Les statistiques descriptives concernant ces valeurs du temps sont présentées dans le tableau 4.2. Ces valeurs du temps sont présentées de deux façons : en € par tonne et par an (le résultat direct de l'application de l'équation (4.7) avec les variables disponibles) et en € par tonne et par heure (le passage de l'année à l'heure a ici été réalisé simplement en divisant l'un par 8 760, c'est-à-dire le nombre d'heures dans une année de 365 jours ; la question de savoir s'il faut prendre en compte seulement les jours ouvrables, etc., reste ouverte.)

Dans tous les cas, les ordres de grandeur obtenus sont cohérents avec les recommandations du rapport CGSP (2013), selon lequel les valeurs du temps chargeur recommandées sont : 0,10€/t/an (resp. 0,20€/t/an et 0,60€/t/an) pour les marchandises à faible (resp. moyenne et haute) valeur ajoutée. De ce point de vue, les valeurs les plus intéressantes du tableau ont été mises en gras.

	Moy.	Q1	Med.	Q3	95%
$a + c_w$ (€/t/an) ^a	$1,39 \cdot 10^7$	$1,18 \cdot 10^3$	$7,91 \cdot 10^3$	$6,21 \cdot 10^4$	$3,58 \cdot 10^6$
$a + c_w$ (€/t/an) ^b	$3,63 \cdot 10^7$	$4,85 \cdot 10^2$	$1,37 \cdot 10^3$	$9,80 \cdot 10^3$	$1,12 \cdot 10^5$
$a + c_w$ (€/t/h) ^a	1 582,90	0,13	0,90	7,09	408,60
$a + c_w$ (€/t/h) ^b	4 139,92	0,06	0,16	1,12	12,79

^a : sans pondération

^b : pondération en tonnage

TABLE 4.2 – Valeurs du temps chargeur : statistiques descriptives

On observe une très forte asymétrie des distributions, avec des moyennes très élevées et très éloignées des différents fractiles calculés. Dès lors, si ces valeurs devaient être utilisées pour la modélisation, il faudrait s'appuyer plutôt sur les quartiles que sur les moyennes, qui sont clairement problématiques. Il faut noter d'ailleurs que pour la modélisation, il faut également connaître les chargements moyens dans les véhicules.

La table suivante (4.3) montre peut-être encore plus clairement l'intérêt de la démarche menée ici : en effet, au delà des statistiques descriptives agrégées présentées ci-dessus, il est possible de calculer les distributions des valeurs du temps par NST. On constate ici aussi la très grande dispersion des valeurs, généralement fortement asymétriques. Les valeurs du temps chargeur les plus élevées

sont rencontrées pour les produits chimiques, puis les produits alimentaires. Les produits manufacturés ne sont pas systématiquement ceux pour lesquelles les valeurs sont les plus hautes.

	Moy.	Q1	Med.	Q3	95%
NST0	13,46	0,14	0,49	1,87	12,61
NST1	3,42	0,55	1,12	4,82	8,47
NST3B	0,09	0,05	0,05	0,05	0,20
NST4	0,38	0,07	0,14	0,21	1,83
NST5	0,64	0,09	0,41	0,70	1,11
NST6	2,27	0,01	0,16	0,55	0,55
NST7-8	49 537,97	0,09	0,72	181,32	301 922,37
NST9	29,71	0,06	0,06	0,31	5,78

NST0 : Agricole ; NST1 : Agro-alimentaire ; NST3B : Produits pétroliers ;
 NST4 : Minerais ; NST5 : Produits métalliques ; NST6 : Matériaux de construction ;
 NST7-8 : chimie et engrais ; NST9 : produits manufacturés.

TABLE 4.3 – Valeurs du temps chargeur, par NST, redressées en tonnage

Ces résultats sont illustrés par la figure 4.7, en échelle logarithmique.

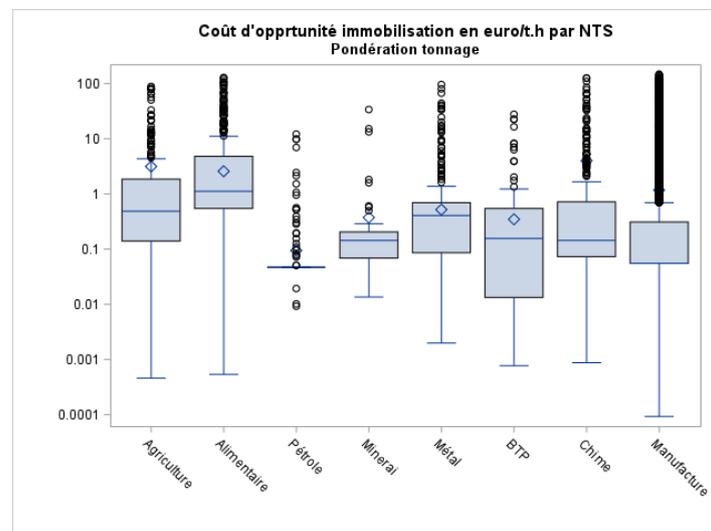


FIGURE 4.7 – Valeurs du temps chargeur par NST et type d'opération

4.4 Spécification et calibration du modèle de choix d'organisation de transport

La dernière étape de la chaîne de modèle présentée dans le Chapitre 1 est le modèle qui simule le choix des chargeurs entre FTL et LTL. Le principe qui régit ce choix est simple : pour chaque chargeur, chacune des deux organisations de transport est synonyme d'un coût total logistique donné. Étant rationnels et cherchant à maximiser leurs profits, les chargeurs choisissent l'option qui leur permet de subir le TLC unitaire le moins élevé.

4.4.1 Spécification du modèle

L'estimation du modèle du choix du mode de transport nécessite que nous connaissions, pour chaque chargeur, les TLCs relatifs aux deux organisations. Cependant, les TLCs ne sont pas directement observables. Nous pouvons néanmoins en faire des estimations assez robustes mais qui souffrent de deux faiblesses : la première est que l'estimation relative au mode non choisi est moins précise que celle relative au mode choisi (plusieurs variables doivent être calculées pour l'alternative non choisie). La seconde est que les coûts d'inventaire en ligne, dépendant du temps de transport, n'ont pas été pris en compte dans l'analyse, faute de données de qualité.

En plus du TLC unitaire, chaque mode de transport a des inconvénients qui lui sont propres. Par exemple : une moindre flexibilité et une plus grande difficulté à gérer les ruptures de stock pour le FTL compte tenu de la taille des envois expédiés via ce mode, et plus d'administration et plus de difficulté à maîtriser les risques pour les LTL, et ce principalement en raison des nombreuses ruptures de charge. Les inconvénients liés à chaque organisation peuvent s'apparenter à des *shadow costs* : ce sont en effet des coûts (monétaires ou non monétaire) qui existent bel et bien, mais qui sont difficile voire impossible à mesurer.

Formellement, en vue d'établir un modèle économétrique, le coût global engendré par le choix d'un mode X perçu par un chargeur peut s'exprimer comme suit :

$$C_X = C_X^{sh} + \beta_X \frac{\widetilde{TLC}_X}{Q} + \varepsilon_X. \quad (4.8)$$

Où C_X^{sh} et \widetilde{TLC}_X sont respectivement le *shadow cost* et le *TLC* estimé relatifs au mode X et ε_X la réalisation d'une variable aléatoire tirée d'une distribution de Gumbel de paramètres 0 et 1.

Soit Y une variable qui prend la valeur 1 si le chargeur choisit le mode FTL et 0 sinon. Le modèle qui nous permettra d'en prévoir la valeur est probabiliste, c'est à dire qu'il ne va pas nous donner une prévision certaine de l'occurrence de l'évènement "choix du mode FTL", mais de la probabilité que celui-ci se produise. La probabilité qu'un chargeur choisissent l'organisation FTL s'écrit comme suit :

$$\mathbb{P}\{Y = 1\} = \mathbb{P}\{C_{FTL} < C_{LTL}\},$$

c'est-à-dire :

$$\mathbb{P}\{Y = 1\} = \mathbb{P}\left\{\varepsilon_{FTL} - \varepsilon_{LTL} < C_{LTL}^{sh} - C_{FTL}^{sh} + \beta_{LTL} \frac{\widetilde{TLC}_{LTL}}{Q} - \beta_{FTL} \frac{\widetilde{TLC}_{FTL}}{Q}\right\}$$

$\varepsilon_{FTL} - \varepsilon_{LTL}$ suit une loi logistique. De ce fait, le modèle que nous obtenons est un binomial logit à la BEN-AKIVA et LERMAN (1985). En notant $\gamma = C_{LTL}^{sh} - C_{FTL}^{sh}$, la probabilité de choisir le mode FTL s'écrit :

$$\mathbb{P}\{Y = 1\} = \frac{\exp\left(\beta_{LTL} \frac{\widetilde{TLC}_{LTL}}{Q} - \beta_{FTL} \frac{\widetilde{TLC}_{FTL}}{Q}\right)}{\exp\left(\gamma + \beta_{LTL} \frac{\widetilde{TLC}_{LTL}}{Q} - \beta_{FTL} \frac{\widetilde{TLC}_{FTL}}{Q}\right)}.$$

4.4.2 Estimation du modèle

Les coefficients, estimés par maximum de vraisemblance, et un certain nombre de statistiques sont présentées dans la table 4.4.

Paramètre	Estimateur	Sign.
γ	0,558 5	***
β_{FTL}	0,051 6	***
β_{LTL}	0,010 4	***
Pourcentage concordant	77,5%	D de Somers 0,55
Pourcentage discordant	22,5%	Gamma 0,55
		AUC 0,776
		AIC 264 591 561
Test	khi-2	DDL Pr > khi-2
Rapport de vrais	24 679 735	2 <.0001
N	2 642	

Significativité (p -value) : *** <0,001; ** <0,01; * <0,05; . <0,1

TABLE 4.4 – Coefficients du modèle de choix.

Les signes obtenus pour les estimateurs sont conformes aux attentes. Le fait que γ soit positif indique que les *shadows costs* relatifs à l'option LTL sont supérieurs à ceux relatifs à l'option FTL du point de vue des chargeurs. Cela traduit la préférence de ces derniers pour la trace directe si les coûts monétaires mesurables des deux modes sont proches. Par ailleurs, les signes des estimateurs montrent que la probabilité de choisir le FTL diminue quand les TLC relatifs à ce mode augmentent et qu'elle augmente avec l'augmentation

des TLC relatifs au LTL. Enfin en regardant les estimateurs de plus près on saperçoit que FTL est 5 fois supérieur à LTL. Il ne faut cependant pas tirer de ce constat des conclusions hâtives. Il convient de garder à l'esprit que les vraies valeurs des paramètres d'un modèle économétrique sont impossibles à obtenir et que le métier d'économètre consiste à en faire l'estimation la plus précise possible. Par ailleurs les valeurs obtenues pour les estimateurs n'ont pas beaucoup d'importance dans le cas d'un modèle logit dans le sens où elles ne nous indiquent pas l'amplitude avec laquelle la probabilité évolue quand les variables relatives à ces estimateurs évoluent. Enfin, et cela est spécifique à notre étude, les TLC estimés sont potentiellement sous-estimés pour le LTL ; cela peut avoir pour conséquence des estimations biaisées, d'où le ratio entre les coefficients β_X . Si la spécification des coûts perçus par les chargeurs était parfaite et que les TLCs que nous estimons étaient les vrais, les β_X auraient été égaux.

Il faut noter que seules 2077 observations ont été utilisées pour l'estimation des modèles de prix dans le Chapitre 3. Avaient été écartées les prix nuls et les valeurs aberrantes. Mais les observations correspondantes, pour lesquelles l'ensemble des informations permettant le calcul des *TLC* sont disponibles, ont été réintégrées, c'est pour cela que le nombre d'observations est supérieur à 2077. Cela ne nuit aucunement à la qualité du modèle. Celle-ci est mesurée par le coefficient AUC : il est ici proche de 0,8. Rappelons que le coefficient AUC est l'aire sous la courbe ROC. Cette courbe est un outil graphique qui permet d'évaluer et de comparer globalement le comportement des modèles dont l'objet est d'estimer la probabilité d'occurrence d'un événement. Elle est présentée par la figure 4.8.

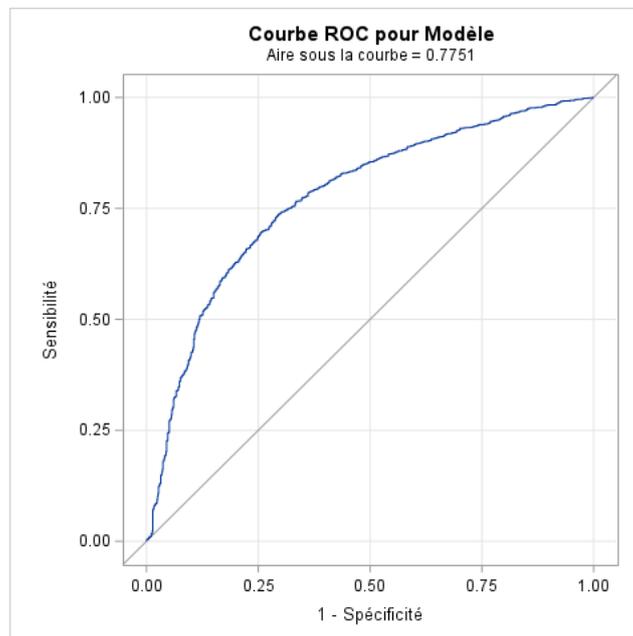


FIGURE 4.8 – Courbe ROC du modèle retenu.

4.4.3 Construction de la courbe ROC, choix de la valeur seuil

La construction de la courbe ROC est assez fastidieuse mais néanmoins assez simple. Pour comprendre comment on l'obtient il faut garder à l'esprit que l'estimation du modèle logit, ou de tout autre modèle de choix discret d'ailleurs, nous donne in fine, pour chaque observation, la probabilité qu'une certaine alternative soit choisie. Dans notre cas, nous obtenons à l'issue de l'estimation du modèle logit la probabilité que le mode de transport choisi soit le FTL, et ce pour chaque envoi. Le modèle nous permet aussi de calculer cette probabilité pour des envois qui ne font pas partie de l'échantillon, typiquement des envois futurs. Cependant, pour ces envois, l'intérêt de donner des probabilités est faible. Ce qui nous importe, c'est de partir des probabilités pour prévoir les choix à venir en matière de mode de transport, le tout en ayant le taux d'erreur le moins coûteux possible. Il est assez tentant de décider que les envois pour lesquels la probabilité d'être effectués en FTL est supérieure à 0,5 le seront effectivement via ce mode. Cela entraînerait néanmoins un taux d'erreurs très élevé⁹. La question qui se pose alors est la suivante : à partir de quelle probabilité peut-on dire qu'un envoi en dehors de l'échantillon de l'estimation sera effectué par le mode FTL ?

Pour répondre à cette question nous procédons comme suit : soit une valeur seuil $\bar{s} \in [0; 1]$.

- Si $\mathbb{P}\{Y = 1\} > \bar{s}$ alors on fixe $Y = 1$.
- On peut comparer la valeur ainsi calculée à l'observation, pour chaque observation. Il est alors possible de construire la matrice de confusion (schématisée par la table 4.5)
- La sensibilité est calculée :

$$\text{sensibilité} = 1 - \frac{\#\text{faux négatifs}}{\#\text{faux négatifs} + \#\text{vrais positifs}}.$$

- La spécificité est calculée :

$$\text{spécificité} = 1 - \frac{\#\text{faux positifs}}{\#\text{faux positifs} + \#\text{vrais négatifs}}.$$

Cette procédure est appliquée pour différentes valeurs de \bar{s} régulièrement réparties.

Pour chaque valeur de \bar{s} un couple de valeurs (1 – sensibilité; spécificité) est donc disponible. Ces points sont tracés dans le plan, et dessinent la courbe dite ROC (FAWCETT, 2006). Plus cette courbe est loin de la diagonale, ou encore plus l'aire sous la courbe est élevée, meilleure est la qualité prédictive du modèle. La valeur finalement retenue pour \bar{s} est celle qui minimise la somme du taux de faux positifs et du taux de faux négatifs. La valeur retenue est $\bar{s} = 0.63$.

9. Les raisons à cela sont très techniques et ne seront pas abordées ici.

		Y observé (FTL)	
		1	0
Y simulé	1	# vrais positifs	# faux positifs
	0	# faux négatifs	# vrais négatifs

TABLE 4.5 – Matrice de confusion.

L'ensemble des maillons de la chaîne de modélisation étant désormais disponibles, il est possible de simuler les scénarios PLA1 et PLA2, et les conséquences qu'ils pourraient avoir pour les chargeurs que ce soit en termes de choix de mode de transport, ou en terme de tailles d'envoi et de coûts.

Chapitre 5

Les effets du véhicule autonome

5.1 Introduction

Le présent chapitre présente les résultats obtenus lorsque la chaîne de modèle présentée dans le Chapitre 1 et illustrée par les figures 1.1 et 1.2 est appliquée aux scénarios élaborés dans le Chapitre 2 (Tableau 2.4).

Pour rappel, ces deux scénarios décrivent deux situations hypothétiques contrastées : dans le premier scénario PLA1, les poids lourds peuvent être en autonomie pour la majeure partie du trajet, que l'on suppose se dérouler sur l'autoroute ; mais la présence d'un chauffeur est nécessaire pour rejoindre les zones d'origine et de destination. Dans le second scénario PLA2, les poids lourds sont en totale autonomie. Les conducteurs ne sont plus nécessaires, et les véhicules, qui ne comportent plus de cabine, peuvent transporter plus de marchandises.

Le modèle de coût microéconomique est utilisé pour déduire à partir d'un ensemble d'hypothèses les effets de ces scénarios sur la structure des coûts des transporteurs. Ces effets sont appliqués à un modèle de prix estimé économétriquement à partir de données désagrégées. Différents impacts sont alors calculés : d'abord, la réaction des chargeurs qui modifient les tailles d'envoi. Également, les effets sur les coûts des chargeurs, avec d'une part l'effet sur les coûts de transport, d'autre part l'effet sur les coûts d'inventaire. Enfin l'effet sur le choix de type d'opération de transport est également simulé à partir d'un modèle développé spécifiquement à cette fin et cohérent microéconomiquement avec les modèles sous-jacents. Les données utilisées dans cette recherche permettent de distinguer les impacts des deux scénarios par type de marchandise, et donc par secteur, approximativement.

La suite de ce chapitre présente ces différents effets et discute les implications. L'effet des scénarios sur les poids des envois est présenté en Section 5.2. L'effet sur la part d'envois transportés en LTL ou FTL est présenté en Section 5.3. Enfin, l'effet sur les coûts logistiques totaux est présenté en Section 5.4.

5.2 Effet sur les poids d'envoi

Le poids d'envoi est modifié de deux façons dans un scénario de véhicule autonome : d'abord par la modification de la structure des coûts (illustrée par exemple par la figure 2.3, p. 38), qui implique une modification du poids d'envoi calculé d'après l'équation (4.5), p. 56, puis éventuellement par la bascule d'un type de prestation de transport (LTL ou FTL) vers l'autre.

Les poids d'envoi varient en moyenne de 50kg à la baisse dans le cas du scénario d'automatisation partielle et de 420kg dans le scénario d'automatisation totale (tableau 5.1). La première conclusion est donc qu'en général, les scénarios d'automatisation engendrent une baisse du poids des envois. Pour la même quantité de marchandises transportées, il y aura donc des envois plus petits, plus nombreux, et plus fréquents. Cet effet est bien plus fort dans le scénario d'autonomie totale.

	PLA1	PLA2
Moyenne	-0,05	-0,42
Q1	-0,02	-0,46
Médiane	0,07	-0,45
Q3	0,12	-0,40
95%	0,41	-0,26

TABLE 5.1 – Variations des poids d'envoi en tonnes sous chaque scénario (pondération en tonnage)

Cela dit, comme le montrent les quantiles présentés dans ce tableau, les variations sont hétérogènes. La figure 5.1 montre l'évolution des poids des envois, pondérés en tonnage, en fonction des scénarios, par rapport au scénario de référence.

Cas de l'autonomie partielle (PLA1) Dans le scénario d'automatisation partielle PLA1, on constate en comparant les courbes correspondantes (la rouge et la grise) que l'effet sur les poids d'envoi dépend du poids d'envoi initial. Comme on l'observe notamment dans la figure 2.3, dans ce scénario, le coût fixe de transport d'un envoi (précisément le coefficient b du modèle micro-économique) augmente ou reste inchangé, en fonction du type d'opération de transport.

Plusieurs effets vont donc intervenir : d'abord, pour une opération de transport FTL, le poids de l'envoi va augmenter. Ensuite, le coût total logistique TLC_{FTL} peut augmenter ou diminuer, selon les caractéristiques de l'opération de transport. Pour une opération de type LTL, le poids d'envoi optimal ne sera pas modifié car le coefficient Le coût total logistique d'une opération de type LTL (TLC_{LTL}) va globalement diminuer. Ainsi, en fonction des caractéristiques de l'envoi, une fois pris en compte le choix de type d'opération de

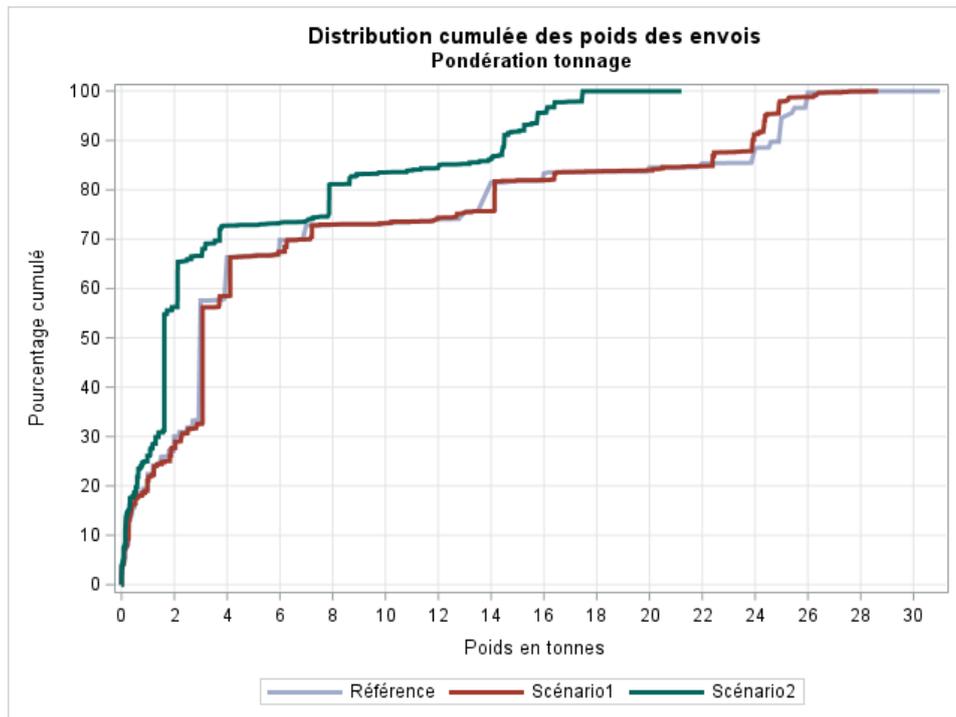


FIGURE 5.1 – Distribution cumulée poids d’envoi sous chaque scénario

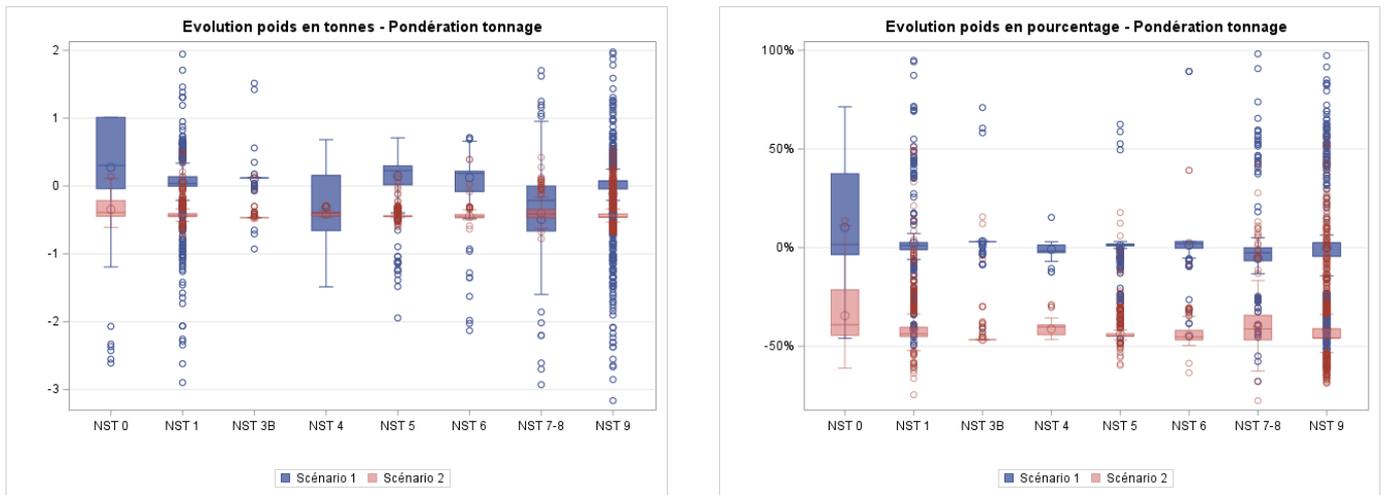
transport, on peut constater un effet à la hausse comme à la baisse. De façon globale, on observe ici que l’effet est légèrement à la hausse pour les envois de poids inférieur à 20 tonnes, et un peu plus fortement à la baisse pour les envois de poids supérieur à ce seuil.

Cas de l’autonomie totale (PLA2) En ce qui concerne le scénario PLA2, l’effet est un peu moins ambigu : les coefficients b_{FTL} et b_{LTL} baissent tous les deux fortement, on s’attend donc à observer une baisse significative des poids d’envoi, sans présumer des bascules FTL vers LTL et inversement (ces bascules rendent le résultat un peu moins facile à expliquer.)

C’est effectivement ce que l’on observe sur la Figure 2.3 ; la médiane des poids d’envoi pondérée en tonnage chute d’environ 1,2 tonnes¹. L’ensemble de la courbe est décalée vers le haut. Les envois de grande taille sont beaucoup plus petits que dans le scénario de référence.

Analyse par type de marchandise Les courbes présentées ci-dessus ne montrent qu’un effet global ; il est intéressant de segmenter l’analyse par type de marchandise. D’une part, cela illustre l’hétérogénéité des impacts des scénarios d’automatisation ; d’autre part, cela permet d’identifier comment les différents secteurs de l’économie seraient impactés dans ces scénarios.

1. Cette différence est plus élevée que dans le tableau 5.1 ; cela s’explique par le fait que la différence des médianes (qu’on voit sur le graphique) n’est pas la même chose que la médiane des différences (calculée dans le tableau.)



(a) Evolution des poids en tonne

(b) Evolution des poids en pourcentage

FIGURE 5.2 – Variations des poids d'envoi en tonnes sous chaque scénario (pondération en tonnage), par NST

On observe que, tant en variation absolue (figure 5.2a) qu'en variation relative (figure 5.2b), les effets du scénario PLA1 sont très contrastés en fonction du type de marchandise. Ainsi pour la NST 0 (produits agricoles) on constate une forte variation à la hausse des tailles d'envoi. Des variations à la hausse sont également observées pour les NST 1 (agroalimentaire), 5 (produits métalliques) et 6 (BTP). à l'inverse pour les NST 4 (minerai) et 7-8 (produits chimiques et engrais) on constate plutôt une variation à la baisse. Pour certaines NST dont la 9 (produits manufacturés) l'effet est différent en fonction des envois et on constate que certains sont plus lourds, d'autres plus légers.

Plusieurs effets jouent dans différentes directions en fonction des caractéristiques de l'envoi (notamment son poids en scénario de référence, la distance de transport, etc.) Il est donc difficile de conclure sur les raisons pour lesquelles on observe une certaine variation pour certains types de marchandises plutôt que pour tel autre. Il est cependant utile de rappeler que le scénario PLA1 ne permet l'optimisation que sur la phase de traction, et accroît le coût fixe de transport d'un envoi pour les courtes distances. Effectivement, les envois sont en moyenne transportés sur de très courtes distances dans la NST 0, et des distances assez courtes dans les NST 1, 5 et 6. Ils sont transportés sur de plus longues distances dans la NST 7-8. Cet effet de la distance n'explique pas tout : certains envois transportés en FTL en scénario de référence peuvent être transportés en LTL en scénario PLA1 ce qui contribue à modifier les poids d'envoi. Ce point sera discuté plus loin.

Pour ce qui concerne le cas du scénario d'automatisation totale PLA2, on observe une baisse globale des poids des envois. La baisse relative peut atteindre 45%, voire plus. Mais cette baisse de taille d'envoi est hétérogène en fonction des types de marchandises. Ainsi pour les produits agricoles (NST

0) ou chimiques (NST 7-8) les baisses sont plus faibles que pour les produits manufacturés (NST 9), par exemple. Dans le scénario PLA2, l'automatisation est totale. Il y a donc baisse des coûts de transport pour toutes les gammes d'opération de transport, quel que soit la distance ou le poids de l'envoi. Il y a une baisse du coût fixe de transport, ce qui se traduit donc par une baisse des tailles d'envoi. Ici aussi il faut noter que plusieurs effets interviennent simultanément, dont les bascules FTL/LTL et inversement.

Conclusion On observe que les chargeurs réagissent fortement aux changements de l'offre de transport. La modélisation est faite à flux chargeur-destinataire constant : une modification du poids de l'envoi s'accompagne donc mécaniquement, dans le modèle, d'une modification de la fréquence d'envois.

Cela a plusieurs implications : d'abord, en fonction du type de scénario d'automatisation, les effets sur les poids d'envoi sont très différents. Ainsi, un scénario d'automatisation total (avec les hypothèses prises plus haut) se traduit par une baisse significative du poids de quasiment tous les envois. Cela s'accompagne donc d'une augmentation significative des fréquences, et probablement d'une augmentation des émissions de gaz à effet de serre à quantité de marchandise transportée fixée.

Par ailleurs, cette baisse des tailles d'envoi pourrait causer des changements dans les types de véhicule utilisés, peut-être avec l'utilisation de véhicules de charge utile plus faible. Il faut noter cependant que le modèle ne prend pas en compte la contrainte de capacité aussi bien qu'elle devrait l'être (voir la note de bas de page 5, p. 58 ; le calage d'un modèle prenant en compte ce phénomène proprement serait considérablement plus compliqué.) Les baisses de poids d'envoi pourraient être plus faibles si cette contrainte était prise en compte proprement.

Le scénario d'automatisation partielle a des effets plus contrastés avec une augmentation des poids des envois dans certains cas. Cela suggère, et on le vérifiera plus loin, que dans certains cas ce scénario d'automatisation peut être coûteux pour les chargeurs.

5.3 Effet sur les parts d'envois transportés en LTL/FTL

Le choix d'organisation de transport (LTL versus FTL) est simulé par le modèle décrit dans la section 4.2.2. En simulation, le modèle prévoit, pour chaque observation, si l'envoi sera transporté en LTL ou FTL. Ce calcul est fondé sur la variation de la structure des coûts de transport, la variation des tailles d'envoi et la variation des coûts totaux logistiques, tel que présenté dans le reste du rapport.

Cas du scénario PLA1 La répartition des envois dans chaque scénario (référence, PLA1 et PLA2) est présentée par la figure 5.3.

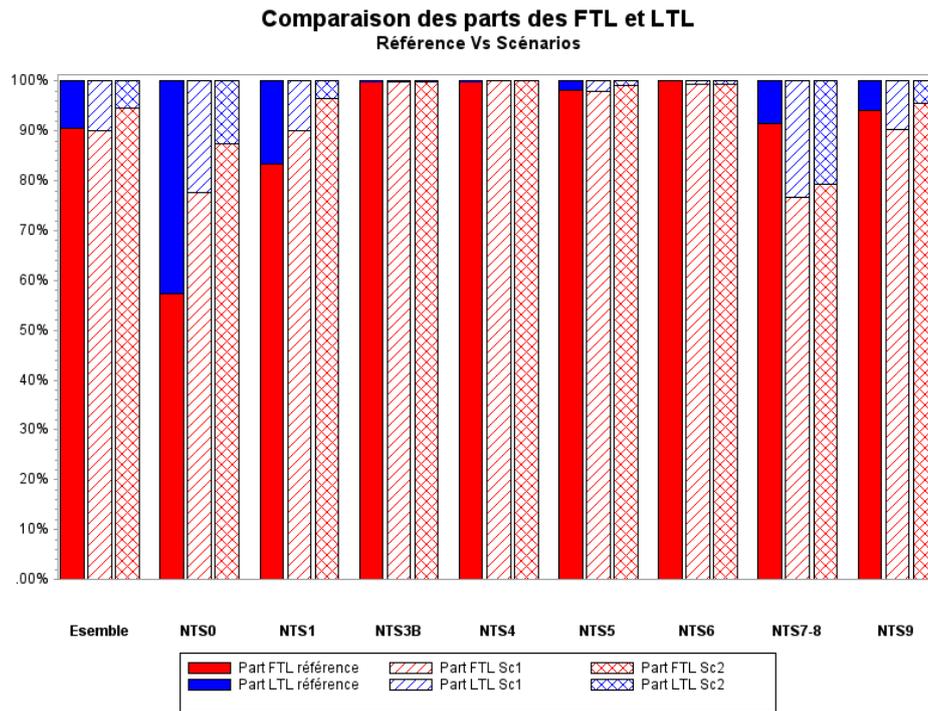


FIGURE 5.3 – Parts des envois transportés en FTL et LTL dans les différents scénarios, par NST (pondération en tonnage)

On observe ainsi qu’au niveau global, la part des envois transportés en FTL est stable dans le scénario PLA1. Cette stabilité cache des mouvements dans les deux directions, ainsi que l’indique la figure 5.4. Ainsi, un peu moins de 10% des tonnages transportés en FTL dans le scénario de référence sont transportés en LTL dans le scénario PLA1. Dans l’autre direction, plus de 65% des tonnages transportés en LTL dans le scénario de référence sont transportés en FTL dans le scénario PLA1.

Comme discuté ailleurs dans ce chapitre, différents effets concourent à expliquer ces variations. Le coût du FTL baisse globalement dans le scénario PLA1, mais pas pour toutes les gammes de taille d’envoi. Dans certains cas (notamment les envois les plus petits transportés en FTL), la bascule s’opère vers le LTL dont le coût total logistique peut devenir plus attrayant. Mais l’hétérogénéité des caractéristiques des chargeurs, des envois et des opérations de transport fait que les mouvements inverses s’observent également. La distance joue également un rôle, et le gain de coût est plus fort pour les opérations FTL que pour les opérations LTL avec les hypothèses qui ont été posées précédemment. Ainsi, pour cette raison et d’autres, on observe une importante bascule globale des opérations LTL vers les opérations FTL. L’effet final étant apparemment nul : en termes de tonnage, les parts LTL et FTL sont globalement égales dans les deux scénarios.

Cette homogénéité apparente cache également une hétérogénéité en termes de types de marchandises. Les catégories de marchandises pour lesquelles la

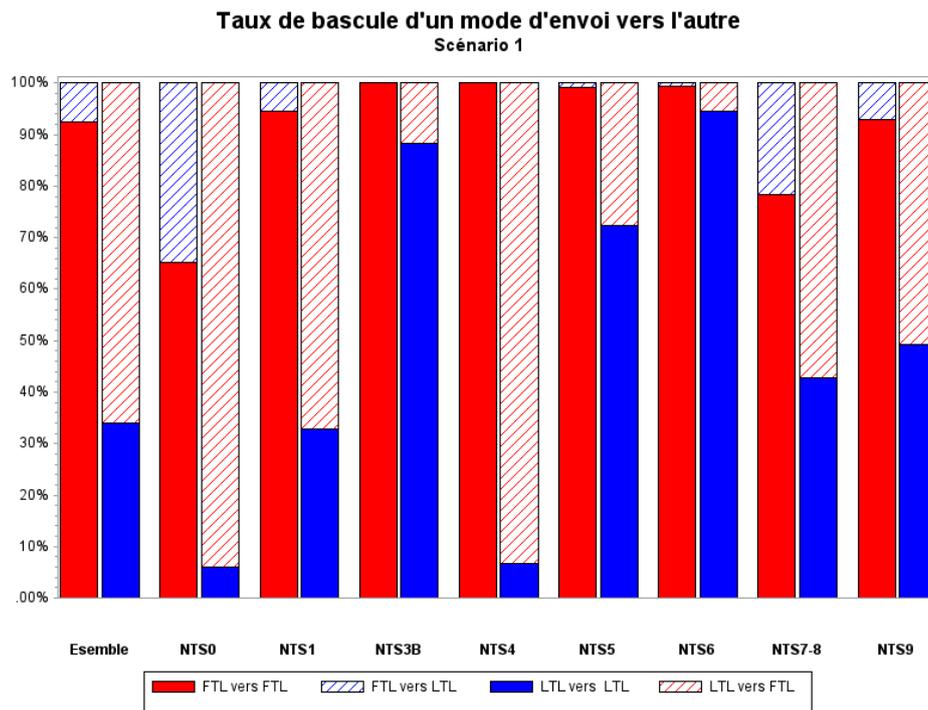


FIGURE 5.4 – Bascules d’une organisation de transport vers l’autre par NST, scénario PLA1 (pondération en tonnage)

part FTL est déjà largement dominante (NST3B : produits pétroliers ; NST4 : minerais ; NST5 : produits métalliques et NST6 : matériaux de construction) voient la part FTL inchangée. Pour la NST0 et la NST1 (produits agricoles et agro-alimentaires respectivement) la bascule s’opère plutôt vers dans le sens LTL vers FTL ; ce qui s’explique par la présence d’envois de plutôt grande taille transportés sur des distances plutôt limitées. A l’inverse la part du FTL baisse pour les produits à plus haute valeur ajoutée, transportés en plus petites quantités et sur des distances plus longues que sont les NST7-8 (chimie et engrais) et NST9 (produits manufacturés).

Ici aussi, comme l’indique la figure 5.4, les bilans cachent des mouvements dans les deux directions. C’est particulièrement papparent pour la NST0 ou la NST1, ainsi que pour les NST7-8 et NST9. Ces bascules dans les deux sens s’expliquent là encore par la grande hétérogénéité des opérations concernées. C’est une nouvelle illustration de la diversité des impacts que peut avoir une modification de la structure des coûts en transport de marchandises.

Cas du scénario PLA2 Le second scénario a un effet bien plus important sur la structure des coûts, sur les prix et sur les comportements des chargeurs. L’effet global est une baisse substantielle des quantités transportées en LTL, qui se reportent vers le FTL. L’explication principale est la suivante : les opérations LTL viennent de la nécessité de mutualiser les ressources pour le transport de marchandises. Cette mutualisation a deux sources : la première

est la mutualisation des origines ou des destinations dans les phases de pré et de post acheminement, ce qui permet d'organiser des tournées efficacement. La seconde est la mutualisation des véhicules pendant les tractions. Il s'agit de véhicules de grande capacité transportant des petites quantités en grand nombre.

Mais la véritable raison d'être de cette mutualisation est que l'alternative, qui consiste à transporter directement de l'origine à la destination sans rupture de charge, est très coûteuse. Or dans le scénario PLA2, ce surcroît de coût est bien moindre, puisque le coût du véhicule baisse substantiellement et que le chauffeur n'est plus nécessaire. Le transport avec massification s'en trouve moins justifié, et on observe donc un report massif du LTL vers le FTL.

L'analyse par catégorie de marchandises montre que cet effet est homogène, à l'exception de la catégorie NST7-8 (engrais et produits chimiques) pour laquelle la bascule s'effectue dans l'autre direction. L'examen de la figure 5.5 montre que les mouvements sont bien plus homogènes dans le scénario PLA2 que dans le scénario PLA1. On pouvait observer dans le scénario PLA1 de nombreux mouvements croisés, avec, pour une catégorie de marchandise donnée, presque autant de mouvements dans le sens FTL vers LTL que dans l'autre sens. Dans le scénario PLA, les mouvements FTL vers LTL sont très peu nombreux et ne concernent quasiment que deux catégories de marchandises : la NST0 (produits agricoles) et la NST7-8. Cela traduit ici une baisse bien plus globale des coûts des opérations FTL par rapport aux opérations LTL, à quelques exceptions près.

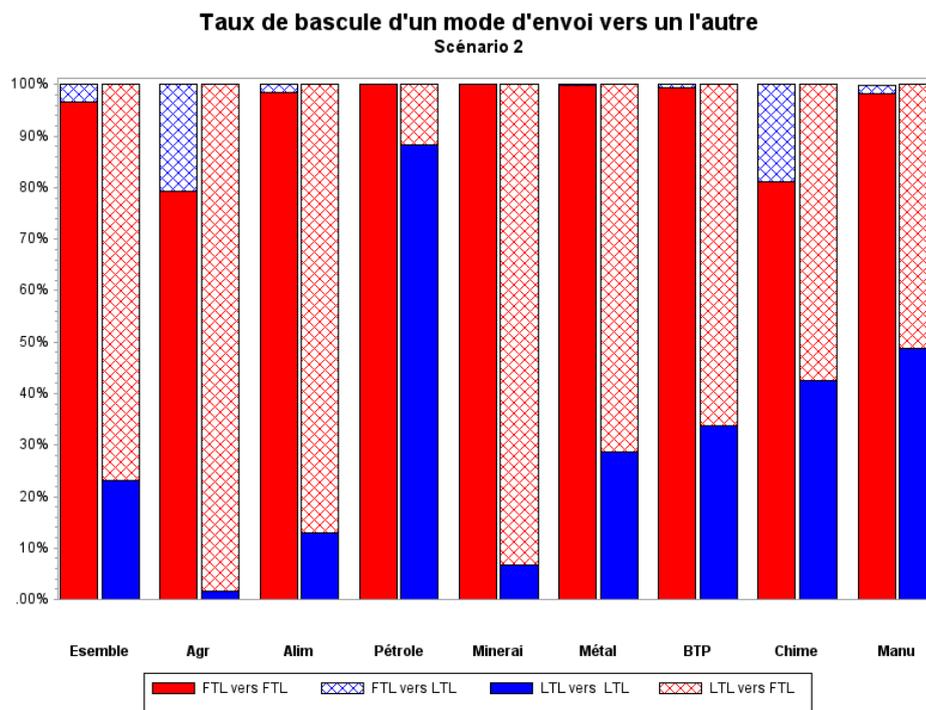


FIGURE 5.5 – Bascules d'une organisation de transport vers l'autre par NST, scénario PLA2 (pondération en tonnage)

Cette comparaison des bascules dans le cas des scénarios PLA1 et PLA2 permet de conjecturer que la baisse des coûts de transport et la modification de leur structure avec la venue de poids lourd aura des effets non linéaires et complexes en termes de marché du transport de marchandises et de comportement des chargeurs. L'étape intermédiaire où seule une partie des opérations seraient réalisées sans chauffeurs aurait des effets complexes engendrant d'importantes reconfigurations, mais pour un équilibre global entre transport direct et transport massifié. L'étape finale où l'ensemble des opérations seraient automatisées se traduirait par une baisse mécanique de la pertinence économique de la massification (qui n'est en somme qu'un mode d'absorption des coûts élevés des grands véhicules) au bénéfice du transport direct.

5.4 Effet sur les coûts logistiques

En définitive, c'est l'examen de l'effet des scénarios sur les coûts totaux logistiques qui permet d'apprécier pleinement l'impact qu'ont ces technologies pour les chargeurs. Selon l'approche mise en oeuvre ici, le calcul des coûts prend en compte la réaction des chargeurs à la modification de l'offre de transport. Comme expliqué précédemment, cette approche prend en compte les coûts de transport, les coûts d'inventaire, et le choix de type de prestation de transport.

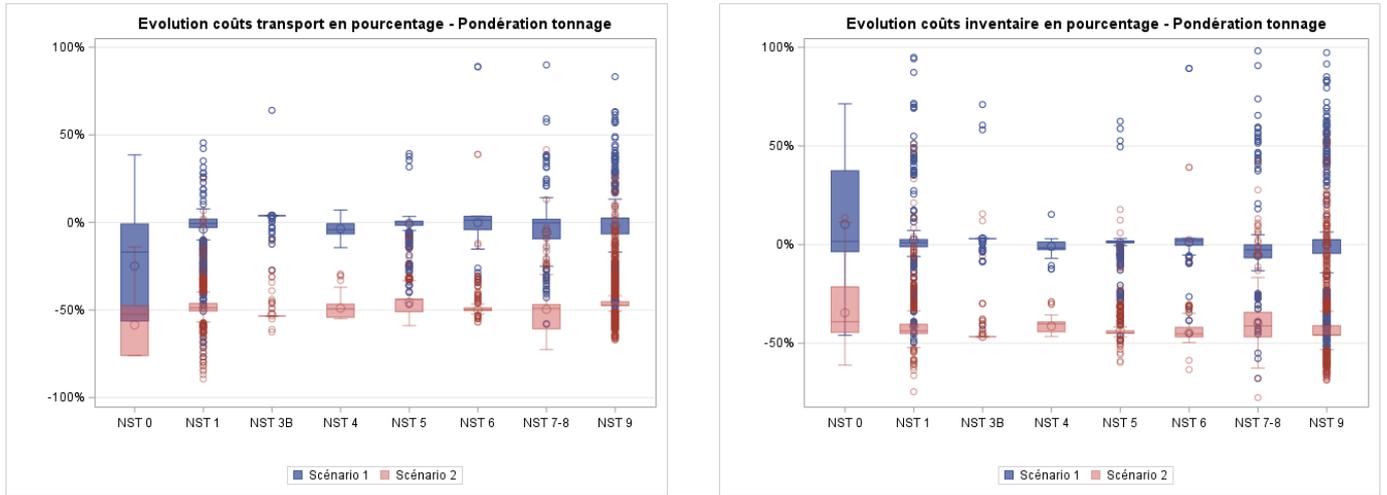
Le tableau 5.2 présente l'effet global de chaque scénario sur les coûts totaux logistiques, et la dispersion de cet effet.

	PLA1	PLA2
Moyenne	-7,18%	-47,97%
Q1	-14,92%	-51,11%
Médiane	-0,69%	-47,80%
Q3	1,84%	-46,99%
95%	13,51%	-28,89%

TABLE 5.2 – Variations des coûts totaux logistiques sous chaque scénario (pondération en tonnage)

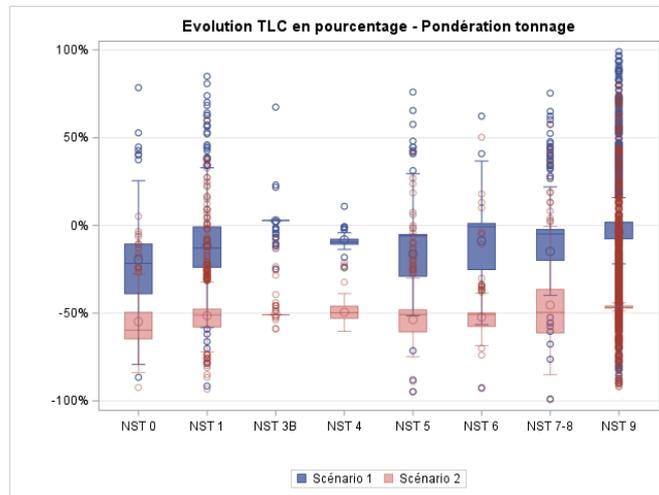
La figure 5.6 illustre l'évolution des différents postes de coût par type de marchandise et pour chacun des deux scénarios. Les trois sous figures présentent respectivement l'évolution des coûts de transport, l'évolution des coûts d'inventaire et l'évolution des coûts logistiques totaux (la somme des deux premières grandeurs) en pourcentage. Les deux scénarios sont associés à deux couleurs : bleu pour PLA1 et rouge pour PLA2.

Effet du scénario d'autonomie partielle PLA1 On observe d'abord que l'effet du scénario PLA1 est relativement faible, avec une moyenne à environ -7% et une médiane proche de 0. La dispersion est significative ; on observe



(a) Variation des coûts de transport

(b) Variation des coûts d'inventaire



(c) Variation des coûts logistiques totaux (transport et inventaire)

FIGURE 5.6 – Variations relatives des coûts logistiques sous chaque scénario (pondération en tonnage), par NST

que plus d'une moitié des flux est sous l'effet d'une baisse des coûts logistiques totaux, mais qu'au moins un quart des flux serait exposé à une hausse de ces coûts si la technologie était universellement déployée : dans le cas du scénario PLA1, une part significative des chaînes logistiques serait perdante. En d'autres termes, si les chargeurs avaient le choix entre une prestation réalisée par des véhicules partiellement autonomes ou des véhicules classiques, beaucoup resteraient sur la dernière alternative.

Un examen plus précis de l'effet du scénario d'autonomie partielle permet de l'expliquer : le véhicule coûtant plus cher et le conducteur devant être présent pour les opérations de pré et post-acheminement, le coût d'une prestation de transport peut en être augmenté, notamment pour les distances relative-

ment courtes (voir la figure 2.3). Dans tous les cas, il est généralement économiquement pertinent d'augmenter les poids des envois dans ces conditions (voir le tableau 5.1). Mais cette augmentation s'accompagne d'une augmentation des coûts d'inventaire (voir en particulier les diagrammes bleus sur la figure 5.6b) qui n'est pas systématiquement compensée par la baisse des coûts de transport (figure 5.6a), si celle-ci a lieu.

La comparaison des différentes NST montre que les effets sont contrastés. Les secteurs qui bénéficient des baisses les plus importantes (mais avec une hétérogénéité élevée) sont les NST 0 (produits agricoles), et les NST 4 et 5 (minerais et produits métalliques, respectivement). Ces bénéfices proviennent majoritairement d'une baisse des coûts de transport. Les coûts d'inventaire, par contre, augmentent ; mais la baisse des coûts de transport s'avère suffisante pour compenser cette hausse. Ce n'est pas le cas pour d'autres NST : ainsi, le bilan est négatif pour la NST 3B (produits pétroliers – il faut cependant noter qu'il y a peu d'observations dans cette catégorie), et pour la NST 6 (BTP) et 9 (produits manufacturés) le bilan est négatif pour une part substantielle des observations. De façon générale, le scénario PLA1 est plutôt favorable aux secteurs industriels et de matières premières, et moins au fur et à mesure que l'on s'approche des marchés finaux et que l'on progresse dans les chaînes de valeur.

Effet du scénario d'autonomie totale PLA2 A l'inverse, le scénario d'autonomisation totale PLA2 offre des bénéfices beaucoup plus importants (de l'ordre de 50% de baisse des coûts logistiques totaux) et beaucoup plus homogènes : au moins 95% des flux en tonnage sont sous l'effet d'une baisse des coûts logistiques totaux de plus de 28%, ce qui est très important.

Cette baisse des coûts s'explique d'abord par les gains de productivités très directs engendrés par le scénario PLA2 : le conducteur n'est plus nécessaire, le véhicule coûte moins cher, et sa capacité est augmentée. Ces effets s'additionnent et résultent en une baisse substantielle des coûts de transport (figure 5.6a, diagrammes rouges). La modification de la structure des coûts de transport, et notamment la chute des coûts fixes par envoi engendre une réaction des chargeurs, à la fois en termes de poids d'envoi (voir discussion précédente) et en termes de type d'opération de transport (id.) ; de ce fait les coûts d'inventaire chutent également (figure 5.6b, diagrammes rouges). En conséquence, les coûts logistiques totaux baissent fortement et globalement pour la quasi totalité de la population observée dans la base de donnée (figure 5.6c, diagrammes rouges).

Dans ce second scénario, les gains économiques sont donc très importants et au contraire du scénario PLA1, presque toujours positifs. Il y a donc fort à parier que si une telle révolution technologique venait à voir le jour, dans des conditions économiques similaires à celles prises en compte dans l'exercice de modélisation présenté ici, elle serait adoptée rapidement et massivement.

La comparaison des différentes NST montre que les secteurs sont impactés de façon plus homogène par le scénario PLA2 que par le scénario PLA1 : la

baisse des coûts est plus forte, et aussi plus centrée. On observe qu'à l'inverse du scénario PLA1 qui engendrait des hausses de coût d'inventaire parfois très importantes pour certains types de marchandises, le scénario PLA2 s'accompagne de baisses à peu près uniformes des coûts de transport et des coûts d'inventaire, et donc des coûts logistiques totaux. La hiérarchie des NST est également un peu différente. La NST0 (produits agricoles) reste le type de marchandise qui bénéficie le plus de l'automatisation, mais les NST 1 (produits agro-alimentaires), 5 (produits métalliques), 6 (BTP) et 7-8 (produits chimiques) ne sont pas loin derrière. La NST 9 (produits manufacturés) est légèrement moins favorisée mais la baisse des coûts est tout de même de l'ordre de 45%, ce qui est très important. Il n'y a pas de véritable perdant dans ce second scénario. Sa valeur économique est très élevée, et intéresse l'ensemble des secteurs.

5.5 Discussion

Ce chapitre a présenté les résultats de la mise en oeuvre de la chaîne de modèles développée dans le cadre de ce projet de recherche.

Rappel méthodologique, enjeux scientifiques La chaîne de modèles développée dans cette recherche combine différentes méthodes. Fondamentalement, elle s'inspire de l'approche en coût total logistique classique en recherche opérationnelle appliquée à la logistique, et dont l'utilisation pour la modélisation du transport de marchandise d'un point de vue microéconomique a été imaginée il y a déjà plusieurs décennies. L'intérêt de cette approche est qu'elle rend explicite la structure des coûts des chargeurs, et notamment l'interaction entre coûts de transport et coûts d'inventaire (coûts de stockage et coût d'opportunité d'immobilisation des marchandises en particulier.) Des travaux de plus en plus nombreux ont montré la supériorité de cette approche sur les modèles plus classiques en coût généralisé dans les dernières années.

Mais la mise en oeuvre d'une approche de ce type est plus exigeante que celle d'un modèle classique². Il faut modéliser les coûts des transporteurs de façon bien plus fine (Chapitre 2). Cela permet de faire des scénarios relativement fins concernant les coûts de transport et de modéliser de façon contrastée de nombreux scénarios différents ; mais cela soulève de nombreuses difficultés techniques, ainsi qu'empiriques.

2. Par construction, un modèle standard de demande de transport de marchandises suppose que tous les coûts, directs et indirects, sont proportionnels aux flux mesurés en tonnes-kilomètres. Il revient au modélisateur de faire des hypothèses sur les coûts des différents modes, en €/tkm ; il n'est pas possible de modéliser les poids d'envoi ni de prendre en compte les coûts indirects tels que les coûts d'inventaire. Par ailleurs les approches sont généralement calées sur la base de données agrégées, avec des valeurs du temps uniques par type de marchandise. Mais ces modèles standards sont construits avec des bases de données plus généralement accessibles que celles mobilisées dans le cadre de ce projet de recherche.

Pour revenir sur les difficultés techniques, il faut noter qu'un des principaux intérêts de l'approche retenue dans ce rapport est qu'elle permet de rentrer plus précisément dans les contraintes techniques des transporteurs. Mais cette opportunité vient avec une difficulté : lorsqu'on modélise explicitement et (relativement) finement les contraintes techniques des transporteurs, on ne peut plus ignorer le fait que la relation entre coûts et prix est potentiellement très complexe. D'où l'approche hybride retenue dans cette recherche, combinant un modèle de coût microéconomique analytique et un modèle de prix économétrique (Chapitre 3) ; le modèle de coût sert à calculer des modifications qui seront appliquées au modèle de prix. Il est très probable que de nombreux travaux de recherche seront encore nécessaires pour vérifier si cette approche est vraiment valable, ou par quel moyen plus adéquat ce problème peut être traité.

En ce qui concerne les problèmes empiriques, ils sont également nombreux et complexes. Le premier concerne l'absence de données fines concernant la production du transport de marchandises. Les bases de données à partir desquelles les statistiques publiques sont construites sont inadaptées ; elles sont trop peu précises et, de toute façon, l'accès aux données à l'échelle la plus désagrégée n'est pas possible à l'heure actuelle. Les transporteurs disposent de leur côté de plus en plus de données dans leurs systèmes d'information (pour ceux qui en disposent) mais, d'une part, ces données ne sont pas non plus librement accessibles ; d'autre part il est difficile de dire de quoi un transporteur donné est représentatif. Côté chargeur, les mêmes problèmes se posent. Par chance, des bases de données "chargeur" étaient disponibles pour cette recherche. Elles fournissent un certain nombre d'informations au niveau de l'envoi. Il fallait aussi connaître la propension de chaque chargeur à payer pour réduire son stock (une sorte de valeur du temps) : ce problème a été résolu par une approche indirecte inspirée des modèles de prix hédonique et spécifiquement développée dans le cadre de cette recherche (Chapitre 4).

Scénarios L'approche en coût total logistique a permis de développer des scénarios relativement détaillés de véhicule autonome. Ainsi, le premier scénario, PLA1, suppose que le poids lourd est autonome sur autoroute. Les mouvements d'approche doivent donc être réalisés avec un conducteur à bord. De ce fait, les gains de coût de main d'oeuvre permis par l'autonomie du véhicule ne sont réalisés que pendant la phase de traction. Le véhicule lui-même est un peu plus cher qu'un véhicule standard.

Dans le second scénario PLA2, on suppose que l'autonomie totale est possible. Le véhicule peut donc être conçu en sachant qu'il n'aura pas besoin d'accueillir un humain à bord. Cela permettrait d'en réduire substantiellement les coûts, et d'en augmenter la charge utile.

Les scénarios, élaborés dans le Chapitre 2, sont introduits dans la chaîne de modèle qui, après modification de la structure des prix, permet de calculer d'une part la réaction des chargeurs (modification du poids et donc de la fréquence des envois ; modification du choix des opérations de transport), d'autre

part les effets en termes de coût logistique (c'est-à-dire coût de transport et coût d'inventaire.)

Principaux résultats Les résultats sont les suivants : le scénario d'autonomie partielle, PLA1, offre des bénéfices économiques mesurés, et hétérogènes. Certains secteurs (plutôt bas dans les chaînes de valeur) en bénéficient, mais d'autres y sont partiellement perdants. Dans ce scénario, les gains proviennent des coûts de transport ; mais pour bénéficier pleinement de ces gains, les chargeurs doivent généralement réduire la fréquence des envois et donc subir des coûts d'inventaire plus élevés. Par ailleurs, le scénario PLA1 ne modifie pas fondamentalement l'équilibre entre transport direct (FTL) et massifié (LTL) malgré d'importantes reconfigurations tant du côté des transporteurs que du côté des chargeurs.

On peut postuler que le scénario PLA1 présente d'autant moins d'intérêt qu'un chargeur privilégie l'agilité et la flexibilité de sa chaîne logistique par rapport aux coûts de transport. Dès lors, une économie tertiarisée, qui n'accorde finalement qu'une place relativement limitée aux matières premières et à l'industrie lourde, comme la France, bénéficierait probablement moins d'un tel scénario que d'autres territoires dans lesquels ces secteurs seraient plus présents. On peut également postuler que dans le cas du scénario PLA1, un certain nombre d'acteurs économiques n'adopteraient pas la technologie d'autonomie partielle ; il resterait une part de marché significative pour le transport classique.

Le scénario d'autonomie totale (scénario PLA2) offre des bénéfices bien plus élevés et mieux répartis dans l'économie. La quasi totalité des acteurs en bénéficie ; les gains sont substantiels, avec une réduction de l'ordre de 50% des coûts logistiques pris en compte dans cette recherche. Ces gains proviennent à la fois d'une réduction très importante des coûts de transport, et d'une baisse également substantielle des coûts d'inventaire. Dans tous les cas, si le transport routier de marchandises doit, demain, être assuré par des véhicules totalement autonome à un prix raisonnable, il est raisonnable d'imaginer que ces véhicules remplaceront à terme une grande majorité des véhicules aujourd'hui opérés par des conducteurs. Il y aurait également une bascule substantielle du transport massifié (LTL) vers le transport direct (FTL). En effet la pertinence économique de la massification serait diminuée par la baisse très importante des coûts du transport direct.

Limites Ce travail présente cependant un certain nombre de limites méthodologiques qu'il faut souligner. Premièrement, du point de vue de la modélisation de l'offre, la contrainte de capacité et son effet sur les choix des chargeurs et des transporteurs n'a été que partiellement pris en compte, et il faudrait affiner le modèle pour mieux en appréhender l'impact. Dans une certaine mesure, il est possible que ce choix méthodologique implique une surestimation des baisses des poids d'envoi dans le scénario PLA2 et une surestimation des hausses des poids d'envoi dans le scénario PLA1, bien qu'il soit difficile d'en

être certain. Par ailleurs, les contraintes d'exploitation des transporteurs ont été modélisées de façon extrêmement simplifiées. Elles sont en réalité assez complexes, à cause de la présence de conducteurs à bord notamment. Dans un scénario d'autonomie partielle ou totale, la réduction de ces contraintes permettra certainement aux transporteurs de dégager des gains de productivité; mais il est très difficile d'apprécier quantitativement cet effet.

Deuxièmement, du point de vue de la modélisation de la demande, il faut d'abord souligner la représentativité imparfaite de la base de donnée utilisée. Il faut aussi dire que la demande de transport n'est modélisée que de façon partielle; d'éventuels effets rebonds tels qu'une hausse de l'intensité des échanges de biens ou des distances parcourues par les marchandises sont pourtant à prévoir avec les variations de coûts calculées ici.

Troisièmement, l'interaction offre-demande est très difficile à modéliser; hors des paramètres d'importance centrale comme le taux de remplissage des véhicules en découle de façon directe. C'est pourquoi le choix a été fait dans ce rapport de traiter cette dimension de façon exogène, mais c'est évidemment très imparfait. Il est très difficile, sur ce point, d'avoir une idée de l'impact de ce choix sur les résultats.

Enfin, le cas du transport urbain de marchandises mériterait un traitement bien plus fin, bien plus précis. Les contraintes d'exploitation sont spécifiques en logistique urbaine, ainsi que les préférences des chargeurs. Les véhicules sont également spécifiques. En matière de véhicule autonome pour le fret, de nombreux développements technologiques, prototypes, start-ups concernent spécifiquement la logistique urbaine. Les véhicules développés sont très divers, de la petite caisse mobile à roues plus ou moins nombreuses au véhicule de taille plus standard servant de hub pour une flotte de très petits robots, drones, ou encore servant de consigne automatique... Les méthodes mises en oeuvre ici sont trop grossières pour permettre la prise en compte spécifique de ce champ, pourtant très important.

Implications pour les politiques publiques Cette recherche est complètement axée sur une approche économique consistant à simuler les gains monétaires pour le secteur privé des gains qu'apporteraient les véhicules autonomes en transport de marchandise. De fait, les implications pour l'action publique ne sont pas discutées. Il s'agit d'en dire ici un mot.

Du point de vue économique d'abord, le véhicule autonome en transport de fret peut être la source d'un bouleversement majeur. La présence d'un opérateur à bord des véhicules est un des principaux postes de coût pour le transport routier de marchandises. Pouvoir faire du transport routier de marchandises sans conducteur est donc susceptible de générer des économies très importantes. Cela dit, tout dépend de ce qui est effectivement possible : s'il faut acquérir des véhicules autonomes seulement sur certaines routes, et s'assurer qu'un chauffeur sera présent pour assurer les déplacements terminaux car ils se situent en ville ou dans un tissu périurbain, les gains pourraient être nettement moindres que ceux permis par des véhicules véritablement autonomes.

Les gains pour les chargeurs proviendraient de façon directe de la baisse des coûts de transport, mais aussi de façon indirecte de l'opportunité qu'ils y trouveraient de réorganiser leurs chaînes logistiques afin de réduire leurs stocks ou mieux répondre aux exigences de leurs clients. A tout point de vue, si la technologie devient suffisamment mature, ne pas en autoriser l'utilisation dans un territoire alors qu'elle est permise ailleurs pourrait causer un déficit de compétitivité. Cela dit, les effets sur l'emploi ne doivent pas être ignorés, mais ils ont été discutés en détail dans d'autres travaux.

Du point de vue de la demande de transport, les gains très élevés du scénario d'autonomie totale pourront engendrer une augmentation de la demande de transport, et donc des trafics. Qui plus est, si les véhicules deviennent plus petits (un phénomène qui n'a pas été modélisé dans cette recherche, mais qui pourrait se produire dans le cas où les envois deviennent plus petits, plus fréquents et plus nombreux), alors il y aurait beaucoup plus de véhicules sur les routes, avec les conséquences attendues en termes de congestion, etc.

Enfin, le scénario d'autonomie totale PLA2 est associé à une réduction à une baisse significative des poids d'envoi. Or, toutes choses égales par ailleurs, le transport d'envois plus petits génère plus d'émissions de gaz à effet de serre à tonnes-kilomètres fixés (RIZET, CRUZ & de LAPPARENT, 2014b). On peut donc s'attendre à une augmentation des émissions de gaz à effet de serre générées par le transport de marchandises dans un scénario d'autonomie totale. Qui plus est, la baisse substantielle de la pertinence économique de la massification serait probablement de nature à démultiplier les liaisons directes, sans rupture de charge. Cela pourrait se traduire par une réduction des distances parcourues (pas de détour par une ou plusieurs plateformes de dégroupage) mais aussi par une réduction des taux de remplissage des véhicules (les coûts baissant, le parcours à vide et le taux de vide sont moins pénalisants). Les conséquences environnementales sont ambiguës, mais potentiellement négatives.

Conclusion

Ce rapport porte sur l'évaluation des impacts économiques potentiels du véhicule autonome en transport routier de marchandises. Le vaste périmètre de ce sujet a été réduit de la façon suivante : d'abord, le focus est porté sur le transport interurbain. Ensuite, les effets économiques pris en compte sont l'impact sur les coûts de transport, d'une part, et l'impact sur les coûts d'inventaire, d'autre part. L'approche est donc plus large que ce que permet un modèle de transport de marchandises classique, mais reste partielle.

Du point de vue méthodologique, une chaîne de modélisation spécifique a été mise en place. Ses caractéristiques principales sont premièrement le fait qu'elle est fondée sur l'approche en Coût Total Logistique, qui est plus large que l'approche classique en coût généralisé qu'on rencontre très généralement en économie du transport de marchandises. Deuxièmement, l'unité d'observation est l'envoi, cela réclame des approches de modélisation spécifiques, mais aussi des bases de données spécifiques. Troisièmement, différentes approches sont combinées : modélisation micro-économique et économétrique pour la modélisation de l'offre ; inférence des valeurs du temps par une méthode apparentée aux prix hédoniques pour la modélisation de la demande. De fait, un résultat collatéral de ce travail de recherche est que des valeurs du temps chargeur désagrégées sont calculées. Elles ne sont pas directement assimilables aux valeurs du temps utilisées en modélisation du transport de marchandises mais en sont probablement très proches numériquement.

Deux scénarios sont évalués. Dans chacun de ces scénarios, le véhicule est totalement autonome (SAE niveau 5). Mais dans le premier scénario, le véhicule n'est autonome que sur une partie du réseau. Dans le second scénario, le véhicule est totalement autonome. Dans le premier cas, le véhicule doit être conçu de façon à ce qu'un humain soit toujours capable de le faire fonctionner. Le véhicule coûte donc un peu plus cher, mais certaines économies de main d'oeuvre sont réalisées. Le bilan est globalement positif mais pas pour tous les secteurs. Dans les secteurs agricoles et industriels, l'effet est positif : la baisse des coûts de transport est supérieure à la hausse des coûts d'inventaire et le bilan est favorable. Mais le bilan est défavorable dans certains secteurs. On peut postuler qu'une autonomie partielle des véhicules sera plus favorable à des pays ou territoires d'industrie lourde ou d'économie agricole ou extractive, moins aux économies plus développées, aux industries à plus forte valeur ajoutée.

Dans le second scénario, l'humain n'est plus nécessaire à bord. Le véhicule

n'a donc plus besoin d'être équipé avec cabine, siège, etc., il coûte moins cher et sa charge utile est accrue. Ce scénario est extrêmement bénéfique d'un point de vue économique : il engendre de très fortes baisses des coûts de transport, et une baisse importante des coûts d'inventaire. Les besoins de stockage en seront diminués ; et l'effet global sera d'une division par deux des coûts logistiques totaux, avec une certaine homogénéité en fonction des secteurs.

La méthode mise en oeuvre dans ce rapport présente certaines limites qui sont autant de pistes pour de nouvelles recherches. C'est ainsi le cas de la prise en compte de nouveaux types de véhicules (robots de transport de marchandises en ville, flottes de drones, etc.), la meilleure prise en compte méthodologique de la contrainte de capacité des véhicules, des horaires de transport, ou bien encore une meilleure prise en compte des interactions avec d'autres enjeux de politique publique. Enfin, à plusieurs reprises est apparu le sujet de la disponibilité des données. La méthode mise en oeuvre permet de modéliser et d'apprécier assez finement les effets de diverses modifications technologiques ou réglementaires en transport de marchandises (en tout cas plus finement que les méthodes usuelles) mais des données nouvelles sont requises. Ces données doivent porter tant sur la demande (par exemple les enquêtes chargeur) que sur l'offre (sur ce point les données manquent cruellement, ou bien sont peu accessibles.)

Bien que ce travail ait porté uniquement sur les effets économiques directs des scénarios de véhicule autonome, quelques conclusions qualitatives peuvent être tirées sur les enjeux d'action publique. Il est notamment clair que le scénario d'autonomie total, engendrant une forte baisse des coûts de transport et d'inventaire, va causer une hausse des trafics. Les effets en termes de congestion seront importants, mais aussi ceux en termes de pollution (en fonction de la motorisation de ces véhicules – d'où la question de l'interaction avec d'autres politiques publiques), d'émissions de gaz à effet de serre, ou encore sur l'emploi. Ce sont autant de sujets qui réclament des développements additionnels, ainsi que les données correspondantes.

Bibliographie

- ARROW, K. J., HARRIS, T. & MARSCHAK, J. (1951). Optimal inventory policy. *Econometrica : Journal of the Econometric Society*, 250–272.
- BAUMOL, W. J. & VINOD, H. D. (1970). An Inventory Theoretic Model of Freight Transport Demand. *Management Science*, 16(7), 413–421.
- BECKER, G. S. (1965). A theory of the allocation of time. *The Economic Journal*, 75(299), 493–517.
- BEN-AKIVA, M. & LERMAN, S. (1985). *Discrete Choice Analysis*. Cambridge : MIT Press.
- BEZIAT, A., LAUNAY, P. & TOILIER, F. (2015). A Comprehensive View of Goods Transport Systems. Typology and Analysis of Delivery Tours in the Paris Region. In *6th Metrans International Urban Freight Conference*. Long Beach, CA, USA.
- COMBES, F. (2010). Logistics imperatives and mode choice. 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. (2013). On Shipment Size and Freight Tariffs Technical Constraints and Equilibrium Prices. *Journal of Transport Economics and Policy (JTEP)*, 47(2), 229–243.
- COMBES, F. (2018). *Transport de marchandises et logistique : performance, impacts, et structure des coûts : Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches*. Université Paris-Est.
- COMBES, F. (2019). Equilibrium and Optimal Location of Warehouses in Urban Areas : A Theoretical Analysis with Implications for Urban Logistics. *Transportation Research Record*, 0361198119838859.
- COMBES, F. & LEURENT, F. (2013). Improving road-side surveys for a better knowledge of freight transport. *European Transport Research Review*, 1(5), 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.
- COMES, F. & COMBES, F. (2017). *Les enquêtes chargeurs en transport de marchandise*. Cerema.

- 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_detaillies/metadonnees.pdf
- COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE. (2018). *Les comptes des transports en 2017 : 55^e rapport à la Commission des comptes des transports de la Nation*.
- COUNCIL OF SUPPLY CHAIN MANAGEMENT PROFESSIONALS. (2013). *Supply Chain Management Terms and Glossary*.
- DAGANZO, F. F. (2005). *Logistics Systems Analysis* (Fourth). Berlin : Springer.
- 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.
- FAWCETT, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern recognition letters*, 27(8), 861–874.
- 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.
- 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.
- KONING, M., COMBES, F., PIENDL, R. & LIEDTKE, G. (2018). Transferability of models for logistics behaviors : A cross-country comparison between France and Germany for shipment size choice. *RTS - Recherche Transports Sécurité*. Pratiques logistiques et enjeux du transport de marchandises : une comparaison franco-allemande, 2018, 14p. doi :10.25578/RTS_ISSN1951-6614_2018-06
- LAUNAY, P. (2018). *Le redéploiement technique et organisationnel des réseaux de messagerie dans les territoires* (thèse de doct.).
- LLORET-BATLLE, R. & COMBES, F. (2012). Estimation of an inventory-theoretic model of mode choice in freight transport. In *European Transport Conference*.

- 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.
- ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT – INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM. (2017a). *ITF Transport Outlook 2017*. doi :<http://dx.doi.org/10.1787/9789282108000-en>
- ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT – INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM. (2017b). *Managing the transition to driverless road freight transport – Case-specific policy analysis*.
- 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.
- RIZET, C., CRUZ, C. & de LAPPARENT, M. (2014a). CO2 emissions of French shippers : The roles of delivery frequency and weight, mode choice, and distance. *Research in Transportation Business & Management*, 12, 20–28.
- RIZET, C., CRUZ, C. & de LAPPARENT, M. (2014b). CO2 emissions of French shippers : The roles of delivery frequency and weight, mode choice, and distance. *Research in Transportation Business & Management*, 12, 20–28.
- ROSEN, S. (1974). Hedonic prices and implicit markets : product differentiation in pure competition. *Journal of political economy*, 82(1), 34–55.
- ROUTHIER, J.-L., SEGALOU, E. & DURAND, S. (2002). *Mesurer l'Impact du Transport de Marchandises en Ville : le Modèle de Simulation FRETURB v1*.
- RUSHTON, A., CROUCHER, P. & BAKER, P. (2014). *The handbook of logistics and distribution management : Understanding the supply chain*. Kogan Page Publishers.
- TAVASSZY, L. & DE JONG, G. (2013). *Modelling freight transport*. Elsevier.