



**HAL**  
open science

# Potentiel de réduction des émissions de GES du transport routier de fret

Hoai Thu Tu Thi

► **To cite this version:**

Hoai Thu Tu Thi. Potentiel de réduction des émissions de GES du transport routier de fret. Economies et finances. Université Paris-Est; École Supérieure de Transport et de Communication de Hanoi (ESTC) (Hanoi), 2019. Français. NNT : 2019PESC2026 . tel-02393326

**HAL Id: tel-02393326**

**<https://theses.hal.science/tel-02393326>**

Submitted on 4 Dec 2019

**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.

UNIVERSITE PARIS-EST

École doctorale Organisations, Marchés, Institutions (OMI)

**Thèse de Doctorat**

Sciences économiques

**TU THI Hoai Thu**

**Potentiel de réduction des émissions de GES du  
transport routier de fret**

Thèse dirigée par M. **Christophe RIZET**

**Composition du jury**

M. Moez KILANI	Professeur des universités	Université du Littoral, Côte d'Opale	Rapporteur
Mme. Ariane DUPONT-KIEFFER	MDC, HDR	Université Paris 1 Panthéon - Sorbonne	Rapporteur
M. Jean-Loup Madre	Directeur de recherche émérite	IFSTTAR - Université Paris-Est	Examineur
Mme. Cécilia CRUZ	MDC	Ecole des Ponts ParisTEch	Examinatrice
M. Christophe RIZET	Directeur de recherche émérite	IFSTTAR - Université Paris-Est	Directeur de thèse

## Remerciements

A l'issue de la rédaction de ce mémoire, je suis convaincue que la thèse est une recherche scientifique de haut niveau, exigeant de la part du doctorant assiduité, concentration et sérieux. Tout au long de ma thèse, je n'aurais pu mener ce travail à son terme sans le soutien d'un grand nombre de personnes.

Tout d'abord de grands remerciements à mon directeur de thèse, monsieur Christophe RIZET, Directeur de recherche émérite à l'IFSTTAR, pour le temps qu'il a consacré à m'apporter les outils méthodologiques indispensables à la conduite de cette recherche. Je souhaiterais également lui dire à quel point j'ai apprécié sa grande disponibilité et son respect sans faille des délais serrés de relecture des documents que je lui ai adressés. Enfin, j'ai été extrêmement sensible à ses qualités humaines d'écoute et de compréhension tout au long de ce travail doctoral.

Je remercie également Monsieur Moez KILANI, Professeur des universités à l'Université du Littoral Côte d'Opale, et Madame Ariane DUPONT-KIEFFER, Maître de conférences, HDR, Doyenne du Centre Pierre Mendès France à l'Université Paris 1 Panthéon Sorbonne, de l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être rapporteurs de cette thèse.

Ma gratitude va également à Monsieur Jean-Loup MADRE, Directeur de recherche émérite à l'IFSTTAR, pour le temps qu'il m'a consacré et pour ses avis critiques qui m'ont grandement aidé à améliorer ce mémoire. J'ai beaucoup appris à ses côtés, et j'ai apprécié son enthousiasme et sa sympathie.

Je tiens aussi à remercier Madame Cécilia CRUZ, Responsable Académique du département Ville, Environnement, Transport, à l'École des Ponts ParisTech pour ses multiples conseils avisés. J'ai pris un grand plaisir à travailler avec elle.

Je pense également à Monsieur Martin KONING, chargé de recherche à l'IFSTTAR, pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail. Ses remarques et ses très nombreuses connaissances m'ont permis de progresser.

Ainsi qu'à Monsieur Laurent HIVERT, directeur adjoint du laboratoire DEST à l'IFSTTAR, pour avoir relu une grande partie de ma thèse ainsi que pour ses commentaires constructifs.

Un grand remerciement à Monsieur Francis PAPON, directeur du laboratoire DEST, qui m'a accueilli durant ma thèse au sein de son laboratoire.

Je désire en outre remercier Monsieur Richard GRIMAL, directeur d'études en économie des transports au CEREMA, qui a accepté de répondre à mes interrogations sur les procédures SAS avec gentillesse.

Je remercie également tous les thésards et les autres collègues du DEST pour la bonne ambiance de travail ainsi que les bons moments partagés.

Je tiens à remercier mes collègues de l'Ecole Supérieure de Transport et de Communication à Hanoi et de l'Institut de Stratégie des Transports qui ont co-organisé les séminaires à Hanoi sans lesquels ma recherche serait certainement moins riche.

Je souhaiterais remercier le Ministère de l'Education Nationale de l'Enseignement du Vietnam qui a financé cette thèse.

Merci à mes amis NGO Van Minh, SE Tien, Mathilde QUERIN, NGUYEN Mai Hue, Patricia ALVAREZ, Clarisse PAMPON, NGUYEN Minh Hieu, TRUONG Thuy Hien, DINH Le Dung ...pour les bons moments que nous avons partagés ensemble, ainsi que pour leur aide, leur encouragement et leur bonne humeur.

Ces remerciements seraient incomplets si je n'en adressais pas également à mon cher garçon LAM Phuc de 9 ans, qui m'a permis d'oublier momentanément le travail à travers les sorties et par les bons repas qu'il m'a faits. Je le remercie également pour son soutien et sa gentillesse.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à mes parents, à mon grand frère, à ma belle sœur et à tous mes proches, pour le soutien qu'ils m'ont apporté dans la réalisation de ma thèse, et sans lesquels je ne serais pas là aujourd'hui.

**Table des matières**

Résumé.....	5
Abstract .....	6
Introduction .....	7
Chapitre 1 : Analyse des politiques de réduction des émissions de CO <sub>2</sub> du transport de fret ...	9
1.1. Les mesures visant aux changements du comportement des acteurs .....	10
1.2. Les mesures visant aux changements techniques .....	23
1.3. Méthodologie pour l'analyse des mesures de réduction des émissions de GES du fret	23
Chapitre 2 : Taxe Carbone.....	27
2.1. Présentation des scénarios.....	27
2.2. Objectif du chapitre .....	28
2.3. Méthodologie.....	28
2.4. Hypothèses .....	31
2.5. Résultat sur le coût d'abattement de la tonne de CO <sub>2e</sub> évitée.....	37
2.6. Analyse de la sensibilité .....	42
Conclusion du chapitre 2 .....	46
Chapitre 3: Véhicule électrique .....	47
3.1. Présentation des scénarios.....	47
3.2. Objectifs et Méthode .....	51
3.3. Les trafics routiers urbains de marchandise.....	52
3.4. Quantification des émissions de GES évitées .....	55
3.5. Evaluation économique .....	61
3.5.1. Les hypothèses .....	61
3.5.2. Transporteurs .....	65
3.5.3. Finances publiques.....	67
3.5.4. Coût des externalités .....	69
3.6. Résultat du coût économique d'une tonne de GES évitée.....	73
3.7. Tests de sensibilité.....	74
3.6.1. Kilométrage annuel des véhicules .....	74
3.6.2. Durée de vie de la batterie.....	74
3.6.3. Taux de remplissage.....	75
3.6.4. Coût de la congestion.....	76
3.6.5. Coût de l'énergie .....	77
Conclusion du chapitre 3 .....	79
Chapitre 4 : Impact de la fréquence des envois sur les émissions de CO <sub>2</sub> .....	80

4.1. La fréquence des envois vue à partir de l'enquête ECHO .....	80
4.2. L'intensité carbone et la fréquence d'envoi.....	82
4.3. Réduction des émissions de CO <sub>2</sub> via la diminution de la fréquence d'envoi .....	84
4.4. Modélisation de la fréquence d'envoi .....	85
4.4.1 Le modèle économique théorique .....	85
4.4.2 Application de ce modèle théorique aux données de l'enquête ECHO .....	88
4.4.3. Modélisation de la fréquence d'envoi au niveau envoi .....	88
4.4.4. Effet de la réglementation du stationnement sur la fréquence d'envoi.....	97
4.4.5. Quantification de la réduction d'émissions de CO <sub>2</sub> via la réglementation du stationnement .....	98
4.4.6. Coût pour le chargeur de cette réduction de la fréquence.....	99
Conclusion du chapitre 4 .....	102
Chapitre 5 : Quelles sont les bonnes mesures de réduction des émissions de GES du transport routier de fret ?.....	103
5.1. Objectifs du chapitre .....	103
5.2. Mesures de réduction des émissions de GES du fret pour la France .....	103
5.2.1. Présentation des nouveaux scénarios .....	103
5.2.2. Harmonisation des hypothèses avec celles des chapitres précédents .....	105
5.2.3. Quantification des émissions de CO <sub>2</sub> .....	105
5.2.4. Coûts des externalités .....	107
5.2.5. Coûts d'exploitation du transport de fret .....	110
5.2.6. Impact sur les Finances publiques .....	111
5.2.7. Coût économique d'une tonne de CO <sub>2</sub> évitée.....	114
5.2.8. Test de sensibilité.....	114
5.3 Comparaison des réductions d'émissions et des coûts des différents scénarios envisagés pour la France .....	115
5.4 .Quelles mesures pour le Vietnam ?.....	116
5.4.1. Contexte générale du Vietnam.....	116
5.4.2. Transport de fret au Vietnam .....	118
5.4.3. Les mesures de réduction des émissions de GES appliquées au Vietnam.....	120
Conclusion du chapitre 5 .....	125
Conclusion et perspectives .....	128
Bibliographie.....	129
Annexe .....	132

## Résumé

L'objectif de cette thèse est d'identifier les politiques qui permettraient de réduire les émissions de GES du transport de fret routier au moindre coût pour la collectivité. Pour cela, nous estimons, sur la période 2030-2050, les quantités évitées ainsi que le coût économique dans 6 scénarios correspondant à différentes politiques de réductions des émissions. Le coût économique comprend la somme des coûts pour les utilisateurs de transport et pour les pouvoirs publics ainsi que les coûts des externalités. Nous utilisons, quand ils sont disponibles, des jeux d'hypothèses définis par le ministère des transports, en particulier pour l'évolution des trafics et les valeurs unitaires des externalités. Pour chaque scénario, le coût économique par tonne de GES évitée est très sensible aux hypothèses, en particulier aux valeurs unitaires retenues pour les externalités (valorisation des co-bénéfices). Dans les hypothèses centrales, plusieurs scénarios présentent un coût négatif, c'est-à-dire un bénéfice pour la collectivité en plus de la réduction des émissions.

C'est le cas notamment de la **taxe carbone**, aussi longtemps qu'elle reste inférieure aux coûts externes engendrés par les poids lourds. Pourtant, quand cette taxe augmente, la hausse correspondante du prix de transport conduit les chargeurs à renoncer à une partie de leur activité, ce qui limite l'augmentation souhaitable.

L'**augmentation de 40 à 60 tonnes du poids maximum autorisé des poids lourds** est une mesure très favorable aux utilisateurs de transport car elle permet de réduire significativement le coût du transport. Prenant en compte les gains d'externalités, la perte fiscale des pouvoirs publics, ainsi que les coûts d'infrastructure (investissement pour renforcer les ponts et les routes et entretien), ce scénario présente également un bénéfice pour la collectivité.

Le scénario d'installation de caténaires sur le réseau autoroutier pour permettre la circulation de **poids lourds hybrides** est efficace en matière de quantité de GES évitée et le coût d'évitement par tCO<sub>2e</sub> reste limité. En revanche, dans le scénario d'**électrification du fret urbain** (remplacement des camions diesels par des camions électriques dans les villes) le **coût de** la tonne évitée est élevé si les camions électriques n'ont que deux tonnes de charge utile alors qu'il devient un bénéfice économique si, grâce au progrès technologique, les camions électriques ont 6 tonnes de charge utile en 2030 (pour une autonomie de 100 km).

Le remplacement des poids lourds diesels par des **poids lourds au Gaz Naturels Véhicules** réduit le coût du transport et bénéficie donc aux transporteurs et chargeurs tandis que les pouvoirs publics supportent une perte de recette fiscale. En tenant compte des gains d'externalités, cette mesure permettrait un coût économique limité.

Enfin, le chargeur a la possibilité de réduire ses émissions de GES, avec un coût raisonnable pour l'entreprise et un bénéfice pour la collectivité, en diminuant la **fréquence de ses envois**.

Pourtant, aucune de ces mesures n'est susceptible d'offrir seule une réduction suffisante des émissions. Pour atteindre l'objectif du facteur 4 à un coût raisonnable pour la collectivité, différentes mesures doivent être combinées

## Abstract

The purpose of this thesis is to identify policies that would allow mitigating road freight GHG emissions at the lowest cost for the community. With this in mind, for six scenarios corresponding to different mitigation policies we estimate the mitigated emissions along with the economic cost, over the 2030-2050 periods. The overall economic cost includes the cost for transport users, for public authorities, and an economic valuation of transport externalities. When available, we used sets of assumptions retained by the French Ministry of Transport for official traffic projections and for the unitary valuation of external costs. For every scenario, the economic cost by avoided ton of CO<sub>2</sub> is highly sensitive to these assumptions, especially to the unitary value of external costs (valuation of co-benefits). In the central set of assumptions, several scenarios result in a negative economic cost of GHG mitigation, *id est* a benefit to the community in addition to GHG cuts.

This is notably the case for the carbon tax, as long as it remains lower than the external costs of freight road transportation. However, when the tax rate is rising, the resulting increase in transport prices leads shippers to reduce their activity, which limits the desirable tax rate increase. Increasing the maximum authorized weight of heavy trucks from 40 to 60 tons would be a very beneficial measure towards transport users by allowing a substantial transport costs reduction. This scenario is also beneficial for the community, when accounting for the avoided external costs, the financial loss for public authorities and infrastructure costs (the required reinforcement of roads and bridges and increased maintenance costs).

The installation of catenaries on motorways to supply hybrid heavy trucks is efficient to reduce CO<sub>2</sub> emissions, and the economic cost per avoided ton of CO<sub>2</sub> remains moderate. Quite the opposite, the economic cost is high in the scenario of electrification of urban freight (where diesel trucks are replaced by electric trucks for urban goods delivery), if electric trucks only have a maximum payload of 2 tons. On the contrary, it turns into an economic benefit if, thanks to technological progress, electric trucks have a payload of 6 tons in 2030, for a range of 100 km.

The replacement of diesel trucks by natural gas vehicles reduces transport costs and is therefore beneficial towards carriers and loaders, but public authorities support a loss of taxation revenues. However, when accounting for the avoided external costs, the overall economic cost happens to be limited.

Finally, shippers can reduce GHG emissions for a reasonable economic cost by reducing the frequency of shipments, this measure also being beneficial for the community.

However, none of these measures is capable to achieve by itself the official goal of dividing by 4 the level of GHG emissions at a reasonable cost for the community, implying that additional measures have to be considered jointly.

## Introduction

La hausse des émissions de gaz à effet de serre (GES), surtout des émissions de CO<sub>2</sub>, est à l'origine du réchauffement climatique. Pourtant, quand on analyse la courbe de croissance du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, on observe une croissance très rapide, qui a commencé au 19<sup>ème</sup> siècle. Les émissions de GES mondiales ont augmenté de plus de 80% depuis 1970 et plus de 45% depuis 1990 pour atteindre 54 Gt CO<sub>2</sub> équivalents en 2013 contre 49 Gt CO<sub>2</sub> équivalents en 2010<sup>1</sup>. Pour l'objectif du développement durable, il faut évidemment réduire les émissions de GES. Mais, une question se pose : est ce qu'il faut mieux réduire les émissions dès maintenant ou attendre des dizaines ou trentaine d'années pour le faire. La plupart des travaux (Stern 2006) (Quinet 2008) confirment que le coût total sera moins cher si on a des actions dès maintenant. Les coûts nécessaires pour stabiliser le climat sont importants mais ils sont gérables ; un retard serait dangereux et bien plus coûteux (Stern 2006). Donc, il faut avoir des mesures pour réduire les émissions de GES le plus tôt possible.

Les émissions de GES proviennent des différents secteurs. Le transport en général et le transport de fret en particulier constituent une partie importante dans les émissions totales. Si on zoome sur le domaine du transport, on constate que c'est un des premiers émetteurs : il représente environ 23% des émissions au niveau mondial<sup>2</sup>.

Le transport de marchandise occupe actuellement près de 10% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub><sup>3</sup>. Cette part peut être modeste par rapport à celle de l'industrie ou de l'énergie mais elle est en constante augmentation, à l'inverse ce qu'on constate pour les autres secteurs. Donc, la réduction des émissions de GES du transport de fret devient impérative.

Dans la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC)<sup>4</sup>, la France a fixé un objectif de diviser par 4 des émissions de GES à l'horizon 2050. Pour le secteur transport, cette stratégie suppose une baisse de 29% des émissions de GES pour la période 2024-2028 par rapport à l'année 2013 et un objectif de diminuer au moins de deux tiers à l'horizon 2050. Récemment, selon l'étude du Ministère en charge des transports (Pochez 2016), si la tendance se poursuit, les émissions de GES du fret atteindrait 34,5 millions de tonnes de GES à l'horizon 2050, soit une augmentation de 27% par rapport au 27,2 millions de tonnes de GES en 2012. Pour l'ensemble du secteur transport, la baisse serait de 30% à l'horizon 2050, ce qui est insuffisant pour atteindre l'objectif du facteur 4 de la France. Donc, il est nécessaire de rechercher les mesures politiques efficaces pour réduire les émissions de GES.

Pourtant, la problématique est complexe pour ce secteur : comment réduire les émissions produites par le transport de fret sans freiner la croissance économique, sans nuire aux transporteurs, aux chargeurs ? C'est une question difficile pour les décideurs politiques. Les mesures possibles de réductions des émissions de GES dans le transport en général et

---

<sup>1</sup> Chiffres clés du climat : France, Europe et monde (Service de l'Observation et des Statistiques, 2017)

<sup>2</sup> Key Trends in CO<sub>2</sub> emissions. Excerpt from: CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion (IEA, 2015)

<sup>3</sup> Le fret mondial et le changement climatique : Perspectives et marges de progrès (Savy et al. ,2010)

<sup>4</sup> (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire 2015)

dans le transport de fret sont nombreuses. Pourtant quelles mesures permettent de réduire les émissions de GES du transport de fret au moindre coût pour la collectivité ? A notre connaissance, cette question est rarement traitée en France. Donc, l'objectif de cette thèse consiste à répondre cette question. Pour cela, nous estimons le coût économique pour réduire une tonne de GES évitée ou le coût d'abattement des émissions de GES. Le rapport (Rizet 2014) montre que les émissions du transport de fret proviennent à plus de 95% de la route. C'est la raison pour la quelle, dans cette thèse nous nous concentrons sur les mesures de politique visant à réduire les émissions de GES du fret routier. Cette thèse se structure en 5 chapitres. Le premier chapitre dresse un panorama des mesures politiques de diminution des émissions de GES du transport de fret en analysant les avantages et les inconvénients de ces mesures sous les points de vue des différents acteurs économiques. Les données et la méthode sont décrites dans le paragraphe dédié à la méthodologie, à la fin du chapitre 1.

Dans le reste de cette thèse, nous avons estimé le coût économique pour une tonne de GES évitée par différentes politiques. Le chapitre 2 présente la taxe carbone qui vise à réduire la consommation de gazole. L'augmentation de la taxe carbone fait augmenter le prix de l'un des facteurs de production : cela entraîne à une augmentation du coût du transport routier de marchandise. Pour apprécier le coût économique de cette taxe pour la collectivité, nous avons testé différents scénarios correspondant à différents montants de la taxe carbone.

L'idée de l'électrification du fret urbain est décrite au chapitre 3. Sous l'hypothèse que, à l'horizon 2030, l'Etat va interdire la circulation des camions et camionnettes diesels dans les villes, ce chapitre analyse le coût de cette politique pour les transporteurs et les chargeurs, pour les finances publiques, pour l'environnement ainsi que pour la collectivité.

Selon le résultat du rapport (Rizet et al. 2014) la moitié des émissions du transport de fret provient des envois qui ont une faible efficacité carbone. Pour améliorer cette efficacité, le chapitre 4 s'intéresse à la réduction de la fréquence des envois.

Trois autres mesures politiques ont été traitées dans le chapitre 5: augmentation des poids et dimensions maximums des véhicules routiers, autoroutes électriques et véhicules au gaz naturel. Dans ce chapitre, nous comparons aussi ces mesures avec celles des chapitres précédents en termes de coût économique d'une tonne GES réduite mais aussi en termes de quantité de réduction des émissions de GES. Est-ce que l'efficacité de ces mesures, analysée dans un pays développé comme la France est encore valable pour un pays en voie de développement comme le Vietnam ? Le chapitre 5 de cette thèse traite aussi cette question.

En conclusion sont repris les principaux résultats et sont suggérées quelques pistes de réduction des émissions du fret routier.

## Chapitre 1 : Analyse des politiques de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> du transport de fret

Dans ce premier chapitre, pour avoir une vision générale des différentes politiques de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> du transport de fret, nous analysons les avantages et les inconvénients de ces politiques sous les points de vue des différents acteurs économiques.

En effet, la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> du transport de fret est un sujet qui préoccupe non seulement les décideurs publics mais aussi les professionnels (chargeurs, transporteurs) ou encore le monde de la recherche. Ce sujet a fait l'objet de nombreux travaux (Léonardi et Baumgartner 2004), (Savy et Daude 2008), (A. McKinnon 2008), (A. C. McKinnon et Piecyk 2009), (Savy et al. 2010), (Martins et al. 2012), (Stelling 2014), (Rizet et al. 2014), (Koning et al. 2018). A titre d'exemple, McKinnon a montré que les émissions de CO<sub>2</sub> du transport de fret peuvent être analysées à partir de 7 indicateurs clés: la répartition modale (*modal split*), le nombre de manutention dans la chaîne de transport (*handling factor*), la distance du trajet (*length of haul*), le poids du chargement (*payload on laden trips*), la proportion de trajets vides (*proportion of km run empty*), l'efficacité énergétique (*energy efficiency*), l'intensité carbone de l'énergie utilisée (*carbon intensity of the energy source*). On pourrait se baser sur ces paramètres pour élaborer des mesures politiques de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> du transport de fret. Par exemple, l'augmentation du prix du transport routier fera croître la part des modes ferroviaire, fluvial et maritime, le taux de chargement du véhicule, l'encouragement à utiliser des véhicules bas carbone. McKinnon a proposé aussi des mesures comme réduire le nombre de manutention, réduire la distance du trajet pour réduire la demande de fret, développer les modes de transport moins intenses en carbone, améliorer le taux de remplissage; augmenter l'efficacité énergétique du transport routier (A. McKinnon 2008).

Dans les travaux publiés, de nombreuses solutions sont proposées pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> du transport de fret. D'après les différents travaux ainsi que de la propre expérience de l'auteur, nous proposons de les classer en 2 grandes catégories : soit changer la technologie, soit changer le comportement.

Pour **changer le comportement** des acteurs, au niveau macro, l'Etat pourrait utiliser les moyens publics comme les taxes, le système de tarification, développer le report modal en favorisant les modes doux tels que les canaux, favoriser la diffusion de l'information sur le CO<sub>2</sub>. Sous l'impact de ces mesures, l'entreprise va réorganiser ses flux de transport pour optimiser ses trajets et ses chargements en favorisant le recours aux modes non routiers.

L'Etat pourrait aussi donner des normes, des réglementations ainsi que des accords basés sur le volontariat. Sous l'impact de ces mesures, l'entreprise va chercher les solutions pour améliorer sa technologie: soit elle va utiliser les énergies plus propres comme le véhicule électrique, le véhicule hybride ou au gaz naturel (GNV), soit elle va améliorer l'efficacité de ses véhicules et de ses composants comme le moteur, les pneumatiques.....

Cependant, aucune mesure n'est susceptible d'offrir seule un potentiel suffisant. Chaque mesure doit donc être envisagée de manière complémentaire.

## 1.1. Les mesures visant aux changements du comportement des acteurs

Pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> du transport de fret via le changement de comportement des acteurs, les pouvoirs publics disposent de deux types d'instruments politiques : réglementer par des interdictions ou par l'attribution de quotas d'émissions ou agir sur les prix au moyen de taxes, de permis négociables ou de subvention (Darbéra 2010)

Les instruments économiques (taxes ou marché carbone) sont supérieurs aux normes au sens où ils permettent d'atteindre l'objectif donné de réduction des émissions à moindre coût. En plus, l'objectif des normes européennes d'émission est de réduire les émissions des polluants des véhicules, telles que les émissions de NO<sub>x</sub>, CO, HC et particules. Les émissions de CO<sub>2</sub> des poids lourds ne sont pas prises en compte dans ces normes. C'est la raison pour laquelle nous présenterons plus en détail la taxe carbone et le marché des quotas européens...

### 1.1.1. Instruments économiques

#### Taxe carbone et le marché de quotas européens

L'Etat pourrait introduire des instruments économiques qui prennent la forme de la taxe carbone ou un système d'échange de quotas. L'objectif de ce moyen est de modifier l'environnement économique des agents à travers un mécanisme de prix pour les inciter à changer leur comportement. Les fonctionnements de la taxe carbone et celui du marché de quotas sont différents. Pour **la taxe carbone**, on fixe un prix pour chaque tonne émise **sans avoir de contraintes sur la quantité de réduction qui en résultera**. Quant au **marché de carbone**, on fixe la quantité d'émission souhaitée par les quotas distribués et on laisse le marché en déterminer le prix.

#### **Taxe carbone:**

##### *Fonctionnement :*

*La taxe carbone est une taxe ajoutée au prix de vente de produits ou de service en fonction de la quantité de GES, comme le CO<sub>2</sub> ou mesuré en équivalent CO<sub>2</sub>, émis lors de leur utilisation<sup>5</sup>. La taxation se calcule sur la base d'un prix à la tonne de CO<sub>2</sub> émise. Ce prix exprimé en dollar ou en euros par tonne, est fixé par le gouvernement. Basé sur ce principe, toutes les activités qui utilisent les carburants fossiles seront touchées par cette taxe.*

##### *Les acteurs économiques : qu'en pensent-ils?*

En effet, les pouvoirs publics ont l'intention de mettre en œuvre cette taxe depuis long temps. La première proposition de loi sur l'application d'une double taxe (taxe carbone et taxe générale sur les activités polluantes (TGAP) a été définie dans l'article 5 de la loi de finance en septembre 2009 (Bouguerra et Rizet 2013).

Du point de vue des décideurs publics, augmenter le prix du carburant à travers une taxe carbone est un moyen d'en réduire la consommation, donc de réduire les émissions de

---

<sup>5</sup> INSEE: Définitions et méthodes-taxe carbone

CO<sub>2</sub>e (équivalent CO<sub>2</sub>). Surtout dans le secteur du transport routier de fret, la demande de ce secteur est sensible aux changements de prix du carburant ; une élasticité constante de la demande de fret exprimée en véhicules.km au prix du gazole a été estimée à -0,33 (Bouguerra et Rizet 2013). C'est pourquoi, plus la taxe carbone est importante, plus on génère des incitations fortes à réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. Nous estimons, dans le chapitre 2 de cette thèse, la quantité des émissions de GES évitée selon le montant de la taxe carbone.

Sous les yeux des dirigeants, selon le rapport (Rocard 2009), la taxe carbone dans le secteur des transports aurait pu avoir des résultats intéressants comme l'influence que la TIPP (taxe intérieure sur les produits pétroliers), introduite en 1922, a eue dans la durée. Cette taxe nous permet de consommer, par habitant, trois fois et demi moins de carburants qu'aux Etats-Unis (Rocard 2009). Si on ne prend pas en compte les différences géographiques et économiques entre les pays, pour les experts de la commission Rocard, la taxe carbone aura des effets positifs sur l'environnement.

Pourtant, une des raisons pour lesquelles on a dû attendre jusqu'en 2014 pour mettre en place cette taxe en France était l'opposition des transporteurs. Selon les syndicats de **transporteurs**, le secteur du transport routier a **déjà** mis en œuvre **plusieurs propositions** pour réduire ses émissions polluantes : normes technique, TIPP, TVA, certificat d'énergie, charte CO<sub>2</sub> etc. (Reme-Harnay 2010). En France, le carbone est globalement taxé à un niveau supérieur à la moyenne européenne (ADEME 2009). D'autre part, un des arguments des transporteurs pour rejeter la taxe carbone repose sur **la compétitivité** des entreprises françaises par rapport aux entreprises européennes. Surtout, on a enregistré actuellement une baisse de compétitivité du pavillon français (Savy et Daude 2008). En effet, sous l'impact de la taxe carbone, les transporteurs pourraient avoir des choix différents. Ils pourraient investir pour améliorer leur technologie, améliorer leur taux de chargement, changer l'habitude du conducteur (éco-conduite) ou utiliser un mode moins émetteur pour tel ou tel trajet.

Du point de vue des **chargeurs**, la **taxe carbone** contribue à augmenter le prix du carburant et donc entraîne une **augmentation du prix du transport** routier. En effet, pour les chargeurs le coût de transport joue un rôle important pour choisir le mode principal. Basé sur les données de l'enquête Envois-Chargeurs-Opérateurs (ECHO), on trouve que le coût de transport reste l'élément le plus souvent déterminant ; il est mentionné pour 60 % des envois (Soppé et Guilbault 2009).

Donc, cette hausse du prix pourrait pousser les chargeurs à choisir un autre mode de transport moins émetteur et bien sûr moins cher (chercher la solution pour le report modal). Cette augmentation du prix du transport aura aussi des impacts sur l'organisation de la chaîne logistique des chargeurs. Ils peuvent soit améliorer leur taux de remplissage, soit réorganiser leur chaîne logistique. Pour avoir de la rentabilité financière, la taxe carbone qui est très élevée, pourrait conduire les chargeurs à réorienter leur transport en compte propre vers le compte d'autrui.

**Pour la collectivité :**

Pour juger de l'intérêt de la taxe carbone, il est intéressant de comparer le coût économique de la taxe carbone aux bénéfices attendus de la réduction de consommation des carburants. Cette idée a été bien présentée dans l'article de (Darbéra 2010). Il confirme qu'une taxe carbone sur le carburant consommé par les voitures entrainera un coût pour la collectivité. Suite à cette idée, le chapitre 2 de ma thèse porte principalement sur le coût économique pour une tonne de GES évitée du transport de fret par la taxe carbone.

### **Quels usages faire des recettes ?**

L'un des objectifs des décideurs publics de mettre en place la taxe carbone est non seulement de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> mais aussi de remplir les caisses de l'Etat. Mais, comment ces recettes vont-elles être utilisées ? En réalité, on pourrait regrouper les modes d'utilisation des recettes de la taxe carbone en quatre catégories.

**Tableau 1.1 : Mode d'utilisation des recettes de la taxe carbone**

	Danemark	Suède	Finlande	Norvège	Suisse	Irlande
Chèque vert ou compensation forfaitaire destinée aux ménages	•	•	•		•	•
Réduction de prélèvement assis sur travail ou capital	•	•			•	
Consolidation des recettes budgétaires		•	•	•		•
Utilisation affectée à l'environnement	•	•			•	

*Source:(De Perthuis et Elbeze 2011)*

**Chèque vert ou compensation forfaitaire** : les recettes de la taxe carbone pourrait être redistribuées aux ménages sous la forme de compensation. Cette compensation peut prendre la forme de versement direct comme un "chèque vert" ou la forme de réduction de l'impôt, comme en Suisse où une somme forfaitaire identique est restituée à chaque résident. Cette redistribution des revenus facilite l'acceptation sociale car les ménages reçoivent directement l'argent du gouvernement. Pourtant, ce dispositif restreint l'utilisation des autres usages (C. De Perthuis et Elbeze 2011).

**Réduction de prélèvements assis sur le travail ou le capital**: La charge fiscale des entreprises peut être réduite en accordant des exemptions d'impôt ou des réductions des taxes. Ce type de réduction visant à générer un deuxième dividende pour les entreprises. Ce mécanisme est favorable au niveau d'activité économique. Grâce à cet avantage ce dispositif est encouragé par les économistes.

**Consolidation des recettes budgétaires:** L'Etat pourrait utiliser les revenus de la taxe carbone pour consolider son budget.

**Utilisation affectée à l'environnement:** Les recettes de la taxe carbone pourraient être utilisées pour financer ou inciter les projets ou les actions supplémentaires pour réduire les émissions de gaz à effet de serre

Les pays qui ont choisi la taxe carbone combinent souvent plusieurs usages.

### *Avantage de la taxe carbone*

L'un des avantages de la taxe carbone par rapport aux autres mesures réglementaires qui auraient le même résultat en termes de réduction des émissions, est son **coût économique faible**. Plus en détail, par exemple, une entreprise de transport qui émet 20t de CO<sub>2</sub> dans un pays où la taxe carbone imposée est de 17euros/tCO<sub>2</sub>, devra payer 340 euros supplémentaires pour réaliser ses activités. Elle a deux choix: soit elle payera cette somme, soit elle peut réduire ses émissions GES à un coût inférieure à 17 euros/ tonne CO<sub>2</sub> ; alors cette entreprise va réduire ses émissions jusqu'à ce que son coût de réduction des émissions soit égal à 17euros/tCO<sub>2</sub>. Elle payera la taxe jusqu'au moment où elle trouve une solution pour réduire ses émissions. Donc, dans tous les cas, sous l'aspect économique cette entreprise choisira la meilleure option qui lui coûte le moins cher.

Un deuxième avantage possible de la taxe carbone est le **double dividende**. Quand la taxe carbone est mise en place, il en résulte un bénéfice environnemental et, si les recettes de cette taxe sont utilisées pour réduire les charges salariales, il en résulte aussi une amélioration de l'économie et de l'emploi. Pour analyser plus en profondeur le double dividende de la taxe carbone dans le transport de fret, sur la base des données de l'enquête ECHO, on a essayé d'identifier les chargeurs gagnants et les perdants sous l'impact de la taxe carbone

### *Face à la mise en place d'une fiscalité verte quels seraient les gagnants et les perdants ?*

#### **Hypothèse :**

Si nous retenons l'hypothèse d'une taxe de  $t$  €/tonne de CO<sub>2e</sub>, et si nous notons  $E_i$  les émissions annuelles de l'entreprise  $i$  pour son transport de fret et  $N_i$  le nombre de ses salariés, le transport de fret émet  $\sum E_i$  tonne de CO<sub>2e</sub> et  $\sum N_i$  est le nombre total des salariés dans notre économie. Un établissement  $n$  qui émet  $E_n$  tCO<sub>2e</sub>/an paie ( $E_n * t$ ) €/an de taxe carbone pour son transport de fret. Cette taxe, multipliée par l'ensemble des émissions du transport de fret ( $\sum E_i$  tonnes de CO<sub>2WW</sub>) rapporte à l'Etat  $\sum E_i * t$  euros. Si le montant de ces recettes est entièrement utilisé pour réduire les charges sociales (prélèvements retraite et sécurité sociale à la charge des employeurs) et, pour simplifier, avec un montant identique pour chaque travailleur, on obtiendrait pour  $\sum N_i$  employés, une réduction de coût de  $(\sum E_i / \sum N_i) * t$  par salarié et par an. Mais il est clair que tous les établissements ne paieraient pas le même montant et ne bénéficieraient pas des mêmes réductions de charges. Le montant de la taxe varierait, selon les types d'établissements. Un résultat de cette recherche (Rizet, Cruz, et Tu Thi 2015) était ainsi de voir quels sont les établissements gagnants ou perdants après la mise en place d'un tel dispositif (taxe et utilisation des recettes de cette taxe).

Notre établissement n qui aura à payer ( $E_n * t$ ) €/an de taxe carbone aura en contrepartie une réduction des charges sociales égale à  $t * (\sum E_i / \sum N_i) * N_n$

Le solde de ce dispositif pour cet établissement est alors :

$$(t \sum E_i / \sum N_i) * N_n - t * E_n = t * N_i [(\sum E_i / \sum N_i) - (E_n / N_n)]$$

Cette formule indique que l'établissement i sera gagnant si et seulement si  $(\sum E_i / \sum N_i) > (E_n / N_n)$ , autrement dit si les émissions de CO<sub>2</sub> par salarié de cet établissement sont inférieures à celles de la moyenne des établissements.

Sur la base des données de l'enquête ECHO, les auteurs du rapport (Rizet et al. 2014) ont établi une typologie des établissements de 10 groupes homogènes d'établissements. Cette typologie est constituée à partir des variables qui caractérisent le volume d'émission comme le tonnage annuel, le nombre annuel d'envois, la répartition des envois en tranche de poids, la répartition du tonnage annuel selon la destination géographique et du mode, la taille de l'établissement selon le nombre de salariés.

Sous l'hypothèse que  $t = 100$  €/tonne de CO<sub>2</sub>;  $\sum E_i = 45,7$  millions de tonnes de CO<sub>2</sub>WW (en 2004) et  $\sum N_i = 26$  millions d'employés. On obtiendra une réduction de coût égale à  $4570/26 = 176$  €/employé et par an. Le montant de la taxe varierait, selon les 9 types d'établissements, de 7 900 €/an pour les établissements du type 1, les moins émetteurs, à 476 000 € pour le type 2, les plus émetteurs. D'autre part la réduction de charges sociales varierait aussi selon le nombre d'employés de l'établissement. En moyenne, un établissement du champ de l'enquête aurait à payer 62 000 € de taxe par an et, compte tenu d'une réduction de charges salariales de 10 000 €, aurait une contribution nette de 52 000 € par an, avant tout effort supplémentaire de réduction de ses émissions ; ce résultat n'est guère surprenant compte tenu du fait que l'enquête porte les établissements chargeurs et que nous avons retenu pour cet exercice l'hypothèse que seules les émissions du fret sont taxées. Les établissements du type 2, les gros émetteurs, auraient à payer un solde de 410 000€ par an en plus que dans la situation actuelle, incitation à réduire leurs émissions. Les établissements du groupe 1 au contraire n'auraient à payer qu'un solde de 4 700 € par an.

**Tableau 1.2 : Répartition des taxes, réductions de charges et solde par établissement selon les types**

Type	Population des étab.	Tonnes de CO <sub>2</sub> par étab.	Taxe par étab. (milliers €/an)	Salariés par étab.	Réduc. de charges (milliers €/an)	Solde par étab. (milliers €/an)
0	1869	1054	105	79	14	-91
1	13731	79	7,9	18	3	-4,7
2	2228	4764	476	380	67	-410
3	4999	252	25	56	10	-15
4	7260	638	64	65	12	-52
5	4626	402	40	57	10	-30
6	3340	1154	115	192	34	-82
7	3810	1210	121	72	13	-108
8	15127	86	8,6	18	3	-5,5
9	4897	494	49	79	14	-35
10	7335	1095	110	39	7	-103
Total	69222	621	62	60	10	-52

*Source : (Rizet, Cruz, et Tu Thi 2015)*

Si on mène cette analyse des gagnants et perdants d'une 'fiscalité verte' non plus par type mais par établissement, il est clair que certains établissements sont gagnants. Le tableau 1.3 ci-dessous indique, non plus par type mais par grand secteur d'activité (9 grands secteurs d'activité construits par regroupements de la nomenclature INSEE et adaptés à la problématique 'transport de marchandises), la proportion d'établissements 'gagnants' c'est-à-dire ceux qui bénéficieraient d'une réduction de charges sociales plus importante que le montant de leur taxe carbone sur le fret.

**Tableau 1.3 : Pourcentage des établissements gagnants selon le secteur d'activité**

Activité	Nb etab.	Nb de salariés	% établis. gagnants
Industries des biens intermédiaires	12651	894797	37
Commerce de Gros des biens intermédiaires et récupération.	5998	176208	12
Industrie des biens de production	13994	864497	54
Commerce de Gros des biens de production	6937	219333	61
Industries agro alimentaires	5474	488580	24
Commerce de Gros des biens agro-alimentaires	3969	163385	12
Industrie des biens de consommation	13474	1083266	47
Vente par Correspondance et Com. de Gros des biens de consommation.	5502	251677	36
Entrepôts	1257	78834	19
TOTAL	69256	4220577	39

*Source: (Rizet, Cruz, et Tu Thi 2015)*

Sur l'ensemble des établissements correspondant au champ de l'enquête, 39% seraient bénéficiaires d'une telle 'fiscalité verte'. Les premiers secteurs bénéficiaires seraient ceux des biens de production : commerce de gros des biens de production (61% de bénéficiaires), suivi par les industries des biens de production (54%), c'est à dire des établissements à forte valeur ajoutée par emploi. A l'inverse les principaux contributeurs seraient les commerces de gros des biens intermédiaires et de la récupération (88% de contributeurs nets) et les commerces de gros des biens agro-alimentaires (88% également). Ainsi une telle fiscalité contribuerait non seulement à réduire les émissions de CO<sub>2</sub> et à favoriser l'emploi mais elle orienterait aussi l'activité vers les secteurs stratégiques que sont la production et le commerce des biens de production.

**.....et aussi des inconvénients**

Il existe aussi des inconvénients de la taxe carbone. En effet, la taxe carbone touche tous les acteurs économiques, donc, il est plus **difficile d'avoir une acceptabilité sociale**. En plus, les décideurs publics rencontrent toujours des difficultés pour déterminer le niveau de la taxe. En effet, si la taxe est trop faible, elle n'encourage pas forcément des agents économiques à changer leurs comportements. Mais à l'inverse, si la taxe carbone est trop élevée, dans certain secteur, il y aura le phénomène de **délocalisation** des entreprises vers les pays où soit aucune contrainte environnementale n'est imposée, soit le niveau de taxe est moins fort (phénomène "**fuite carbone**") surtout si une partie du revenu n'est pas redistribuées aux entreprises (Savy et Daude, 2008) ( De Perthuis et Delbosc, 2009). Cette délocalisation des entreprises entraine un accroissement des distances parcourues par produit. Donc, dans ce cas, il y a un doute sur l'efficacité environnementale de la taxe. D'autre part, les produits fortement intensifs en carbone peuvent être importés des pays où la contrainte environnementale est moins exigeante. Pour éviter les phénomènes de "fuite carbone" évoqués, certaines politiques commencent à proposer la mise en place d'une **taxe aux frontières** sur le contenu de carbone

des importations. Cette taxe aux frontières soulève des problèmes liée à la compatibilité d'une taxe sur les importations avec les règles du commerce international (Mirabel, 2010).

Une autre solution envisagée pour résoudre le phénomène de "fuite carbone" est d'appliquer le même niveau de taxe à tous les pays. Pourtant, il est **compliqué d'harmoniser** la taxe carbone ou le système de quotas d'émissions au niveau mondial.

#### *Taxe carbone dans le monde :*

En 2017, une vingtaine de pays avaient mis en place la taxe carbone avec succès. ([Annexe 1.1](#)). Historiquement, la première tentative pour introduire une tarification du carbone date du début des années 90 (Ellerman, Convery et De Perthuis 2010). Elle a pris la forme d'une communication de la Commission Européenne proposant d'instaurer une taxe harmonisée sur les émissions de CO<sub>2</sub> d'origine énergétique de l'industrie européenne. Cette proposition a été contrée par les pays comme l'Espagne, la Grèce et la Grande Bretagne (De Perthuis et Elbeze 2011). Pourtant, certains pays nordiques comme la Finlande, la Norvège et la Suède se sont engagés à mettre une taxation domestique du carbone. En 1990, la Finlande a été le premier pays à introduire la taxe carbone.

**Tableau 1.4: Evolution de la taxe carbone dans le temps**

Pays	Année de mise en place de la taxe	Taux standard de départ (€/tCO <sub>2</sub> )	Taux de la taxe carbone en 2017 (€/tCO <sub>2</sub> )
Finlande	1990	1.2	55
Pologne	1990		>1
Norvège	1991	43	31
Suède	1991	23	96
Danemark	1992	13	23
Slovénie	1996		17
Lettonie	2006		5
Estonie	2006		2
Suisse	2008	8	79
Colombie britannique	2008		21
Irlande	2010	15	20
Islande	2010		21
Liechtenstein	2008		79
Japon	2012		2
Royaume-Uni	2013		21
France	2014	7,5	31
Mexique	2014		1
Portugal	2015		8
Alberta	2017		14
Chili	2017		5
Afrique du sud	2017		8
Colombie	2017		5

Source:(Métivier et al. 2017)

## Fiscalité carbone en France

Après deux échecs en 2000 et 2009, la France a introduit en 2014 une composante carbone au sein des taxes intérieures de consommation des différents produits énergétiques : la Taxe Intérieure de Consommation sur les Produits Energétiques (TICPE) pour les produits pétroliers, la TICGN (Taxe Intérieure de Consommation sur le Gaz Naturel) et TICC (Taxe Intérieure de Consommation sur le Charbon). Ces taxes concernent les particuliers ainsi que les professionnels. Avec le montant initial de 7€/ tonne de CO<sub>2</sub>, ce taux de départ peut sembler relativement faible comparé à ce qui est fait chez les autres pays européens (Elbeze 2014)<sup>6</sup>. Néanmoins, le niveau de la composante carbone a ensuite été augmenté à 14,5 €/ tonne de CO<sub>2</sub> en 2015, à 22€/ tonne de CO<sub>2</sub> en 2016 et 30,5€/ tonne de CO<sub>2</sub> en 2017<sup>7</sup>. La réduction des émissions de CO<sub>2</sub> attendue grâce à cette mesure est estimée, à l'horizon 2017, à 1 millions de tonne dans le transport routier<sup>8</sup>. En se basant sur la valeur tutélaire du carbone définie dans le Rapport Quinet (Quinet 2008), le Gouvernement se fixe pour objectif d'atteindre une valeur de la tonne de CO<sub>2</sub> de 56 € en 2020 et 100€ en 2030<sup>9</sup>. Donc, la taxe carbone évolue selon la trajectoire suivante:

Tableau 1.5: Evolution de la taxe carbone en France sur la période 2014-2030

Année	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2030
Valeur de la tonne CO <sub>2</sub> (en €/ tCO <sub>2</sub> )	7	14,5	22	30,5	39	47,5	56	100

Source : L'article 32 de la loi de finances 2014 et la loi de finances rectificative pour 2015

Pourtant, dans le Plan Climat en 2017, le Ministre de la Transition Energétique et Solidaire estime qu'"un prix de 100€ par tonne de CO<sub>2</sub> d'ici 2030 est insuffisant pour placer le monde sur la trajectoire des 2°C" et il faut renforcer le prix du carbone<sup>10</sup>. Récemment, dans la loi de finance 2018, le gouvernement a décidé d'augmenter la taxe carbone, le montant de la taxe était fixé à 65,40 €/tCO<sub>2</sub> en 2020 et 86,20 €/tCO<sub>2</sub> en 2022. Dans le chapitre suivant, intitulé taxe carbone, nous construisons un scénario noté « PLF2018 » qui correspond au niveau de la taxe programmé dans la loi de finance de 2018.

### Le système d'échange de quotas d'émissions :

Afin de changer les comportements des agents économiques, les décideurs publics pourraient utiliser l'instrument économique comme la taxe carbone ou le système d'échange de quotas

<sup>6</sup> Les taux appliqués au départ de la taxe était de 23€/tCO<sub>2</sub> en Suède, 13€/tCO<sub>2</sub> au Danemark, 43€/tCO<sub>2</sub> en Norvège, 8€/tCO<sub>2</sub> en Suisse (Elbeze 2014)

<sup>7</sup> L'article 32 de la loi de Finances 2014

<sup>8</sup> (« Fiscalité carbone | Ministère de la Transition écologique et solidaire » 2017)

<sup>9</sup> "Le Gouvernement se fixe pour objectif, pour la composante carbone intégrée aux tarifs des taxes intérieures sur la consommation des produits énergétiques inscrites au tableau B du 1 de l'article 265 du code des douanes, d'atteindre une valeur de la tonne carbone de 56 € en 2020 et de 100 € en 2030 », article 1-VIII de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte n°2015-992 du 17 août 2015.

<sup>10</sup> (« Plan climat | Ministère de la Transition écologique et solidaire » 2017)

d'émission ou combiner ces deux outils. Comme nous présentons ci-dessus, la taxe carbone est basée sur le prix alors que le principe du système de quotas est basé sur les quantités.

***Fonctionnement :***

Le système d'échange de quotas d'émissions, également nommé le marché carbone ou le système de permis d'émissions négociables (Emissions Trading Schemes – ETS) est un mécanisme qui fixe des obligations de réduction d'émission aux participants du marché et leur distribue des quotas d'émission correspondant à ce plafond. Les participants peuvent acheter ou vendre des quotas<sup>11</sup>. Afin de diminuer ses émissions, chaque participant pourrait investir pour changer sa technologie, utiliser une autre énergie moins carbonée, améliorer son efficacité énergétique, aussi longtemps que ce coût de réduction de ses émissions est inférieur au prix du quota sur le marché. Au contraire, si son coût de réduction est plus élevé que le prix du quota, il préfère acheter des quotas sur le marché. Les participants qui réduisent leurs émissions au delà de leur quota pourraient aussi vendre leurs quotas non utilisés.

***Le système d'échange de quotas d'émission dans le monde :***

En 2017, au niveau mondial, il y a environ une quinzaine de juridictions qui ont mis en place un système de quotas d'émissions (**Annexe 1.1**). Nous résumons dans le tableau ci-dessous uniquement les systèmes d'échange de quotas d'émissions qui couvrent le transport.

**Tableau 1.6 : Système d'échange de quotas d'émission en 2017**

<b>Juridiction</b>	<b>Année de mise en œuvre</b>	<b>Prix en €/ tCO<sub>2</sub> en 2017</b>
Nouvelle Zélande	2008	11
Californie	2013	13
Québec	2013	13
Beijing	2013	7
Shenzhen	2013	4
Corée du Sud	2015	17
Ontario	2017	13

*Source : Institute for Climate Economics*

***L'EU ETS:***

***Est-ce qu'il faut inclure le transport routier dans le système d'échange de quotas d'émission ?***

---

<sup>11</sup> (« Panorama des prix explicites du carbone - I4CE » 2017)

En 2013, le transport est à l'origine de 26% des émissions de CO<sub>2</sub> de l'Union Européenne<sup>12</sup> et la route est essentiellement responsable de ces émissions, néanmoins, à l'heure actuelle le transport routier n'est pas encore couvert par le système européen d'échange de quotas d'émission. On constate qu'il existe d'autres systèmes d'échange de quotas d'émissions tels que le système d'échange en Californie, au Québec ou en Nouvelle Zélande, qui ont inclus le transport routier. Pourquoi l'Union Européenne ne veut pas encore introduire le transport routier dans l'ETS ? Dans le chapitre 4 du rapport "Exploring the EU ETS beyond 2020"(Afriat et al. 2015), les auteurs montrent que l'inclusion du transport routier dans le marché européen de quotas entraînerait des conséquences économiques.

### *Des difficultés se posent*

Comment trouver une articulation idéale entre les différents instruments économiques ? Pour mettre en place les deux outils: la taxe carbone et le système d'échange de quotas d'émissions, les décideurs publics doivent répondre aussi aux questions concernant l'articulation entre ces outils. Par exemple, les établissements qui sont déjà couverts par le système d'échange de quotas d'émission doivent ils payer aussi la taxe carbone ? Sous quelles conditions y aura-t-il des exonérations pour ces établissements pour éviter la double taxation ?

Actuellement, il n'y a qu'une partie du secteur de transport (le transport aérien) qui est concernée ; le transport routier n'est pas encore inclus dans le marché de quotas d'émission européen.

### **1.1.2.Favoriser les modes non routiers: transport combiné, autoroute maritime et ferroviaire**

#### ***De la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> .....***

Grâce aux facteurs favorables comme la flexibilité (porte à porte), le délai de transit plus court, moins de manutention et la souplesse sur les distances courtes ou moyennes, le transport routier de marchandise reste fortement jusqu'à maintenant le mode dominant. En France, sa part de marché est de **87,1%** des tonnes-kilomètres intérieures en 2015<sup>13</sup>. Pourtant, ce fort développement du transport routier de fret entraîne aussi des conséquences sur notre environnement comme les émissions de CO<sub>2</sub>. En 2015, les émissions de GES de la route sont de **125,5**<sup>14</sup> millions de tonnes équivalents CO<sub>2</sub>, donc, elles représentent près de 96% des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur des transports.

Face à cette situation et dans la perspective d'un développement durable, en termes politiques, le transfert modal (de la route vers des modes alternatifs) est considéré comme la mesure qui permet de réduire de façon significative les émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur des transports. Pourtant, une des difficultés du transport de marchandises provient de la diversité des types de clients, des marchandises à transporter, des destinations .... Donc, il est difficile de trouver une solution unique de transport et un seul système. Chaque mode de transport présente des forces

---

<sup>12</sup> Chiffre clés du climat France et monde-SOeS-2017

<sup>13</sup> CCTN en 2016

<sup>14</sup> SOeS ; CCTN 2016 d'après Citepa - rapport Secten mai 2016

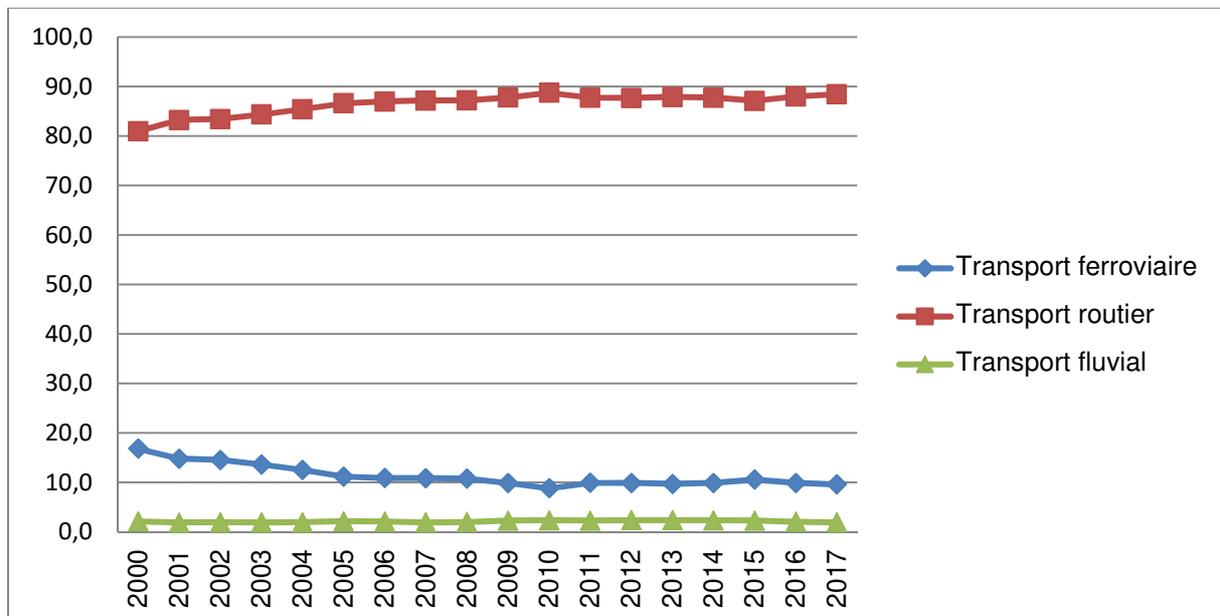
et faiblesse propres. C'est pourquoi le développement des modes alternatifs à la route est pertinent seulement sur quelques créneaux ou secteurs. À l'échelle européenne, on peut réduire les émissions de CO<sub>2</sub> par le report du mode routier poids lourds sur le mode ferroviaire ou fluvial, à l'échelle mondiale, c'est le report de l'aérien vers le maritime. Le rapport de (Savy et Daude 2008) a évalué le potentiel de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de cette mesure. D'après eux, pour la France, le report d'une tonne-kilomètre permet d'économiser 119,64 g de CO<sub>2</sub>, soit une réduction de 95 % (hors décompte des trajets terminaux routiers). Pour économiser une tonne de CO<sub>2</sub>, il faudrait donc reporter environ 8 000 tonnes kilomètres du mode routier sur le mode ferroviaire. Ainsi, en France, un report modal de 10 % du mode routier vers le mode ferroviaire sur l'ensemble du territoire national – représentant un quasi-doublement du trafic ferroviaire de marchandises – permettrait d'économiser environ 3 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>.

Non seulement grâce au gain des émissions de CO<sub>2</sub> mais aussi à la réduction de la congestion et à l'amélioration de la sécurité routière, le transfert modal a été envisagé par la politique. La loi Grenelle 1 a affirmé l'objectif de faire évoluer la part modale du non routier et non aérien de 14% à 25% à l'horizon 2022.

Bien que le report modal ait eu des conditions favorables pour se développer pourtant, son évolution a été contraire à notre attente. La part modale de l'ensemble ferroviaire plus fluvial a diminué au lieu d'augmenter. Le graphique ci-dessous montre l'évolution des parts modales pour la période 2000-2017.

Figure 1.1: Evolution des parts modales en France entre 2000 et 2017

En % des tonnes.kilomètres



Source : Graphique réalisé par l'auteur à partir de Comptes Transport en 2017

D'après les Comptes Transports en 2017, le routier occupe 89% du transport terrestre hors oléoducs, 9,8% pour transport ferroviaire et celle du transport fluvial a reculé à 1,8 % en

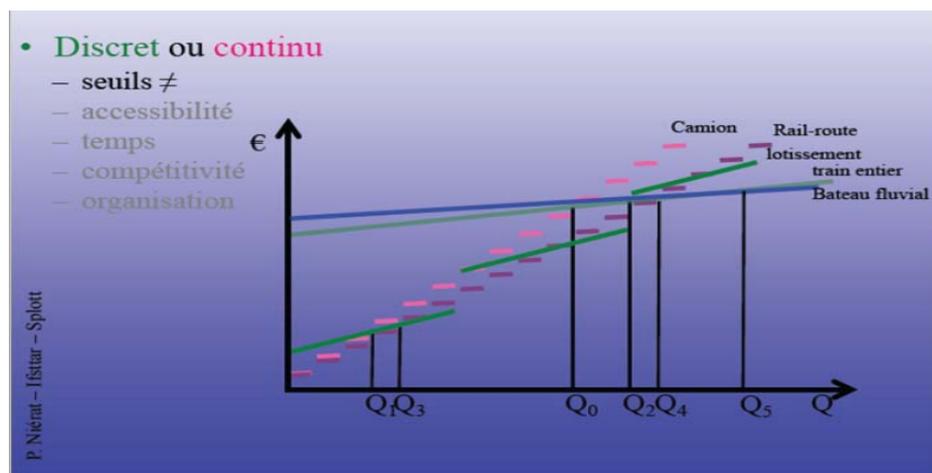
2017. Entre 2000 et 2013, le trafic de fret ferroviaire a chuté fortement, passant de 16,8% en 2000 à 9,9% en 2011. Depuis, la part du transport ferroviaire reste stable à ce niveau. Du côté du transport fluvial, sa part a légèrement progressé entre 2006 et 2010, passant de 2,1 % à 2,4%, elle est quasi stable à ce niveau jusqu'à 2015, elle a baissé en 2016 et 2017 pour la raison de la baisse structurelle du transport de combustibles minéraux. On constate bien que les objectifs fixés en matière de report modal dans la loi Grenelle 2009 sont loin d'être atteints à ce jour. La domination du transport routier s'est accentuée ces dernières années.

Quelles sont les raisons qui expliquent ces tendances ?

*.....aux difficultés rencontrées*

Il y a plusieurs raisons qui expliquent cette tendance. Premièrement, l'étude de (Nierat 2011) nous explique que les causes qui freinent le développement du report modal ne sont pas totalement un problème de service : ce sont aussi les problèmes concernant les caractéristiques techniques et morphologiques très différentes entre les réseaux. L'un est continu, l'autre est discret. La route peut desservir tout endroit, alors que le ferroviaire ne dessert, comme le fluvial que quelques destinations. Ceci va avoir des conséquences sur les différents registres. Il existe des seuils de capacité différents selon les réseaux. Donc, selon la quantité produits à transporter, pour les chargeurs, les solutions intéressantes ne sont pas les mêmes. Par exemple, dans le schéma ci dessous, selon la quantité expédiée  $Q$ , c'est la route ou le train entier qui est la solution la moins chère. On constate qu'au-delà du seuil  $Q_0$ , l'avantage est au chemin de fer. Ce seuil dépend du parcours, des conditions d'acheminement fer et route, du matériel utilisé, des réglementations... Il varie dans le temps. Les entreprises dont les échanges sont plus modestes peuvent toujours recourir au train entier, même si elles ne saturent pas la capacité de transport. Mais en deçà du seuil  $Q_0$ , le transport routier est plus attractif.

Figure 1.2 : Relation entre coût de transport et quantité expédiée selon le mode



Source : (Nierat 2011)

Cette tendance est expliquée d'autre part par le fait que l'outil de production ferroviaire n'a pas su s'adapter à une demande de plus en plus exigeante et diversifiée des chargeurs tandis que la route s'imposait par sa souplesse et l'amélioration continue de ses performances (Zembri 2004). Donc, actuellement le fret ferroviaire ne satisfait pleinement ni les chargeurs ni les

opérateurs de transport de fret. Le report modal reste difficile puisque 80% des marchandises transportées en France par la route le sont dans un rayon de moins de 300 kilomètres lorsque la pertinence du mode ferroviaire et fluvial se situe plutôt au-delà. D'autre part, la plupart des chargeurs montrent leurs difficultés à articuler les modes, leurs insatisfactions de la qualité des modes alternatifs à la route ainsi que de leurs prix. Si le report modal est une des mesures de réduction des émissions CO<sub>2</sub> qui est envisagée par les décideurs politiques, pourtant, pour le transport de marchandise, le report modal se fait vers la route et non l'inverse.

## 1.2. Les mesures visant aux changements techniques

Afin de réduire les émissions de GES, au lieu d'utiliser le gazole, on pourrait utiliser les autres énergies moins carbonées ; par exemple l'électricité pour des véhicules électriques fonctionnant avec des batteries ou des poids lourds hybrides captant le courant électrique sur l'infrastructure au moyen de pantographes, ou encore le gaz naturel de véhicule. Les chapitres suivants de cette thèse analysent ces nouveaux systèmes envisagés sous les différents points de vue : transporteurs, chargeurs, Etat et environnement.

## 1.3. Méthodologie pour l'analyse des mesures de réduction des émissions de GES du fret

Notre analyse dans ce premier chapitre montre que les mesures de politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) du transport routier de marchandise sont très nombreuses. Chaque mesure a ses propres avantages ainsi que ses inconvénients. L'objet de cette thèse est de voir quelles sont les bonnes mesures de réduction des émissions de GES du transport de fret, c'est-à-dire celles qui permettent de réduire les émissions de GES au moindre coût pour la collectivité. Selon les données disponibles, dans les chapitres suivants, nous traitons notamment de trois mesures: augmentation de la taxe carbone, véhicules électriques pour le transport urbain de fret et réduction de la fréquence d'envoi par les chargeurs. Pour comparer le coût économique d'une tonne CO<sub>2</sub> évitée par ces trois mesures, nous appliquons la même méthodologie et utilisons les mêmes données.

**-Méthode de calcul des émissions de CO<sub>2</sub> :** Dans les chapitres suivants, nous utilisons les facteurs d'émission de CO<sub>2</sub> dits "**du puits à la roue**"(en anglais « from well to wheel » WW). Autrement dit, le calcul des émissions de CO<sub>2</sub> prend en compte les quantités émises lors de l'utilisation des moyens de transport et lors de la phase amont de production des sources d'énergie<sup>15</sup>. Cette méthode additionne les émissions de CO<sub>2</sub> "du puits au réservoir" et les émissions CO<sub>2</sub> "du réservoir à la roue" :

- "**du puits au réservoir**" : les émissions CO<sub>2</sub> pour produire l'énergie et l'apporter jusqu'au mode de transport (par exemple électricité, carburants fossiles liquides, biocarburants. ...);

- "**du réservoir à la roue**" : les émissions de CO<sub>2</sub> du ou des modes pendant le transport.

---

<sup>15</sup> Information CO<sub>2</sub> des prestations de transport : une valorisation des transports les plus respectueux de l'environnement -2012

**- Nouveaux facteurs d'émission de CO<sub>2</sub> équivalents (CO<sub>2</sub>e)**

Pour aller plus loin dans la responsabilisation des transporteurs et des chargeurs quant à la maîtrise des émissions de gaz à effet de serre, au-delà des efforts sur le seul dioxyde de carbone et ainsi harmoniser les pratiques d'information entre transporteurs et chargeurs au niveau européen, depuis le 1er juin 2017<sup>16</sup>, l'information que le transporteur doit communiquer à son client sur les émissions de sa prestation de transport porte **non seulement sur la quantité de CO<sub>2</sub> mais** aussi sur les autres gaz à effet de serre (**GES**) principaux. La mise en place de ce nouveau décret a modifié aussi les valeurs des facteurs d'émission des sources d'énergie utilisées par les modes de transport. Le tableau suivant montre le changement des valeurs des facteurs d'émission.

**Tableau 1.7: Facteurs d'émission des différentes sources d'énergie**

	Unité de mesure de la quantité de source d'énergie	Facteur d'émission (kg de CO <sub>2</sub> ou de CO <sub>2</sub> e par unité de mesure de la quantité de source d'énergie)					
		Arrêté du 10 avril 2012			Arrêté du 26 avril 2017		
		Phase amont	Phase de fonctionnement	Total	Phase amont	Phase de fonctionnement	Total
Gazole	Litre	0,58	2,49	3,07	0,66	2,51	3,17
Electricité	kWh	0,053	0,00	0,053	0,048	0,00	0,048
Kérosène	Litre	0,48	2,52	3,00	0,53	2,52	3,05
Fioul lourd (HFO)	kg	0,46	3,12	3,58	0,50	3,14	3,64

*Source: Arrêté du 10 avril 2012, Arrêté du 26 avril 2017*

Dans cette thèse, pour quantifier des émissions de GES, nous utilisons les nouveaux facteurs d'émission : 3,17 kgCO<sub>2</sub>e par litre pour le gazole et 0,048 kgCO<sub>2</sub>e par kWh pour l'électricité consommée en France métropolitaine. Nous supposons que ces facteurs d'émission restent inchangés dans le futur.

**-Méthode de calcul du coût économique pour la collectivité**

Sous l'hypothèse que les mesures politiques de réduction des émissions de GES du transport de fret routier seront mise en place, nous exposons dans les chapitres suivants notre estimation de la variation du surplus économique de la collectivité sous l'impact de ces mesures

<sup>16</sup> Date d'entrée en vigueur du **Décret n° 2017-639 du 26 avril 2017**, Source: (Information GES des prestations de transports- Guide méthodologique» 2017)- Version actualisée suite à l'article 67 de la loi n° 2015-992

politiques. Pour cela, nous tenons compte de tous les coûts réels supportés par les acteurs économiques (les chargeurs, les transporteurs, l'Etat) ainsi que des coûts des externalités.

Les externalités sont utilisées pour décrire *les situations où les décisions de consommation ou de production d'un agent affectent directement la satisfaction ou le profit d'autres agents, sans que le marché évalue et fasse payer ou rétribue l'agent pour cette interaction*, (Salanié 1998), (Picard 2007). Autrement dit, comme expliqué dans (MEDDE 2013), ces coûts sont externes au sens où le système de prix payé par les agents ne rend pas compte des coûts pour la collectivité. La question se pose : Quelles sont ces externalités dans le cas du transport routier de marchandises ? Il y a plusieurs discussions sur ce sujet. Dans cette thèse, les externalités prises en compte sont la pollution locale, le bruit, le risque d'accident (insécurité) et la congestion routière. Pour les valoriser, il existe plusieurs sources de données comme le rapport (Quinet 2013), le Handbook Européen (Ricardo 2014), les Comptes des transports en 2011 (MEDDE 2013) et récemment le rapport (Duron 2018). Chaque source de données a ses propres avantages. Nos analyses portent sur le trafic de fret routier de la France pour la période 2030-2050, nous prenons le coût marginal de la pollution locale et de la pollution sonore du rapport (Quinet 2013) et la valeur du coût marginal de la congestion ainsi que l'insécurité dans le rapport (MEDDE 2013). Nous faisons aussi évoluer la valeur de ces externalités dans le temps en suivant les recommandations de (Quinet 2013).

Dans un souci de simplification, nous supposons que tous les coûts liés à l'usage de l'infrastructure comme les coûts d'entretien et d'exploitation de la voirie sont payés totalement par l'Etat.

Puisque notre analyse porte sur la période 2030-2050, tous les coûts dans nos calculs sont actualisés avec un **taux d'actualisation de 4,5%** en incluant un **coût d'opportunité des fonds publics (COFP) de 1,2 (soit un coût majoré de 20%)** conformément aux recommandations du rapport (Quinet 2013).

### **- Méthode de calcul du coût d'abattement du CO<sub>2</sub>**

Comme indiqué, notre objectif est d'identifier quelles mesures politiques permettent de réduire des émissions de GES au moindre coût pour la collectivité. Pour cela, nous calculons le coût d'abattement du CO<sub>2e</sub> ou coût économique pour une tonne de CO<sub>2e</sub> évitée. Sous l'hypothèse que telle ou telle mesure politique de réduction des émissions de GES sera mise en place, nous estimons d'abord la variation de bien être des différents acteurs économiques sous l'impact de cette mesure politique. Nous quantifions ensuite la quantité des émissions de GES avant et après la mise en place de cette mesure politique. Le coût d'abattement par tonne est le rapport entre le coût économique pour la société et la quantité des émissions de GES économisée.

Selon ce critère, une mesure politique est meilleure que les autres si elle a un coût d'abattement de la tonne de CO<sub>2e</sub> plus faible que les autres. Pour bien évaluer une politique, dans notre chapitre 5, notre analyse porte non seulement sur ce coût d'abattement du CO<sub>2e</sub> mais aussi sur la quantité de GES évitée.

**- Données de trafic**

Les trafics du transport de fret routier dans la période 2030-2050 dans cette thèse sont construits en partant principalement des données du rapport du Commissariat Général au Développement Durable - CGDD (Pochez 2016) sur la prévision de la demande de transport en 2030-2050. Nous utilisons aussi les données de l'enquête Envoi-Chargeur-Opérateur (ECHO) (Guilbault 2008), en particulier pour l'analyse de la fréquence des envois, chapitre 4.

Le coût marginal de la congestion est très variable selon les sources et ce coût occupe une partie importante dans le coût total des externalités. Donc, nous faisons des tests de sensibilité sur le coût de la congestion.

**-Enquête Envois-Chargeurs-Opérateurs :**

Il existe différentes bases de données sur le transport de marchandises, par exemple, l'enquête sur le transport routier de marchandises (TRM), les enquêtes de transport de marchandises en ville (TMV), etc. Pourtant, les informations fournies par ces enquêtes sont limitées aux mobilités des marchandises par la route ou à l'intérieur des agglomérations enquêtées. Pour avoir une vision plus globale, les analyses de la fréquence d'envoi du chapitre 4 se basent sur les résultats obtenus à partir de l'enquête ECHO de 2004-2005. C'est une enquête nationale qui nous permet de suivre **10462** envois depuis l'expéditeur jusqu'au destinataire. 2935 établissements qui ont plus de 10 salariés dans le secteur industriel (hors matériaux de construction) et du commerce de gros ont été interrogés par ECHO. Plus en détail, grâce aux données de cette enquête, nous sommes capables de connaître finement toutes les opérations effectuées d'un bout à l'autre de la chaîne, du chargeur jusqu'au destinataire final en passant par tous les intermédiaires, transporteurs et logisticiens, ainsi que la nature des systèmes de production. Cette enquête ECHO fournit en outre et notamment les éléments suffisants pour estimer les émissions de CO<sub>2</sub> de chaque envoi.

## Chapitre 2 : Taxe Carbone

### 2.1. Présentation des scénarios

Comme rappelé dans le premier chapitre, la France a introduit en 2014 le dispositif de la taxe carbone<sup>17</sup> et le Gouvernement se fixait pour objectif d'atteindre une valeur de la tonne de CO<sub>2</sub> de **56 € en 2020** et **100€ en 2030**. Ce montant aurait-il permis d'atteindre l'objectif du facteur 4 ? Récemment, selon le rapport du Conseil d'Orientation des Infrastructures (Duron 2018), les utilisateurs de Poids lourds et de VUL ne paient pas le coût marginal social qu'ils engendrent sauf sur le réseau routier national concédé. Alors, si l'Etat maintient le niveau actuel de la taxe carbone, ce niveau est-il suffisant pour compenser totalement les coûts externes du transport routier de marchandises ? Quel serait le niveau "optimal" de la taxe carbone pour la collectivité ? C'est pour tenter de répondre à cette question que, dans ce chapitre, nous quantifions la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> du transport de fret obtenue grâce à la taxe carbone ainsi que son coût pour la collectivité dans quatre scénarios décrits brièvement ci-dessous : le scénario de référence, le scénario « PLF2018 », le scénario « taxe optimale » et le scénario « taxe carbone quadruplée ».

**Scénario de référence** : c'est le scénario où le montant de la taxe carbone évolue au fil de l'eau, comme indiqué dans **la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte**.

**Scénario PLF2018** : c'est le scénario où le montant de la taxe carbone correspond à la **loi de finance 2018** et où la tendance de 2018-2022 est prolongée jusqu'en 2050. Plus en détail, le projet de la loi de finance 2018 prévoit un prix de 44,60 € pour une tonne de CO<sub>2</sub> en 2018 et la taxe carbone augmenterait ensuite de 10,40 euros chaque année pour atteindre 86 €/tCO<sub>2</sub> en 2022<sup>18</sup>.

**Scénario taxe optimale** : correspond au niveau de la taxe carbone "optimale", autrement dit, dans ce scénario, le transport routier de marchandises **supporte exactement le coût externe** qu'il génère.

---

<sup>17</sup> La définition, les avantages ainsi que les inconvénients de cette taxe ont été présentés dans le chapitre 1 de cette thèse.

<sup>18</sup> Mission "Écologie, développement et mobilité durables" - Programmes 113, 181, 174, 345, 217 - CAS "Transition énergétique", "Aides à l'acquisition de véhicules propres" et "Financement des aides aux collectivités pour l'électrification rurales (FACé)" - M. Jean-François HUSSON-ce rapport est disponible sur le site <https://www.senat.fr/commission/fin/pjlf2018/np/np10a/np10a.html>

**Scénario taxe quadruplée** : dans ce scénario, le montant de la taxe carbone est **4 fois plus élevé** que dans le scénario de référence.

Ce chapitre s'intéresse au coût économique de la taxe carbone appliquée au transport routier de marchandises en France pendant la période 2030-2050. Une question notable qui se pose est la suivante : les véhicules français seront-ils les seuls concernés par cette taxe, ou bien faut-il également considérer les véhicules étrangers ? Selon nous, il faut prendre en compte tous les véhicules qui circulent sur le territoire français, car ils émettent des externalités comme des émissions de CO<sub>2</sub>, des pollutions locales, du bruit... sur le territoire national. Nous posons (en outre) l'hypothèse selon laquelle les carburants achetés en France sont consommés par des véhicules qui circulent sur le territoire.

Nous notons aussi que ces véhicules pourraient acheter le gazole à l'étranger où le montant de la taxe carbone peut être plus ou moins élevé que celui appliqué en France. En réalité, cette différence du niveau de la taxe aura des impacts sur le prix payé par le transporteur. Pour éviter de prendre en compte cet impact sur le trafic, nous supposons que la différence entre le niveau des taxes françaises et celles des pays voisins n'est pas suffisamment importante pour que les transporteurs décident d'acheter les carburants à l'étranger.

## **2.2. Objectif du chapitre**

La mise en place de la taxe carbone permet de réduire les émissions de GES. Pourtant, l'augmentation de la taxe pourrait entraîner aussi une perte de surplus pour la collectivité. Est-ce le cas pour le transport routier de marchandises ?

L'objectif de ce chapitre consiste à calculer le coût économique pour la collectivité d'une tonne de CO<sub>2</sub> évitée en haussant le niveau de la taxe carbone à celui de chacun des quatre scénarios évoqués. Méthode et calcul de ce coût économique sont décrits dans la section suivante.

## **2.3. Méthodologie**

Dans ce chapitre, nous allons calculer le coût économique pour la collectivité si on réduit ses émissions d'une tonne de CO<sub>2</sub> via une taxe carbone. Cette approche n'est pas récente. Nous la trouvons dans les travaux (David-Nozay et Girault, 1999), (Darbéra 2010), (Rizet 2017). A la différence des travaux existants, ce chapitre est orienté vers le coût économique d'une tonne de CO<sub>2</sub> évitée pour la période 2030-2050. Nous prenons en compte aussi la mise en place du nouveau facteur d'émission de GES (ADEME 2017) ainsi que les recommandations du rapport (Quinet 2013).

### **Méthode de calcul du coût économique de la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> du transport de fret via une taxe carbone**

Pour juger de l'intérêt de la taxe carbone, il convient de comparer le coût économique de la mise en place de cette taxe au bénéfice attendu de la réduction de consommation de carburant. Une politique qui vise à réduire la consommation d'un produit a pour coût économique la

perte du « surplus du consommateur » que représente la différence entre l'utilité que le consommateur retire de cette consommation et le prix qu'il paye. C'est en particulier le cas pour le coût d'une taxe sur le carburant du transport de marchandises. Nous nous proposons ici de rapporter ce coût à la quantité d'émission qu'une telle taxe permettrait de réduire, pour estimer le coût économique d'une telle mesure, en € par tonne de GES évitée.

### Le coût pour la collectivité d'une taxe additionnelle sur le gazole

Pour cela, nous reprenons ci-dessous le schéma de (Darbéra, 2010) dans lequel la fonction de demande de carburant selon le prix est figurée par une droite (ce qui correspond à l'hypothèse que le prix international du pétrole n'est pas influencé par la consommation de gazole en France). Le prix du gazole avant la nouvelle taxe  $P_0$  est la somme de : C le coût de production (pétrole brut, raffinage et distribution) et de taxe T (Taxe Intérieure sur la Consommation de Produits Energétiques) :

$$P_0 = C + T \text{ où } T \text{ est la TIPCE}$$

Quand on met en place une taxe additionnelle  $\Delta t$ , le prix du gazole augmente de  $P_0$  à  $P_1$  et la consommation de gazole diminue de  $\Delta Q$ , soit de  $Q_0$  à  $Q_1$ . On a :

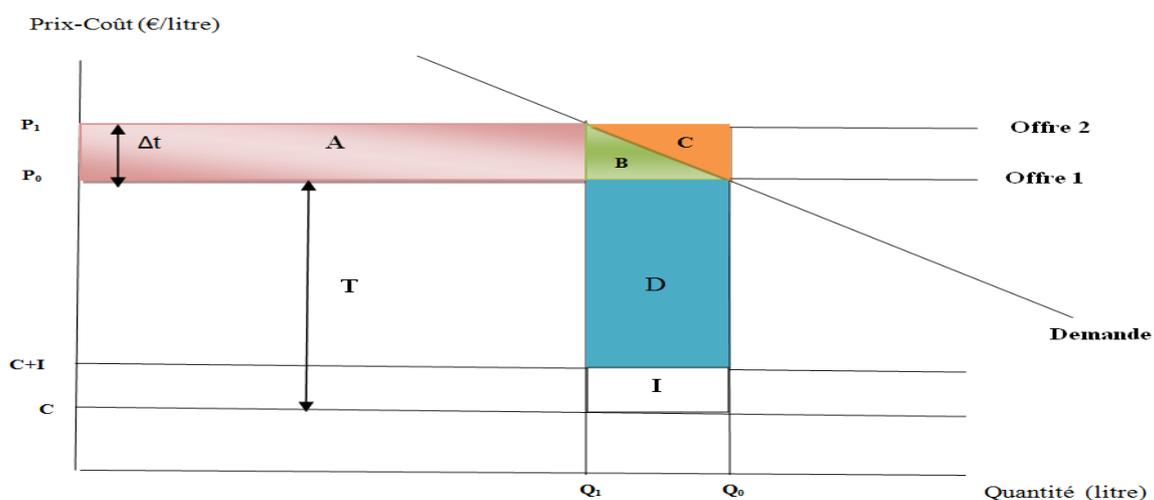
$$\Delta Q = Q_1 - Q_0 < 0$$

Les taxes perçues par l'Etat vont augmenter d'un montant qui correspond à la recette de la nouvelle taxe figurée dans la figure par la surface A :

$$A = (P_1 - P_0) * Q_1 = \Delta t * Q_1 \text{ avec } \Delta t = (P_1 - P_0) > 0$$

La baisse de la consommation du gazole entraîne aussi une réduction des recettes fiscales de l'Etat qui correspond dans la figure 2 aux surfaces D+I, soit  $T * (Q_1 - Q_0) = T * \Delta Q$  avec  $\Delta Q = (Q_1 - Q_0) < 0$ , où I est le coût d'entretien des routes.

**Figure 1.1: Coût pour la collectivité d'une taxe additionnelle sur le carburant**



Source: (d'après Darbéra, 2010)

La surface I est, dans la réduction de recettes de l'Etat, une partie qui compense les dépenses publiques directement liées au trafic. Donc, quand le trafic diminue, ce montant n'est plus dépensé. C'est pourquoi, la perte nette de l'Etat liée à la diminution de la consommation du gazole n'est que D. Le solde de l'**Etat** s'écrit:

$$A+D = \Delta t * Q_1 + (T-I)*\Delta Q = \Delta T*(Q_0 + \Delta Q) + (T-I)*\Delta Q$$

Pour les chargeurs et les transporteurs, l'augmentation du prix fait diminuer leur surplus économique. Leur perte est -(A+B) dont A est le paiement supplémentaire de la taxe carbone, somme qui sera transférée à l'Etat, et B est la perte de surplus économique liée au renoncement à transporter à cause de l'augmentation du prix. La perte totale pour les **chargeurs** ainsi que les **transporteurs** est:

$$-[A+B] = -[Q_1 + Q_0] * \Delta T * 1/2 = -[(\Delta T*(Q_0 + \Delta Q/2))]$$

Le total du surplus de l'Etat, des chargeurs et des transporteurs est :

$$\begin{aligned} [A+D]-[A+B] &= \Delta T*(Q_0 + \Delta Q) + (T-I)*\Delta Q - [(\Delta T*(Q_0 + \Delta Q/2))] \\ &= \Delta T* Q_0 + \Delta T* \Delta Q + (T-I)*\Delta Q - \Delta T* Q_0 - \Delta T*\Delta Q/2 \\ &= (T-I + \Delta T/2)*\Delta Q \end{aligned}$$

La baisse de consommation du gazole via la taxe carbone permet aussi de réduire des externalités. Si E est le coût des externalités du transport de fret, ce gain économique des externalités est:  $-\Delta Q * E$

Le solde pour la collectivité de la mise en place de la nouvelle taxe sur le carburant du transport de marchandises est alors :

$$(T-I + \Delta T/2)*\Delta Q - \Delta Q * E = \Delta Q*(T-E-I+\Delta T/2) (*)$$

Avec  $\Delta Q = Q_1 - Q_0 < 0$  ; le solde sera positif si le deuxième terme du produit est (aussi) négatif

$$\Delta T/2 + (T-E-I) < 0 \text{ soit } \Delta T/2 < ((E+I)-T) \text{ ou } \Delta T < 2*(E+I-T)$$

En rappelant que E est le coût des externalités (pollution locale, bruit, accident et congestion), I est le coût de l'entretien des routes, T est le niveau de TICPE avant d'imposition de la taxe carbone.

Pour que le solde de la collectivité ou coût économique d'une taxe additionnelle soit positif, il faut que cette nouvelle taxe soit inférieure à deux fois la différence entre la somme du coût externe et le coût d'infrastructure et le niveau antérieur de la taxe. Autrement dit, si la somme du coût externe E et le coût d'entretien des route I (qui) est supérieur au niveau de la taxe existante T, une taxe additionnelle aura un solde positif car elle réduit le coût externe de la consommation de gazole d'un montant supérieur à la perte de recette de l'Etat. Si au contraire cette somme est inférieure à la taxe T, alors seule une réduction de taxe ( $\Delta T < 0$ ) permet

d'obtenir un solde positif pour la collectivité. L'ajout d'une nouvelle taxe additionnelle ( $\Delta T > 0$ ) aura un solde négatif c'est-à-dire un coût pour la collectivité.

Notons que le solde pour la collectivité dans la formule (\*) ci-dessus est le solde qui n'a pas encore été actualisé. Pour estimer le coût d'abattement d'une tonne de CO<sub>2</sub> évitée pendant la période 2030-2050, nous allons ensuite actualiser, pour chaque année, le solde l'Etat, la perte du surplus des chargeurs et transporteurs et le gain des externalités avec un **taux d'actualisation de 4,5%** en incluant un **coût d'opportunité des fonds publics (COFP) de 1,2** conformément aux recommandations du rapport (Quinet 2013). Ensuite, nous calculons la somme de ces coûts économiques pour obtenir le coût économique actualisé de la collectivité.

## 2.4. Hypothèses

### *Hypothèses concernant le trafic routier de marchandises à l'horizon 2050*

Dans le **scénario de référence**, nous faisons des hypothèses sur le trafic routier de marchandises. Nous partons d'abord des données sur les véhicules.kilomètres des poids lourds (PL) et véhicules utilitaires légers (VUL) d'après le bilan de la circulation 2016 (CCTN 2016). Nous appliquons un taux de croissance annuel moyen (TCAM) de 1,3 % sur la période **2012-2050** pour les véhicules.kilomètres des PL ainsi que des VUL comme indiqué dans le rapport (Pochez, 2016) pour faire évoluer le trafic. Remarquons que le total des véhicules.kilomètres des VUL en 2012 est de 92,9 milliards de kilomètres, alors que seulement 14% d'entre eux sont effectués pour le motif transport de marchandises (Ovieve, 2014). Notre résultat sur le trafic est le suivant :

**Tableau 2.1: Trafic routier de marchandises à l'horizon 2050**

*En milliards de véhicules.kilomètres*

	<b>2012</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
Poids lourd	27,1	34,0	38,6	43,8
VUL	13,0	16,3	18,5	21,0
<b>Total</b>	<b>40,1</b>	<b>50,3</b>	<b>57,1</b>	<b>64,8</b>

*Source: Calcul de l'auteur à partir du bilan de la circulation 2016 (CCTN 2016) et de (Pochez 2016)*

### *Hypothèses concernant le prix du gazole*

Selon le scénario "Current Policies" de l'Agence Internationale de l'énergie, le prix du pétrole a un taux de croissance moyen annuel de 7% dans la période 2015-2030 et de 1% après 2030. Nous faisons l'hypothèse que le prix global du carburant gazole (hors taxe carbone et TVA) sera 1,07 (€/litre) en 2030 et 1,37 (€/litre) en 2050 comme l'hypothèse du rapport CGDD 2017 (Fragnolet 2017)

**Tableau 2.2 : Les hypothèses concernant le prix du gazole (hors taxe carbone et TVA)**

*En €/litre*

<b>PL diesel</b>	<b>2030</b>	<b>2050</b>
Prix Hors Taxes	1,07	1,37
TICPE	0,43	0,43
Prix du gazole (hors taxe carbone)	1,50	1,80
<b>VUL diesel</b>	<b>2030</b>	<b>2050</b>
Prix Hors Taxes	1,07	1,37
TICPE	0,48	0,48
Prix du gazole (hors taxe carbone)	1,55	1,85

*Source : (Fragnot 2017)*

***Hypothèses concernant la consommation unitaire de carburant***

Concernant la consommation unitaire de carburant des PL, nous reprenons l’hypothèse du rapport (Pochez 2016) : Nous supposons que la consommation unitaire des PL va diminuer de 33,9 l/100 km en 2012 à 29,7 l/100km en 2030 et 26,6 l/100km en 2050. Pour les VUL, nous prenons la consommation moyenne de 16 l/100km qui est indiquée dans le guide méthodologique 2017. A partir des données du bilan de la circulation 2016, nous avons calculé le taux de croissance annuel moyen (TCAM) de la consommation unitaire moyenne des VUL. En supposant que les tendances observées de 2004 à 2016 se poursuivent et en appliquant ce taux de croissance annuel, nous estimons la consommation unitaire de carburant des VUL sur la période analysée. Le résultat est présenté dans le tableau suivant:

**Tableau 2.3 : Consommation unitaire de gazole des PL et des VUL à l’horizon 2050**

	<b>2030</b>	<b>2050</b>
Consommation unitaire du PL (l/100km)	29,70	26,60
Consommation unitaire du VUL (l/100km)	14,85	13,24

*Source: Calcul de l’auteur à partir de Pochez (2016), bilan de la circulation et le guide méthodologique*

Nous considérons la même hypothèse sur la consommation unitaire des véhicules dans les 4 scénarios.

***Hypothèses concernant les coûts externes :***

Les externalités prises en compte dans notre calcul sont la pollution locale, la pollution sonore, la congestion, et les accidents. Les données pour les coûts marginaux de ces externalités proviennent du rapport sur « Les comptes des transports en 2011 » (MEDDE ; 2013) et du rapport (Quinet 2013). Elles sont monétarisées et évoluent dans le temps selon les recommandations du rapport Quinet.

*\* Hypothèse du coût marginal unitaire pour la pollution sonore*

Nous prenons les données du coût marginal en 2010 de la pollution sonore des poids lourds ainsi que des VUL selon les différents types d'infrastructures dans le rapport Quinet 2013 (Annexe 2.1), en prenant en compte la répartition du trafic (Annexe 2.2) et nous obtenons donc le coût marginal du bruit en 2010 (Annexe 2.3). Ensuite, nous faisons évoluer ces coûts dans le temps comme le PIB par tête (+1,3% par an). Le résultat est présenté dans le tableau suivant.

**Tableau 2.4: Coût marginal de la pollution sonore sur la période 2030-2050**

*En c€/véh.km*

	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
<b>Poids lourd</b>	0,23	0,26	0,30
<b>VUL</b>	0,07	0,08	0,09

*Source: Calcul de l'auteur à partir de (Quinet 2013)*

*\* Hypothèse de coût marginal unitaire de la pollution locale*

Les coûts marginaux de la pollution locale au total pour les poids lourds et les VUL diesel en 2010 sont calculés à partir des données sur la répartition du trafic (Annexe 2.2), et le coût marginal de la pollution locale selon les zones géographiques provient du rapport Quinet 2013 (Annexe 2.4). L'évolution de ces valeurs est évaluée en prenant en compte d'une part la croissance du PIB par tête, d'autre part l'amélioration des émissions individuelles (- 6% par an sur 2010-2020) comme indiqué dans le rapport Quinet. Le résultat est résumé dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 2.5: Coût marginal de pollution locale**

*En c€/véh.km*

	<b>2010</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
<b>Poids lourd</b>	15,7	9,6	10,9	12,4	14,1
<b>VUL</b>	5,4	3,3	3,8	4,3	4,9

*Source: Calcul de l'auteur à partir de (Quinet 2013)*

*\* Hypothèse du coût marginal unitaire de congestion*

Pour évaluer ce coût, nous utilisons les données sur le coût marginal unitaire de congestion routière en 2015 fournies par Les comptes transports de la Nation en 2011 (MEDDE, 2013). Nous faisons l'hypothèse que le niveau de congestion ne varie pas dans le temps, le coût marginal unitaire de congestion des PL comme des VUL évoluent comme la valeur du temps

(i.e PIB/tête avec un facteur 0,7)<sup>19</sup>. Donc, le coût marginal unitaire de congestion routière est le suivant :

Tableau 2.6: Coût marginal de la congestion sur la période 2030-2050

En c€/véh.km

	2030	2040	2050
<b>Poids lourd</b>	20,7	22,6	24,8
<b>VUL</b>	7,4	8,0	8,8

Source: Calcul de l'auteur à partir des comptes des transports de la nation en 2011 (MEDDE, 2013)

Rappelons que dans la méthodologie, nous avons expliqué que, comme indiqué dans les comptes des transports en 2011, le coût marginal de la congestion est le coût marginal moyen. En réalité, le coût marginal de la congestion correspond au coût engendré par les derniers véhicules arrivés sur la voirie. Les premiers véhicules n'ont aucun coût de congestion car la voirie n'était pas encore saturée. Alors, quand nous multiplions ce coût marginal par kilomètre avec le trafic, cela pourrait surestimer le coût total réel de la congestion.

\* Hypothèse du coût marginal unitaire pour l'insécurité routière

Nous utilisons les valeurs du coût marginal unitaire de l'insécurité des Poids lourds et des VUL dans le rapport de la CCTN en 2011 (Annexe 2.5). En suite, nous faisons évoluer ce coût dans le temps parallèlement au PIB/tête. Le résultat est détaillé dans le tableau suivant.

Tableau 2.7: Coût marginal de l'insécurité sur la période 2030-2050

En c€/véh.km

	2030	2040	2050
<b>Poids lourd</b>	6,2	7,0	7,9
<b>VUL</b>	2,0	2,2	2,5

Source: Calcul de l'auteur à partir des comptes des transports en 2011 (MEDDE, 2013)

Notons que ce coût marginal est peut-être surestimé car, comme indiqué dans le rapport (MEDDE, 2013), le coût marginal unitaire de l'insécurité dépend des dommages liés aux accidents et de l'impact d'un véhicule supplémentaire sur la probabilité d'accident. Selon les auteurs de ce rapport, le risque d'accident, de manière générale, dépend de nombreux déterminants : le niveau de trafic sur le tronçon étudié, les caractéristiques des conducteurs par exemple leur niveau d'expérience, la qualité de leur formation la vitesse, les conditions météorologiques (neige, verglas, ...), etc... Dans ce rapport, les auteurs supposent que la probabilité d'accident est proportionnelle au volume du trafic.

<sup>19</sup> Règle d'évolution dans le rapport Boiteux II

*\* Total des coûts externes*

Selon les hypothèses faites sur le coût marginal de la pollution locale, de la pollution sonore, de la congestion, des accidents et de l'usage de l'infrastructure, le tableau ci-dessous résume le coût externe total des PL et VUL.

**Tableau 2.8: Coût externe total des PL et des VUL sur la période 2030-2050**

*En c€/véh.km*

	PL			VUL		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050
Pollution locale	10,9	12,4	14,1	3,8	4,3	4,9
Bruit	0,23	0,26	0,30	0,07	0,08	0,09
Insécurité	6,2	7,0	7,9	2,0	2,2	2,5
Congestion	20,7	22,6	24,8	7,4	8,0	8,8
<b>Total</b>	<b>38,0</b>	<b>42,3</b>	<b>47,1</b>	<b>13,2</b>	<b>14,6</b>	<b>16,3</b>

*Source: Calcul de l'auteur à partir des comptes des transports en 2011 (MEDDE, 2013), de (Quinet, 2013)*

Nous pouvons souligner que la pollution locale et la congestion représentent une grande partie du coût total externe pour les PL comme pour les VUL. Le total de ces deux coûts est plus de 60% du coût total externe.

La même hypothèse en euro par kilomètre est conservée dans nos quatre scénarios. Pour calculer le coût externe en euro par litre, nous suivons la formule suivante :

Total coût externe = Coût externe en euro par kilomètre \* Total véhicule.kilomètre

Consommation totale de gazole = Total véhicule. kilomètre \* Consommation unitaire de carburant des véhicules

On en déduit :

Coût externe en euro par litre = Coût externe en euro par kilomètre / Consommation unitaire des véhicules

Notons que le total des véhicules.kilomètres est différent selon les scénarios mais le coût externe en euros par litre reste le même dans nos scénarios puisque nous y prenons les mêmes

hypothèses pour le coût externe en euros par kilomètre et pour la consommation unitaire des véhicules.

En s'appuyant sur le trafic total des véhicules.kilomètres des PL et des VUL dans le scénario de référence et leur consommation unitaire de carburant, nous calculons le coût externe du transport de fret en euro par litre. Le résultat est résumé dans le tableau suivant.

**Tableau 2.9: Coût externe du transport de fret**

	<i>En €/litre</i>		
	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
Coût externe du Poids lourd	1,28	1,51	1,77
Coût externe du VUL	1,44	1,66	1,97
Total coût externe	1,31	1,52	1,81

*Source: Calcul de l'auteur à partir des comptes des transports en 2011 (MEDDE, 2013), de (Quinet, 2013)*

***Hypothèse du coût marginal unitaire de l'usage de l'infrastructure***

Concernant le coût marginal unitaire de l'usage de l'infrastructure, nous utilisons à nouveau les valeurs fournies par les comptes des transports en 2011. Comme indiqué dans ce rapport, ces coûts d'usage de l'infrastructure sont liés aux coûts d'entretien et d'exploitation de la voirie engendrés à moyen terme par la circulation routière. Pour actualiser ce coût, nous calculons l'évolution de l'indice "TP 01" de l'INSEE (107% en 2017 par rapport à 2010) ; en prenant l'hypothèse que la tendance se poursuit, nous obtenons le résultat sur le coût de l'usage de l'infrastructure dans la période 2030-2050 en euros par véhicule.kilomètre (**Annexe 2.6**). Tenant compte des véhicules.kilomètres PL et VUL (tableau 2.1) et de la consommation unitaire de carburant des véhicules (tableau 2.3), nous estimons le coût marginal de l'usage de l'infrastructure du transport de fret en euros par litre. Le résultat est présenté dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 2.10: Coût marginal de l'usage de l'infrastructure du transport de fret à l'horizon 2050**

	<i>En €/litre</i>		
	2030	2040	2050
Poids lourd	0,23	0,26	0,30
VUL	0,09	0,10	0,11
Total	0,21	0,23	0,26

*Source: Calcul de l'auteur à partir des comptes des transports en 2011 (MEDDE, 2013) et de Pochez (2016)*

***Hypothèses concernant la taxe carbone***

Nous émettons des hypothèses différentes sur le montant de la taxe carbone dans chacun des quatre scénarios. D'abord, dans le scénario de référence, le montant de la taxe carbone

correspond au niveau de la taxe indiquée dans la LTECV, loi française relative à la transition énergétique pour la croissance verte. Nous appliquons la règle d'évolution indiquée dans le rapport (Quinet, 2013). Plus en détail, sur la période **2010-2030**, la taxe carbone croît de **5,8%** par an, puis, après l'année **2030**, la valeur du carbone va évoluer parallèlement au taux d'actualisation **+4,5% par an** (principe d'Hotteling) (Quinet, 2013)

Dans notre scénario PLF2018, nous prenons l'hypothèse que la tendance d'accélération de la taxe carbone dans la loi de finance 2018 se poursuit, le montant de la taxe carbone sera de **169 €/tCO<sub>2</sub>** en **2030** et au delà de **370 en 2050** (tableau 2.11).

Sous l'hypothèse que les agents économiques doivent payer exactement les externalités qu'ils génèrent dans le scénario taxe optimale, conformément à notre explication ci-dessus, ce montant de la taxe carbone sera égal à **(E+I-T)**.

Rappelons-nous que, comme indiqué dans la partie méthodologie ci-dessus, E est le coût externe du transport du fret, I est le coût d'entretien des routes et T est le niveau de la taxe (TICPE + taxe carbone) avant augmentation de la taxe carbone.

Pour le scénario taxe quadruplée, la taxe carbone est quatre fois plus élevée que celle du scénario de référence.

Les niveaux de la taxe 'carbone' (taxe applicable au carburant consommé pour transporter les marchandises) dans les scénarios sont résumés dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 2.11: Taxe carbone pour le transport de marchandises dans la période 2030-2050**

	Unité	2030	2040	2050
Scénario de référence	€/tCO <sub>2</sub>	100	155	241
	€/litre	0,25	0,39	0,60
Scénario PLF2018	€/tCO <sub>2</sub>	169	273	377
	€/litre	0,42	0,68	0,94
Scénario taxe optimale	€/tCO <sub>2</sub>	436	540	662
	€/litre	1,09	1,34	1,65
Scénario taxe quadruplée	€/tCO <sub>2</sub>	400	620	964
	€/litre	1,00	1,56	2,40

Source: Calcul de l'auteur

## 2.5. Résultat sur le coût d'abattement de la tonne de CO<sub>2</sub>e évitée

### 2.5.1. La quantité de gazole consommée par les Poids lourds et les VUL

Pour quantifier la variation de consommation du gazole du transport de fret, nous partons de la formule :

*Consommation du gazole = véhicules.kilomètres \* consommation unitaire des véhicules*

qui relie la quantité de gazole consommée par le transport de fret au total des véhicules.kilomètres et à la consommation unitaire de carburant des véhicules. Rappelons que, selon notre hypothèse, les consommations unitaires de carburant du PL et du VUL diminueraient dans le temps pour la période 2030-2050 mais elles restent les mêmes dans les quatre scénarios. Donc, la demande de gazole du transport de fret varie avec la même élasticité que celle des véhicules.kilomètres.

Afin de quantifier la réduction de consommation de gazole des trois scénarios (scénario PLF2018, scénario taxe carbone et scénario taxe triplée) par rapport au scénario de référence sous l'impact de la taxe carbone, nous retenons les hypothèses sur le prix du gazole (tableau 2.2) et sur le niveau de la taxe carbone (tableau 2.11) ainsi qu'une élasticité de la demande du transport exprimée en véhicules.kilomètres à son prix de **-0,33** (Bouguerra et Rizet, 2013). Nous estimons la réduction de la quantité de gazole du transport de fret chaque année pendant la période 2030-2050. Le résultat est présenté dans le tableau suivant :

**Tableau 2.12 : Réduction du gazole du transport de fret à l'horizon 2050**

		2030	2040	2050
Scénario PLF2018	$\Delta t$ (€/litre)	0,17	0,29	0,34
	$\Delta P/P_0$ (%)	10%	15%	14%
	$\Delta Q/Q_0$ (%)	-3%	-5 %	-5%
	Q <sub>0</sub> (Mds de litres)	12,85	13,58	14,37
	$\Delta Q$ (Mds de litres)	-0,42	-0,65	-0,67
	$\Delta Q$ 2030-2050 (Mds litres)	-12,8		
Scénario taxe optimale	$\Delta t$ (€/litre)	0,84	0,97	1,05
	$\Delta P/P_0$ (%)	48%	47%	44%
	$\Delta Q/Q_0$ (%)	-16%	-16%	-14%
	Q <sub>0</sub> (Mds de litres)	12,85	13,58	14,37
	$\Delta Q$ (Mds de litres)	-2,03	-2,12	-2,07
	$\Delta Q$ 2030-2050 (Mds litres)	-43,9		
Scénario taxe quadruplée	$\Delta t$ (€/litre)	0,75	1,16	1,80
	$\Delta P/P_0$ (%)	43%	57%	75%
	$\Delta Q/Q_0$ (%)	-14%	-19%	-25%
	Q <sub>0</sub> (Mds de litres)	12,53	13,41	14,37
	$\Delta Q$ (Mds de litres)	-1,81	-2,56	-3,56
	$\Delta Q$ 2030-2050 (Mds litres)	-54,8		

Source: Calcul de l'auteur

Le tableau 2.12 montre que la taxe carbone a des impacts directs sur la consommation du gazole. Plus le niveau de la taxe est important, et plus on devrait pouvoir diminuer la quantité du gazole consommée. Plus en détail, dans le scénario PLF2018, nous faisons l'hypothèse qu'en 2030, une augmentation de 17 centimes de la taxe carbone fait augmenter de 10% le

prix de gazole. Selon notre résultat, cette augmentation permet de réduire de 420 millions de litres de gazole ou 3% du total de la consommation du gazole du transport de fret. Même principe, si cette augmentation est plus importante (84 centimes) comme notre hypothèse dans le scénario taxe carbone, alors, la quantité du gazole réduite sera 2.030 millions de litres de gazole.

Sur la période 2030-2050, d'après notre estimation, la consommation totale de gazole du transport de fret dans le scénario référence (Qo) serait 285 milliards de litres de gazole. Selon le niveau de la taxe carbone, la diminution de quantité du gazole est différente dans chacun des trois scénarios. Cette réduction est la plus importante dans le scénario taxe quadruplée où le niveau de la taxe est très important : 55 milliards de litres de gazole, soit près de 19% du total de la consommation de gazole du fret. Nous constatons bien que ce résultat dépend de nos hypothèses sur le prix du gazole à l'horizon 2050 et de l'élasticité de la demande du gazole pour le transport de fret à son prix, donc, nous faisons dans la section 2.6 les tests de sensibilité sur ces paramètres.

### **2.5.2. Le coût pour la collectivité**

L'augmentation de la taxe carbone fait augmenter le coût d'énergie qui entraînerait une hausse du coût de transport pour les utilisateurs du transport. Sous l'impact de cette augmentation de la taxe, les chargeurs, les transporteurs vont choisir soit un autre mode de transport plus doux, soit réorganiser leurs organisations logistiques pour optimiser leur coût logistique. Leur changement de comportement permet de réduire le coût des externalités. Nous résumons dans le tableau ci-dessous le coût pour la collectivité selon des scénarios étudiés.

Tableau 2.13 : Coût pour la collectivité selon les différents scénarios

<b>Scénario PLF2018</b>			
	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
Perte actualisée du surplus des chargeurs et des transporteurs (Mds €)	-2,09	-2,40	-1,89
Solde actualisé de l'Etat (Mds €)	+2,24	+2,53	+1,97
Gain actualisé des externalités (Mds €)	+0,53	+0,62	+0,56
Solde actualisé pour la collectivité (Mds €)	+0,68	+0,75	+0,64
Solde actualisé pour la collectivité 2030-2050 (Mds €)	<b>+14,7</b>		
<b>Scénario taxe optimale</b>			
	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
Perte actualisée du surplus des chargeurs et des transporteurs (Mds €)	-9,48	-7,39	-5,44
Solde actualisé de l'Etat (Mds €)	+9,30	+7,20	+5,38
Gain actualisé des externalités (Mds €)	+2,54	+2,01	+1,49
Solde actualisé pour la collectivité (Mds €)	+2,36	+1,82	+1,33
Solde actualisé pour la collectivité 2030-2050 (Mds €)	<b>+38,5</b>		
<b>Scénario taxe quadruplée</b>			
	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
Perte actualisée du surplus des chargeurs et des transporteurs (Mds €)	-8,54	-8,79	-9,00
Solde actualisé de l'Etat (Mds €)	+6,93	+6,14	+4,92
Gain actualisé des externalités (Mds €)	+2,27	+2,43	+2,56
Solde actualisé pour la collectivité (Mds €)	+0,66	-0,22	-1,52
Solde actualisé pour la collectivité 2030-2050 (Mds €)	<b>-6,1</b>		

Source: Calcul de l'auteur

La taxe carbone permet d'avoir un gain économique pour la collectivité dans le scénario PLF2018 et le scénario taxe optimale. Cela s'explique par le coût externe élevé du poids lourd et du VUL. Selon nos estimations, le coût externe du transport de marchandise est 1,31 (€/l) en 2030 et 1,81 (€/l) en 2050. Cependant, le niveau actuel de la taxe d'énergie (TICPE+ taxe carbone) n'est que 0,67 (€/l) en 2030 et 1,03 (€/l) en 2050 dans le scénario référence et 0,85 (€/l) en 2030 et 1,37 (€/l) en 2050 dans le scénario PLF2018. Ce niveau de la taxe n'est pas suffisant pour compenser tous les dommages engendrés par le transport de marchandises. C'est la raison pour laquelle, nous avons un bénéfice économique dans les deux scénarios : PLF2018 et taxe optimale. Notons bien que notre analyse porte sur le transport routier de marchandise qui a un coût externe estimé à 1,81 €/litre en 2050. Pourtant, si les décideurs

publics augmentent la taxe au niveau très élevé comme dans le scénario taxe quadruplée, nous aurons une perte pour la collectivité. Cette perte subie principalement par les chargeurs et les transporteurs est due au renoncement à une partie de leur activité à cause du prix du transport élevé.

### 2.5.3. Le coût d'abattement d'une tonne CO<sub>2</sub> évitée

Selon les hypothèses émises, nous avons suivi la méthodologie présentée ci-dessus pour calculer le coût économique de chaque acteur économique. La quantité d'émission de GES évitée par la taxe carbone est égale à la réduction de la demande en litres de gazole ( $\Delta Q$ ) (tableau 2.12) multipliée par la quantité de CO<sub>2</sub>e par litre, soit 3,17 kg de CO<sub>2</sub> par litre de gazole. A partir de ces résultats, nous estimons le coût économique d'une tonne de CO<sub>2</sub>e évitée. Le résultat est résumé dans le tableau suivant :

Tableau 2.14: Coût de la tonne de CO<sub>2</sub>e évitée selon les différents scénarios

	Scénario PLF2018	Scénario taxe optimale	Scénario taxe quadruplée
CO <sub>2</sub> e évité (millions de tCO <sub>2</sub> )	-40,70	-139,2	-173,6
CO <sub>2</sub> e évité (en % du transport routier de fret)	-4%	-15%	-19%
Solde actualisé pour la collectivité (Mds €)	+14,7	+38,5	-6,1
<b>Coût d'abattement (€/tCO<sub>2</sub>)</b>	<b>-361</b>	<b>-276</b>	<b>+35</b>

Source: Calcul de l'auteur

Notre objectif est de réduire les émissions de GES au moindre coût pour la collectivité. Si on compare le coût d'abattement pour une tonne de CO<sub>2</sub>e évitée dans les trois scénarios, nous constatons que le scénario PLF2018 a le bénéfice économique le plus élevé : 361€/tCO<sub>2</sub>e. Pourtant en termes de quantité des émissions de CO<sub>2</sub>e, ce scénario ne pourrait réduire que de 41 millions de tCO<sub>2</sub>e, soit 4% des émissions de GES du transport de fret dans la période 2030-2050. Sous cet aspect, le scénario taxe quadruplée montre son avantage. Avec un niveau de la taxe très élevé dans ce scénario, nous pourrions économiser près de 174 MtCO<sub>2</sub>e, soit 19 % des émissions de GES du fret. Mais le niveau important de la taxe implique aussi un coût pour la collectivité. Ce coût est supporté principalement par des chargeurs et transporteurs. Cette perte provient du renoncement à transporter des marchandises à cause du prix très élevé du transport. Le scénario taxe optimale permet de réduire le total des émissions de GES un peu moins par rapport au scénario taxe quadruplée, mais on a un gain économique. Il faut noter ici que nos résultats ne reflètent pas des valeurs tutélaires du carbone mais le coût élevé des externalités du fret routier : cette analyse est **valable seulement pour le transport routier de marchandise**, le résultat serait très différent pour la taxation du carburant des automobiles qui ont des coûts externes moins élevés ou pour d'autres secteurs d'activité.

## 2.6. Analyse de la sensibilité

### -Elasticité du transport routier de fret au prix du gazole

Comme indiqué dans l'article de (Bouguerra et Rizet 2013), si on introduit le temps comme variable explicative de l'élasticité de la demande du transport routier de fret au prix du gazole, les auteurs trouvent que cette élasticité varie de -0,28 à -0,48 pour les véhicules.kilomètres. Notre calcul du coût économique porte sur la période 2030-2050, c'est pourquoi, nous allons tester ensuite ces deux valeurs et analyser l'impact de l'élasticité du transport de fret au prix du gazole sur le résultat du coût d'abattement d'une tonne de CO<sub>2</sub>e évitée.

Tableau 2.15 : Test de sensibilité de l'élasticité

Elasticité	Solde pour la collectivité 2030-2050 (Mds €)		
	Scénario PLF2018	Scénario taxe optimale	Scénario taxe quadruplée
Valeur de référence à -0,33	+14,7	+38,5	-6,1
Valeur -0,28	+13,9	+37,8	+1,0
Valeur -0,48	+17,0	+40,6	-27,4
Elasticité	CO <sub>2</sub> évité 2030-2050 (millions tCO <sub>2</sub> )		
	Scénario PLF2018	Scénario taxe optimale	Scénario taxe quadruplée
Valeur de référence à -0,33	-40,70	-139,2	-173,6
Valeur -0,28	-34,5	-118,1	-147,3
Valeur -0,48	-59,2	-202,5	-252,5
Elasticité	Coût d'abattement (€/tCO <sub>2</sub> )		
	Scénario PLF2018	Scénario taxe optimale	Scénario taxe quadruplée
Valeur de référence à -0,33	-361	-276	+35
Valeur -0,28	-404	-320	-7
Valeur -0,48	-287	-200	+109

Source : Calcul de l'auteur

Nous avons testé deux nouvelles valeurs de l'élasticité des véhicules.kilomètres au prix du gazole : -0,28 et -0,48. Le résultat montre que le coût économique d'une tonne de CO<sub>2</sub> évitée est sensible à l'élasticité mais il est toujours le plus faible dans le scénario PLF2018 et le plus élevé dans le scénario taxe quadruplée. Le scénario taxe optimal conserve une réduction importante de GES tout en gardant un coût négatif pour la collectivité. Nous observons aussi que le coût d'abattement d'une tonne de CO<sub>2</sub> est plus élevé lorsque la demande de transport de fret est plus sensible aux variations de prix du gazole.

**-Prix du carburant :**

Le prix du gazole (hors taxe carbone et TVA) dans cette thèse est basé sur la prévision de l'Agence Internationale de l'Energie à l'horizon 2050 (le prix du pétrole brut de 130 USD le baril en 2030 et de 150 USD en 2050). Historiquement, les chocs pétroliers rendent la prévision du prix du gazole incertaine. C'est la raison pour laquelle nous faisons le test de sensibilité sur ce paramètre. Notons que notre hypothèse sur le prix du gazole hors taxe et TVA (tableau 2.2) est de 1,07 €/litre en 2030 et 1,37 €/litre en 2050.

Nous testons maintenant deux cas : le prix du gazole sera doublé et le prix du gazole sera divisé par deux. Plus détaillé, dans le test sur le prix du gazole doublé, nous faisons l'hypothèse que le prix du gazole (hors taxe et TVA) serait 2,14 €/litre en 2030 et 2,74 €/litre en 2050. Les prix du gazole sont respectivement 0,54 €/litre en 2030 et 0,68 €/litre en 2050 dans le cas du prix divisé par deux. Notons que sur ces prix du gazole hors taxe carbone et TVA nous intégrons ensuite la TICPE (supposé à 0,43 €/litre comme indiqué dans le (tableau 2.2) et la taxe carbone (tableau 2.11) pour obtenir le prix du gazole payé par les transporteurs.

Notre résultat sur le test de sensibilité du gazole est résumé dans le tableau suivant :

**Tableau 2.16 : Test de sensibilité sur le prix du gazole**

Prix du gazole	Solde pour la collectivité 2030-2050 (Mds €)		
	Scénario PLF2018	Scénario taxe optimale	Scénario taxe quadruplée
Valeur de référence à	+14,7	+38,5	-6,1
Prix doublé	+12,8	+36,7	+11,3
Moitié prix	+16,8	+40,4	-25,8
	CO <sub>2</sub> évité 2030-2050 (millions tCO <sub>2</sub> )		
	Scénario PLF2018	Scénario taxe optimale	Scénario taxe quadruplée
Valeur de référence à	-40,70	-139,2	-173,6
Prix doublé	-25,5	-87,3	-109,0
Moitié prix	-57,9	-198,2	-246,7
Prix du gazole	Coût d'abattement (€/tCO <sub>2</sub> )		
	Scénario PLF2018	Scénario taxe optimale	Scénario taxe quadruplée
Valeur de référence	-361	-276	+35
Prix doublé	-502	-421	-104
Moitié prix	-291	-204	+105

Source : Calcul de l'auteur

Notre test sur le prix des carburants confirme que le coût économique d'une tonne de CO<sub>2</sub>e évitée via la taxe carbone est sensible au prix du gazole. Dans un même scénario, avec un

montant de la taxe carbone donné, nous constatons que plus le prix du gazole est faible, plus le coût économique d'une tonne CO<sub>2e</sub> évitée est élevé.

Avec ce test sur les niveaux différents de prix du gazole, nous trouvons que nos conclusions principales restent encore valable : nous avons un bénéfice économique pour une tonne de CO<sub>2e</sub> évitée dans les deux scénarios PLF2018 et taxe carbone ; le coût d'abattement pour une tonne CO<sub>2e</sub> est le plus faible dans le scénario PLF2018 et le plus élevé dans le scénario taxe quadruplée.

### **-Coût marginal de la congestion**

Le coût de congestion occupe une partie importante du coût total des externalités. Après analyse de la littérature, nous observons que ce coût est très variable d'un endroit à l'autre. Selon (Prud'homme 2015) la congestion est un phénomène urbain et les Poids lourds circulent surtout hors des villes. C'est pourquoi, d'après cet auteur, les poids lourds sont rarement pris dans les embouteillages. Suite à cette idée, nous testons ensuite l'hypothèse H<sub>0</sub> qui correspond au coût marginal de la congestion très faible du Poids lourd et du VUL, ces coûts ne sont que **10%** des valeurs de référence.

Nous testons aussi une hypothèse dite H<sub>1</sub>, où le coût marginal de la congestion est doublé par rapport à la valeur de référence : 41 c€/véhicule.km pour les PL en 2030 et 15 c€/véhicule.km pour les VUL en 2030 (**Annexe 2.7**).

Quand le coût marginal de la congestion varie, le coût total des externalités du Poids lourd ainsi que du VUL va aussi changer. Comme indiqué dans la description des scénarios, dans le scénario taxe optimale, le transport routier de marchandises supporte exactement le coût externe qu'il génère. Le montant de la taxe dans ce scénario est déterminé par (E+I-T). Alors quand le coût des externalités varie, nous calculons aussi le nouveau montant de cette taxe dans ce scénario. Le résultat est le suivant :

**Tableau 2.17: Taxe carbone dans le scénario taxe carbone selon l'hypothèse H0 et H1**

	Hypothèse H <sub>0</sub>		Valeur de référence		Hypothèse H <sub>1</sub>	
	2030	2050	2030	2050	2030	2050
<b>Total coût externe</b> <i>(hors infrastructure)</i> <b>(€/litre)</b>	0,55	0,78	1,31	1,81	1,62	2,21
<b>Taxe (€/litre)</b>	0,32	0,61	1,09	1,65	1,40	2,04
<b>Taxe (t/CO<sub>2e</sub>)</b>	130	246	436	662	561	820

Source : Calcul de l'auteur

Le tableau 2.17 montre que dans notre hypothèse H<sub>0</sub>, la taxe en 2050 dans le scénario taxe optimale est très proche de celle du scénario de référence (0,6 €/litre).

Pour le scénario PLF2018 et le scénario taxe quadruplée, le montant de la taxe reste inchangé. En suite, nous estimons le coût économique d'une tonne CO<sub>2</sub>e réduite. Le résultat est résumé dans le tableau suivant :

**Tableau 2.18 : Test de sensibilité du coût marginal de la congestion**

<b>Coût marginal de congestion</b>	<b>Solde pour la collectivité 2030-2050 (Mds €)</b>		
	Scénario PLF2018	Scénario taxe optimale	Scénario taxe quadruplée
Valeur de référence à	<b>+14,7</b>	<b>+38,5</b>	<b>-6,1</b>
Hypothèse H <sub>0</sub>	+7,2	+2,1	-37,7
Hypothèse H <sub>1</sub>	+17,4	+56,6	+5,4
<b>Coût marginal de congestion</b>	<b>CO<sub>2</sub> évité 2030-2050 (millions tCO<sub>2</sub>)</b>		
	Scénario PLF2018	Scénario taxe optimale	Scénario taxe quadruplée
Valeur de référence à	<b>-40,70</b>	<b>-139,2</b>	<b>-173,6</b>
Hypothèse H <sub>0</sub>	-40,70	-8,8	-173,6
Hypothèse H <sub>1</sub>	-40,70	-190,5	-173,6
<b>Coût marginal de congestion</b>	<b>Coût d'abattement (€/tCO<sub>2</sub>)</b>		
	Scénario PLF2018	Scénario taxe optimale	Scénario taxe quadruplée
Valeur de référence	<b>-361</b>	<b>-276</b>	<b>+35</b>
Hypothèse H <sub>0</sub>	-177	-238	+217
Hypothèse H <sub>1</sub>	-429	-297	-31

Source : Calcul de l'auteur

Notre test de sensibilité sur le coût marginal de la congestion indique que notre résultat sur le coût d'abattement d'une tonne de CO<sub>2</sub> évitée est sensible aux hypothèses du coût de congestion ainsi que du coût total des externalités. La variation de ce coût ne fait pas changer la quantité totale des émissions de GES évitées dans le scénario PLF2018 et taxe quadruplée mais elle a des impacts directs sur le solde pour la collectivité. Avec un même montant de la taxe carbone, plus le coût de la congestion (ou des externalités) est élevé, plus une augmentation de la taxe carbone apporte un bénéfice économique pour la collectivité.

Nous constatons aussi que le niveau de la taxe noté « optimale » varie selon les hypothèses du coût de la congestion en particulier et aussi des autres externalités en général. C'est pourquoi, pour bien déterminer le niveau de la taxe carbone, il faut aussi bien estimer le coût total des externalités.

## Conclusion du chapitre 2

L'objectif de ce chapitre est d'estimer ce que coûterait à la collectivité la réduction des émissions de GES via une taxe carbone applicable au transport routier de marchandises (et uniquement à lui) pendant la période 2030-2050. Pour cela, nous avons testé les différents niveaux de la taxe dans quatre scénarii : scénario de référence, scénario PLF2018, scénario taxe carbone et scénario taxe quadruplée.

Comme on s'y attendait, la taxe carbone permet une réduction des émissions de GES. La quantité des émissions de CO<sub>2</sub>e évitée varie selon le montant de la taxe carbone. Plus le niveau de la taxe est élevé, plus on pourrait réduire les émissions de GES.

En terme de coût économique, selon nos hypothèses, la taxe carbone provoquerait un gain économique pour la collectivité dans deux scénarios : PLF2018 et scénario taxe optimale. Cela s'explique par un coût externe très élevé du transport routier de marchandise : le niveau de la taxe carbone dans le scénario PLF2018 n'est pas suffisant pour compenser tous les dommages environnementaux engendrés par le fret routier.

Avec un montant de la taxe très élevé dans le scénario taxe quadruplée, nous pourrions diminuer de 19% les émissions de GES. Pourtant, un niveau important de la taxe carbone dans ce scénario implique une perte pour la collectivité. Cette perte subie principalement par les chargeurs et les transporteurs est due au renoncement à une partie de leur activité à cause du prix du transport élevé.

Le scénario taxe quadruplée a aussi un coût d'abattement d'une tonne de CO<sub>2</sub> évitée le plus élevé selon les scénarios étudiés. Fixé le niveau de la taxe qui compense totalement le coût des externalités élevé du fret routier, le scénario taxe optimale permet de réduire le total des émissions de GES un peu moins par rapport au scénario taxe quadruplée, mais on a un bénéfice économique pour la collectivité

Notre test de sensibilité affirme aussi que le coût économique pour réduire une tonne de CO<sub>2</sub>e est sensible à l'élasticité de la demande du transport à son prix, au prix du gazole et au coût de la congestion.

Notons que nos analyses sont seulement valables pour le transport routier de marchandises dont le coût externe est plus élevé que celui du transport de voyageurs. Cela nous fait penser à la possibilité d'appliquer un niveau de taxe, carbone ou non carbone, différent selon les types utilisateurs. Est-ce que ce serait réaliste ? Pourquoi pas.

## Chapitre 3: Véhicule électrique

Comme nous l'avons présenté dans le chapitre 1 de cette thèse, le véhicule électrique (VE), est l'une des mesures envisageables pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> du transport de fret. Nous soulignons évidemment que le remplacement de véhicules diesel par des véhicules électriques, s'il permet de réduire les émissions, demande des investissements supplémentaires, sur les véhicules ainsi que sur les infrastructures. Mettant en regard les avantages et inconvénients de ce type de véhicules, il nous semble intéressant d'analyser leurs coûts et bénéfices, en nous demandant notamment : quel est le coût par tonne de CO<sub>2</sub> évitée grâce à l'électrification du fret urbain? Et jusqu'à quel point le véhicule électrique est une mesure efficace pour réduire l'émission de CO<sub>2</sub> du transport de fret ?

Avant de répondre ces questions, nous précisons ci-dessous la définition de deux notions fondamentales, telles qu'elles sont utilisées dans cette partie, concernant, d'une part, la zone sur laquelle ce fret est transporté, l'unité urbaine et, d'autre part, le véhicule électrique.

**Unité Urbaine:** Selon INSEE, l'Unité urbaine est une commune ou un ensemble de communes qui présentent une zone de bâti continu (pas de coupure de plus de 200 mètres entre deux constructions) et qui compte au moins 2000 habitants.

**Véhicule électrique:** Un véhicule électrique possède un moteur électrique et pas de moteur thermique : dans le cas qui nous intéresse pour ce chapitre, 100% de ses trajets seront réalisés en mode électrique avec batteries.

Ce chapitre se structure en 6 sous-parties. Tout d'abord, nous présentons différents scénarios proposés dans le chapitre ainsi que la méthodologie. Ensuite, selon les hypothèses émises, nous estimons les émissions de CO<sub>2</sub> évitées grâce à l'électrification du transport de fret urbain mise en place sur la période 2030-2050. Puis, nous analysons le coût économique pour les différents acteurs économiques. Nous complétons ce chapitre par quelques tests de sensibilité aux sources d'incertitudes. Enfin, une discussion des résultats sur ces scénarios conclut le chapitre.

### 3.1. Présentation des scénarios

Dans plusieurs villes européennes, notamment en Allemagne, mais aussi à Paris ou Grenoble, les décideurs publics ont l'intention d'interdire les vieux véhicules diesel. Très récemment, plusieurs travaux ont étudié ce sujet. Par exemple, l'analyse coût-bénéfice de la voiture électrique (Taszka et Domergue 2017) ou du VUL électrique (Camilleri et Dablanc 2017). Cependant, il semble qu'il n'existe pas encore de travaux traitant spécifiquement du coût d'abattement d'une tonne de GES pour les camions électrique en zone urbaine.

Dans nos scénarios 'véhicules électriques en ville', décrits ci-dessous (à l'exception du scénario 'au fil de l'eau'), nous faisons l'hypothèse que pour atteindre l'objectif de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, les pouvoirs publics vont mettre en place une **interdiction de la**

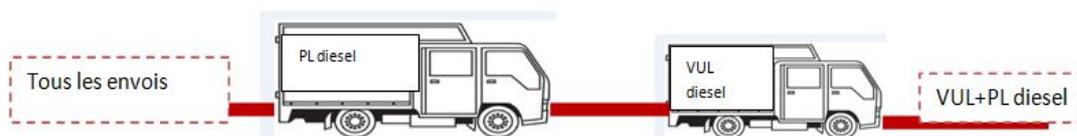
**circulation des camions et camionnettes diesel en ville à partir de l'année 2030, sauf sur les autoroutes urbaines.**

Dans la suite du chapitre, nous étudions spécifiquement trois scénarios distincts, que nous nommons : scénario au fil de l'eau, scénario VE1 et scénario VE2. Voici leur description.

**Scénario au fil de l'eau**

Dans ce scénario, nous prolongeons les tendances observées à partir de l'année 2004, décrite dans l'enquête ECHO. Tous les transports (y compris en ville) sont réalisés par des PL diesel et par des VUL diesel.

**Figure 3.1: Scénario au fil de l'eau**



Source: Figure réalisée par l'auteur

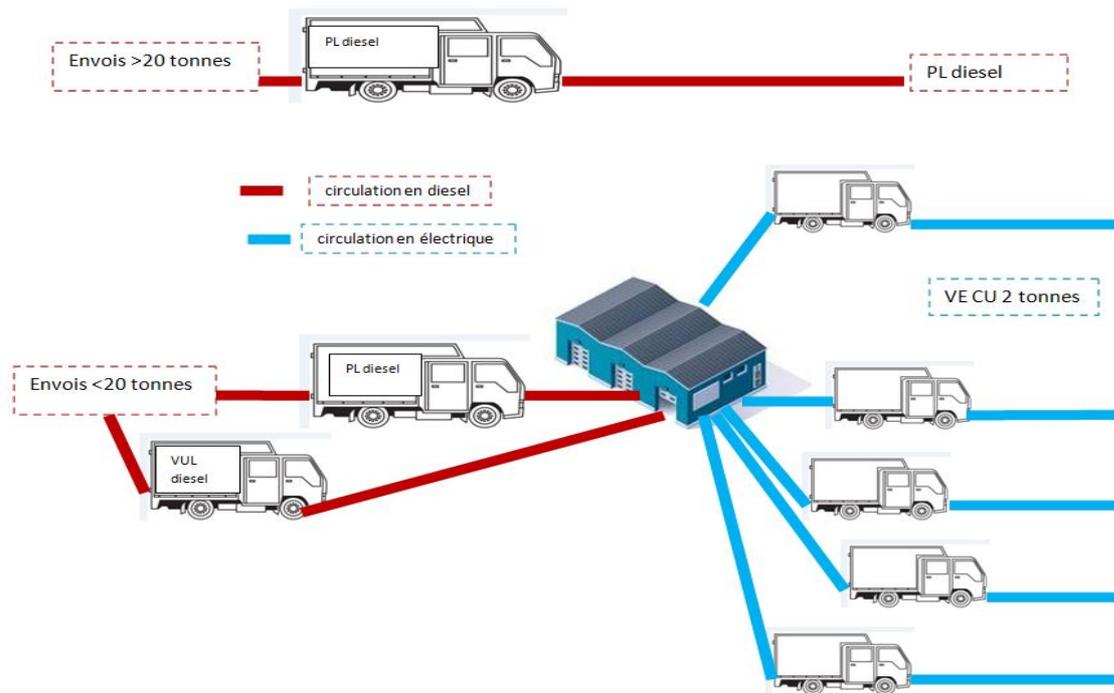
**Scénario VE1**

L'idée d'électrification du fret urbain a été présentée dans le rapport ECHO (Rizet et al. 2014). Dans ce rapport, à partir des données de l'enquête ECHO, les auteurs ont quantifié la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> permise par la circulation de camions électriques en zone urbaine pour l'année 2004. Dans ce scénario, nous retenons les mêmes hypothèses : sur les principaux axes routiers menant les PL diesel à l'entrée des unités urbaines, on ajoute des plateformes de transbordement. Les distances parcourues par la suite en véhicule électrique sont calculées selon la taille de la ville, le nombre et la localisation des plateformes. Pour estimer le nombre de plateformes, on suppose qu'une plateforme doit être le point de départ ou d'arrivée d'au moins 30 tournées par jours ou 11700 tonnes par an. A partir de cette hypothèse et du poids total des envois entrants ou sortants de chaque agglomération, les auteurs ont déterminé le nombre des plateformes au maximum par unité urbaine et la localisation des plateformes. Nous reprenons ce résultat dans ce chapitre (voir [Annexe 3.1](#), [Annexe 3.2](#), [Annexe 3.3](#) sur la localisation des plateformes retenues dans ce rapport pour les agglomérations de Paris, Bordeaux et Marseille).

Dans notre scénario **VE1**, pour le fret entrant dans les villes, les livraisons de **plus de 20 tonnes** seront transportées **en diesel** en ville, les envois de moins de 20 tonnes seront transportés par des camions électriques de charge utile (CU) de 2 tonnes et d'une autonomie de 100 km, comme par exemple la camionnette électrique Renault Maxity. Le véhicule est alimenté par une batterie lithium-ion d'une capacité de 42 kWh (**scénario VE1**). Ces envois, selon leur poids, sont répartis en plusieurs camionnettes électriques. Le fret partant de cette ville doit aussi être livré par camionnette électrique au moins jusqu'à une plateforme. Puisque l'ensemble du fret entrant et sortant de la ville passe par ces plateformes, nous retenons alors une hypothèse optimiste pour le taux de remplissage (et le taux de retour à vide) des camions

électriques. On suppose un taux de remplissage de 80% et un taux de retour à vide de 50% des kilomètres en charge.

Figure 3.2: Scénario VE1



Source: Figure réalisée par l'auteur

Dans ce scénario, il y a une **dérogation** pour les envois **plus de 20 tonnes**. Ils continuent à être transportés en diesel en ville. Donc, les caractéristiques de ces envois comme le type de véhicule, le taux de chargement, les distances parcourues.... ne changent pas. Par contre, pour les envois de moins de 20 tonnes, ils seront répartis en VUL électrique de CU de 2 tonnes. Le nombre de véhicules kilomètres électriques circulant en ville est alors calculé avec le principe suivant :

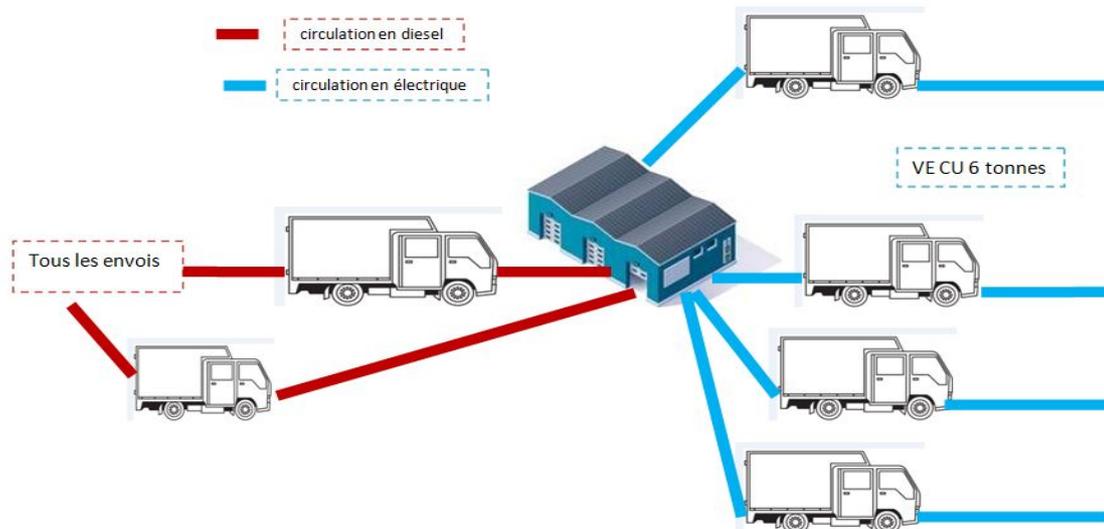
- Si 2 tonnes  $\leq$  poids de l'envoi < 20 tonnes, alors le nombre de véhicules électriques = arrondi supérieur du poids de l'envoi / 2
- Si 1,6 tonnes  $\leq$  poids de l'envoi < 2 tonnes, alors le nombre de véhicules électriques = 1
- Si poids de l'envoi < 1,6 tonnes, l'envoi est regroupé avec les autres envois pour un chargement de 1,6 tonnes. Alors, le nombre de véhicule électrique = poids de l'envoi / poids de chargement.

Nous constatons que ce remplacement de véhicules diesel par des véhicules électriques de faible capacité entraîne une augmentation du nombre de véhicules et, par suite, de la congestion de trafic dans la ville. C'est la raison pour laquelle nous prenons en compte le coût de la congestion dans notre analyse des externalités dans la partie suivante.

## Scénario VE2

Nous prenons des hypothèses semblables celles du scénario VE1, à la différence qu'au delà des plateformes, tous les envois, y compris ceux de 20 tonnes et plus, doivent être transportés par des camions électriques sur la partie urbaine. Ces camions électriques ont 6 tonnes de charge utile pour un Poids total autorisé en charge (PTAC) de 10 tonnes, et ils ont une autonomie de 100 km. Ces camions électriques fonctionnent avec 3 packs de batterie lithium-ion d'une capacité de 150 kWh qui se rechargent en 8h. Nous faisons l'hypothèse que les constructeurs auront amélioré leur offre d'ici 2030.

Figure 3.3: Scénario VE2



Source: Figure réalisée par l'auteur

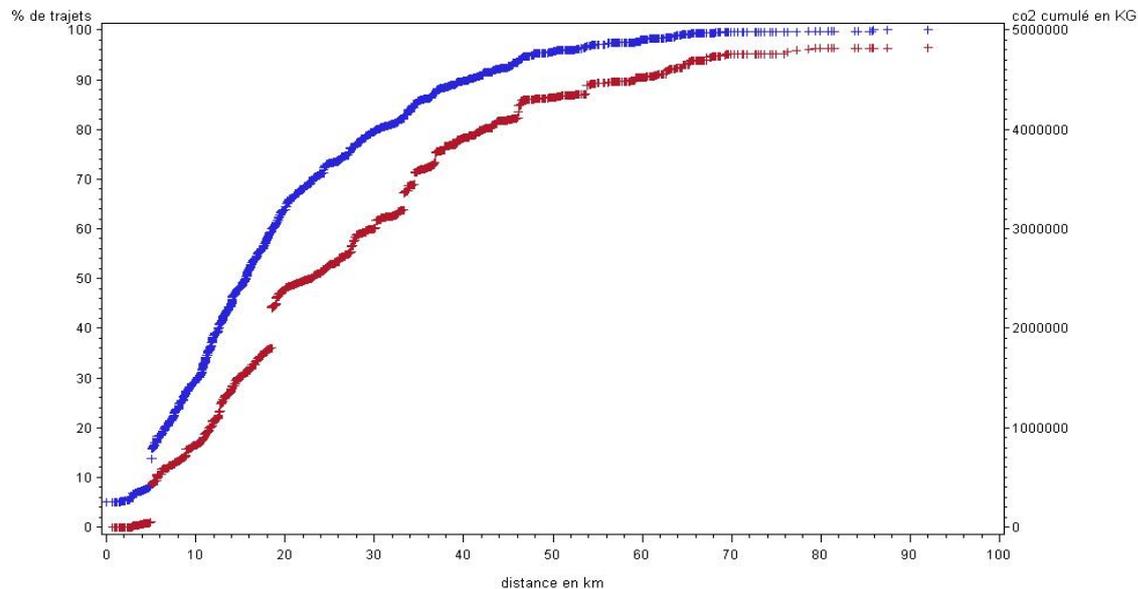
De manière analogue au scénario VE1, le nombre de camions électriques de CU 6 tonnes est calculé comme indiqué ci-dessous :

- Si poids de l'envoi > 6 tonnes, alors le nombre de véhicules électriques = arrondi supérieur de poids de l'envoi / 6
- Si 4,8 tonnes <= poids de l'envoi < 6 tonnes, alors le nombre de véhicules électriques = 1
- Si poids de l'envoi < 4,8 tonnes, l'envoi est regroupé avec les autres envois pour un chargement de 4,8 tonnes. Alors le nombre de véhicule électrique = poids de l'envoi / poids de chargement.

Rappelons également qu'une autre limite importante des véhicules électriques est leur autonomie. Selon le résultat du rapport déjà cité, l'autonomie des véhicules électriques (camionnettes CU 2 t et camions CU 6 t) est de 100 km et permet de couvrir environ 90% des trajets (voir le graphique ci-dessous). Pour les 10% restant, nous faisons l'hypothèse que ce

problème sera résolu d'ici 2030, soit grâce à l'amélioration de la technologie, l'autonomie des camions électriques sera améliorée pour s'adapter à tous les trajets urbains, soit grâce à l'optimisation des plateformes.

Figure 3.4: Distribution des trajets et du CO<sub>2</sub> selon la distance des trajets



— : % Trajet

— : CO<sub>2</sub>

Source: Rapport ECHO 2014 (Rizet et al)

### 3.2. Objectifs et Méthode

Notre objectif dans ce chapitre est d'analyser le coût économique par tonne de CO<sub>2</sub> évitée dans la période 2030-2050 via le remplacement des véhicules thermiques par les véhicules électrique dans la zone urbaine. Autrement dit, notre analyse porte sur les coûts réels supportés par la collectivité (l'Etat, les chargeurs, les transporteurs et les riverains). Pour bien comparer les coûts économiques dans les deux cas (avec ou sans l'électrification du fret urbain), nous prenons en compte les externalités dans les trois étapes suivantes: phase "en circulation", phase "amont" de production de l'énergie et phase "amont" de production de la batterie.

Les coûts dans nos calculs sont actualisés avec un **taux d'actualisation de 4,5%** en incluant **un coût d'opportunité des fonds publics (COFP) de 1,2 (soit un coût majoré de 20%)** conformément aux recommandations du rapport (Quinet 2013)

### 3.3. Les trafics routiers urbains de marchandise

#### \* Fret urbain en 2004

Dans la base de données de l'enquête ECHO, les auteurs du rapport ECHO ont déjà estimé la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> permise par l'électrification du fret urbain (situation en 2004)

Tableau 3.1: Emission de CO<sub>2</sub> du fret urbain en 2004

	Fret urbain en 2004		
	Situation observée dans l'enquête ECHO	Simulation avec le Scénario VE1	Simulation avec le Scénario VE2
Véhicule.km (milliards)	15,47	16,34	13,25
CO <sub>2</sub> de la route (Mt)	15,04	11,25	10,97
Emission de CO <sub>2</sub> évitée (Mt)	3,79		4,07

Source: Tableau élaboré à partir de l'annexe du rapport de phase 3 de (RIZET et al. 2014)

Pourtant, dans ce rapport, nous n'avons pas d'informations sur la répartition du trafic de fret urbain entre poids lourds et VUL. Cette répartition est pourtant nécessaire pour notre estimation de l'émission de CO<sub>2</sub> et du coût d'externalité. A partir des données sur le kilométrage total effectué par les véhicules Diesel (PL et VUL thermiques) en urbain et sur l'émission de CO<sub>2</sub> correspondante (données qui sont indiquées dans le tableau ci-dessus, nous essayerons de déterminer le kilométrage effectué par les PL et celui des VUL dans les zones urbaines en 2004. Plus précisément, si on désigne par X et Y respectivement les nombres de véhicule.km des PL et des VUL, on a l'équation suivante:

$$X+Y= 15,47 \text{ (*) (dans la situation observée dans l'enquête)}$$

Avec le facteur d'émission Well to Wheel (WW) de **3,07** kg de CO<sub>2</sub> par litre pour le gazole (ADEME 2012, facteur utilisé dans ces travaux) et l'émission de CO<sub>2</sub> de la route, nous obtenons que le fret urbain routier a consommé 4,89 milliards de litres de gazole en 2004. Nous cherchons dans le bilan de la circulation 2004 (CCTN 2004) la consommation unitaire du PL (36,25 l/100km) et grâce aux informations données par le guide méthodologique (ADEME 2017) nous estimons la consommation du VUL à 17,24 l/100km<sup>20</sup> pour l'année 2004). Donc, la consommation totale de carburant du fret routier urbain est la suivante :

$$0,3625 X+ 0,1724 Y =4,89 \text{ (**)}$$

<sup>20</sup> Soulignons que les VUL consomment plus de diesel pour transporter des marchandises que pour les autres motifs. Cette consommation est aussi modulée en fonction des tonnes transportées. Nous estimons ici la consommation moyenne pour les tonnes transportées de 0,26 à 0,46 tonnes (tenant en compte des trajets à vide).

(\*) et (\*\*) nous fournissent un système de deux équations à deux inconnues (X et Y). Nous pouvons calculer les véhicule.km des PL et des VUL. Le résultat est résumé dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 3.2: Répartition du trafic fret routier urbain en 2004**

	Situation observée du fret urbain en 2004	
	En milliards kilomètres	En pourcentage
Véhicule.km du PL (milliards)	11,74	76%
Véhicule.km du VUL (milliards)	3,73	24%
Total	15,47	100%

*Source: Calcul de l'auteur à partir de (RIZET et al. 2014) et du bilan de la circulation*

Le résultat montre qu'en 2004, selon les données de l'enquête ECHO, les VUL représentent seulement 24% des véhicule.km du fret urbain. On constate que ce résultat est assez faible par rapport à celui qu'on trouve dans l'article (Coulombel et al. 2018) sur le trafic en Île-de-France. Ce résultat pourrait s'expliquer par plusieurs raisons. Premièrement, le transport de marchandises réalisé en VUL est largement sous-estimé dans l'enquête ECHO à cause de l'absence de petites entreprises dans l'échantillon de l'enquête (Rizet et al. 2014). Deuxièmement, on trouve bien que le fret urbain dans la région Île-de-France a toujours des caractéristiques différentes de celles d'autres agglomérations urbaines. C'est pourquoi la décomposition entre poids lourd et VUL peut être différente de celle des autres agglomérations.

De la même façon, nous avons estimé le kilométrage effectué en diesel des PL et des VUL dans les scénarios VE1 et VE2. Le résultat est le suivant :

**Tableau 3.3: Trafic du fret urbain en 2004**

*En milliards de kilomètres*

	Fret urbain en 2004		
	Situation observée dans l'enquête ECHO	Simulation avec le Scénario VE1 <sup>21</sup>	Simulation avec le Scénario VE2
Véhicule.km du PL	11,74	8,46	8,31
Véhicule.km du VUL	3,73	3,04	3,04
Véhicule.km du VE		4,84	1,90
Total	15,47	16,34	13,25

*Source: Calcul de l'auteur à partir de (RIZET et al. 2014) et le bilan de la circulation*

<sup>21</sup> Les scénarios VE1 et VE2 sont respectivement les scénarios VE du camion électrique 2 tonnes et 6 tonnes

Le tableau 3.3 montre que grâce à l'électrification fret urbain, il y a une réduction importante du kilométrage effectué par poids lourd thermiques dans les deux scénarios VE1 et VE2. Ce remplacement de diesel par des véhicules électriques permet de réduire l'émission de CO<sub>2</sub>. Ce point sera analysé plus en détail dans la partie suivante.

Néanmoins, il est à noter que (sur l'ensemble des véhicules\*kilomètres) on enregistre une augmentation du total kilométrage réalisé dans le scénario VE1. Cela est expliqué par deux raisons: un détournement du trafic surtout dans les unités urbaines de moins de 100 000 habitants (Rizet et al. 2014) et le remplacement des poids lourds par les camions électriques entraînant une augmentation du nombre de véhicules ainsi que du total de véhicules\*kilomètres.

**\*Fret urbain à l'horizon 2050**

La projection 2050 est établie en considérant que le trafic dans la zone urbaine évolue selon le même taux de croissance annuelle moyen que l'ensemble du trafic (TCAM de 1,3% entre 2012 et 2050, comme dans l'étude de (Pochez 2016), pour les véhicules. kilomètres PL ainsi que ceux des VUL thermiques et électriques.

**Tableau 3.4 : Trafic fret routier urbain à l'horizon 2050**

*En milliards de véhicule kilomètre*

<b>Scénario 'au fil de l'eau'</b>		
	<b>2030</b>	<b>2050</b>
PL.km	16,42	21,26
VUL.km	5,23	6,77
Total véh.km	<b>21,65</b>	<b>28,03</b>
<b>Scénario VE1</b>		
	<b>2030</b>	<b>2050</b>
PL.km	11,84	15,33
VUL diesel.km	4,25	5,50
Véhicules électriques.km	6,78	8,77
Total véhicules.km	<b>22,87</b>	<b>29,60</b>
<b>Scénario VE2</b>		
	<b>2030</b>	<b>2050</b>
PL.km	11,63	15,06
VUL diésel.km	4,25	5,50
Véhicules électriques.km	2,66	3,44
Total véhicules.km	<b>18,54</b>	<b>24,00</b>

*Source: Calcul de l'auteur à partir de (RIZET et al. 2014) et (Pochez 2016)*

Nous retenons l'hypothèse que le total des tonnes.kilomètres reste inchangé dans les trois scénarios. En outre, on retient la même hypothèse que le rapport (Pochez 2016) sur le chargement moyen des poids lourds : 10,9 tonnes en 2030 et 12,1 tonnes en 2050 (**Annexe 3.4**) ainsi que le ratio de tonnes. kilomètres des VUL thermiques et PL dans le rapport ECHO2014 ; nous obtenons alors le résultat suivant sur les tonnes.kilomètres dans la zone urbaine :

Tableau 3.5 : Le fret routier urbain à l'horizon 2050

En milliard de tonnes.kilomètres

	2030			2050		
	PL	VUL	VE	PL	VUL	VE
Scénario fil de l'eau	178,99	1,09	0	257,26	1,57	0
Scénario VE1	171,85	1,01	7,23	248,17	1,31	9,36
Scénario VE2	170,56	1,01	8,51	247,82	1,31	11,02

Source: Calcul de l'auteur à partir de (RIZET et al. 2014) et (Pochez 2016)

Notons que les tonnes.kilomètres des VUL pourraient être sous-estimés à cause de la limite des données dans l'enquête ECHO comme nous l'avons expliqué précédemment.

### 3.4. Quantification des émissions de GES évitées

Pour calculer le gain total de GES, nous quantifions toutes les émissions émises durant la phase amont et la phase en circulation.

#### Méthodologie de calcul des émissions de GES

Pour quantifier l'émission de CO<sub>2</sub> du fret, il existe plusieurs méthodes. Dans cette partie, l'émission de CO<sub>2</sub> est calculée par la distance parcourue par les véhicules, la consommation unitaire au kilomètre des véhicules et le facteur d'émission de la source d'énergie :

$$\text{Quantité de CO}_2 \text{ émises} = \text{véhicule.km} * \text{consommation unitaire au km} * \text{facteur d'émission}$$

#### Hypothèses:

##### Hypothèses sur les facteurs d'émission de l'énergie

Notre objectif dans ce chapitre est de quantifier le coût économique d'une tonne de CO<sub>2</sub> évitée dans la période 2030-2050. Pour cela, nous prenons les résultats des émissions de CO<sub>2</sub> des deux scénarios de l'électrification urbaine de l'année 2004 du rapport ECHO (Rizet et al. 2014). Dans ce rapport, les auteurs ont calculé les émissions de CO<sub>2</sub> avec le facteur d'émission WW de **3,07** kg de CO<sub>2</sub> pour le gazole et **0,053** kg de CO<sub>2</sub> pour l'électricité. Nous prenons en compte le fait que depuis le 1er juin 2017<sup>22</sup>, l'information que le transporteur doit fournir à son client à l'occasion d'une prestation de transport porte **non seulement sur la quantité de CO<sub>2</sub> mais** aussi sur d'autres **GES**. La mise en place de ce nouveau décret a modifié aussi les valeurs des facteurs d'émission des sources d'énergie utilisées par les modes de transport (**Annexe 3.5**). Donc, nous introduisons le nouveau facteur d'émission WW de **3,17** kgCO<sub>2e</sub>/litre (CO<sub>2</sub> équivalent) pour le gazole et de **0,048** kgCO<sub>2e</sub>/kWh pour l'électricité consommée en France métropolitaine dans notre calcul des émissions de GES. En nous appuyant sur le résultat du rapport ECHO (Rizet et al. 2014), nous prenons le

<sup>22</sup> Date d'entrée en vigueur du **Décret n° 2017-639 du 26 avril 2017**, Source: (Information GES des prestations de transports- Guide méthodologique» 2017)-Version actualisée suite à l'article 67 de la loi n° 2015-992

nouveau facteur d'émission d'énergie pour actualiser l'émission de CO<sub>2</sub> (situation en 2004). Le résultat est le suivant :

**Tableau 3.6: Emission de CO<sub>2</sub> du fret urbain en 2004 avec le nouveau facteur d'émission d'énergie**

	Fret urbain en 2004		
	Situation observée dans l'enquête ECHO	Simulation avec le Scénario VE1	Simulation avec le Scénario VE2
Véhicule.km (milliards)	15,47	16,34	13,25
CO <sub>2</sub> de la route (Mt)	15,52	11,59	11,32
Emission de CO <sub>2</sub> évitée (Mt)	3,93		4,20

*Source: Calcul de l'auteur à partir de (RIZET et al. 2014)*

Pour quantifier l'émission de CO<sub>2</sub> dans la période 2030-2050, on suppose que le facteur d'émission WW du gazole ne varie pas dans le temps. Cependant, on fait l'hypothèse que le facteur d'émission WW de l'électricité est de 0,045 kg de CO<sub>2</sub> en 2020 et que cette valeur va baisser de 50% en 2030, et qu'elle reste stable ensuite.

**Tableau 3.7: Facteur d'émission des sources d'énergie**

		2030	2050
Electricité phase amont (kgCO <sub>2</sub> /kwh)		0,0225	0,0225
Gazole	Phase amont (kgCO <sub>2</sub> /litre)	0,66	0,66
	Phase de fonctionnement (kgCO <sub>2</sub> /litre)	2,51	2,51

*Source: Calcul de l'auteur*

*Hypothèse sur la consommation unitaire de carburant*

Nous faisons aussi la même hypothèse sur la consommation unitaire de carburant du PL que celle indiquée dans Pochez. On suppose que, grâce aux nouvelles technologies, la consommation unitaire du PL va diminuer de 33,9 l/100 km en 2012 à 29,7 l/100km en 2030 et 26,6 l/100km en 2050. Le VUL étant utilisé pour différents motifs, nous prenons, pour le transport de marchandises, la consommation unitaire moyenne de 16 litre/100km qui est indiquée dans le guide méthodologique 2017. Pour faire évoluer cette consommation, nous avons calculé le taux de croissance annuel de la consommation unitaire moyenne du VUL dans le bilan de la circulation 2016. Supposant que les tendances observées de 2004 à 2016 se poursuivent, nous appliquons ce taux de croissance annuel dans le futur. Les hypothèses sur la consommation du VUL et du PL sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.8 : Consommation de carburant des PL et des VUL à l'horizon 2050

	2030	2050
Consommation unitaire du PL (l/100km)	29,70	26,60
Consommation unitaire du VUL (l/100km)	14,85	13,24

Source: Calcul de l'auteur à partir de Pochez (2016), bilan de la circulation et guide méthodologique

Il faut noter que la consommation du véhicule électrique varie fortement selon la saison<sup>23</sup>, en raison notamment de l'énergie nécessaire à la climatisation et au chauffage. Dans notre calcul, pour simplifier, on considère que la consommation unitaire du camion électrique n'est pas influencée par ce facteur et qu'elle ne varie pas dans le temps. Pour notre scénario, nous estimons que les consommations de camions électriques avec des charges utiles de 2 tonnes et 6 tonnes sont respectivement de 0,55 kWh/km et 0,76 kWh/km (RIZET et al. 2014).

Tableau 3.9: Consommation d'électricité du camion électrique

	2030	2050
Consommation unitaire du camion électrique CU 2 tonnes (kWh/km)	<b>0,55</b>	<b>0,55</b>
Consommation unitaire du camion électrique CU 6 tonnes (kWh/km)	<b>0,76</b>	<b>0,76</b>

Source: (Rizet 2014)

#### Hypothèses sur le kilométrage annuel et la durée de vie des véhicules

Le kilométrage annuel moyen du VUL thermique dans le bilan de la circulation 2016, est de 16600 km. On trouve qu'un VUL est utilisé pour différents motifs : services (dépannages, visites clients, chantiers), transport des biens (outillage, échantillons, matériaux, gravats ou déchets), transport des marchandises. Pourtant, les trajets pour transport de marchandise sont en moyenne plus longs que les autres déplacements<sup>24</sup>. C'est la raison pour laquelle, dans cette partie, nous supposons que le kilométrage annuel moyen du VUL diesel pour transporter des marchandises est de 17000 km comme sur l'ensemble des motifs. Pour les camions électriques de nos scénarios, qu'ils soient de CU 2 tonnes ou 6 tonnes, nous considérons aussi que leur kilométrage annuel moyen sera de 17000, et que ce kilométrage moyen parcouru par an ne change pas dans le temps.

Les données de kilométrage annuel moyen des PL, quant à elles, proviennent du bilan de la circulation 2016. On émet l'hypothèse que le PL effectue 32 000 km par an.

<sup>23</sup> Analyse des coûts et des bénéfices des véhicules électriques

<sup>24</sup> Les véhicules utilitaires légers : une bonne complémentarité avec les Poids lourds

Tableau 3.10: Kilométrage annuel moyen et durée de vie des véhicules

	Kilométrage annuel moyen	Durée de vie	Kilométrage total parcouru
VUL diesel	17000	15	255 000
Camion électrique CU 2t	17000	15	255 000
Camion électrique CU 6t	17000	15	255 000
PL	32000	15	480 000

*Hypothèses liées à l'émission de la phase amont de la production du véhicule*

Nous émettons l'hypothèse que l'émission de CO<sub>2</sub> associée à la production des véhicules est presque la même pour les véhicules diesel et électrique et que la différence entre le CO<sub>2</sub> émis pour produire le véhicule thermique et le véhicule électrique est seulement liée à la production de la batterie. Donc, dans cette partie, nous prenons en compte **uniquement** les émissions de CO<sub>2</sub> émises lors de la **production de la batterie**

*\*Emissions de CO<sub>2</sub> de la production de la batterie*

Pour quantifier les émissions de GES liées à la production de la batterie, nous partons de l'étude réalisée pour l'ADEME (Niels et al. 2013) Selon cette étude, pour produire une batterie 24 kW nous devons émettre 3 tonnes de CO<sub>2</sub>. Sous l'hypothèse que ce résultat restera valable dans les prochaines années et en éliminant la pollution liée à l'effet de la taille de la batterie, nous appliquons ce résultat dans nos scénarios, et obtenons que la **production d'une batterie de 42kWh** (respectivement. 150kWh) conduit à **5,25** (resp. 18,75) **tonnes de CO<sub>2</sub>e**. Notons que ces batteries sont produites en France. L'électricité consommée est donc produite avec le mix français, qui a un facteur d'émission assez faible par rapport aux pays voisins comme l'Allemagne ou l'Espagne pour produire ces batteries.

*\* Cycle de vie de la batterie*

Concernant la durée de vie de la batterie, nous constatons que cette durée varie de 5 à 20 ans en fonction de nombreux facteurs<sup>25</sup> comme la température, le niveau de charge et surtout l'usage, selon que le véhicule roule beaucoup chaque jour ou non. Selon (ICF 2011), la durée de vie de la batterie actuelle a dépassé 7 ans et elle pourrait être 10 ans. Puisque la durée de vie de la batterie dépend forcément de l'usage, notre raisonnement s'appuie alors donc notamment sur le kilométrage total effectué par une batterie pendant sa durée de vie.

Nous faisons l'hypothèse que sous condition d'exploitation normale, dans la période 2030-2040, une batterie pourrait effectuer 170 000 km au cours de sa durée de vie. Ensuite, grâce à l'évolution de la technologie, la batterie ne va se dégrader qu'après avoir parcouru 204 000 km à partir des années 2040. Et cette hypothèse reste valable jusqu'à l'année 2050.

<sup>25</sup> (« Quelle durée de vie pour les batteries lithium-ion ? » 2017)

Compte tenu de cette hypothèse sur les batteries, et du fait que les émissions de CO<sub>2</sub>e pour produire une batterie de 42 kWh (resp. 150 kWh) sont de 5,25 tonnes de CO<sub>2</sub>e (reps. 18,75) comme expliqué précédemment, nous pouvons estimer la valeur unitaire d'émission amont de CO<sub>2</sub>e de la production de la batterie par kilomètre.

**Tableau 3.11: Emission de GES lors de la production de la batterie**

*En kgCO<sub>2</sub>e par kilomètre*

	2030	2040	2050
kgCO <sub>2</sub> e amont de la production de la batterie 42 kWh	0,03	0,026	0,026
kgCO <sub>2</sub> e amont de la production de la batterie 150kWh	0,11	0,092	0,092

*Source: Calcul de l'auteur*

Nous résumons dans le tableau suivant les facteurs d'émission de la phase amont de production d'énergie, phase amont de production de la batterie et phase en circulation.

**Tableau 3.12: Facteurs d'émission de CO<sub>2</sub>**

	Unité	2030	2040	2050
Phase amont de production du gazole	kgCO <sub>2</sub> e/litre	0,66	0,66	0,66
Phase amont de production d'électricité	kgCO <sub>2</sub> e/kWh	0,0225	0,0225	0,0225
CO <sub>2</sub> amont de la production de la batterie 42kWh	kgCO <sub>2</sub> e/km	0,03	0,026	0,026
CO <sub>2</sub> amont de la production de la batterie 150kWh	kgCO <sub>2</sub> e/km	0,11	0,092	0,092
Phase en fonctionnement du gazole	kgCO <sub>2</sub> e/litre	2,51	2,51	2,51

*Source: Calcul de l'auteur*

**\*Résultats sur l'émission de CO<sub>2</sub> économisée**

Afin de quantifier cette émission de CO<sub>2</sub>, nous suivons la méthode de calcul présentée ci-dessus. La quantité d'émissions de CO<sub>2</sub> évitées selon les deux scénarios VE1 et VE2 est au total la suivante :

Tableau 3.13: Quantification des émissions de CO<sub>2</sub> évitées sur la période 2030-2050

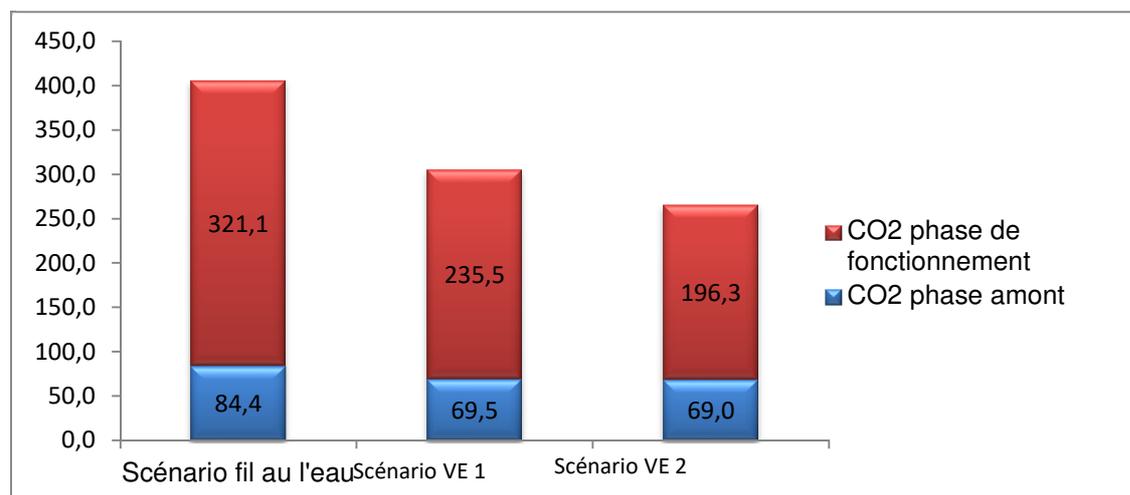
	Scénario 'au fil de l'eau'	Scénario VE1	Scénario VE2
Véhicule.km (milliards)	518,90	548,0	444,3
Phase en amont de production d'énergie (Mt CO <sub>2</sub> e)	84,4	64,9	62,6
Phase en circulation (Mt CO <sub>2</sub> e)	321,1	235,5	196,3
CO <sub>2</sub> amont de la production de la batterie (Mt CO <sub>2</sub> e)	0	4,5	6,4
Total CO <sub>2</sub> du fret routier urbain (Mt CO <sub>2</sub> e)	405,5	305,0	265,3
Gains de CO <sub>2</sub> (Mt CO <sub>2</sub> e)		100,5	140,2

Source: Calcul de l'auteur

Les résultats permettent d'illustrer que le remplacement des véhicules thermiques par les véhicules électriques dans la zone urbaine permet une baisse des émissions de GES du fret urbain dans les deux scénarios : une réduction de 24,8% pour le scénario VE1 et légèrement plus élevée pour le scénario VE2, avec 34,6% sur la période 2030-2050. Plus précisément en valeur absolue, l'électrification du fret urbain permet de réduire de 100 Mt CO<sub>2</sub> pour le scénario VE1 (en moyenne 5,0 Mt CO<sub>2</sub> par an) et d'une valeur un peu supérieure, comme le montre la figure ci-dessous, de 140 Mt CO<sub>2</sub> dans le scénario VE2 (ou 7,0 MtCO<sub>2</sub> par an). Nous constatons aussi que l'émission de CO<sub>2</sub> économisée chaque année évolue dans le temps

Figure 3.5: Emission de GES du fret urbain dans la période 2030-2050

En millions de tonnes de CO<sub>2</sub>e



Source: Figure réalisée par l'auteur

D'un autre côté cependant, on observe aussi une hausse de la circulation des camions en ville pour le scénario VE1. Cette augmentation pose aussi le problème de la congestion dans les villes. C'est la raison pour laquelle, quand nous quantifions (ci-dessous) le coût économique de cette réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, nous prenons en compte le coût de la congestion dans notre calcul.

### 3.5. Evaluation économique

#### \* Méthodes

Nous exposons dans cette partie deux analyses : l'analyse socio-économique qui prend en compte tous les coûts réels supportés par la collectivité (par l'Etat, par les chargeurs et les transporteurs) et enfin les externalités, supportées par les riverains (nuisances) et les autres usagers (congestion), liés au remplacement des camions thermiques par les camions électriques. La variation du coût de transport, supportée par les chargeurs et les transporteurs est analysée avec la méthode du coût total de possession (Total Cost of Ownership, TCO) qui porte sur les coûts associés à l'achat et l'usage des véhicules.

Pour cela, nous émettons plusieurs hypothèses.

#### 3.5.1. Les hypothèses

Hypothèses concernant les véhicules

##### *Prix d'achat des véhicules*

Sur le prix d'achat des véhicules (hors batterie) nous faisons la même hypothèse que (Taszka et Domergue 2017). On suppose un **surcoût** pour le **camion électrique (sans batterie)** par rapport au **camion thermique** de l'ordre de **25% en 2017** et ensuite, grâce aux économies d'échelle, le prix du camion électrique restera constant. Selon INSEE, en raison de changements tarifaires chez certains constructeurs, le prix des véhicules neufs augmente de +0,2% entre 2016 et 2017<sup>26</sup>. Dans un souci de simplification, nous faisons l'hypothèse qu'à cause des réglementations de plus en plus strictes pour les véhicules thermiques, les prix des poids lourds ainsi que des camionnettes vont augmenter dans la même proportion de +0,2% par an. Compte tenu de cette hypothèse, on estime que les prix des poids lourds diesel vont augmenter de **+500€ entre 2017 et 2020**, **+1500€ entre 2020 et 2030** et **+3000€ entre 2030 et 2050** et les prix des camionnettes diesel vont augmenter de **+200€ entre 2017 et 2020**, **+800€ entre 2020 et 2030** et **+1500€ entre 2030 et 2050**.

En effet, les prix des véhicules sont très variables selon les modèles, le moteur, la marque ainsi que l'équipement. A la lumière des données concernant le prix d'achat moyen du camion, nous avons estimé la relation entre la charge utile et le prix des véhicules à partir des données du prix du camion à la vente sur le site de Renault ([Annexe 3.7](#)). En tenant compte des données du Service des données et des études statistiques (SDES au Ministère MTES) sur les véhicules en service ([Annexe 3.8](#)), nous pourrions estimer le prix moyen des véhicules. Nos hypothèses sur les prix d'achat des véhicules sont résumées dans le tableau suivant :

---

<sup>26</sup> Indice des prix à la consommation en juillet 2017-INSEE

Tableau 3.14: Hypothèse sur le prix d'achat HT (hors batterie, hors bonus) des véhicules

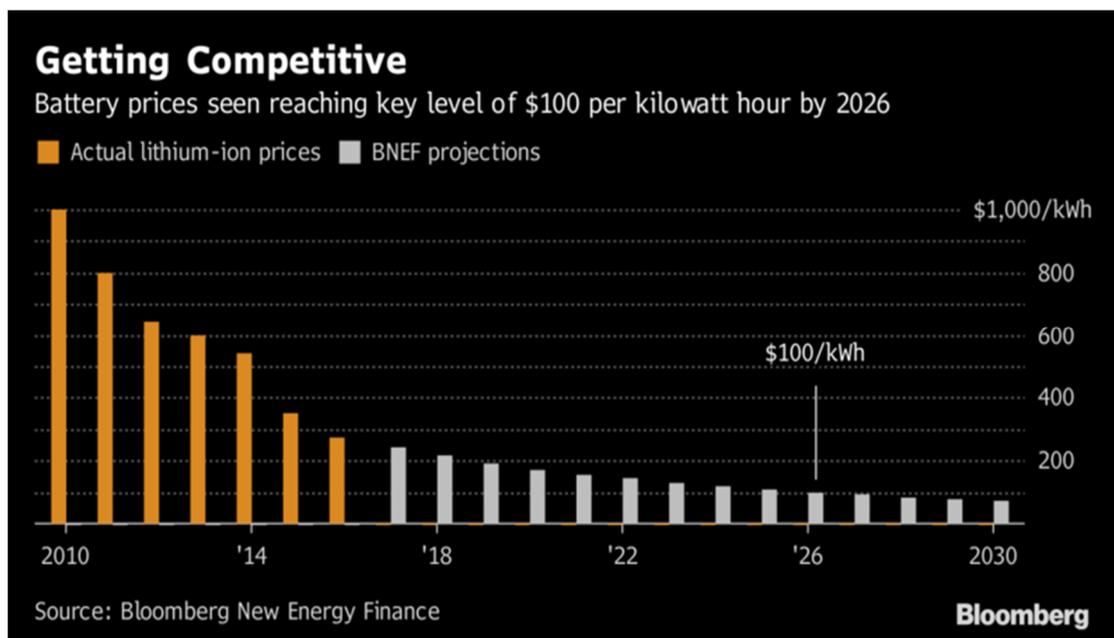
	Poids lourd	VUL thermique	VE CU 2 tonnes	VE CU 6 tonnes
2017	71 026	35 921	58 894	80 080
2030	73 026	36 921	58 894	80 080
2050	76 026	38 421	58 894	80 080

Source: Calcul de l'auteur à partir des données de Renault et SDES

\* Coût des batteries

Selon (Björn Nykvist et Mans Nilsson 2015) le prix des batteries a diminué d'environ 14% par an entre 2007 et 2014, passant de plus de 1 000 USD à environ 410 USD par kWh. Ce prix va baisser à moins de 100 \$/kWh en 2026 selon l'estimation de Bloomberg.

Figure 3.6: Evolution des coûts de la batterie



Source: Bloomberg New Energy Finance

Pour réduire les émissions de GES, nous supposons également que la tendance d'une baisse significative sur le coût des batteries se prolonge dans le futur: le prix des batteries sera divisé par 2 entre 2020 et 2030 et divisé par 1,5 entre 2030 et 2050. Cette hypothèse a été retenue dans plusieurs travaux récents<sup>27</sup>.

<sup>27</sup>Temis (2017, a) : « Analyse coûts bénéfiques des véhicules électriques. Les voitures. - Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer ». Dans ce rapport, l'hypothèse sur le prix de batterie en 2020 est de 200€/kWh et en 2030 il n'est plus que de 100€/kWh

**Tableau 3.15 : Hypothèse sur le coût des batteries**

	2020	2030	2050
Coût batterie (€/kWh)	400	200	133

*Source: (CGDD 2017)*

En prenant en compte cette hypothèse ainsi que les hypothèses sur le kilométrage annuel du véhicule électrique (Tableau 3.10), nous avons estimé aussi le coût des batteries par kilomètre.

**Tableau 3.16 : Coût des batteries par kilomètre**

	2030	2040	2050
Coût batterie 42kWh (€/km)	0,0494	0,034	0,0275
Coût batterie 150 kWh (€/km)	0,18	0,12	0,10

*Source : Calcul de l'auteur*

*\* Borne de recharge rapide*

D'après l'analyse de la littérature, nous trouvons que le coût d'une borne de recharge varie grandement selon la puissance de la charge ainsi que le type de borne. Dans ce chapitre, nous émettons l'hypothèse que la durée de vie d'une borne est de 15 ans, le coût d'une borne de recharge rapide et de son raccordement au réseau électrique est de 55000 € et le coût d'entretien par an des bornes de recharge est de 1650 €, soit 3% de l'investissement initial (CGDD 2011).<sup>28</sup> Nous supposons aussi que ces bornes de recharge seront utilisées de façon très optimale: une borne de recharge pour 4 véhicules dans le scénario VE1 et pour 2 véhicules dans le scénario VE2.

**Tableau 3.17 : Coût des bornes de recharge rapide**

	VE1	VE2
Coût des bornes de recharge (€/km)	0,05	0,09

*Source: Calcul de l'auteur à partir de CGDD 2011*

*\* Taxes sur le gazole et l'électricité*

Dans cette partie, nous supposons que la TICPE (hors taxe carbone) reste au même niveau actuel de **43 centimes** par litre pour les **Poids lourds** et **48 centimes** pour les **VUL**. Notons que le PTAC des VUL est limité à 3,5 tonnes, c'est pourquoi les VUL n'ont pas accès au gazole professionnel, qui est réservé aux véhicules de plus de 7,5 tonnes. Le montant de la

---

Temis 2017,b : « Concept d'autoroute électrique. Évaluation socioéconomique. -Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer »

<sup>28</sup> Les véhicules électriques en perspective: Analyse coûts-avantages et demande potentielle (CGDD 2011)

taxe carbone évolue comme indiqué dans la loi de 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte, autrement dit, le niveau de la taxe carbone est supposé atteindre 100 euros par tonne de CO<sub>2</sub> en 2030 ou 25 centimes par litre.

**Tableau 3.18 : Les hypothèses concernant les taxes**

Gazole		
	2030	2050
<b>Taxes pour les PL</b>		
TICPE (€/l)	0,43	0,43
Taxe carbone (€/l)	0,25	0,60
Total Taxe d'énergie PL (€/l)	0,68	1,03
<b>Taxes pour les VUL</b>		
TICPE (€/l)	0,48	0,48
Taxe carbone (€/l)	0,25	0,60
Total Taxe d'énergie VUL (€/l)	0,73	1,08
	2030	2050
Taxe sur l'électricité (€/kWh)	0,05	0,05

Pour l'électricité, nous faisons la même hypothèse que celle des rapports du CGDD 2017 (Taszka et Domergue 2017) (FragnoI 2017). Plus en détail, la taxe intérieure sur la consommation finale d'électricité (TICFE) est supposée augmenter à 50€/MWh en 2025 et puis, elle se stabilise à ce niveau sur la période 2030-2050.

*\* Prix des carburants et de l'électricité*

Nous reprenons les hypothèses sur les prix des énergies du rapport CGDD 2017 (FragnoI 2017). Dans ce rapport, le prix du diesel (gazole) est construit en partant des données du scénario "Current Policies" de l'Agence Internationale de l'énergie qui suppose que le prix du pétrole a un taux de croissance moyen annuel de 7% dans la période 2015-2030 et de 1% après 2030. Pour le prix de l'électricité hors taxe, on suppose qu'il évolue 1% par an. Les hypothèses liées aux prix des énergies sont résumées dans le tableau 3.19

Tableau 3.19 : Les hypothèses concernant les prix d'énergie

<b>PL diesel</b>	<b>2030</b>	<b>2050</b>
Prix Hors Taxes	1,07	1,37
TICPE	0,43	0,43
Taxe carbone	0,25	0,60
<b>Prix final</b>	<b>1,75</b>	<b>2,4</b>
<b>VUL diesel</b>	<b>2030</b>	<b>2050</b>
Prix Hors Taxes	1,07	1,37
TICPE	0,48	0,48
Taxe carbone	0,25	0,60
<b>Prix final</b>	<b>1,80</b>	<b>2,45</b>
<b>Electricité</b>		
Prix HT (€/MWh)	77,8	77,8
Taxe d'électricité	50,5	50,5
<b>Prix final (€/MWh)</b>	<b>128,3</b>	<b>128,3</b>

Source : CGDD 2017

### 3.5.2. Transporteurs

Dans nos scénarios, nous supposons que l'Etat va interdire les véhicules diesel dans les zones urbaines à partir de l'année 2030. Sous l'impact de cette politique, les transporteurs vont commencer à réagir dès maintenant. Ils vont investir en achetant des véhicules électriques pour renouveler leur parc de véhicules ; faisons l'hypothèse que leur parc de véhicules sera renouvelé totalement en 2030.

Du point de vue des transporteurs, un des inconvénients majeurs de passer des véhicules thermiques aux véhicules électriques ne réside pas uniquement dans le problème de l'autonomie des véhicules électriques mais plutôt dans le problème lié au coût d'achat des camions électriques, qui est actuellement assez élevé par rapport aux véhicules thermiques. Est-ce que l'adoption du camion électrique pourra s'avérer une bonne mesure pour les transporteurs sous l'aspect économique ? Pour répondre à cette question, cette partie fournit une comparaison du coût total de possession (TCO) des différents types de véhicules : Poids lourd, VUL, VE1 et VE2. Ensuite, nous analysons les coûts totaux du transport selon les trois scénarios, au fil de l'eau, VE1 et VE2.

Selon les hypothèses émises, le résultat est résumé dans le tableau suivant:

Tableau 3.20 : Coût du transport selon les différents types de véhicules

**A l'horizon 2030:**

		PL	VUL	VE1	VE2
Kilométrage	km/an	32000	17000	17000	17000
Tonnage transporté	t/véh.	10,90	0,24	1,07	3,2
Durée de possession	ans	15	15	15	15
<b>Actualisation</b>	%	0,08	0,08	0,08	0,08
<b>Dépréciation</b>	%	0,04	0,04	0,04	0,04
<b>Coûts fixes</b>					
Achat	€	73026	36921	58894	80080
Valeur résiduelle	€	11555	5842	9319	12671
Assurances (véhicule +marchandises)	€/an	1871	747	1218	1722
Charges administratives	€/an	18387	18387	18387	18387
Taxe à l'essieu	€/an	516	0	0	0
<b>Coûts variables</b>					
Prix de batterie	€/ km	0	0	0,05	0,18
Borne de recharge	€/ km			0,06	0,11
Pneumatique+Entretien+réparation	€/ km	0,110	0,038	0,019	0,019
Salaire chauffeur	€/ km	1,114	2,096	2,096	2,096
Coût énergie TTC	€/ km	0,520	0,267	0,071	0,098
Coût unitaire selon la distance	€/ km	1,49	2,13	2,16	2,37
Coût unitaire à la tonne. kilomètre	€ /tkm	0,14	8,97	2,02	0,74

Source: Calcul de l'auteur

Le résultat montre que le transporteur peut économiser sur l'énergie, mais le coût du chauffeur du VE par km est très important puisque le kilométrage annuel du VE est plus faible par rapport au PL. Les coûts unitaires du PL, du VUL ainsi que ceux des camions électriques CU 2 tonnes et 6 tonnes évoluent dans le temps comme dans l'annexe 3.12. Selon l'évolution du trafic, nous calculons le coût unitaire moyen du transport pour les différents scénarios. Le résultat est présenté dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 3.21 : Coût du transport urbain selon les scénarios**

	2030		2050	
	€/tkm	€/km	€/tkm	€/km
Scénario 'au fil de l'eau'	0,19	1,65	0,21	1,98
Scénario VE1	0,23	1,81	0,25	2,17
Scénario VE2	0,18	1,77	0,20	2,11

*Source: Calcul de l'auteur*

A partir du résultat du coût unitaire du transport selon les trois scénarios, nous estimons les coûts totaux du transport urbain selon le scénario.

**Tableau 3.22 : Variation du coût pour les transporteurs**

	Scénario fil de l'eau	Scénario VE1	Scénario VE2
<b>Coût du transport</b>	581,1	672,4	531,1
<b>Variation du coût</b>		<b>-91,3</b>	<b>+50,0</b>

*Source: Calcul de l'auteur*

Selon notre résultat, le remplacement des Poids lourds par de petits camions électriques (CU 2 t) entraîne une perte importante supportée par les transporteurs et les chargeurs (91 milliards d'euros sur 20 ans soit 4,5 milliards par an) à cause d'une part de l'augmentation du coût unitaire du transport. Au contraire, si les fabricants proposaient des camions électriques avec une charge utile de 6 tonnes et si le taux de remplissage restait à 80% pour les kilomètres en charge, comme notre hypothèse dans le scénario VE2, les coûts totaux du transport urbain seraient réduits de 50 milliards d'euros sur 20 ans, autrement dit, l'économie serait en moyenne de 2,5 Mds euros par an par rapport au scénario au fil de l'eau. Du point de vue du chargeur, nous constatons bien évidemment que si les marchandises passent par les plateformes, le temps total du trajet s'en trouve rallongé dans les deux scénarios électriques, par rapport au fil de l'eau, à cause du temps du chargement et déchargement des véhicules. Nous aurions souhaité pouvoir prendre en compte un coût spécifique sur ce point dans nos calculs mais faute de données, ce coût n'a pas pu être estimé : dans ce chapitre, nous faisons l'hypothèse que le coût de plateforme est le même selon les trois scénarios.

### **3.5.3. Finances publiques**

On émet l'hypothèse qu'avant 2030, pour réduire les émissions de GES, l'Etat va subventionner l'achat des camions électriques de moins de 4,5 tonnes. A partir de 2030, il n'y a plus de subvention. Comme l'indique notre analyse dans les parties précédentes, le remplacement des véhicules thermiques par les véhicules électriques permet de réduire les émissions de GES via la baisse de la consommation de carburants, mais cette diminution de la

consommation va entraîner aussi à son tour une **perte de recettes fiscales** sur le gazole pour l'Etat.

Le remplacement des Poids lourds par les véhicules électriques permet de réduire le coût total d'usage d'infrastructure, pour ce qui concerne les coûts d'entretien et de réparations des routes. Dans un souci de simplification, comme indiqué dans la méthodologie de cette thèse, nous considérons que tous ces coûts seront payés par l'Etat. Nous émettons l'hypothèse du coût marginal d'usage de l'infrastructure comme le suivant:

*\* Hypothèse du coût d'usage de l'infrastructure*

Le coût marginal d'usage de l'infrastructure est calculé à partir des données dans **Les Comptes des transports en 2011** (MEDDE 2013). Nous actualisons ce coût suivant l'évolution de l'indice "TP 01 " de l'INSEE (107% en 2017 par rapport à 2010). En supposant que le coût marginal d'usage de l'infrastructure est identique dans toutes les zones géographiques, notre hypothèse sur ce coût dans la période 2030-2050 est présentée dans le tableau ci-dessous:

**Tableau 3.23: Coût marginal unitaire de l'usage de l'infrastructure**

c€/vkm	2030	2040	2050
PL	6,8	7,4	7,9
VUL diesel	1,3	1,4	1,5
Véhicule électrique VE1	1,3	1,4	1,5
Véhicule électrique VE2	6,8	7,4	7,9

*Source : Calcul de l'auteur à partir du rapport de la CCTN en 2011*

Prenant en compte ces hypothèses, nous estimons la perte des recettes fiscales et le bénéfice pour les finances publiques grâce à la réduction des dépenses liées à l'usage l'infrastructure. Le résultat est le suivant:

**Tableau 3.24 : Bilan pour l'Etat sur la période 2030-2050**

	Scénario Fil de l'eau	Scénario VE1	Scénario VE2
Recettes fiscales (Mds €)	79,0	61,4	61,44
Perte fiscale de l'Etat (Mds €)		-17,66	-17,60
Dépenses publiques (Mds €)	23,0	18,40	19,94
Gain pour l'Etat (Mds €)		+4,60	+3,06
Bilan de finance publique (Mds €)		-13,1	-14,5

*Source: Calcul de l'auteur*

On peut constater qu'avec la mise en place de l'interdiction de la circulation des véhicules thermique à partir de l'année 2030, l'Etat va perdre en moyenne un peu moins d'un milliard d'euros par an de recette fiscale. C'est la raison pour laquelle, nous pensons qu'à long terme il sera difficile pour l'Etat de retenir un niveau de la taxe d'électricité très faible comme prévu actuellement. Un test de sensibilité sur le niveau de la taxe sera présenté plus loin.

Cette perte fiscale sera en partie compensée par le gain des dépenses publiques liées à l'entretien et réparations des routes. Sur le bilan total, l'Etat va perdre en moyenne près de 0,73 milliards euros par an dans scénario VE2 et ce montant est légèrement plus faible dans le scénario VE1 (0,65 milliards euros par an).

### **3.5.4. Coût des externalités**

L'objectif de cette partie consiste à identifier les coûts des externalités (coût lié à la pollution, à la congestion, et à l'insécurité). Nous prenons en compte des coûts d'externalité dans les 3 phases:

- les émissions de GES et de polluants locaux émis lors de la circulation des véhicules ;
- les émissions amont liées à la production de l'énergie (électricité ou carburant) ;
- les émissions associées à la phase amont de production des batteries.

Les émissions de CO<sub>2</sub> liées à la production des véhicules électriques ainsi que thermique ne sont pas prises en compte

### **Méthode**

Les coûts marginaux des externalités dépendent des zones géographiques et aussi du type de réseau. Pour simplifier, dans cette partie, on considère que la répartition du trafic de fret routier urbain selon le type de réseau (autoroutes concédées, réseau national non concédé, routes départementales, routes communales) reste inchangée durant la période 2030-2050 (**Annexe 3.9**). Nous partons des valeurs tutélaires recommandées dans le rapport (Quinet, 2013) et (MEDDE 2013) et faisons évoluer ces externalités dans le temps. Le taux de croissance du PIB/tête est supposé égal à + 1,3%/an<sup>29</sup>. Ces externalités sont aussi actualisées au taux de **4,5%** conformément aux recommandations du même rapport (Quinet, 2013).

### **Hypothèses**

#### **Hypothèse sur les coûts de l'environnement**

*\* Hypothèse du coût marginal unitaire du bruit*

Le remplacement des véhicules thermiques par des véhicules électriques permet de réduire la pollution sonore. Pour le poids lourds et le VUL thermique, nous retenons le coût marginal unitaire du bruit dans le rapport (Quinet, 2013) en prenant en compte la répartition du trafic selon le type de réseau (**Annexe 3.9**). Ensuite, nous faisons évoluer ce coût dans le temps,

---

29

avec un taux de croissance analogue à celui du PIB par tête. Pour le camion électrique, nous posons l'hypothèse que dans la zone urbaine, qu'on lui ajoute ou non un bruit artificiel, le véhicule électrique a un coût unitaire du bruit égal à **la moitié** de celui du véhicule thermique. Le résultat est résumé dans le tableau suivant:

**Tableau 3.25: Coût marginal unitaire du bruit du PL, VUL et véhicule électrique dans la zone urbaine**

€/1000vkm	2030	2040	2050
PL	3,6	4,1	4,7
VUL diesel	0,78	0,89	1,01
Véhicule électrique VE1	0,39	0,45	0,5
Véhicule électrique VE2	1,8	2,0	2,3

*Source : Calcul de l'auteur à partir du rapport (Quinet 2013)*

*\* Hypothèse du coût marginal unitaire de la pollution locale*

Les données sur le coût unitaire de la pollution locale du poids lourds et du VUL thermique proviennent du rapport Quinet 2013. L'évolution de ces valeurs est évaluée en prenant en compte d'une part la croissance du PIB par tête, d'autre part l'amélioration des émissions individuelles (-6% par an sur 2010-2020) comme indiqué dans le rapport Quinet. Pour le camion électrique, cette pollution locale est supposée nulle comme dans le rapport CGDD 2017

**Tableau 3.26: Coût marginal unitaire de la pollution locale du PL, VUL et véhicule électrique dans la zone urbaine**

c€/km	2020	2030	2040	2050
PL	10,8	11,7	12,6	13,5
VUL diesel	2,1	2,2	2,4	2,6
Véhicule électrique	0	0	0	0

*Source : Calcul de l'auteur à partir du rapport Quinet*

*\* Hypothèse du coût externe lié à la production de la batterie*

Nous prenons la valeur du coût externe pour produire une batterie de 24 kWh dans le rapport (CGDD, 2017) afin d'évaluer notre coût externe associé à la production de la batterie de 42 kWh pour le scénario VE1 et de 150 kWh pour le scénario VE2. Notre hypothèse sur ce coût externe est la suivante :

**Tableau 3.27: Hypothèse sur le coût externe lié à la production d'une batterie 42kWh et 150 kWh**

Coût externe (€/batterie)	2030	2040	2050
Batterie 42 kWh	1256	1403	1566
Batterie 150 kWh	4488	5010	5595

Source : Calcul de l'auteur à partir du rapport CGDD 2017

*\*Hypothèse du coût marginal unitaire de l'insécurité*

Pour un volume de trafic donné, l'ajout d'un véhicule sur le réseau a un impact sur la probabilité d'accident. C'est la raison pour laquelle nous prenons en compte le coût de l'insécurité dans notre calcul des externalités. Dans notre calcul nous considérons que le coût marginal unitaire de l'insécurité d'un véhicule électrique est égal à celui du VUL thermique.

Nous utilisons les données sur le **coût marginal unitaire de l'insécurité des Comptes des transports en 2011** (MEDDE 2013) ([Annexe 3.10](#)) et la répartition du trafic urbain ([Annexe 3.9](#)) pour calculer le coût marginal unitaire d'accident de Poids lourd et VUL dans la zone urbaine. Ensuite, nous faisons évoluer ce coût dans le temps au rythme de la croissance du PIB par tête. Notre hypothèse est résumée dans le tableau suivant :

**Tableau 3.28: Coût marginal unitaire de l'insécurité dans la zone urbaine**

c€/vkm	2030	2040	2050
PL	6,7	7,6	8,7
VUL diesel	2,0	2,3	2,6
Véhicule électrique VE1	2,0	2,3	2,6
Véhicule électrique VE2	6,7	7,6	8,7

Source : Calcul de l'auteur à partir du rapport CTN en 2011

Notons que ce coût marginal est peut être surestimé car, comme indiqué dans le rapport CTN en 2011, le coût marginal unitaire de l'insécurité dépend des dommages liés aux accidents et de l'impact d'un véhicule supplémentaire sur la probabilité d'accident. Selon les auteurs de ce rapport, le risque d'accident, de manière générale, dépend de nombreux déterminants : le niveau de trafic sur le tronçon étudié, les caractéristiques des conducteurs par exemple le niveau d'expérience, la qualité de la formation, mais aussi la vitesse, les conditions climatiques (neige, verglas, etc.). Néanmoins, en raison de la limite des données, dans ce rapport les auteurs supposent que la probabilité d'accident est proportionnelle au trafic.

*\*Hypothèse du coût marginal unitaire de congestion*

Pour évaluer le coût de congestion, nous partons des données sur le coût marginal unitaire de congestion routière dans Les comptes transport en 2011 selon les types de réseaux ([Annexe 3.11](#)) en tenant compte de la répartition du trafic urbain ([Annexe 3.9](#)). En supposant que le niveau de la congestion ne varie pas dans le temps, le coût marginal unitaire de congestion du

PL comme du VUL évolue comme la valeur du temps (i.e. PIB par tête avec un facteur 0,7)<sup>30</sup>. En ajoutant que dans notre calcul, nous avons supposé que le coût marginal unitaire de la congestion du véhicule électrique CU 2 tonnes est égal à celui du VUL thermique, et du camion électrique CU 6 tonnes est égal à celui du PL. Donc, notre hypothèse sur le coût marginal unitaire de congestion routière est la suivante :

**Tableau 3.29: Coût marginal unitaire de la congestion en zone urbaine**

c€/vkm	2030	2040	2050
PL	23,3	25,5	28,0
VUL diesel	7,8	8,6	9,4
Véhicule électrique VE1	7,8	8,6	9,4
Véhicule électrique VE2	23,3	25,5	28,0

*Source : Calcul de l'auteur à partir CTN en 2011*

Selon les données du Comptes des transports en 2011, le coût marginal unitaire de congestion dans la zone urbaine du PL est trois fois plus que celui de la camionnette. Comme nous avons expliqué dans la méthodologie, le coût marginal de la congestion varie selon l'endroit et le moment de la journée (heure de pointe, heure creuse). Pourtant, dans ce rapport, les auteurs ne distinguent pas ce facteur dans leur calcul. Donc, ce coût marginal pourrait être plus élevé que le coût de la congestion réel. C'est la raison pour laquelle, nous faisons dans la section suivante des tests de sensibilités sur ce coût.

### Résultats globaux du coût des externalités

Selon les hypothèses émises, le coût des externalités est résumé dans le tableau ci-dessous:

**Tableau 3.30: Coût des externalités selon les différents scénarios sur la période 2030-2050**

*En milliard euros*

Externalité		fil de l'eau	Scénario VE1	Scénario VE2
Bruit	Mds €	1,1	0,8	0,8
Pollution locale	Mds €	36,3	27,0	26,9
Accidents urbain	Mds €	20,9	17,6	18,0
Congestion urbaine	Mds €	68,9	58,9	59,6
Total	Mds €	127,2	104,3	105,3
			+22,9	+21,9

*Source : Calcul de l'auteur*

<sup>30</sup> Règle d'évolution dans le rapport Boiteux II

Le résultat dans le tableau 3.30 montre que l'électrification du fret urbain permet de réduire les coûts des externalités: la pollution locale, des accidents, le bruit ainsi que la congestion dans les deux scénarios électriques. Plus en détail, en moyenne, chaque année nous pourrions réduire de plus de 1,1 milliards d'euros les coûts externes grâce à la mise en place de camions électriques dans la zone urbaine. On constate que les coûts externes engendrés par la pollution locale et la congestion occupent une grande partie du coût total des externalités. L'addition de ces deux coûts représente plus de 80% du total des coûts externes. Quels sont les impacts de ces coûts sur le coût économique pour la collectivité ainsi que sur le coût d'abattement d'une tonne de CO<sub>2</sub> évitée ? Nous répondrons à cette question dans la section sur les tests de sensibilité.

### 3.6. Résultat du coût économique d'une tonne de GES évitée

Nous résumons nos résultats sur le coût économique d'une tonne GES évitée via la mise en place de véhicules électrique dans la zone urbaine dans le tableau 3.31

**Tableau 3.31: Coût économique d'une tonne de CO<sub>2</sub> évitée selon les différents scénarios**

		<b>Scénario VE1</b>	<b>Scénario VE2</b>
Transporteur	Mds €	-91,3	+50,0
Finance publique	Mds €	-13,1	-14,5
Externalité	Mds €	+22,9	+21,9
Solde	Mds €	<b>-81,5</b>	<b>57,4</b>
CO <sub>2</sub> économisée	Million tonne	-100,5	-140,3
<b>Coût d'abattement</b>	€/tCO <sub>2</sub>	<b>+811</b>	<b>-409</b>

Source : Calcul de l'auteur

D'après nos calculs, le coût d'abattement final d'une tonne de CO<sub>2</sub> évitée est vraiment très différent selon les deux scénarios : un coût très élevé (811 €/t CO<sub>2</sub>) dans le scénario VE1 et un bénéfice économique (409 €/t CO<sub>2</sub>) dans le scénario VE2.

Cette différence du résultat provient principalement du coût du transport qui est très élevé en raison du remplacement des poids lourds par des petits camions de 2 tonnes de charge utile dans le scénario VE1.

Notons que ces résultats sont vraiment sensibles aux hypothèses émises, c'est la raison pour laquelle, nous testons leur sensibilité aux variations de quelques variables qui influencent le résultat final.

### 3.7. Tests de sensibilité

#### 3.6.1. Kilométrage annuel des véhicules

Rappelons que notre hypothèse dans ce chapitre sur le kilométrage annuel des véhicules électriques est de **17 000**. D'après nous, c'est une hypothèse qui influence fortement le coût économique d'une tonne de CO<sub>2e</sub> évitée, car elle a des impacts directs sur le coût du transport qui occupe un rôle important dans le résultat final.

Faisons varier de 20% ce paramètre. Autrement dit, sous l'hypothèse que toutes les autres choses restent égales par ailleurs, nous calculons le coût d'abattement de CO<sub>2</sub> dans 2 cas : le kilométrage annuel des véhicules électriques augmente de 17 000 à 20 400 ou diminue de 17 000 à 13 600. Le résultat est le suivant :

**Tableau 3.32: Test de sensibilité du kilométrage annuel des véhicules**

Kilométrage annuel du véhicule électrique	Coût d'abattement (€/tCO <sub>2</sub> )	
	Scénario VE1	Scénario VE2
20 400 km	+476	-483
17 000 km	<b>+811</b>	<b>-409</b>
13 600 km	+1325	- 292

Source : Calcul de l'auteur

Le résultat de ce test de sensibilité montre que le coût économique d'une tonne de CO<sub>2</sub> a été nettement influencé par le kilométrage annuel du véhicule électrique dans les deux scénarios. Ce coût est plus sensible dans le scénario VE1 que dans le scénario VE2. Une augmentation de 20% du kilométrage annuel (de 17 000 à 20 400) réduit en effet significativement le coût d'abattement de 811 à 476 €/tCO<sub>2</sub> (soit une réduction de 40% du coût) dans le scénario VE1 et augmenter d'un bénéfice de 409 à 483 €/tCO<sub>2</sub> (soit une augmentation de 18% du bénéfice) pour le scénario VE2.

Cependant, le coût économique d'une tonne de CO<sub>2</sub> dans le cas du scénario VE1 réagit très fortement si le kilométrage effectué par le camion électrique est réduit de 20%, de 17 000 à 13 600 km. On enregistre alors une augmentation de 63% du coût d'abattement d'une tonne de CO<sub>2</sub>, ce coût passant de 811 à 1325€. Cette augmentation du coût économique d'une tonne CO<sub>2</sub> est expliquée principalement par la variation du total coût du transport payé par les transporteurs (voir cette variation dans l'[annexe 3.13](#)). Donc, ce test de sensibilité sur le kilométrage annuel des véhicules électrique confirme que l'utilisation des véhicules électriques a des impacts directs sur le coût unitaire du transport et sur le coût économique pour une tonne de CO<sub>2</sub> réduite.

#### 3.6.2. Durée de vie de la batterie

Notons que nous avons fait l'hypothèse que les batteries de 42 kWh et 150 kWh sont fabriquées en France et que ces batteries utilisent l'électricité française pour la charge.

Concernant la durée de vie de la batterie, dans ce chapitre, nous avons supposé que leur durée de vie est 10 ans (ou 170 000 km au cours de leur durée de vie) dans la période 2030-2040 et 12 ans (20 400 km) dans la période 2040-2050. Pourtant, comme nous l'avons expliqué, cette durée de vie varie avec de très nombreux facteurs. Testons donc la sensibilité du coût d'abattement à une variation de la durée de vie de la batterie.

**Tableau 3.33: Test de sensibilité de la durée de vie de la batterie**

Durée de vie de la batterie (ans)	Coût d'abattement (€/tCO <sub>2</sub> )	
	Scénario VE1	Scénario VE2
Valeur de référence à 10 ans	<b>+811</b>	<b>-409</b>
Diminution de 20 %	+827	- 406
Augmentation de 20%	+802	-410

*Source : Calcul de l'auteur*

Notre analyse de sensibilité (tableau 3.33 ci-dessus) montre que la durée de vie de la batterie a un impact sur le coût d'abattement d'une tonne CO<sub>2</sub>, mais cet impact est faible : lorsque la durée de vie de la batterie varie de 20%, ce coût n'est changé seulement que d'environ 1% à la hausse comme à la baisse dans les deux scénarios

### 3.6.3. Taux de remplissage

Constatons que notre hypothèse de 80% sur le taux de remplissage pour les kilomètres en charge pour les camions électriques est très optimiste. Comment le coût économique d'une tonne CO<sub>2</sub> évitée varie dans les deux scénarios si ce taux n'est que 60% ? Pour cela, nous modélisons d'abord le trafic des véhicules électriques selon le taux de remplissage de 60% et un taux de retour à vide de 50% des kilomètres en charge ([Annexe 3.9](#)). Le résultat est présenté dans le tableau suivant:

**Tableau 3.34: Test de sensibilité du taux de remplissage (60% plutôt que 80%) du camion électrique**

		Scénario VE1	Scénario VE2
Transporteur	Mds €	-102,7	42,2
Finance publique	Mds €	-12,5	-15,3
Externalité	Mds €	18,8	17,0
Solde	Mds €	<b>-96,4</b>	<b>44,0</b>
CO <sub>2</sub> économisée	Millions de tonnes	98,0	137,6
Coût d'abattement	€/tCO <sub>2</sub>	<b>-983</b>	<b>320</b>

*Source : Calcul de l'auteur*

La réduction de 80% à 60% du taux de remplissage des VE durant leurs parcours en charge a des impacts importants sur le coût économique d'une tonne de CO<sub>2</sub> économisé. Cette diminution fait augmenter tous les coûts dans les deux scénarios véhicules électriques (coûts des externalités, coût du transport, perte pour l'Etat). Plus en détail, le coût d'abattement d'une

tonne de CO<sub>2</sub> évitée augmente de **811** €/tCO<sub>2</sub> à **983** €/tCO<sub>2</sub> dans le scénario VE1 et le bénéfice économique pour une tonne de CO<sub>2</sub> réduite diminue de **409** € à **320** € dans le scénario VE2. Donc, notre test de sensibilité sur le taux de remplissage des véhicules montre que le résultat est sensible aux hypothèses sur l'utilisation des véhicules.

### 3.6.4. Coût de la congestion

Comme nous l'avons expliqué dans la note méthodologique, le coût marginal de la congestion occupe une partie importante dans le coût total externe du fret urbain (voir annexe 3.14). Pourtant, selon la littérature disponible, nous constatons que ce coût est très variable selon la zone urbaine (urbain dense, urbaine très dense...). Selon (Prud'homme 2015), les coûts marginaux de la congestion dans le cas du périphérique parisien varient de 0,02 c€/véhicule.km lorsque les véhicules roulent à 80 km/h, jusqu'à 390 c€/véhicule.km quand les véhicules roulent à 5km/h. Récemment, d'après le rapport du Conseil d'orientation des infrastructures (Duron 2018), en 2015 le coût marginal de la congestion du Poids lourd dans la zone urbaine très dense est 99,1 c€/véhicule.km et 44,9 c€/véhicule.km pour le VUL diesel. C'est la raison pour laquelle, nous faisons le test de sensibilité sur ce coût et analysons l'impact de ce coût sur le coût total des externalités ainsi que sur le coût économique pour réduire une tonne de CO<sub>2</sub>. Nous faisons varier le coût marginal de la congestion de 0 à 100 c€/véhicule.km pour le PL et 0 à 45 c€/véhicule.km pour le VUL. Nous maintenons l'hypothèse que le coût marginal de la congestion du VUL électrique VE1 et du camion électrique VE2 est respectivement égal à ceux du VUL diesel et du PL. Plus en détail, notre hypothèse H<sub>0</sub> correspond au coût marginal de congestion nul du PL, du VUL ainsi que des véhicules électriques. Autrement dit, nous calculons le coût d'abattement d'une tonne de CO<sub>2</sub> évitée sans prendre en compte le coût de la congestion dans le coût externe. Notre hypothèse H<sub>1</sub> correspond aux coûts de congestion dans la zone urbaine très dense : 100 c€/véhicule.km pour les PL et les VE2 et 50 c€/véhicule.km pour les VUL et les VE1 en 2015. Nous faisons évoluer ce coût dans le temps. (Annexe 3.15). Notre résultat sur le coût d'abattement est résumé ci-dessous:

**Tableau 3.35: Test de sensibilité du coût marginal de la congestion**

Coût marginal de la congestion (c€/km)	Coût d'abattement (€/tCO <sub>2</sub> )	
	Scénario VE1	Scénario VE2
Valeur de référence <sup>31</sup>	<b>+811</b>	<b>-409</b>
Hypothèse H <sub>0</sub>	+911	-341
Hypothèse H <sub>1</sub>	+545	-683

Source : Calcul de l'auteur

Comme nos résultats dans la section précédente, l'un des avantages de l'électrification du fret urbain est de réduire le coût des externalités et surtout le coût de la congestion grâce à la

<sup>31</sup> Rappelons nous que notre hypothèse sur la valeur de référence du coût marginal de la congestion est bien indiqué dans le tableau 3.26: en 2030, le coût marginal de la congestion du PL, du VUL sont respectivement 23 c€/km, 8 c€/km

baisse du trafic dans le scénario VE2. Dans notre hypothèse  $H_0$ , nous négligeons la congestion dans le coût externe, nous trouvons que le gain des externalités du scénario VE1 et du scénario VE2 a diminué beaucoup: de 22,9 milliards euros à 12,7 milliards euros dans le scénario VE1 et 21,9 à 12,4 milliards euros dans le scénario VE2. Cela entraîne une augmentation significative du coût économique de 811€ à 911€ pour une tonne de  $CO_2e$  dans le scénario VE1 et une baisse du bénéfice économique de 409 € à 341€ dans le scénario VE2.

Dans l'hypothèse  $H_1$ , nous testons avec la valeur élevée du coût marginal de la congestion (**Annexe 3.15**). Selon cette hypothèse, nous enregistrons un gain des externalités très important dans les deux scénarios: 49,6 milliards euros dans le scénario VE1 et 60,4 milliards euros dans le scénario VE2. Ce gain permet de réduire le coût d'abattement de 811 à 545 €/t $CO_2e$  et un bénéfice économique plus élevé dans le scénario VE2: 683 €/t $CO_2e$ .

Ce test de sensibilité sur le coût marginal de la congestion montre que notre résultat est très sensible au coût de la congestion. Le coût économique d'une tonne de  $CO_2e$  évitée varie selon les caractéristiques de la zone urbaine (urbaine dense ou très dense) et le niveau de la congestion. Donc l'électrification urbaine peut être efficace plus ou moins selon les zones urbaines. Avant de mettre en place cette mesure, les décideurs publics doivent évaluer cette mesure selon les propres caractéristiques de chaque zone.

### **3.6.5. Coût de l'énergie**

Selon notre résultat lié au coût du transport, l'un des avantages du véhicule électrique pour les transporteurs est d'économiser sur le coût de l'énergie. Le coût de l'énergie par kilomètre du véhicule électrique est moins cher que celui du véhicule thermique grâce au prix hors taxe de l'électricité et au niveau de la taxe sur l'électricité en France qui sont actuellement faible. Mais est ce que ce niveau de la taxe ainsi que le prix hors taxe de l'électricité seront maintenu faibles dans le futur ? Si on excepte cet avantage du camion électrique, est-ce que cette mesure est encore efficace sous l'aspect économique ? Cette section traite notamment ces questions.

Pour cela, dans cette section nous supposons que dans la période 2030-2050, le coût d'énergie par kilomètre du camion électrique est égal à celui du camion thermique. Cette augmentation du coût d'énergie du véhicule électrique provient peut être de l'augmentation du prix HT de l'électricité ou de l'augmentation de la taxe. Voici l'impact du coût de l'énergie sur le coût d'abattement:

Tableau 3.36: Test de sensibilité sur le coût de l'énergie

	Coût d'abattement (€/tCO <sub>2</sub> )	
	Scénario VE1	Scénario VE2
Valeur de référence	<b>+811</b>	<b>-409</b>
Coût d'énergie égal entre véhicules thermiques et électriques	+939	-331

Source : Calcul de l'auteur

Nous testons l'hypothèse qu'il existe plus d'économie d'énergie du véhicule électrique par rapport au véhicule thermique. Selon cette hypothèse, les transporteurs qui utilisent les camionnettes électriques dans le scénario VE1 enregistrent une perte plus importante. Cette perte du transporteur fait augmenter le coût économique de ce scénario de 811 à 939 €/tCO<sub>2e</sub>. Le bénéfice économique pour la collectivité diminue aussi dans le scénario VE2 (331 €/tCO<sub>2e</sub> au lieu de 409 €/tCO<sub>2e</sub>).

Ce test de sensibilité confirme que la variation du coût d'énergie (soit par l'augmentation de la taxe d'électricité ou l'augmentation du prix HT de l'électricité) va changer le coût d'abattement d'une tonne CO<sub>2e</sub> évitée puisque ce coût a des impacts directs sur le coût unitaire du transport payé par les transporteurs.

### Conclusion du chapitre 3

Nos résultats confirment que **l'électrification du fret urbain** est une des **mesures envisageables de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>** du transport du fret **mais** avec un **coût économique** très **différent selon la charge utile des camions électriques disponibles**.

Nous avons testé deux scénarios avec des véhicules électriques de charges utiles différentes : 2 et 6 tonnes.

Dans le premier scénario (VE1), le remplacement des véhicules thermiques par des camionnettes électriques de 2 tonnes de charge utile entraîne non seulement une augmentation importante du coût de transport par tonne.kilomètre mais aussi amplifie la congestion routière en ville. Selon nos hypothèses, le coût économique pour réduire les émissions de **100,5 Mt CO<sub>2</sub>e** sur la période 2030-2050 est **81** milliards d'euros. Donc, le coût d'abattement d'une tonne CO<sub>2</sub> évitée dans ce scénario est très élevé : 811 €/tCO<sub>2</sub>e.

Cependant, sous l'hypothèse optimiste d'une amélioration importante des camions électriques, le scénario VE2, avec les camions électriques de 6 tonnes de charge utile, présente des bénéfices par rapport au scénario au fil de l'eau. Dans ce scénario VE2, les transporteurs pourraient économiser 50 milliards d'euros grâce au taux de chargement élevé des camions électriques. Dans ce cas, on a un bénéfice économique de 409 €/tCO<sub>2</sub>e.

Nos tests de sensibilité montrent que ces résultats sont très sensibles aux hypothèses sur l'utilisation des véhicules électrique, principalement le kilométrage annuel et les taux de remplissage des véhicules, qui ont des impacts directs sur le coût du transport. Plus en détail, si l'hypothèse sur le kilométrage annuel des véhicules était à 20 400 plutôt qu'à 17 000, les coûts de la tonne de CO<sub>2</sub> évitée s'en trouveraient diminués de 40 % pour le scénario VE1 et 18% pour le scénario VE2. A l'inverse, considérer un taux de remplissage des VE à 60% plutôt qu'à 80% entraînerait une augmentation le coût d'abattement d'une tonne CO<sub>2</sub> de 811 €/tCO<sub>2</sub>e à 983 €/tCO<sub>2</sub>e pour le scénario VE1 et une réduction de bénéfice économique de 409 €/tCO<sub>2</sub>e à 320 €/tCO<sub>2</sub>e dans VE2.

Nos tests de sensibilité confirment aussi que les autres facteurs comme l'augmentation de la taxe ou du prix HT de l'électricité ainsi que le niveau de la congestion de la zone urbaine ont des impacts importants sur le coût d'abattement d'une tonne de CO<sub>2</sub> évitée.

Selon nous, le résultat pourrait vraisemblablement être affiné, car il n'est a priori pas le même pour tous les types de chargeurs, types de marchandises, lieux d'installation des plateformes, etc... Mais, dans le temps imparti à notre exercice, et limités par la précision des données disponibles, nous n'avons pas encore pu traiter ces questions.

## Chapitre 4 : Impact de la fréquence des envois sur les émissions de CO<sub>2</sub>

La première partie de cette thèse montre bien que les mesures politiques à envisager, dans l'objectif de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> du transport de fret, pourraient viser soit à changer la technologie par l'utilisation de modes massifiés et/ou de véhicules moins polluants, soit à changer le comportement des acteurs. Quelles politiques proposer aux acteurs pour les inciter à changer leur comportement afin de réduire leurs émissions de CO<sub>2</sub> ? Dans cette quatrième partie, nous suivons une approche bottom-up, partant, à partir de l'enquête ECHO, des flux les plus importants en matière d'émission de GES pour remonter vers les politiques.

La fréquence des envois joue un rôle important dans le transport de fret. L'objectif du chargeur est de fournir à ses clients, à moindre coût, des biens ou des prestations de services qui correspondent à leurs attentes. Il choisira sa fréquence d'envoi en fonction des besoins de ses clients et de sa propre logistique. Si par exemple le tonnage annuel à expédier par un établissement chargeur vers l'un de ses clients est de 1200 tonnes, ce chargeur a (entre autres possibilités) le choix entre envoyer 100 tonnes chaque mois ou 25 tonnes chaque semaine ou encore 5 tonnes par jour ouvrable. Cette décision sur la fréquence d'envoi du chargeur va modifier le coût logistique annuel de cette opération. Pour un tonnage annuel donné, la fréquence d'envoi et la taille d'envoi sont des paramètres directement liés : plus le poids des envois augmente, plus la fréquence diminue et inversement. Un certain nombre d'études analysent le rôle de la taille d'envoi sous l'aspect de l'organisation logistique (Combes 2009) (Gacogne 2008) (Abate et de Jong 2014) mais, à notre connaissance, elles sont rarement orientées vers l'analyse de la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Les données de l'Enquête Chargeurs Opérateurs (Guilbault 2008) et les travaux menés à l'IFSTTAR (Rizet et al. 2014) montrent que « en réalité » de nombreux envois ont une fréquence très élevée : plus de 300 envois par an vers le même destinataire, soit plus d'un envoi par jour ouvrable. Ces envois que nous qualifions de très fréquents représentent **12,2%** de l'ensemble des envois et sont à l'origine de 3,72 millions de tCO<sub>2</sub> soit **9,6%** des émissions du transport de fret.

L'objectif de ce chapitre est d'analyser la possibilité de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> du transport de fret à travers la diminution de la fréquence des envois : quelle quantité de CO<sub>2</sub> sera économisée grâce à la réduction de la fréquence des envois et à quel coût ? Comment inciter les établissements qui émettent de nombreux envois ayant une faible efficacité carbone à réduire leur fréquence ?

### 4.1. La fréquence des envois vue à partir de l'enquête ECHO

Dans ce chapitre, quelques notions fondamentales sur l'intensité carbone et la fréquence d'envoi ont pu être quantifiées à partir de l'enquête ECHO.

- **Intensité carbone** : Comme le précise l'INSEE, l'intensité en carbone est le rapport des émissions de CO<sub>2</sub> à la production de l'entreprise. Dans notre travail, la production est exprimée en tonnes.kilomètres, donc l'intensité carbone de l'envoi a pour unité le gCO<sub>2</sub>/tonne.km.

**- Envois à haute intensité carbone :**

Sur un ensemble articulé de 25 tonnes de charge utile, d'après le modèle d'émissions Artémis la consommation moyenne d'un camion à pleine charge est de 35,9 litres/100 km (à une vitesse moyenne de 60 km/h) soit 1,44 litres/100 tonnes.kilomètres. Avec un facteur d'émission WW de 3,07 kgCO<sub>2</sub>/litre de gazole, cette consommation d'énergie au kilomètre correspond donc à une émission de 1,10 kgCO<sub>2</sub>/km, soit aussi 45 gCO<sub>2</sub>/tkm. A partir de ces valeurs, (Rizet et al. 2014) ont également calculé les niveaux d'émission par tonne.km selon le type de camion et le taux de remplissage. Nous avons appliqué la nouvelle méthode de calcul des émissions de CO<sub>2</sub>e avec le nouveau facteur d'émission de 3,17 kgCO<sub>2</sub>/litre de gazole pour calculer l'intensité carbone.

**Tableau 4.1 : Consommation et émission des poids lourds selon le taux de chargement**

Charge utile (tonnes)	Taux de chargement (%)	Consommation de gazole		Emission de CO <sub>2</sub> (Ancienne méthode selon arrêté du 10/04/2012)		Emission de CO <sub>2</sub> e (Nouvelle méthode selon arrêté du 26/04/2017)	
		litres/100km	litres/100t	kgCO <sub>2</sub> /km	gCO <sub>2</sub> /tkm	kgCO <sub>2</sub> e/km	gCO <sub>2</sub> e/tkm
1,0	50	8,7	17,4	0,27	534	0,27	550
	100	10,7	10,7	0,33	328	0,34	338
5,0	50	15,2	6,1	0,47	187	0,48	192
	100	16,9	3,4	0,52	104	0,53	107
8,4	50	19,3	4,6	0,59	141	0,61	145
	100	21,7	2,6	0,67	79	0,69	82
24,7	50	28,9	2,3	0,89	72	0,91	74
	100	35,9	1,5	1,10	45	1,13	46

*Source: Rapport ECHO (RIZET et al. 2014) et calcul de l'auteur*

Le tableau 4.1 indique qu'il n'y a pas de grande différence de l'intensité carbone (gCO<sub>2</sub>/tkm) des poids lourds selon les deux facteurs d'émission de CO<sub>2</sub>. (3,07 et 3,17). Notre objectif dans ce chapitre n'est pas seulement de calculer les émissions de CO<sub>2</sub> (ou les émissions de CO<sub>2</sub>e d'après la nouvelle méthode de calcul) à partir des données de l'enquête ECHO, mais aussi de les comparer aux résultats existants dans la littérature. C'est pourquoi, dans cette partie, nos calculs ont pris en compte les facteurs d'émission des différentes sources d'énergie, incluant la phase amont et la phase de fonctionnement, tels qu'ils ont été fixés dans l'arrêté du 26 avril 2017. Plus précisément, nous prenons toujours ici le facteur d'émission WW de **3,17 kgCO<sub>2</sub>e/litre de gazole** pour notre calcul.

Sous ces hypothèses, l'émission de CO<sub>2</sub> du transport routier de marchandises varie de 46 gCO<sub>2</sub>e/tkm à 550 gCO<sub>2</sub>e/tkm. Autrement dit, sous les conditions "normales", un véhicule avec un taux de remplissage minimal de 50% devrait avoir une intensité carbone inférieure à 600

gCO<sub>2</sub>/tkm, sans compter les retours à vide. Il est clair que cette intensité carbone pourrait atteindre des valeurs supérieures lorsque le taux de chargement diminue.

Donc, dans ce chapitre, nous désignerons à "**haute intensité carbone**" (ou "**faible efficacité carbone**") les envois dont l'intensité carbone est **supérieure à 600gCO<sub>2</sub>e/tkm**.

- **Fréquence d'envoi** : La fréquence d'envoi est le nombre d'envois de mêmes produits expédiés par un chargeur vers un même destinataire sur une période donnée. Si l'unité de mesure du temps est l'année, la fréquence d'envoi d'un chargeur vers un client est le nombre d'envois d'un même type de produits qu'il lui expédie annuellement.

**- Envois très fréquents :**

Dans cette thèse, nous utilisons le terme "envois très fréquents" pour les envois dont le nombre d'envois annuels expédiés est **supérieur à 300 envois par an vers un même client**, soit plus d'un envoi par jour ouvrable.

## 4.2. L'intensité carbone et la fréquence d'envoi

L'objet de ce chapitre est ainsi d'analyser la relation entre la fréquence d'envoi et la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> du transport de fret. Donc, dans les données de l'enquête ECHO nous avons sélectionné les observations pour lesquelles la fréquence d'envoi et leur émission de CO<sub>2</sub> sont renseignées. Au final, il ne reste que **8173** observations d'envois sur l'échantillon initial de 10462.

Sur cet échantillon, nous nous penchons particulièrement sur les envois qui ont une haute intensité carbone (plus de **600 gCO<sub>2</sub>/tkm**) ; près de la moitié des émissions vient de ces envois (Rizet et al. 2014). Comparant ces envois avec l'ensemble des envois, nous constatons que **les envois qui ont une haute intensité carbone ont une fréquence d'envoi vers le même destinataire plus élevée que les autres envois**.

**Tableau 4.2: Comparaison entre les envois à haute intensité carbone et l'ensemble des envois**

	Nb d'observation	1000 envois	Nb moyen annuel d'envois vers le même destinataire	Emission de CO <sub>2</sub> WW (millions tonnes)	Milliers tkm	Intensité carbone moyenne (gCO <sub>2</sub> /tkm_réseau) <sup>32</sup>	Intensité carbone moyenne (gCO <sub>2</sub> /tkm_VO) <sup>33</sup>
Envois à haute intensité carbone	2164	256124	393	15,55	8 058 410	1930	2338
Ensemble des envois	8173	551860	267	38,79	457 491 392	85	125

Source : Données de l'enquête ECHO 2004, calcul de l'auteur

<sup>32</sup> tkm\_réseau : tonne.kilomètre à distance du réseau

<sup>33</sup> tkm\_VO : tonne.kilomètre à vol d'oiseau

Sur l'ensemble des envois observés dans la base ECHO de fréquence d'envoi et d'émission de CO<sub>2</sub> renseignées, **26,5%** des envois observés ont une haute intensité carbone; en valeur pondérée (envois redressés) cette proportion est plus importante (46,4%). Ce tableau indique bien que le nombre annuel moyen d'expéditions vers le même client est très important: 267 envois par an, ce qui signifie près d'un envoi par jour ouvrable. La fréquence moyenne des envois à « haute intensité carbone » est quant à elle 1,47 fois plus élevée que celle de l'ensemble des envois. Ces envois représentent 8,06 milliards de tonnes.kilomètres, soit 2% de l'ensemble des tonnes.kilomètres mais ils sont à l'origine de 40% des émissions totales de CO<sub>2</sub> du transport de fret.

Les envois à haute intensité carbone correspondent donc bien à une fréquence d'envoi plus élevée que l'ensemble des envois. Est-ce que réciproquement les envois très fréquents ont une intensité carbone aussi plus haute que les autres ? Pour trouver la réponse à cette question, nous continuons à nous intéresser aux envois très fréquents (plus de 300 envois/ an).

**Tableau 4.3: Comparaison entre les envois très fréquents et l'ensemble des envois**

	Nombre d'observations	Nombre d'envois redressés	Nombre moyen annuel d'envois vers le même destinataire	Intensité carbone moyenne (gCO <sub>2</sub> e/tkm_VO)	Intensité carbone moyenne d'envois (gCO <sub>2</sub> e/tkm_réseau)	Total émission de CO <sub>2</sub> e WW (millions tonnes)
Envois très fréquent	850	67545	1594	118	88	3,72
Ensemble des envois	8173	551860	267	125	85	38,79

*Source : Données de l'enquête ECHO 2004, calcul de l'auteur*

Avec 850 envois observés, les envois très fréquents représentent 10,4% (resp. 12,2% en valeur pondérée) de l'ensemble de l'échantillon considéré dans ECHO. Leur fréquence moyenne est très élevée (1594 envois par an), autrement dit, chaque jour ouvrable, il y a près de 6 envois qui ont été expédiés. Ces envois très fréquents sont responsables de 3,72 Mt CO<sub>2</sub>, soit 9,6% de l'émission totale de CO<sub>2</sub> du fret.

En termes d'émission de CO<sub>2</sub>, nous constatons que les envois très fréquents ont une intensité carbone un peu différente de celle de l'ensemble des envois : légèrement plus faible (118 gCO<sub>2</sub>/tkm contre 125 à la moyenne) lorsqu'on l'estime avec la distance à vol d'oiseau, mais légèrement plus importante (88 gCO<sub>2</sub>/tkm contre 85 en moyenne) avec la distance sur réseau. Si le rapport s'inverse quand on passe aux distances réseau c'est que les distances réseaux des envois très fréquents sont nettement plus allongées par rapport aux distances vol d'oiseau : les envois très fréquents sont probablement souvent des envois de type messagerie qui passent par plusieurs plateformes, ce qui rallonge la distance réseau par rapport à la distance à vol d'oiseau (plus que pour l'ensemble des envois).

Analysons maintenant la fréquence par rapport au poids de l'envoi.

**Tableau 4.4: La fréquence moyenne annuelle des envois à forte fréquence, selon le poids de l'envoi**

Poids de l'envoi	Nombre d'observation	1000 envois	Pourcentage	Fréquence moyenne annuelle d'envoi vers le même destinataire
≤30 kg	142	42063	62,3 %	2019
≤300 kg	200	47679	70,6 %	1784
≤ 1 tonne	262	56965	84,3 %	1692
Total	850	67545	100%	1594

Source : Données de l'enquête ECHO 2004, calcul de l'auteur

En se focalisant sur les envois très fréquents, nous pouvons souligner qu'ils sont caractérisés par les envois de petite taille. En effet, plus de 60% d'entre eux sont des envois de moins de 30kg et plus de 84% de ces envois sont des envois de moins d'une tonne. Parmi les envois très fréquents, plus les envois sont petits et plus leur fréquence d'envoi est élevée. Quantitativement en moyenne par jour ouvrable, près de 7 envois de moins de 30 kg sont expédiés, et cette fréquence reste de près de 6 envois par jour pour les envois de moins d'une tonne

Donc, les **envois très fréquents** ont **une efficacité carbone plus faible** que celle des autres envois et les **envois à haute intensité carbone** correspondent à des **fréquences d'envoi plus élevées** que les autres. Ces résultats nous confirment qu'il existe un lien « bijectif » entre l'intensité carbone des envois et leur fréquence.

Pour approfondir ces résultats, nous étudions la possibilité de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> via la diminution de la fréquence d'envoi.

### 4.3. Réduction des émissions de CO<sub>2</sub> via la diminution de la fréquence d'envoi

Pour quantifier l'impact de la diminution de la fréquence d'envoi sur l'émission de CO<sub>2</sub>, nous utilisons le modèle de l'intensité carbone des envois selon leur fréquence développé dans (Rizet et al. 2014). Le modèle est le suivant :

$$\text{Log (CO}_2\text{/tkm)} = a_1 * \text{log(DISTANCE\_VO)} + a_2 * \text{log(TONNAGE)} + a_3 * \text{log(FREQ)} + a_4 * \text{MARITIME} + a_5 * \text{AERIEN} + a_6 * \text{RAIL} + \text{Constante} + \text{Erreur (1)}$$

Où CO<sub>2</sub>/tkm est l'intensité Carbone de l'envoi, DISTANCE\_VO est la distance à vol d'oiseau, TONNAGE est le tonnage annuel au même destinataire, FREQ est la fréquence d'envoi, MARITIME, AERIEN, et RAIL sont les modes de transport sous formes d'indicatrices binaires.

Si la fréquence varie, par exemple sous l'effet d'une incitation, « toutes choses égales par ailleurs », l'équation (1) permet d'estimer l'évolution de l'intensité carbone qui en découle :

$$\log \text{CO}_2\text{-tkm}_{\text{après}} - \log \text{CO}_2\text{-tkm}_{\text{avant}} = a_3 * [\log (\text{FREQ}_{\text{après}}) - \log (\text{FREQ}_{\text{avant}})]$$

$$\log (\text{CO}_2\text{-tkm}_{\text{après}} / \text{CO}_2\text{-tkm}_{\text{avant}}) = a_3 * \log (\text{FREQ}_{\text{après}} / \text{FREQ}_{\text{avant}}) \quad (2)$$

Avec la valeur du paramètre  $a_3 = 0,26366$  (cf. annexe 2), nous obtenons le résultat suivant:

**Tableau 4.5: Quantification des émissions de CO<sub>2</sub> évitées via la diminution de la fréquence d'envoi**

Variation de la fréquence d'envoi ( $\Delta$ FREQ)	- 25%	-50%
Variation de l'intensité carbone de l'envoi ( $\Delta$ gCO <sub>2</sub> /tkm)	-7,3%	-16,7%
Réduction des émissions de CO <sub>2</sub> (sur 38,79 millions tonnes)	3,34	7,64

Source : Données de l'enquête ECHO 2004, calcul de l'auteur

Le Tableau 4.5 nous indique qu'une diminution de 25% (resp. 50%) de la fréquence d'envoi au même client provoque une réduction de 7,3% (resp. 16,7%) des émissions de CO<sub>2</sub> du transport de fret. Mais quel serait le coût pour le chargeur d'une telle réduction de sa fréquence d'envoi et qu'est-ce qui pourrait l'y inciter ? Dans la section suivante, nous cherchons d'abord dans la littérature ce qui peut expliquer cette fréquence des envois, son lien avec les coûts logistiques du chargeur puis, à partir des données de l'enquête ECHO, nous modélisons cette fréquence d'envoi. Après avoir identifié ses déterminants et estimé la valeur des paramètres du modèle, nous chercherons à estimer la variation de la fréquence d'envoi et la quantité d'émissions de CO<sub>2</sub> qui pourrait être évitée, sous l'hypothèse que telle mesure de politique puisse faire évoluer l'une des variables explicatives du modèle de fréquence.

## 4.4. Modélisation de la fréquence d'envoi

### 4.4.1 Le modèle économique théorique

En se basant sur la théorie de l'inventaire de Baumol et Vinod (1970), Abate et Jong (2014) donnent l'équation suivante du coût total logistique supporté par une entreprise  $i$  durant une année, en faisant intervenir quatre éléments : les coûts de commande et de suivi des envois (coûts de transaction), les coûts de transport, les coûts du capital immobilisé et les coûts de stockage :

$$CTL_i = \frac{O_i Q_i}{q_i} + TC_i d_i Q_i + r t_i v_i Q_i + (s_i + r v_i) \frac{q_i}{2} \quad (3)$$

Où,  $O_i$  désigne les coûts de commande et de suivi d'un envoi (euros/envoi)

$Q_i$ : Le volume annuel expédié par l'entreprise  $i$  au destinataire  $j$  (tonnes /an)

$q_i$  : Le poids moyen d'un envoi (tonnes)

$TC_i$  : Le coût de transport (euros /tkm)

$d_i$  : La distance entre O-D ou entre les entreprises  $i$  et  $j$  (km)

$r$  : Le taux d'intérêt

$t_i$  : Le temps de parcours entre  $i$  et  $j$  (fraction d'une année)

$v_i$  : La densité de valeur de marchandise (euros/tonne)

$s_i$  : Le coût de stockage (euros/tonne/an)

La fréquence d'envoi est alors  $f_i = \frac{Q_i}{q_i}$  ; En remplaçant  $f_i$  dans l'équation (3), on obtient:

$$CTL_i = O_i f_i + TC_i d_i Q_i + r t_i v_i Q_i + (s_i + r v_i) \frac{Q_i}{2 f_i} \quad (4)$$

L'objectif du chargeur est de minimiser son coût total logistique et il va choisir la fréquence d'envoi optimale pour minimiser ce coût, c'est-à-dire celle qui annule la dérivée de la fonction.

$$\frac{\partial CTL_i}{\partial f_i} = O_i + \frac{\partial TC_i}{\partial f_i} d_i Q_i - (s_i + r v_i) \frac{Q_i}{2 f_i^2} = 0 \quad (5)$$

L'équation (5) nous montre bien que la fonction de la fréquence d'envoi optimale dépend de la relation entre le coût du transport et la fréquence d'envoi. Sur ce point, (Combes et al. 2015) ont confirmé que le prix du transport est fortement lié au poids de l'envoi et à la distance. Il montre aussi l'influence de l'organisation du transport comme le nombre de ruptures de charge, le type de marchandise, etc. Sur le prix du transport (McCann 2001).

Chaque approche différente sur le coût du transport nous donnera un résultat différent sur la fréquence d'envoi optimale.

- Si l'on considère que le coût du transport par **tonne. kilomètre n'est pas une fonction de la fréquence**, cela signifie que le coût du transport est indépendant du poids de l'envoi ; ce n'est certainement pas vrai pour les envois dont le poids est compris entre 1 et 25 t. Mais c'est une hypothèse admissible pour la messagerie (< 200 kg) et peut être aussi pour les envois très importants (>100 tonnes). Dans ces deux derniers cas, le poids du chargement est (presque) indépendant du poids de l'envoi. Dans cette hypothèse, le coût du transport par tonne. kilomètre ne dépend pas de la fréquence d'envoi, donc,  $\frac{\partial TC_i}{\partial f_i} = 0$ . Donc, la fréquence d'envoi optimale qui minimise le coût total logistique est donnée par la formule suivante :

$$f_i^* = \sqrt{\frac{(s_i + r v_i) Q_i}{2 O_i}} \quad (6)$$

Autrement dit, selon (6) la fréquence d'envoi choisie par le chargeur est une fonction croissante des **coûts de stockage**, de la **densité de valeur des marchandises** ainsi que de la **quantité annuelle** entre chargeur et destinataire. Elle est une fonction décroissante du **coût de commande et de suivi des envois**. En revanche, d'après cette équation, la fréquence d'envoi ne dépend pas de la distance. Pourtant, les analyses empiriques nous montrent que plus la distance est élevée, plus le poids de l'envoi est faible. Pour résoudre ce problème, Abat et Jong écrivent le coût d'utilisation d'un véhicule\*kilomètre  $TC_i$  en fonction de la quantité transportée :

- Si le coût du transport ne dépend que de la taille d'envoi: (Abate et de Jong 2014)

Alors, le coût d'utilisation d'un véhicule est exprimé en €/vkm :

$$TC_i = a + b q_i$$

Où  $q_i$  est le poids du chargement,  $a$  et  $b$  sont les coûts, fixe et variable, liés à l'utilisation du véhicule.

le coût de transport par tonne\*kilomètre est alors:

$$tc_i = \frac{a+bq_i}{q_i} = \frac{a}{q_i} + b$$

On remplace  $tc_i$  dans l'équation (4) et on obtient:

$$CTL_i = O_i f_i + (a \frac{f_i}{Q_i} + b) d_i Q_i + r t_i v_i Q_i + (s_i + r v_i) \frac{Q_i}{2 f_i}$$

$$CTL_i = O_i f_i + a f_i d_i + b d_i Q_i + r t_i v_i Q_i + (s_i + r v_i) \frac{Q_i}{2 f_i}$$

$$\frac{\partial CTL_i}{\partial f_i} = O_i + a d_i - \frac{Q_i (s_i + r v_i)}{2 f_i^2} = 0$$

$$O_i + a d_i = \frac{Q_i (s_i + r v_i)}{2 f_i^2}$$

$$f_i^2 = \frac{Q_i (s_i + r v_i)}{2 (O_i + a d_i)}$$

$$\longrightarrow f_i^* = \sqrt{\frac{(s_i + r v_i) Q_i}{2 (O_i + a d_i)}} \quad (7)$$

Alors, comme pour l'équation (6) mais en tenant compte de la distance, l'équation (7) montre que la fréquence d'envoi est une fonction croissante des **coûts de stockage**, de **la densité de valeur des marchandises** ainsi que de **la quantité annuelle** entre chargeur et destinataire. Elle est une fonction décroissante du **coût de commande et suivi des envois** ainsi que de **la distance**.

- Si le coût du transport est une fonction du poids de l'envoi et de la distance :

$$TC_i = d_i^\alpha \left( \frac{Q_i}{f_i} \right)^\beta K$$

$$\text{Donc } \frac{\partial TC_i}{\partial f_i} = K d_i^\alpha Q_i^\beta (-\beta) f_i^{-(\beta+1)}$$

On remplace en (5) :

$$\frac{\partial CTL_i}{\partial f_i} = O_i + \frac{\partial TC_i}{\partial f_i} d_i Q_i - (s_i + r v_i) \frac{Q_i}{2 f_i^2} = 0$$

$$= O_i + K d_i^\alpha Q_i^\beta (-\beta) f_i^{-(\beta+1)} d_i Q_i - (s_i + r v_i) \frac{Q_i}{2 f_i^2}$$

$$= O_i - K d_i^{\alpha+1} Q_i^{\beta+1} (\beta) f_i^{-(\beta+1)} - (s_i + r v_i) \frac{Q_i}{2 f_i^2} = 0$$

$$\longrightarrow 2 f_i^2 O_i - 2 K d_i^{\alpha+1} Q_i^{\beta+1} (\beta) f_i^{-(\beta+1)} - (s_i + r v_i) Q_i = 0 (*)$$

On pourrait réécrire (\*) sous la forme :

$$A f_i^2 - B f_i^{-(\beta+1)} - C = 0$$

A notre connaissance, on ne pourrait pas trouver la solution  $f^*$  pour l'équation (\*). Dans toute la suite de ce chapitre, nous suivons le modèle théorique (7) pour analyser la fréquence.

#### 4.4.2 Application de ce modèle théorique aux données de l'enquête ECHO

Comme nous l'avons indiqué au début de ce chapitre, l'avantage de l'enquête ECHO est de suivre **10462** envois depuis l'expéditeur jusqu'au destinataire final. Dans la base ECHO, il y a deux bases de données principales: base "établissements" et base "envois". La base établissements nous fournit des caractéristiques de l'établissement, les conditions de production (diversité des produits, production sur stocks ou commandes. etc.), ainsi que le choix du transport utilisé. La table "envois" nous donne des informations qui permettent de reconstituer la chaîne physique, par exemple, les informations sur le destinataire, les caractéristiques physiques de l'envoi (poids, volume, valeur, conditionnement...), mais aussi les modalités de transport de l'envoi.

Cette partie consiste à **expliquer la fréquence d'envoi à partir des variables caractéristiques des envois et de l'établissement**. La modélisation de la fréquence d'envoi sera réalisée selon ces deux niveaux, **envoi** et **établissement**. Plus en détail, le modèle "au niveau envoi" explique la relation du **nombre d'envois** entre le chargeur et le **même destinataire** avec les caractéristiques de l'envoi ainsi que celles des établissements. Un second modèle, au niveau établissement, montre quelles caractéristiques des établissements peuvent influencer leur fréquence d'envoi. Dans ce dernier modèle, c'est le nombre annuel des envois expédiés vers les différents destinataires qui sera modélisé (sans se limiter à ceux vers un même destinataire comme dans le modèle précédent).

#### 4.4.3. Modélisation de la fréquence d'envoi au niveau envoi

On cherche, à partir des données d'ECHO, à calibrer un modèle qui explique le nombre annuel d'envois d'un chargeur vers un même destinataire (variable à expliquer) à partir des variables caractéristiques de l'envoi et de l'établissement chargeur (variables explicatives)

Les données de la base ECHO sont sélectionnées pour cette modélisation, en se fondant sur le modèle théorique (7) qui indique que la fréquence dépend du coût de stockage, de la densité de valeur des marchandises, du tonnage annuel entre chargeur et destinataire, du coût de commande et de la distance. Parmi ces variables, seules **3** sont **disponibles** dans la base ECHO. Ce sont la **densité de valeur des marchandises**, le **tonnage** annuel entre chargeur et destinataire et la **distance**. Nous essayons donc de modéliser la fréquence d'envoi avec ces trois variables seulement.

**Tableau 4.6: Résultat du calibrage du modèle de la fréquence d'envoi**

R <sup>2</sup> = 0,5744 ; R <sup>2</sup> ajusté = 0,5742		Observations utilisées : 5709		
Variable	Valeur estimée	Ecart-type	T	Pr >  t
Constante	0.70162	0.09851	7.12	<.0001
Tonnage annuel expédié	0.47547	0.00597	79.60	<.0001
Distance	-0.30280	0.00878	-34.50	<.0001
Valeur unitaire de l'envoi en euro HT/tonne	0.43937	0.00974	45.10	<.0001

*Source : Données de l'enquête ECHO 2004, calcul de l'auteur*

Ce modèle est un modèle log-log. Nous constatons bien que ces trois variables sont très explicatives et leurs signes sont conformes au modèle théorique. Seules, ces trois variables expliquent déjà 57% de la distribution de la fréquence d'envoi. Pourtant, sur l'échantillon de **10462** observations, à cause de valeur manquante de ces variables, surtout la densité de valeur des marchandises (Annexe 4.3), il n'y a que **5709** observations utiles.

Pour améliorer le modèle, nous cherchons d'autres variables caractéristiques des établissements et des envois qui pourraient avoir une influence sur la fréquence d'envoi.

### Sélectionner les variables

Dans cette partie, nous allons décrire plus en détail notre sélection des variables. Concernant les variables explicatives du modèle théorique qui ne sont pas disponibles dans l'enquête ECHO, comme le coût de stockage ou le coût de la commande, nous cherchons les variables qui pourraient expliquer une partie de ces coûts. Par exemple, nous avons sélectionné dans la base les variables telles que 'pourcentage du tonnage produit sur stocks', nombre moyen de jours de production, délai moyen de traitement d'une commande, etc.

L'analyse de la littérature nous permet également de sélectionner d'autres variables.

Plusieurs études ont confirmé que la taille de l'envoi et le choix du mode de transport sont liés (par exemple (Mc Fadden, 1986), (Abdelwahab et Sargious, 1992), (Combes et Tavasszy, 2016). Et on sait en outre que pour un tonnage annuel donné, la taille d'envoi et la fréquence d'envoi sont liées. Donc, nous cherchons dans la base ECHO les variables liées au mode de transport.

Le mode principal nous permet de classer les envois selon les différentes catégories : routier compte propre, routier pour compte d'autrui, ferroviaire, combiné rail-route, fluvial, maritime et aérien. Existe-t-il des différences de caractéristiques entre des envois expédiés par la route en compte propre (CP) ou pour compte d'autrui (CA)? Les résultats de l'enquête ECHO permettent d'illustrer cette différence.

Tableau 4.7: Comparaison entre les envois expédiés par compte propre et compte d'autrui selon la fréquence d'envoi et l'intensité carbone

	Fréquence annuelle moyenne d'envoi	Intensité carbone (gCO <sub>2</sub> /tkm)
Envois en compte propre	542	245
Envois en compte d'autrui	153	119

Source : Données de l'enquête ECHO 2004, calcul de l'auteur

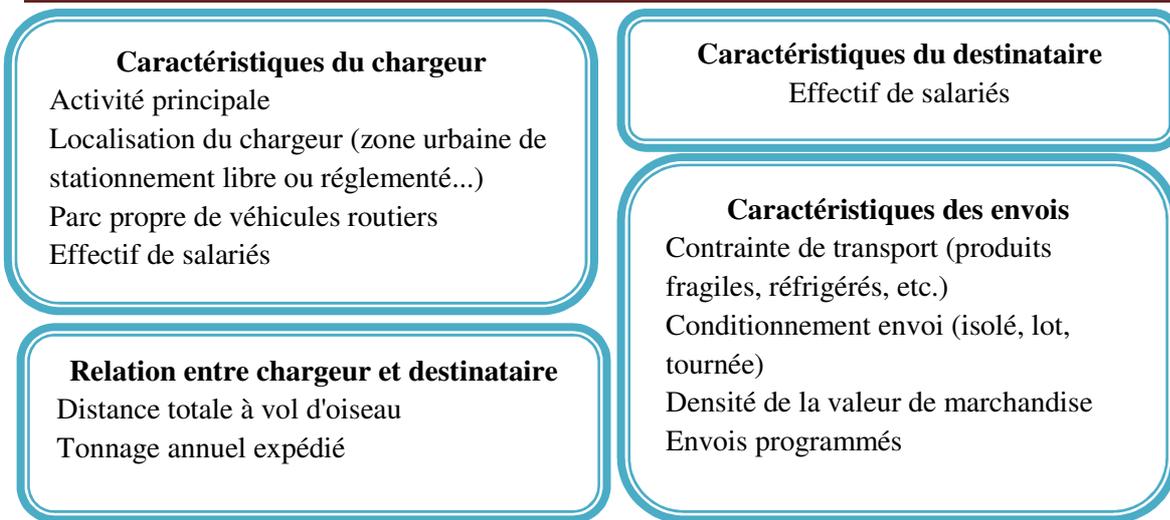
En termes d'intensité carbone, les envois pour compte propre ont **une efficacité carbone deux fois plus faible** que ceux pour compte d'autrui. Pour la fréquence d'envoi vers le même client, on observe en moyenne 542 envois par an pour le CP, alors que cette fréquence n'est que de 153 pour le CA. Autrement dit, la fréquence du compte propre est **3,5 fois** plus élevée que celle observée dans le transport pour **compte d'autrui**. Ce résultat nous incite à tester la variable sur la disposition d'un parc de véhicules routiers en propre du chargeur. Nous avons calculé la fréquence d'envoi vers un même client des établissements qui disposent d'un parc en propre et celle des établissements qui n'en n'ont pas. Le résultat montre que les premiers ont une fréquence d'envoi plus élevée que les seconds (340 contre 182) ([Annexe 4.7](#)).

Essayant également de modéliser séparément les envois CP et CA, nous constatons que la variable concernant la localisation du chargeur<sup>34</sup> n'est explicative que pour les envois transportés par CA. ([Annexe 4.4](#))([Annexe 4.5](#)). D'après nous, il y a deux explications à ce résultat. Premièrement, dans la base ECHO, il y a seulement une petite partie des envois (8,5%) expédiés dans une zone urbaine de stationnement réglementé (annexe 6). Cette proportion est encore plus modeste (1,1%) pour les envois en CP. C'est pourquoi, le nombre d'observations n'est pas suffisant pour que cette variable soit significative pour les envois transportés par CP. Deuxièmement, la plupart des CP ont leur entrepôt propre pour leur chargement. C'est la raison pour laquelle la réglementation du stationnement n'a pas d'effet sur le CP.

Notre objectif dans cette partie est de modéliser la fréquence de l'ensemble de l'envoi (en CA et en CP). Donc, nous avons créé la variable **STATIONNEMENT** qui est une indicatrice indiquant si cet envoi est transporté par le compte d'autrui et le chargeur est localisé dans une zone urbaine de stationnement réglementé.

Les variables sélectionnées peuvent être classées en 4 groupes ci-dessous:

<sup>34</sup> La variable e34 est une indicatrice qui synthétise la réponse à la question : Votre établissement est-il situé...  
 1 ... dans une zone urbaine de stationnement réglementé ?  
 2 ... dans une zone urbaine de stationnement libre ?  
 3 ... dans une zone spécialisée de fret ?  
 4 ... dans une autre zone d'activité ?  
 5... [Rien de tout cela]  
 (Si l'établissement répond oui à la première éventualité, e34 = 1 ; si non e34 = 0 quelle que soit la réponse aux questions suivantes)



## Résultats

Différentes formes fonctionnelles (modèle niveau-niveau, modèle log-niveau, modèle niveau-log, modèle log-log) ont été testées pour la spécification du modèle. Le modèle mixte présenté ci-dessous, que nous appelons modèle « complet » de (log de) la fréquence d'envoi, est le modèle dont le pouvoir explicatif est le plus élevé. (Résultat au tableau 4.8).

$$\log(\text{FREQ}) = a_1 * \log(\text{TONNAGE}) + a_2 * \log(\text{DISTANCE}) + a_3 * \log(\text{VALEUR}) + a_4 * (\text{DELAI}) + a_5 * (\text{PARC\_VEH}) + a_6 * \log(\text{REF}) + a_7 * (\text{STATIONNEMENT}) + a_8 * (\text{SALARIE}) + a_9 * (\text{ENVOI\_PROGRAMME}) + a_{10} * (\text{GECHO}) + a_{11} * (\text{CONDITIONNEMENT\_ENVOI}) + a_{12} * (\text{CONTRAINTE\_TRANSPORT}) + a_{13} * (\text{SALARIE\_DESTINATAIRE}) + \text{Constante} + \text{Erreur}$$

Où : FREQ est la fréquence d'envoi en nombre d'envois par an,

TONNAGE est le tonnage annuel expédié au même destinataire en tonnes,

DISTANCE est la distance totale de transport en km,

VALEUR est la densité de valeur de la marchandise en € par tonne,

DELAI est le délai moyen de traitement d'une commande standard, sans compter le transport,

SALARIE est l'effectif de salariés de l'établissement chargeur,

PARC\_VEH est une indicatrice indiquant si le chargeur dispose d'un parc de véhicules routiers, REF est le nombre de références expédiées par ce chargeur,

STATIONNEMENT est une indicatrice indiquant si cet envoi est transporté pour compte d'autrui et le chargeur est localisé dans une zone urbaine de stationnement réglementé,

ENVOI\_PROGRAMME est une indicatrice indiquant si cet envoi est dans le programme préétabli avec le commanditaire, SALARIE\_DESTINATAIRE est le nombre de salariés du destinataire, GECHO est le groupe d'activité du chargeur,

CONDITIONNEMENT\_ENVOI<sup>35</sup> est le conditionnement envoi au départ de l'établissement chargeur, CONTRAINTE\_TRANSPORT<sup>36</sup> est la contrainte du transport (produits volumineux, produits réfrigérés)

CONDITIONNEMENT\_ENVOI<sup>35</sup> est le conditionnement envoi au départ de l'établissement chargeur, CONTRAINTE\_TRANSPORT<sup>36</sup> est la contrainte du transport (produits volumineux, produits réfrigérés)

<sup>35</sup> La variable CONDITIONNEMENT\_ENVOI est une indicatrice qui synthétise la réponse à la question : Quel était le conditionnement de l'envoi ou du lot, au départ de l'établissement ? S'agissait-il...

1... de vrac sec ?

2... de vrac liquide ?

**Tableau 4.8 : Estimation des paramètres du modèle complet de la fréquence d'envoi entre chargeur vers le même destinataire**

Variable	Valeur estimée	Ecart-type	T	Pr >  t
Constante	1.46458	0.14384	10.18	<.0001
TONNAGE	0.44832	0.00724	61.92	<.0001
DISTANCE	-0.21163	0.01081	-19.57	<.0001
VALEUR	0.27096	0.01138	23.82	<.0001
REF	0.10341	0.00825	12.54	<.0001
DELAI	-0.15211	0.01027	-14.81	<.0001
SALARIE	0.04063	0.01802	2.26	0.0242
STATIONNEMENT	-0.40025	0.06412	-6.24	<.0001
PARC_VEH	0.25083	0.03700	6.78	<.0001
ENVOI_PROGRAMME	0.25739	0.03618	7.11	<.0001
SALARIE_DESTINATAIRE	0.03550	0.00954	3.72	0.0002
Industries biens de production	0.45590	0.06411	7.11	<.0001
CG biens de production	-0.24732	0.05180	-4.77	<.0001
CG biens intermédiaires et Récupération	-0.47349	0.08080	-5.86	<.0001
Contraintes transport, produits réfrigérés	0.32628	0.04965	6.57	<.0001
Contraintes transport, Produits volumineux	-0.53766	0.15443	-3.48	0.0005
Conditionnement envoi, vrac sec	-0.80567	0.06688	-12.05	<.0001
Conditionnement envoi, sacs, colis, cartons	-0.86730	0.04460	-19.44	<.0001
Conditionnement envoi, palettes, rolls	-0.95338	0.16324	-5.84	<.0001
Nombre d'observations utilisées : 3967				
R2 = 0,7155				
R <sup>2</sup> ajusté =0,7142				

Source : Données de l'enquête ECHO 2004, calcul de l'auteur

Notre modèle "complet" de la fréquence d'envoi explique 71% de la distribution de la fréquence d'envoi. Pourtant le nombre de variables explicatives est assez grand. Les tentatives

- 3... de sacs, colis, cartons, caisses, tonneaux ?
- 4... de palettes, rolls ?
- 5... de conteneurs ou caisses mobiles rail route ?
- 6. [NSP]

<sup>36</sup> En réponse à la question : Les produits composant l'envoi impliquaient-ils certaines contraintes spécifiques de transport mentionnées sur cette liste?

- 1 ... Transport matières dangereuses
- 2 ... Transport réfrigéré ou sous température dirigée
- 3 ... Produits fragiles
- 4 ... Produits volumineux
- 5 ... Produits de grande dimension
- 6 ... Convoi exceptionnel
- 7 ... Autre
- 8 ... [Absence de contraintes particulières]

pour ajouter des variables explicatives pourraient améliorer le R2 du modèle mais elles se traduisent aussi par une réduction du nombre d'observations. De plus, certaines variables, bien qu'explicative, ont une influence très faible sur le modèle. Donc, nous tentons d'améliorer la spécification (« à l'économie, pour un meilleur compromis ») en ne sélectionnant que des variables qui ont un impact assez significatif sur la fréquence d'envoi tout en tâchant de maximiser la taille de l'échantillon sur lequel on calibre.

Après plusieurs essais de spécifications, le modèle retenu, que nous appelons modèle "opérationnel", pour lequel les résultats sont les plus fiables est le suivant :

$$\log(\text{FREQ}) = \alpha * \log(\text{TONNAGE}) + \beta * \log(\text{DISTANCE}) + \gamma * \log(\text{VALEUR}) + \delta * (\text{DELAI}) + \xi(\text{PARC\_VEH}) + \varepsilon * \log(\text{REF}) + \theta * (\text{STATIONNEMENT}) + \text{Constante} + \text{Erreur} \quad (11)$$

Le résultat de l'estimation de ce modèle est le suivant :

**Tableau 4.9 : Résultat de l'estimation du modèle opérationnel de la fréquence d'envoi**

(Équation 11)

R <sup>2</sup> =0,6461 R <sup>2</sup> ajusté =0,6457		Nombre d'observation : 5317		
Variable	Valeur estimée	Ecart-type	T	Pr >  t
Constante	0.12545	0.11055	1.13	0.2565
TONNAGE	0.46462	0.00560	82.98	<.0001
DISTANCE	-0.18489	0.00915	-20.21	<.0001
VALEUR	0.40374	0.00954	42.34	<.0001
PARC_VEH	0.34859	0.03297	10.57	<.0001
REF	0.09752	0.00735	13.27	<.0001
STATIONNEMENT	-0.50996	0.05726	-8.91	<.0001
DELAI	-0.15591	0.00878	-17.76	<.0001

*Source : Données de l'enquête ECHO 2004, calcul de l'auteur*

Ce modèle est un modèle log-log (sauf pour stationnement) : la variable dépendante FREQ et les variables indépendantes sont exprimées en logarithme, donc, pour les variables continues, les valeurs estimées des paramètres sont des élasticités. On trouve que ces coefficients sont fortement significatifs et leurs signes sont conformes à ce que l'on attendait. Ce résultat confirme le modèle théorique : il montre que la fréquence d'envoi est une fonction croissante de la quantité annuelle entre chargeur et destinataire, de la densité de valeur des marchandises, du nombre de références et plus le chargeur dispose un parc de véhicules routiers en propre ou en location de longue durée, plus sa fréquence d'envoi est élevée. Les coefficients de trois variables: "distance", "réglementation du stationnement" et "délai de traitement d'une commande" sont négatifs. Autrement dit, plus la distance entre chargeur et destinataire est grande, et plus la fréquence d'envoi diminue. Pour les envois transportés par le compte d'autrui si le chargeur est situé dans une zone urbaine où le stationnement est réglementé, sa fréquence d'envoi sera moins importante que les autres. Et le court délai de traitement d'une commande favorise la fréquence d'envoi.

Notre objectif du chapitre est l'étude de la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> du transport de fret via la diminution de la fréquence d'envoi. A partir de ce modèle de la fréquence d'envoi, nous essayons de trouver les différentes mesures pour réduire cette fréquence. Ces mesures peuvent être du fait de l'Etat, du chargeur ou du transporteur. Dans les sous-parties suivantes, nous analysons l'effet de chaque variable sur la fréquence d'envoi ainsi que sur les émissions de CO<sub>2</sub>. Nous classons ces variables selon deux groupes : un groupe de variables dont l'Etat serait à l'origine pour proposer une politique de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et l'autre groupe qui se compose des variables qui pourrait constituer l'une des mesures de réduction des émissions prises par l'entreprise.

### **Effet du tonnage annuel sur la fréquence d'envoi**

Le résultat du modèle nous montre que le tonnage est une des variables les plus importantes pour expliquer la fréquence d'envoi. Cette relation peut être interprétée comme suit : un changement de **10%** (resp **30%**) du tonnage induit un changement de **4,8%** (resp **15,3%**) de la fréquence d'envoi, et un changement **1,3%** (resp **4,3%**) des émissions de CO<sub>2</sub>, toutes les choses égales par ailleurs (annexe 8).

Il est difficile de diminuer la fréquence d'envoi entre chargeur au même destinataire via la réduction du tonnage annuel expédié sans freiner leur activité économique. Pourtant, pour quelques types de marchandises (par exemple les produits manufacturés comme les ordinateurs, téléphones portables, imprimantes, voitures, matériaux de construction, etc.), l'entreprise peut appliquer de nouvelles technologies afin de fabriquer de nouveaux produits plus légers. De plus, le tonnage annuel expédié par le chargeur **T** est égal au poids moyen de chaque produit **t** multiplié par la quantité de produits expédiée **n**. Donc, pour réduire le tonnage annuel **T** sans modifier les quantités produites (sans modifier **n**), l'entreprise doit rechercher une solution pour réduire **t**. En faisant cela, l'entreprise modifie très légèrement ses émissions de CO<sub>2</sub> en réduisant sa fréquence (résultat du modèle) : elle réduit ses émissions principalement en réduisant le tonnage annuel expédié.

### **Effet de la distance sur la fréquence d'envoi**

La distance entre chargeur et destinataire et la fréquence d'envoi varient en sens opposé (paramètre négatif). Toutes choses égales par ailleurs, une augmentation de **10%** (resp. **20%**) de la distance va faire diminuer de **2%** (resp. **4%**) la fréquence d'envoi.

Cependant, dans l'objectif de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> via la diminution de la fréquence d'envoi, la distance ne peut pas être considérée comme une mesure idéale. En effet, la distance totale du transport a un effet indirect sur les émissions de CO<sub>2</sub> via la fréquence d'envoi mais elle a aussi, contradictoirement, un effet direct sur les émissions de CO<sub>2</sub>. Ou pour le dire autrement, la réduction de la distance totale du transport impliquerait d'augmenter la fréquence d'envoi et cela entraînerait indirectement une augmentation des émissions de CO<sub>2</sub>. Alors que cette diminution de la distance va faire réduire directement l'émission de CO<sub>2</sub>. Dans ce cas, l'effet direct sur l'émission de CO<sub>2</sub> est plus important que l'effet indirect. Et surtout, on ne voit pas comment le chargeur va réduire sa distance (à vol d'oiseau). Le seul moyen serait de refuser les clients 'trop' éloignés.

### **Effet du parc propre de véhicules routiers**

Le résultat du modèle confirme que plus les chargeurs disposent d'un parc en propre, plus leur fréquence d'envoi augmente. Pour approfondir cette corrélation, nous sélectionnons les chargeurs dont le nombre de véhicules routiers est renseigné et nous modélisons la fréquence de ces envois (annexe 9) (pour analyser l'influence du nombre de véhicules). Le résultat nous montre qu'une réduction de 10% du nombre de véhicules routiers entraînera une diminution de 2% de leur fréquence d'envoi, toutes les choses égales par ailleurs. Ce résultat nous fait penser d'envisager des mesures susceptibles de réduire les parcs en compte propres.

### **Effet de la réglementation du stationnement sur la fréquence d'envoi**

La réglementation du stationnement est un des déterminants de la fréquence. Les chargeurs qui se situent dans une zone urbaine à stationnement réglementé, ont une fréquence d'envoi plus limitée que les autres. Dans la partie suivante, nous analyserons plus en détail l'impact de cette variable sur la fréquence d'envoi ainsi que sur les émissions de CO<sub>2</sub>.

### **Remplir les valeurs manquantes de la fréquence d'envoi et l'émission de CO<sub>2</sub>**

Comme nous avons expliqué au début du chapitre, une des limites de la base ECHO est le nombre important de données manquantes. Sur l'ensemble de l'échantillon de **10462** observations, 720 observations ont des données manquantes sur l'émission de CO<sub>2</sub> et 1703 des valeurs manquantes pour la fréquence d'envoi. (*Annexe 4.3*).

Dans la partie 3.2, pour modéliser la fréquence d'envoi, dans la phase de sélection des variables nous avons dû retirer toutes les observations qui ont des données manquantes. Cette élimination est nécessaire pour modéliser la fréquence d'envoi mais elle réduit aussi la taille de l'échantillon utile, donc, cela pourrait entraîner une sous-estimation de l'émission totale de CO<sub>2</sub>. Pour cette raison, cherchant à quantifier les émissions de CO<sub>2</sub> évitées grâce aux mesures de politique, nous essayons d'imputer le plus possible les données manquantes. Pourtant, il existe des variables, par exemple le tonnage annuel expédié entre le chargeur et le destinataire, ou la densité de valeur de marchandise, pour lesquelles l'imputation, lorsqu'elles ne sont pas observées, est très difficile.

Dans cette phase de notre travail d'estimation, nous n'avons imputé que les données manquantes de la fréquence d'envoi et de l'intensité carbone

#### *Méthode d'imputation des données manquantes*

Il existe différentes méthodes de traitements des données manquantes, par exemple, l'imputation par la moyenne, par la médiane, par le plus proche voisin. Dans la partie précédente, on avait déjà un résultat de l'estimation du modèle de la fréquence d'envoi ainsi que de l'émission de CO<sub>2</sub>. Selon l'auteur, la méthode d'imputation par la régression simple est la méthode la plus performante dans ce cas. Donc, à partir de la régression de la fréquence d'envoi (*Tableau 4.6*) et de l'intensité carbone (*Annexe 4.2*), on impute un certain nombre de données manquantes.

*\*Imputer les données manquantes*

Sur 10462 observations de la base ECHO, nous avons 1703 données manquantes de la fréquence d'envoi et 720 valeurs manquantes de l'intensité carbone. La fréquence d'envoi est une des variables explicatives du modèle de l'intensité carbone, donc, pour remplacer le plus possible des valeurs manquantes, on commence d'abord par imputer les données manquantes de la fréquence d'envoi et ensuite les données manquantes de l'émission de CO<sub>2</sub>. La fréquence d'envoi est remplie petit à petit à partir de son modèle par régression. Pourtant, il n'y a que **107** données manquantes (soit 6,2% du total des données manquantes) sur la fréquence qui ont été imputées. Comment s'explique un résultat si modeste ?

En réalité, comme nous l'avons montré ci-dessus, les 3 variables : **densité de valeur des marchandises**, **tonnage** annuel entre chargeur et destinataire et **distance** sont des variables très significatives et elles expliquent déjà 57% de la distribution de la fréquence d'envoi. Pourtant, elles ont énormément de données manquantes. De plus, ce sont des variables qui sont très difficiles à imputer lorsqu'elles ne sont pas observées. Sans les données manquantes sur ces variables, il ne reste que 5816 observations. Sur cet échantillon, il y a 107 des données manquantes de la fréquence d'envoi. Pour cette raison, nous pouvons remplir seulement 107 observations pour lesquelles la fréquence d'envoi n'est pas renseignée.

Ensuite, nous continuons à imputer les données manquantes de l'intensité carbone. Sur 720 des données manquantes de cette variable, 571 observations ont été remplies.

### **Quantification de la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> évitées via la réglementation du stationnement**

Le modèle de la fréquence d'envoi nous montre que les chargeurs qui se situent dans une zone urbaine à stationnement réglementé ont une fréquence d'envoi plus limitée que les autres. A partir de cette idée, nous essayons maintenant de quantifier l'impact de la réglementation du stationnement sur la fréquence d'envoi et surtout sur la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.

La variable type de zone d'activité du chargeur permet de classer les envois selon différentes catégories. Dans notre échantillon de **5416** observations utiles, les envois expédiés à partir d'une zone urbaine représentent **20%** du total mais, sur l'ensemble des envois enquêtés, les envois expédiés à partir d'une zone urbaine représentent **23%** du total et près de la moitié d'entre eux sont des envois expédiés à partir d'une zone urbaine de stationnement libre. Comme exposé dans la partie précédente, la réglementation du stationnement est explicative seulement pour les envois transportés pour compte d'autrui. Dans le tableau ci-dessous nous comparons les caractéristiques moyennes de deux types d'envois pour compte d'autrui par des établissements situés en zone urbaine : ceux situés dans une zone urbaine où le stationnement est réglementé et ceux d'une zone urbaine où il ne l'est pas.

**Tableau 4.10 : Comparaison de la fréquence d'envoi, de la quantité annuelle, de la distance et de l'émission de CO<sub>2</sub> par envoi des deux zones urbaines**

	Fréquence annuelle moyenne d'envois	Tonnage annuel moyen au même destinataire	Distance moyenne (km)	Emission moyenne (kg de CO <sub>2</sub> WW par envoi)
Zone urbaine de station <sup>t</sup> réglementé	71	99	386	72
Zone urbaine de station <sup>t</sup> libre	85	285	832	82

*Source : Données de l'enquête ECHO 2004, calcul de l'auteur*

Quand on compare les envois pour compte d'autrui expédiés à partir de zones urbaines avec et sans réglementation du stationnement, on constate que dans celles où le stationnement est libre, la fréquence d'envoi est plus élevée (85 contre 71) et surtout que l'émission de CO<sub>2</sub> par envoi est plus élevée que dans celles à stationnement réglementé (72 contre 82). Donc, dans la partie suivante, pour les envois transportés pour Compte d'Autrui, nous faisons l'hypothèse que la réglementation du stationnement sera mise en place dans les zones urbaines où le stationnement n'est pas encore réglementé, toutes choses restant égales par ailleurs. Les scénarios seront établis pour quantifier l'impact de la réglementation du stationnement sur la fréquence d'envoi et surtout sur la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.

#### 4.4.4. Effet de la réglementation du stationnement sur la fréquence d'envoi

Notre objectif est d'analyser le changement de la fréquence d'envoi après la mise en œuvre de la réglementation du stationnement. Rappelons notre modèle de la fréquence d'envoi (équation 11):

$$\log(\text{FREQ}) = \alpha * \log(\text{TONNAGE}) + \beta * \log(\text{DISTANCE}) + \gamma * \log(\text{VALEUR}) + \delta * (\text{DELAI}) + \xi(\text{PARC\_VEH}) + \varepsilon * \log(\text{REF}) + \theta * (\text{STATIONNEMENT}) + \text{Constante} + \text{Erreur}$$

La variable indicatrice STATIONNEMENT vaut 0 dans les zones urbaines non réglementées avant de mettre en place la réglementation du stationnement et 1 après la mise en place de la réglementation. Sous l'hypothèse que toutes les choses restent égales par ailleurs :

$$\log(\text{FREQ}_{\text{après}}) - \log(\text{FREQ}_{\text{avant}}) = \theta \quad (12)$$

Où FREQ<sub>avant</sub> et FREQ<sub>après</sub> : sont les fréquences d'envoi respectivement avant et après la mise en place de la réglementation du stationnement dans la zone urbaine.

A partir de l'équation (12) avec la valeur  $\theta = -0.50996$  (voir le Tableau 4.9) et FREQ<sub>avant</sub> = 85, la nouvelle fréquence d'envoi (FREQ<sub>après</sub>) est égale à 51

**Tableau 4.11 : Nouvelle fréquence d'envoi après mise en place de la réglementation**

	Avant <sup>37</sup>	Après <sup>5</sup>	Variation (%)
Fréquence d'envoi	85	51	-40%

*Source : Données de l'enquête ECHO 2004, calcul des auteurs*

#### 4.4.5. Quantification de la réduction d'émissions de CO<sub>2</sub> via la réglementation du stationnement

Rappelons l'équation (1) sur le modèle de l'intensité carbone.

$$\log\text{CO}_2\text{tkm} = a_1 * \log\text{DISTANCE\_VO} + a_2 * \log(\text{TONNAGE}) + a_3 * \log(\text{FREQ}) + a_4 * \text{MARITIME} + a_5 * \text{AERIEN} + a_6 * \text{RAIL} + \text{Constant} + \text{Erreur (1)}$$

Où :

CO<sub>2</sub>/tkm est l'intensité carbone de l'envoi,

DISTANCE\_VO est la distance à vol d'oiseau,

TONNAGE est le tonnage annuel au même destinataire,

FREQ est la fréquence d'envoi,

MARITIME, AERIEN, et RAIL sont les modes de transport maritime, aérien et ferroviaire sous formes d'indicateurs binaires.

Quand la réglementation du stationnement est mise en place, dans l'équation (1), il y a seulement la fréquence d'envoi (FREQ) qui change, les autres variables ne changent pas. Donc,

$$\log\text{CO}_2\text{tkm}_{\text{après}} - \log\text{CO}_2\text{tkm}_{\text{avant}} = a_3 * [\log(\text{FREQ}_{\text{après}}) - \log(\text{FREQ}_{\text{avant}})] = a_3 * \theta \quad (12)$$

Avec la valeur du paramètre  $a_3 = 0,26366$  et  $\theta = -0,50996$ , nous obtenons le résultat suivant :

**Tableau 4.12 : Réduction des émissions de CO<sub>2</sub> après mise en place de la réglementation en zone urbaine**

	Avant <sup>4</sup>	Après <sup>4</sup>	%
Fréquence d'envoi	85	51	-40%
Emissions de CO <sub>2</sub> de cette zone (MtCO <sub>2</sub> )	1,97	1,72	-12,6%
Emission totale de CO <sub>2</sub> de la zone urbaine (MtCO <sub>2</sub> )	3,91	3,66	-6,4 %
Emission totale de CO <sub>2</sub> (MtCO <sub>2</sub> )	20,25	20,00	-1,2%

*Source : Calcul de l'auteur*

Donc, l'extension de la zone réglementée à l'ensemble ferait diminuer la fréquence moyenne d'envoi de 85 à 51 soit de 40%. Cette réduction de la fréquence aurait un effet positif sur les émissions de CO<sub>2</sub> : les émissions totales diminueraient de 0,25 millions de tonnes, soit **13%** des émissions de cette zone (où le stationnement n'était pas réglementé et où il le devient) ou encore **6%** de l'ensemble des émissions de la zone urbaine.

Ces résultats permettent d'illustrer comment la réduction de la fréquence d'envoi via la réglementation du stationnement permet (théoriquement) de diminuer des émissions de CO<sub>2</sub>. Du point de vue des chargeurs, ils pourraient aussi décider d'abaisser leur fréquence d'envoi s'ils trouvent que c'est un moyen qui leur permet d'atteindre leur objectif environnemental au moindre coût. C'est la raison pour laquelle, dans la section suivante, on s'intéresse au coût supporté par le chargeur, par tonne de CO<sub>2</sub> évité par la réduction de leur fréquence d'envoi.

#### **4.4.6. Coût pour le chargeur de cette réduction de la fréquence**

L'objectif de cette section est d'évaluer le coût logistique pour le chargeur de la diminution de la fréquence et ensuite le coût d'une tonne de CO<sub>2</sub> évitée. Rappelons notre modèle théorique sur le total coût logistique supporté par l'entreprise :

$$CTL_i = O_i f_i + TC_i d_i Q_i + r_t v_i Q_i + (s_i + r v_i) \frac{Q_i}{2f_i} \quad (4)$$

On peut constater que le coût du capital ( $r_t v_i Q_i$ ) reste inchangé quand le chargeur change sa fréquence d'envoi. Pour calculer le coût de commande ( $O_i f_i$ ), le coût du transport ( $TC_i d_i Q_i$ ) et le coût du stockage ( $(s_i + r v_i) \frac{Q_i}{2f_i}$ ), nous cherchons les variables dans la base ECHO mais malheureusement il n'y a que 3 variables disponibles. Ces variables nous permettent de calculer le coût du transport ( $TC_i d_i Q_i$ ) et une partie du coût du stockage (coût d'immobilisation ( $r v_i * \frac{Q_i}{2f_i}$ )); ce sont des coûts qui jouent un rôle important dans le coût logistique global, surtout le coût du transport. L'analyse de la répartition des coûts logistiques globaux indique que les coûts de transport représentent plus de la moitié des coûts logistiques globaux (54% en 2008 contre 43% en 2001) (Dromigny 2009). Donc, dans les parties suivantes nous allons estimer l'impact de la réduction de fréquence d'envoi sur ces coûts.

##### *\* L'impact de la fréquence d'envoi sur le coût du transport*

Dans la base ECHO, la variable « prix du transport » nous permet d'évaluer l'effet de la fréquence d'envoi sur le coût du transport. Pourtant, une des limites de cette variable est que ce prix est renseigné seulement pour la partie couvrant les transporteurs ou les organisateurs de transport mandatés par le chargeur. Alors, sur un total de 506 envois dans la zone urbaine non réglementée, il n'y a que 425 prix renseignés dont 25 pour lesquels le prix a été mis à 0. En plus, pour les envois maritimes et aériens, la charge est souvent partagée entre le chargeur et le destinataire. C'est pourquoi notre coût total du transport calculé à partir de la base ECHO pourrait être sous-estimé par rapport au total coût du transport réel.

En tenant compte de ces limites des données, nous trouvons qu'il est intéressant de quantifier l'impact de la réduction de la fréquence d'envoi sur le coût du transport. Pour cela, nous faisons une hypothèse simplificatrice: les chargeurs prennent totalement en charge le prix du transport jusqu'aux destinataires.

Nous supposons que le coût du transport ne dépend que de la taille d'envoi et de la distance. Nous modélisons le prix du transport à partir des données ECHO ; le résultat est le suivant :

$$\text{LOG(PRIX\_TRANSPORT)} = b_1 * \text{LOG(TAILLE)} + b_2 * \text{LOG(DISTANCE)} \quad (13)$$

Où: PRIX\_TRANSPORT est le prix du transport, TAILLE est le poids de l'envoi, DISTANCE est la distance totale du transport.

**Tableau 4.13 : Résultat de l'estimation du modèle du coût du transport**

R <sup>2</sup> = <b>0.6041</b> R <sup>2</sup> ajusté = <b>0.6039</b>				
Variable	Valeur estimée	Ecart-type	T	Pr >  t
Constante	0.54318	0.07098	7.65	<.0001
Taille de l'envoi	-0.52868	0.00590	-89.65	<.0001
Distance totale de transport	0.20837	0.01183	17.61	<.0001

Source : Données de l'enquête ECHO 2004, calcul de l'auteur

Ce modèle est un modèle log-log donc, les valeurs estimées des paramètres sont des élasticités. On trouve que ces coefficients sont fortement significatifs et leurs signes sont aussi conformes à ce que l'on attendait. Nous quantifions ensuite l'impact de la réduction de la fréquence d'envoi sur le coût du transport. En effet, avec le tonnage total annuel inchangé, la réduction de la fréquence d'envoi entraînera une augmentation de la taille des envois. On appelle TC<sub>avant</sub>, TC<sub>après</sub> respectivement le coût du transport avant et après la réduction de la fréquence et TAILLE<sub>avant</sub>, TAILLE<sub>après</sub> respectivement la taille moyenne de l'envoi avant et après la réduction de la fréquence. Donc, d'après le modèle (13)

$$\log TC_{\text{après}} - \log TC_{\text{avant}} = -0,52868 * (\log(TAILLE_{\text{après}}) - \log(TAILLE_{\text{avant}}))$$

$$\text{Log} (TC_{\text{après}} / TC_{\text{avant}}) = -0,52868 * \log(TAILLE_{\text{après}} / TAILLE_{\text{avant}})$$

**Tableau 4.14 : Estimation du coût de transport économisé via la réduction de la fréquence**

	Avant	Après	%
Fréquence moyenne d'envois	85	51	-40%
Taille moyenne d'envois (tonne)	1,53	2,55	+67%
Total Coût du transport (millions euros)	3,19	2,43	-24%
Coût du transport économisé (millions euros)	0,76		

Source : Données de l'enquête ECHO 2004, calcul de l'auteur

\* L'impact de la fréquence d'envoi sur le coût d'immobilisation de la marchandise

$$\text{Coût d'immobilisation} = r * v_i * \frac{Q_i}{2f_i}$$

Nous constatons que ce coût d'immobilisation de la marchandise dépend du taux d'intérêt r, donc, nous voudrions faire aussi un test de sensibilité. C'est la raison pour laquelle nous calculons ce coût d'immobilisation avec les deux taux d'intérêt de 4,5% et 8%. Sous l'hypothèse que toutes les choses restent égales par ailleurs, quand la fréquence d'envoi diminue, le coût d'immobilisation augmente.

**Tableau 4.15 : Impact de la fréquence d'envoi sur le coût d'immobilisation**

	Avant <sup>38</sup>	Après	%
Fréquence moyenne d'envois	85	51	-40%
Valeur moyenne de la densité de valeur marchandise (euro/tonne)	114047	114047	
Tonnage annuel moyen expédié au même destinataire (en tonne)	285	285	
Taux d'intérêt 1	<b>4,5 %</b>		
Total Coût d'immobilisation (million euros)	4,296	7,154	+67%
Augmentation du coût d'immobilisation (million euros)	<b>2,86</b>		
Taux d'intérêt 2	<b>8%</b>		
Total Coût d'immobilisation (million euros)	7,64	12,72	+67%
Augmentation du coût d'immobilisation (million euros)	<b>5,08</b>		

*Source : Données de l'enquête ECHO 2004, calcul de l'auteur*

L'augmentation de la fréquence d'envoi provoque une diminution de 0,76 (M€) du coût du transport et une augmentation de 2,86 (M€) du coût d'immobilisation. Donc une tonne de CO<sub>2</sub> économisée par la réduction de la fréquence d'envois s'accompagne, pour les chargeurs, d'une augmentation de coût logistique égal à :  $2,86 - 0,76 = 2,1$  (M€). Si le taux d'intérêt est de 8%, ce coût sera plus important :  $5,08 - 0,76 = 4,32$  (M€)

*\* Coût logistique supporté par le chargeur, par tonne de CO<sub>2</sub> évitée*

Rappelons que grâce à la mise en place de la réglementation du stationnement en zone urbaine, nous pourrions réduire les émissions de 0,25 MtCO<sub>2</sub>. Pourtant, cette réglementation a entraîné aussi une augmentation du coût logistique pour le chargeur ; l'augmentation de coût supporté par le chargeur, par tonne de CO<sub>2</sub> évitée, est égal à :  $2,1/0,25 = 8,4$  €/tonne.

Ce coût augmente avec le taux d'intérêt. Pour le taux d'intérêt de 8%, ce coût est de  $4,32/0,25 = 17,3$  €/tonne

Nous tenons compte de la limite des données pour calculer le coût total logistique pour le chargeur, le coût de la tonne de CO<sub>2</sub> évitée via la mise en place de la réglementation du stationnement semble intéressant du point de vue des décideurs publics. L'avantage de cette mesure réside dans la simplicité de son application, et surtout sous l'aspect économique, cette mesure est très "bon marché" pour inciter le chargeur à réduire ses émissions de CO<sub>2</sub> via la diminution de leur fréquence d'envoi. Dans le chapitre 5, nous allons faire aussi comparer les coûts économiques des différentes mesures de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.

<sup>38</sup> Avant et après la réduction de la fréquence d'envois

## Conclusion du chapitre 4

Ce chapitre a confirmé que la fréquence d'envoi a un impact fort sur l'intensité carbone du transport de fret : en réduisant la fréquence de ses envois, un chargeur peut réduire sensiblement ses émissions. Cette fréquence d'envoi est une décision qui se prend entre le chargeur et son client en tenant compte des contraintes de chacun et des coûts logistiques qui seront partagés entre eux. Ce choix de changer la fréquence peut provenir d'une nouvelle contrainte et nous avons testé ici l'impact d'un changement de réglementation du stationnement ; mais il pourrait aussi résulter par exemple de la volonté du chargeur de réduire ses émissions. Il nous est donc apparu intéressant d'en comprendre les déterminants et de donner des indications sur le coût logistique pour le chargeur que pourrait entraîner une telle réduction de fréquence des envois.

La fréquence d'envoi est une fonction croissante de la quantité annuelle entre chargeur et destinataire, de la densité de valeur des marchandises, du nombre de références et du fait de disposer en propre d'un parc de véhicules. C'est une fonction décroissante de la distance, de la réglementation du stationnement et du délai de traitement d'une commande. Plus la distance est longue, moins la fréquence d'envoi est importante et les chargeurs situés dans une zone urbaine où le stationnement est réglementé ont une fréquence d'envoi moins importante. A partir du modèle explicatif de la fréquence, calibré sur la base de données ECHO, nous avons fait l'hypothèse que la réglementation du stationnement sera mise en place dans toutes les zones urbaines. Le résultat montre que cette réglementation pourrait contribuer à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> du transport. Dans la zone urbaine de stationnement libre, après mise en œuvre de la réglementation, la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> pourrait atteindre **13%**.

Seuls les envois à partir de la zone urbaine de stationnement libre, soit seulement 11,5% du total des envois, seraient concernés par cette réglementation. Après avoir mis en place la réglementation du stationnement, la fréquence d'envoi dans cette zone diminuerait de 40% permettant de réduire de 13% les émissions de CO<sub>2</sub> de cette zone soit 6% du total des émissions de CO<sub>2</sub> de la zone urbaine. Pourtant, au total, les envois expédiés pour compte d'autrui à partir de zones urbaines de stationnement libre ne constituent qu'une petite partie de l'ensemble des envois, donc la mise en place d'une réglementation du stationnement dans ces zones n'aurait qu'un impact limité sur le total des émissions de CO<sub>2</sub> du fret. Cette mesure aurait un coût limité (**8,4 €/tCO<sub>2</sub>**) sur la logistique des chargeurs. Notons que, à cause de la limite des données, ce coût est peut être sous estimé.

## **Chapitre 5 : Quelles sont les bonnes mesures de réduction des émissions de GES du transport routier de fret ?**

### **5.1. Objectifs du chapitre**

Les chapitres précédents de cette thèse ont déjà estimé le coût d'abattement d'une tonne de CO<sub>2e</sub> évitée du fret routier pour trois politiques. L'objectif de ce chapitre est de voir quelles sont les bonnes mesures de réduction de GES du transport de marchandise pour la France. Comme indiqué dans le premier chapitre, il existe de nombreuses mesures politiques visant à réduire les émissions de GES du fret. En raison des données disponibles et de la méthodologie utilisée, nous avons analysé en détail trois mesures politiques : Taxe carbone, véhicule électrique et fréquence d'envoi. Afin d'avoir une vision plus large pour comparer l'efficacité des différentes mesures, nous reprenons celles qui sont analysées dans l'article (Koning et al. 2018) qui s'intéresse aussi au coût d'abattement d'une tonne de CO<sub>2e</sub> du transport de fret pour la période 2030-2050. Nous dressons d'abord une description des scénarios analysés dans cet article puis, après avoir harmonisé les hypothèses avec celles que nous avons suivies dans les chapitres précédents de notre thèse, nous présentons notre analyse de ces mesures en termes de quantité de réduction des émissions de GES ainsi qu'en termes de coût économique pour une tonne de CO<sub>2e</sub> évitée. Ceci nous permet de comparer six mesures de réduction des émissions de GES du transport routier de marchandise pour la France.

Après cette analyse des mesures politiques proposées pour réduire les émissions de GES du transport routier de marchandise en France, nous nous intéressons aussi à la question Nord-Sud. La question est : ces politiques efficaces en France, un pays développé, sont-elles encore efficaces dans un pays en voie de développement comme le Vietnam. La dernière partie de ce chapitre va essayer de répondre à cette question.

### **5.2. Mesures de réduction des émissions de GES du fret pour la France**

#### **5.2.1. Présentation des nouveaux scénarios**

Dans ce chapitre, nous reprenons les 3 scénarios de l'article de (Koning et al.2018) : Scénario PLH (poids lourds hybrides), scénario PLG (poids lourds au gaz naturel), scénario PLL (poids longs et lourds).

**Scénario PLH** : Sous l'hypothèse que les autoroutes concédées seront équipées de caténaires à l'horizon 2030, ce scénario correspond au remplacement des poids lourds diesel par des poids lourds hybrides (PLH) qui circulent sur des autoroutes électrifiées par caténaires, et au diesel en amont et en aval des autoroutes.

Nous émettons l'hypothèse que 80% des distances parcourues par les poids lourds le sont sur autoroute. Autrement dit, dans ce scénario 80% des kilomètres des poids lourds hybrides sont réalisé en mode électrique (noté PLH), le reste (20%), est circulé en diesel comme un poids lourds diesel.

**Scénario PLG :** En supposant que l’Etat va subventionner les installations des nouvelles stations sur l’ensemble du réseau routier en quantité suffisante à l’horizon 2030 pour que les poids lourds diesels soient remplacés par des poids lourds fonctionnant au Gaz Naturel Véhicules (PLG).

**Scénario PLL :** correspond au scénario où le Poids Total Roulant Autorisé (PTRA) des poids lourds passerait de 40 tonnes à 60 tonnes. Cette augmentation du PTRA s’accompagne d’une augmentation correspondante de la longueur maximum mais aussi du nombre d’essieux afin que le poids maximum par essieux reste inchangé pour ne pas détériorer les routes. En plus, l’Etat va investir pour mettre à niveau le réseau routier structurant national.

A la différence des deux scénarios PLH et PLG qui s’intéressent surtout aux envois interrégionaux, seuls les envois massifiés, principalement sur de courtes distances, seront concernés par les Poids lourds 60t ; c’est la raison pour laquelle nous comparons ce scénario PLL avec le **PL Diesel 40t** où la tendance évolue au fil de l’eau.

Concernant le trafic, selon (Koning et al.2018) les poids lourds hybrides ainsi que les poids lourds au Gaz Naturel Véhicules seront utilisés principalement pour le fret interrégional. Donc, **39,7%** des tonnes.kilomètres ou 151,9 milliards de tonnes.kilomètres du transport routier de marchandise en France à l’horizon 2030 seront transportés par les PLH. Les auteurs ont pris les mêmes hypothèses pour le trafic des PLG. Cependant, ne concernant que les gros envois à l’horizon 2030, le marché des PLL sera de 62 milliards de tonnes.kilomètres à cet horizon, soit **16%** du fret routier de la France. En reprenant notre hypothèse sur le taux de croissance annuelle moyen du trafic de **1,3%** entre 2012 et 2050, comme dans l’étude de (Pochez 2016), pour les poids lourds. Kilomètres ainsi que les hypothèses sur les charges utiles des poids lourds (**Annexe 5.3**), le trafic à l’horizon 2050 de chaque scénario est estimé ; Notons que dans ce chapitre nous ne prenons pas en compte l’impact de ces politiques sur le report modal. Le résultat est résumé dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 5.1 : Trafic fret routier à l’horizon 2050 selon différents scénarios**

*En milliards de véhicules kilomètres*

	<b>2030</b>	<b>2050</b>
<b>Scénario PLH</b>		
Trafic PLH en mode diesel	1,69	2,19
Trafic PLH en mode électrique	6,75	8,74
<b>Scénario PLG</b>		
Trafic PLG	8,44	10,93
<b>Scénario PLL</b>		
Trafic potentiel PLL	2,48	3,21
Trafic PLL	1,55	2,01

*Source : (Koning et al.2018)*

En supposant que les PLH et PLG ont la même charge utile moyenne que le poids lourd diesel, c'est-à-dire 18 tonnes, et avec une quantité à transporter identique, le nombre total de véhicules.kilomètres (et de tkm) avec et sans projet dans ces deux scénarios reste inchangé.

Cependant, l'augmentation de charge utile de 25 tonnes à 40 tonnes, dans le scénario PLL, permet de réduire le trafic de 2,48 à 1,55 milliards véhicule. kilomètre, soit une diminution de 0,93 milliards véhicule. kilomètre en 2030 et 1,20 de milliards véhicules. kilomètres en 2050 par rapport au scénario 'au fil de l'eau'.

### **5.2.2. Harmonisation des hypothèses avec celles des chapitres précédents**

Afin de comparer l'efficacité des différentes options politiques, nous devons harmoniser la méthodologie ainsi que les données pour tous les scénarios. Nous constatons qu'il existe quelques différences entre leurs hypothèses et les nôtres.

D'abord, pour estimer la réduction des émissions de GES, nous constatons que dans l'article de (Koning et al.2018) les auteurs ont pris le facteur d'émission des sources d'énergie de l'arrêté de 2012 (qui ne prend en compte que les émissions de CO<sub>2</sub>), mais dans les chapitres précédents de cette thèse, nous avons pris les nouveaux facteurs d'émission : 3,17 kg CO<sub>2</sub>e pour un litre de gazole, 0,048 kgCO<sub>2</sub>e pour un KWh de l'électricité et 2,28 kg CO<sub>2</sub>e pour un litre de gaz naturel (GNV).

En plus, pour estimer le coût externe, les auteurs ont pris les données du coût marginal de la congestion et de l'accident dans le rapport européen (Ricardo 2014) en supposant que 80% du trafic est dans la situation « régime fluide » et 20% dans un régime proche de la « contrainte de capacité ». Comme explicité dans notre méthodologie, nous avons utilisé les données des comptes des transports en 2011 (MEDDE 2013).

Comme dans les chapitres précédents, nous faisons l'hypothèse que le taux de croissance du PIB/tête est + 1,3% au lieu de +2% par an comme les hypothèses des auteurs de cet article. Nous maintiendrons aussi notre hypothèse que la consommation unitaire des Poids lourds Diesel est de 0,297l/km en 2030 et 0,266 l/km en 2050. La taxe carbone est supposée de 100 euros par tCO<sub>2</sub>e ou 25 centimes par litre en 2030 qui évoluera pour atteindre 60 centimes par litre en 2050.

### **5.2.3. Quantification des émissions de CO<sub>2</sub>**

Comme expliqué ci-dessus, nous utilisons les nouveaux facteurs d'émission pour quantifier les émissions de GES : 3,17 kg CO<sub>2</sub> pour un litre de gazole, 0,048 kgCO<sub>2</sub> pour un KWh de l'électricité et 2,28 kg CO<sub>2</sub> pour un litre du gaz naturel (GNV). On suppose aussi que ces facteurs d'émission ne varient pas dans le temps.

Nous retenons l'hypothèse sur la consommation unitaire de carburant du PL Diesel indiquée dans Pochez : le PLL de 60 tonnes de PTAC est supposé consommer 35% de gazole en plus que le PL Diesel de 40 tonnes. Nous retenons les mêmes hypothèses que l'article (Koning et al.2018) sur la consommation d'énergie des PLH et PLG.

**Tableau 5.2: Consommation d'énergie des véhicules à l'horizon 2050**

	<b>2030</b>	<b>2050</b>
PL Diesel (litre/km)	0,297	0,266
PLL (litre/km)	0,40	0,359
PLH (KWh/km)	1,50	1,50
PLG (litre/km)	0,25	0,25

Source : Calcul de l'auteur à partir de (Pochez 2016) et (Koning, et al. 2018)

A partir des hypothèses sur le trafic, des facteurs d'émission des énergies et de la consommation unitaire des véhicules pendant la période 2030-2050, nous estimons la quantité des émissions de GES économisée par chaque scénario chaque année. Le résultat est résumé dans le tableau suivant :

**Tableau 5.3 : Quantification des émissions de GES sur la période 2030-2050**

*En millions de tonne de CO<sub>2</sub>e*

	2030	2040	2050
<b>Scénario PLH</b>			
Sans projet	7,95	8,56	9,22
Avec projet	2,08	2,26	2,47
GES évité	5,87	6,30	6,75
Total GES évité 2030-2050			<b>132,26</b>
<b>Scénario PLG</b>			
Sans projet	7,95	8,56	9,22
Avec projet	4,81	5,47	6,23
GES évité	3,14	3,09	2,99
Total GES évité 2030-2050			<b>64,57</b>
<b>Scénario PLL (sur le trafic concerné ou potentiel PLL)</b>			
Sans projet	2,33	2,51	2,71
Avec projet	1,97	2,12	2,28
GES évité	0,36	0,39	0,43
Total GES évité 2030-2050			<b>8,26</b>

Source : Calcul de l'auteur à partir de (Pochez 2016) et (Koning et al.2018)

Le tableau 5.3 montre que le scénario PLH permet d'éviter la quantité de GES la plus élevée : plus de 132 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>e sur la période 2030-2050 soit, en moyenne, une réduction de 6,6 millions de tonnes par an. La quantité des émissions de GES évitée est limitée pour le scénario PLL. Ce scénario réduit seulement de 8,26 millions de GES pendant la période 2030-2050. Enfin le scénario PLG est intermédiaire entre les deux autres avec 64,57 millions de tonnes de GES évitées sur la période.

#### 5.2.4. Coûts des externalités

Les coûts marginaux des externalités dépendent des zones géographiques (urbain ou non urbain) et aussi du type de réseau. Pour simplifier, dans ce chapitre, nous considérons que la répartition du trafic de chaque scénario selon le type de réseau et la zone géographique reste inchangée durant la période 2030-2050 (Annexe 5.1).

Comme dans les chapitres précédents, nous prenons les valeurs tutélaires recommandées dans les rapports (Quinet, 2013) (et CTN 2011) et faisons évoluer ces valeurs unitaires (en €/véhicule.km) dans le temps en supposant que le taux de croissance du PIB/tête est + 1,3%/an. Ces externalités sont aussi actualisées au taux de 4,5% conformément aux recommandations du même rapport (Quinet, 2013).

#### **Coût marginal unitaire du bruit**

Puisque les PLH et PLG dans les deux scénarios circulent principalement sur autoroute, nous retenons l'hypothèse que la pollution sonore est supposée égale à la moitié de celle du PL Diesel pour le PLG (Koning et al.2018) ainsi que pour le PLH

Pour le scénario PLL, nous supposons que le coût des externalités est 35% supérieur à celui du PL Diesel 40t.

Ensuite, nous prenons les valeurs de la pollution sonore dans le rapport (Quinet 2013), en tenant compte des hypothèses sur la répartition du trafic des Poids lourds et faisons évoluer ces coûts marginaux dans le temps. Le résultat est résumé dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 5.4: Coût marginal unitaire du bruit du PLH, PLG et PLL**

€/1000vkm	2030	2040	2050
PLH	0,50	0,55	0,65
PL Diesel (moyenne du parc)	1,00	1,1	1,3
PL G	0,50	0,55	0,65
PL Diesel 40t	1,20	1,4	1,6
PLL	1,65	1,88	2,14

Source : Calcul de l'auteur à partir du rapport (Quinet 2013) et (Koning et al.2018)

#### **\* Coût marginal unitaire de la pollution locale**

Nous partons des données sur le coût unitaire de la pollution locale du PL Diesel du rapport Quinet 2013. L'évolution de ces valeurs est estimée en prenant en compte d'une part la croissance du PIB par tête, d'autre part l'amélioration des émissions individuelles comme indiqué dans le rapport Quinet. Pour le PLH, cette pollution locale est supposée nulle quand il circule sur l'autoroute électrique, pour le reste nous prenons le coût marginal de la pollution du PL Diesel. Nous reprenons les hypothèses que le PLG pourrait réduire de 80% les pollutions locales par rapport au PL Diesel et que le PLL émet 35% de polluants locaux en plus que le PL Diesel 40t.

Tableau 5.5: Coût marginal unitaire de la pollution locale du PLH, PLG, PLL, PL Diesel

c€/km	2030	2040	2050
PLH	0,98	1,12	1,26
PL Diesel	4,9	5,6	6,3
PLG	0,98	1,12	1,26
PL Diesel 40t	5,5	6,3	7,1
PLL	7,4	8,4	9,6

Source : Calcul de l'auteur à partir du rapport (Quinet 2013) et (Koning et al.2018)

**\* Hypothèse du coût marginal unitaire de l'insécurité**

Dans ce chapitre nous considérons que le coût marginal unitaire de l'insécurité d'un PLH et PLG est égal à celui du PL Diesel. Pour un même total de véhicule.kilomètres, le coût total d'accident du scénario PLH ou PLG est égal à celui du scénario de référence. Donc, pour le coût marginal de l'insécurité, nous calculons seulement le scénario PLL

Nous prenons les données sur le **coût marginal unitaire de l'insécurité dans les comptes des transports en 2011** (CTN 2013) et la répartition du trafic de ce scénario ([Annexe 5.1](#)) pour calculer le coût marginal unitaire d'accident des scénarios PL Diesel 40t et PLL. Ensuite, ce coût évolue dans le temps au rythme de la croissance du PIB par tête. Notre hypothèse sur le coût unitaire de l'insécurité est résumée dans le tableau 5.6:

Tableau 5.6: Coût marginal unitaire de l'insécurité du PL Diesel 40t et PLL

c€/vkm	2030	2040	2050
PL Diesel 40t	3,3	3,7	4,2
PLL	4,4	5,0	5,7

Source : Calcul de l'auteur à partir du rapport CTN en 2011

**\* Hypothèse sur le coût marginal unitaire de la congestion**

Nous retenons l'hypothèse que le PLH, le PLG et le PL Diesel ont le même coût marginal de congestion. Avec une quantité de véhicules. kilomètres identique, le total du coût marginal de la congestion dans les deux scénarios PLH et PLG est le même que celui du scénario de référence. Alors, nous estimons seulement le coût de la congestion du scénario PLL.

Pour évaluer ce coût, nous utilisons les données sur le coût marginal unitaire de congestion routière figurant dans le rapport CTN 2011 en prenant en compte notre hypothèse sur la répartition du trafic : 50% du trafic du PLL sont dans la zone urbaine diffuse et 50% dans la zone interurbaine. En supposant que le niveau de la congestion ne varie pas dans le temps, le coût marginal unitaire de congestion du PL Diesel 40t comme du PLL évolue proportionnellement à la valeur du temps (i.e. PIB par tête avec un facteur 0,7). Le résultat sur le coût marginal unitaire de congestion routière est le suivant :

**Tableau 5.7: Coût marginal unitaire de la congestion des PL Diesel 40 t et PLL**

c€/vkm	2030	2040	2050
PL Diesel 40 t	9,4	10,3	11,2
PLL	12,7	13,9	15,2

*Source : Calcul de l'auteur à partir de (MEDDE 2013)*

Nous constatons que notre hypothèse est éloignée de celle sur le coût de la congestion du PLL dans l'article de (Koning et al.2018) (*Annexe 5.2*). Comme expliqué ci-dessus, cette différence provient des sources de données. Puisque le coût de la congestion occupe une partie importante du coût total des externalités, pour apprécier l'impact du coût marginal de la congestion sur nos résultats, nous appliquons le test de sensibilité à ce coût.

**\* Total du coût unitaire externe**

Selon les hypothèses retenues sur le coût marginal de la pollution locale, de la pollution sonore, de la congestion et des accidents, nous résumons dans le tableau ci-dessous le coût externe total des véhicules dans les trois scénarios.

**Tableau 5.8: Coût unitaire externe total des PLH, PLG et PLL dans la période 2030-2050**

*En c€/véh.km*

	PLH		PLG		PLL	
	2030	2050	2030	2050	2030	2050
Pollution locale	0	0	0,98	1,26	7,4	9,6
Bruit	0,05	0,065	0,05	0,065	0,16	0,21
Insécurité	3,2	4,1	3,2	4,1	4,4	5,7
Congestion	9,4	11,2	9,4	11,2	12,7	15,2
<b>Total</b>	<b>12,7</b>	<b>15,4</b>	<b>13,6</b>	<b>16,6</b>	<b>24,7</b>	<b>30,7</b>

*Source: Calcul de l'auteur à partir des comptes des transports en 2011 (MEDDE 2013), de (Quinet 2013) et (Koning et al.2018)*

On peut constater que le total des coûts unitaires externes des Poids lourds dans ces trois scénarios est légèrement plus faible que celui mentionné dans les autres chapitres. Ceci s'explique par le fait que la plupart du trafic dans ces trois scénarios n'est pas dans la zone urbaine. Rappelons que dans les scénarii PLH et PLG nous prenons l'hypothèse que 80% du trafic est dans la zone interurbain et 20% dans la zone urbain diffus, pour le scénario PLL la répartition est 50% pour l'interurbain et 50% pour l'urbain diffus.

## Coût des externalités

Tableau 5.9: Gain d'externalités selon les différents scénarios sur la période 2030 – 2050

Externalité	Unités	Scénario PLH		
		2030	2050	Total
Sans projet	Mds €	1,42	0,95	24,51
Avec projet	Mds €	1,10	0,73	18,90
Gain	Mds €	0,32	0,22	<b>5,61</b>
Externalité		Scénario PLG		
		2030	2050	Total
Sans projet	Mds €	1,42	0,95	24,51
Avec projet	Mds €	1,10	0,72	18,88
Gain	Mds €	0,32	0,22	<b>5,63</b>
Externalité		Scénario PLL		
		2030	2050	Total
Sans projet	Mds €	0,43	0,29	7,51
Avec projet	Mds €	0,37	0,24	6,33
Gain	Mds €	0,06	0,05	<b>1,18</b>

Source : Calcul de l'auteur

Nous observons que les deux scénarios PLH et PLG ont presque le même gain d'externalités. Ce gain reste plus modeste pour le scénario PLL. Notons que selon nos hypothèses, seulement 16% des tonnes. kilomètres du total fret routier sont concernés par les véhicules de 60 tonnes de PTAC dans ce scénario, c'est la raison pour laquelle le résultat des externalités est plus limité que ceux des deux autres scénarii.

### 5.2.5. Coûts d'exploitation du transport de fret (Surplus des chargeurs et transporteurs)

Selon les hypothèses émises (Annexe 5.3), les auteurs (Koning et al. 2018) ont estimé le coût unitaire moyen du transport pour les différents scénarios en utilisant la méthode « total costs of ownership ». Le résultat présenté dans le tableau ci-dessous inclut les coûts d'achats nets des valeurs résiduels, les coûts variables, le surpéage des PLH et la surimmobilisation des PLL:

Tableau 5.10 : Coût du transport selon les scénarios en 2030

	2030	
	€/véhicule. kilomètre	€/tonne. kilomètre
PL Diesel	1,46	0,081
PLH	1,39	0,077
PLG	1,38	0,077
PL Diesel 40t	1,63	0,065
PLL	2,13	0,053

Source: (Koning et al.2018)

Nous constatons que par rapport aux autres poids lourds, grâce à la charge utile de 40 tonnes, le PLL a un coût par tonne.kilomètre nettement plus faible que les autres véhicules. Le PLH et le PLG ont presque le même coût unitaire du transport. Pour estimer les coûts totaux du transport chaque année selon les scénarios, nous multiplions ce coût de transport unitaire (Tableau 5.10) avec les données du trafic (Tableau 5.1). Notons que ces coûts sont aussi actualisés au taux de 4,5% comme indiqué dans rapport (Quinet, 2013).

Tableau 5.11 : Gains pour les chargeurs-transporteurs

	Scénario PLH	Scénario PLG	Scénario PLL
Variation du coût	+8,78	+8,88	+11,19

Source: Calcul de l'auteur à partir de (Koning et al.2018)

### 5.2.6. Impact sur les Finances publiques

Nos résultats présentés dans les parties précédentes montrent que le remplacement du PL Diesel par les Poids lourds hybrides ou PLG permet de réduire les émissions de GES ainsi que les autres externalités. Pourtant, ce remplacement demande aussi des investissements en infrastructures et en équipements ...Nous prenons les mêmes hypothèses sur ces investissements que dans l'article (Koning et al.2018). Pour mettre en place ces mesures politiques en 2030, nous supposons que l'Etat ou les sociétés concessionnaires vont investir **10,3** milliards d'euros dans le scénario **PLH** pour que l'autoroute soit équipée de caténaires. Pour faciliter l'alimentation des poids lourds au gaz naturel, nous retenons l'hypothèse que 100 nouvelles stations seront installées. Pour cela, l'Etat doit financer **120** millions euros. Pour le scénario PLL, les entretiens des routes, des ponts pour qu'ils puissent adapter aux circulations des PLL coûteront **10,77** milliard d'euros de finances publiques.

Ces mesures politiques demandent non seulement les investissements initiaux mais elles ont aussi des impacts sur les recettes fiscales sur le gazole pour l'Etat. Nous estimons ensuite cet

impact sur le budget de l'Etat. Pour cela, nous émettons des hypothèses sur les taxes des énergies:

**Tableau 5.12 : Les hypothèses concernant les taxes**

Gazole		
	2030	2050
Taxes pour les PL Diesel		
TICPE (€/l)	0,43	0,43
Taxe carbone (€/l)	0,25	0,60
Total Taxe d'énergie PL Diesel (€/l)	0,68	1,03
Taxe sur l'électricité (€/kWh)	0,05	0,05
Taxe sur GNV (€/kg)	0,25	0,25

*Source: Calcul de l'auteur*

**\* Hypothèse du coût d'usage de l'infrastructure**

Comme dans les chapitres précédents, nous faisons aussi l'hypothèse que l'Etat va financer totalement les coûts liés à l'entretien des routes publiques. On suppose que le coût marginal de l'usage d'infrastructure du PLH et PLG est égal à celui du PL Diesel. Pour le PLL, nous prenons l'hypothèse que ce coût est de 35% supérieur au coût marginal unitaire du PL Diesel 40 t. Notre hypothèse sur ce coût est résumée dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 5.13: Coût marginal unitaire de l'usage de l'infrastructure**

c€/vkm	2030	2040	2050
PL	6,8	7,4	7,9
PLL	9,2	10,0	10,7

*Source : Calcul de l'auteur à partir CTN en 2011*

Selon nos hypothèses décrites précédemment, nous calculons le résultat pour les finances publiques qui est résumé dans le tableau suivant :

Tableau 5.14 : Bilan pour l'Etat sur la période 2030-2050

Scénario PLH	Sans projet	Avec projet
Investissements initiaux (Mds €)	0	-10,3
Recette fiscale (Mds €)	34,70	16,14
Perte recette fiscale (Mds €)	<b>-18,56</b>	
<b>Totale perte de l'Etat (Mds €)</b>	<b>-28,88</b>	
Scénario PLG	Sans projet	Avec projet
Investissements initiaux (Mds €)	0	-0,12
Recette fiscale (Mds €)	34,70	9,50
Perte recette fiscale (Mds €)	<b>-25,20</b>	
<b>Totale perte de l'Etat (Mds €)</b>	<b>-25,31</b>	
Scénario PLL	Sans projet	Avec projet
Investissements initiaux (Mds €)		-10,77
Recette fiscale (Mds €)	10,19	8,60
Perte recette fiscale (Mds €)	<b>-1,59</b>	
Dépense publique (Mds €)	3,28	2,76
Gains des usages d'infrastructure (Mds €)	<b>+0,52</b>	
<b>Totale perte de l'Etat</b>	<b>-11,84</b>	

Source: Calcul de l'auteur

Nous constatons qu'avec la mise en place du Poids lourd hybride, l'Etat va perdre en moyenne à peu près un milliard d'euros par an de recette fiscale. Cette perte est plus importante dans le scénario PLG (1,2 milliard par an en moyenne). Par contre, avec un investissement initial faible, la perte totale de l'Etat dans le scénario PLG est moins importante que celle du scénario PLH.

Pour le PLL, selon notre hypothèse, la taxe par kilomètre est de 35% supérieure à celle du PL Diesel du 40t ([Annexe 5.4](#)) (0,27 €/véh.km contre 0,20 €/véh.km) mais grâce à la baisse du total des véhicules.kilomètres, l'Etat va perdre seulement 1,6 milliard d'euros dans la période

2030-2050. Cette perte fiscale sera en partie compensée par le gain sur les dépenses publiques liées à l'entretien et aux réparations des routes. Prenant en compte les investissements initiaux, sur le bilan total, dans le scénario PLL, l'Etat va perdre seulement 11,84 milliards d'euros. Rappelons que ce coût est actualisé.

### 5.2.7. Coût économique d'une tonne de CO<sub>2</sub> évitée

Le coût d'abattement d'une tonne de GES évitée est résumé dans le tableau suivant :

Tableau 5.15: Coût économique d'une tonne de CO<sub>2</sub> évitée selon les différents scénarios

		Scénario PLH	Scénario PLG	Scénario PLL
Transporteur	Mds €	+8,78	+8,88	+11,19
Finance publique	Mds €	-28,88	-25,31	-11,84
Externalité	Mds €	+5,61	+5,63	+1,17
Solde	Mds €	-14,49	-10,80	+0,52
CO <sub>2</sub> économisée	Millions de tCO <sub>2</sub> e	-132,3	-64,6	-8,3
Coût d'abattement	€/tCO <sub>2</sub> e	<b>+109</b>	<b>+167</b>	<b>-63</b>

Source : Calcul de l'auteur

Selon nos résultats, le coût d'abattement final d'une tonne de CO<sub>2</sub> évitée est différent selon les trois scénarios : 167€/t CO<sub>2</sub> dans le scénario PLG, un coût légèrement plus faible 109 €/t CO<sub>2</sub> dans le scénario PLH et surtout un bénéfice économique 63 €/t CO<sub>2</sub> dans le scénario PLL. Pourtant, en terme de réduction des émissions de GES, le scénario PLL permet de supprimer seulement 8,3 millions de tonnes de GES. Sur ce point, avec 132 millions de tonnes de GES évitées le scénario PLH montre son avantage. Notons que ces résultats sont vraiment sensibles aux hypothèses émises, donc, vous trouverez dans la partie suivante notre test de sensibilité.

### 5.2.8. Test de sensibilité

#### Coût de la congestion

Nous testons ici deux hypothèses concernant le coût marginal de la congestion. L'hypothèse noté H<sub>0</sub> correspond au coût marginal de la congestion supposé nul pour le PLL. Nous testons aussi l'autre hypothèse dite H<sub>1</sub> où le coût marginal de la congestion est doublé par rapport à la valeur de référence. Plus en détail, nous faisons l'hypothèse que le coût marginal de la congestion du PLL 19 c€/véhicule.km en 2030 et 23 c€/véhicule.km en 2050. Notons que 50% du trafic du PLL est réalisé sur l'urbain diffus et 50% sur l'interurbain.

Tableau 5.16: Test de sensibilité du coût marginal de la congestion

Coût marginal de la congestion (c€/km)	Coût d'abattement (€/tCO <sub>2</sub> )
	Scénario PLL
Valeur de référence <sup>39</sup>	<b>-63</b>
Hypothèse H <sub>0</sub>	+9
Hypothèse H <sub>1</sub>	-134

Source : Calcul de l'auteur

Notre test de sensibilité confirme que le résultat du coût économique d'une tonne de CO<sub>2</sub>e évitée dans le scénario PLL est très sensible aux hypothèses émises. Plus le trafic n'est congestionné, plus la mise en place du PLL présente un bénéfice pour la collectivité. Au contraire, si le trafic est fluide, le scénario PLL n'a plus un bénéfice économique. Mais par rapport aux autres scénarios comme PLH ou PLL, son coût d'abattement reste encore faible.

### 5.3 Comparaison des réductions d'émissions et des coûts des différents scénarios envisagés pour la France

Comme indiqué dans la partie méthodologique, nous suivons la même méthode et nous utilisons les mêmes sources de donnée qui nous permettent de comparer l'efficacité des différents scénarios. Dans le tableau suivant, nous résumons nos résultats sur le coût économique pour une tonne de GES évitée.

Tableau 5.17: Comparaison des coûts économiques de réduction des GES des différents scénarios

	GES évité	Coût abattement
<b>Taxe carbone</b>		
	CO <sub>2</sub> e évitée (millions de tCO <sub>2</sub> )	Coût d'abattement (€/tCO <sub>2</sub> )
Scénario PLF 2018	-40,70	<b>-361</b>
Scénario taxe optimale	-139,2	<b>-276</b>
Scénario taxe quadruplée	-173,6	<b>+35</b>
<b>Véhicule électrique</b>		
Véhicule électrique CU2 t	-100,5	<b>+811</b>
Véhicule électrique CU 6t	-140,3	<b>-409</b>
<b>Fréquence d'envoi</b>		
Fréquence d'envoi	-0,25	<b>+8</b>
<b>Poids lourds</b>		
Scénario PLH	-132,3	<b>+109</b>
Scénario PLG	-64,6	<b>+167</b>
Scénario PLL	-8,3	<b>-63</b>

Source : Calcul de l'auteur

<sup>39</sup> Rappelons que notre hypothèse sur la valeur de référence du coût marginal de la congestion est bien indiqué dans le tableau 5.8 : en 2030, le coût marginal de la congestion du PL, du VUL sont respectivement 12,7 c€/km, 15,2 c€/km

Selon nos résultats sur le cas français, nous constatons que le coût d'abattement des émissions de GES est très différent selon les scénarios. Nous obtenons un bénéfice économique pour les mesures : taxe carbone, le camion électrique CU 6 tonnes et le méga-camion. Cependant, le remplacement des camions par le VUL électrique a enregistré un coût économique élevé par tonne de GES évitée. Ce coût élevé est expliqué par une perte importante des transporteurs et chargeurs.

Le PLH et le PLG ont un coût d'abattement assez proche, pourtant, avec 132 millions de tonnes de GES évitées, en termes de réduction des émissions de GES, le PLH montre son avantage par rapport au PLG. Concernant ce point, l'électrification du fret urbain et la taxe carbone sont des mesures efficaces.

Du côté chargeur, nos résultats confirment qu'en réduisant la fréquence de ses envois, un chargeur peut réduire sensiblement ses émissions avec un coût très raisonnable (8€/tCO<sub>2</sub>e)

Notons aussi que notre test de sensibilité montre que ces résultats sont sensibles aux hypothèses émises.

Est-ce que ces mesures, efficaces dans le contexte de la France, sont encore valables pour le cas du Vietnam ? Pour cela, dans la partie suivante, nous dressons tout d'abord un panorama de l'économie du Vietnam, nous présentons ensuite une vue générale du transport et des émissions de GES du Vietnam. En fin, nous analysons la faisabilité des mesures politiques visant à réduire les émissions de GES du transport de fret proposées en France pour le cas du Vietnam.

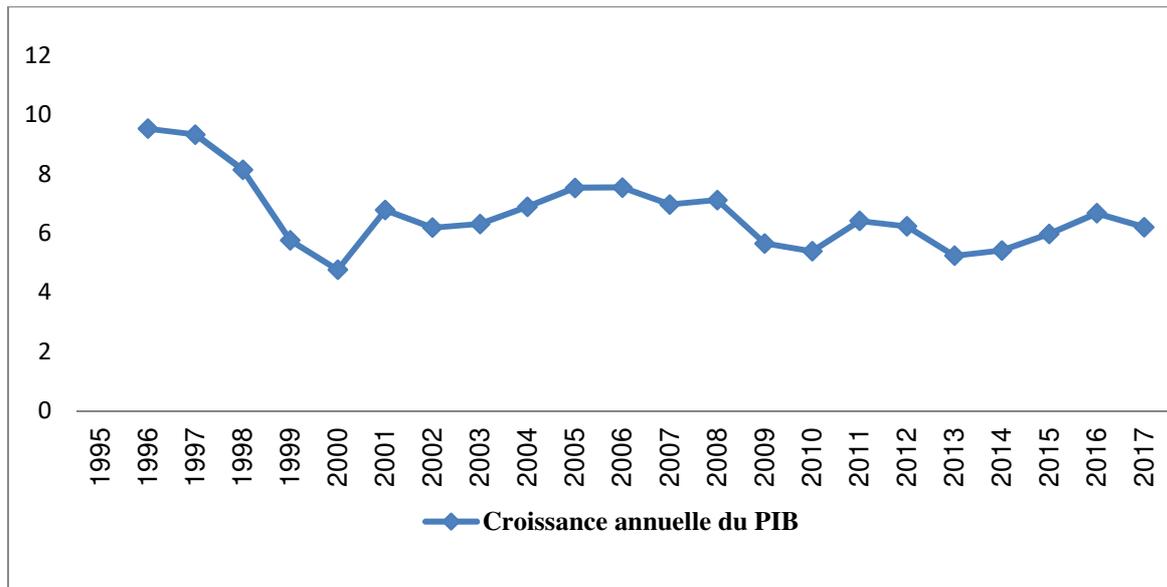
## 5.4 .Quelles mesures pour le Vietnam ?

### 5.4.1. Contexte générale du Vietnam

*\* De la croissance économique .....*

L'économie du Vietnam s'est ouverte à partir de l'année 1986 avec la politique dite du "renouveau". Sur l'ensemble de la période 1995-2017, le Vietnam a connu une période de forte croissance : le PIB a été multiplié par 3 **en 22 ans** avec **un taux de croissance annuel moyen de 6,5%**. Les perspectives de croissance pour l'année 2018 restent parmi les plus élevées d'Asie avec **6,7%**

Figure 5.1: Taux de croissance annuel du PIB au Vietnam 1995-2017



Source : Graphique réalisé par l'auteur à partir des données de la Banque Mondiale

La population est passée de **71,9** millions d'habitants en 1995 à **95,5** millions en 2017. Le niveau de vie a été amélioré. Le PIB par habitant, qui était de 581USD en 1995, a été multiplié par trois sur la période pour finalement atteindre 1834<sup>40</sup> USD par habitant en 2017, permettant au pays de passer de la catégorie des pays moins avancés (PMA) à celle des pays à revenu intermédiaire.

D'autre part, selon les données de la Banque Mondiale, en 1995, il n'y avait que **16 millions** d'habitants, soit **22%** de la population qui vivaient en zone **urbaine**. En 2018, ce chiffre est passé à **33,6 millions** d'habitants, soit **35%** de la population totale dont **46%** d'entre eux qui habitent dans des agglomérations urbaines de plus d'un million d'habitants. (Annexe 5.6)

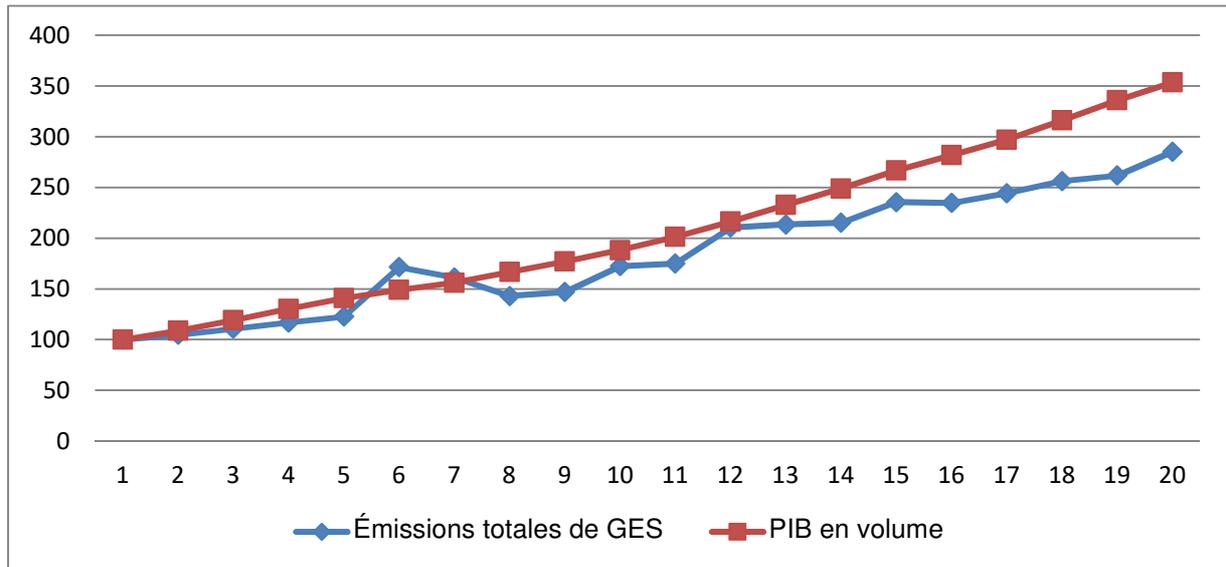
#### ...aux émissions de GES :

L'accroissement du PIB apporte des effets positifs comme créer des emplois, améliorer le niveau de vie des habitants,... ; mais cette croissance rapide de l'économie du Vietnam entraîne aussi les problèmes liés à la pollution. : par rapport au niveau de 1995, le total des émissions de GES du Vietnam en 2012 a triplé.

<sup>40</sup> Source : Banque Mondiale

Figure 5.2: Evolution des émissions de GES et du PIB entre 1995 et 2012

En indice base 100 en 1995



Source : Graphique réalisé par l'auteur à partir des données de la Banque Mondiale

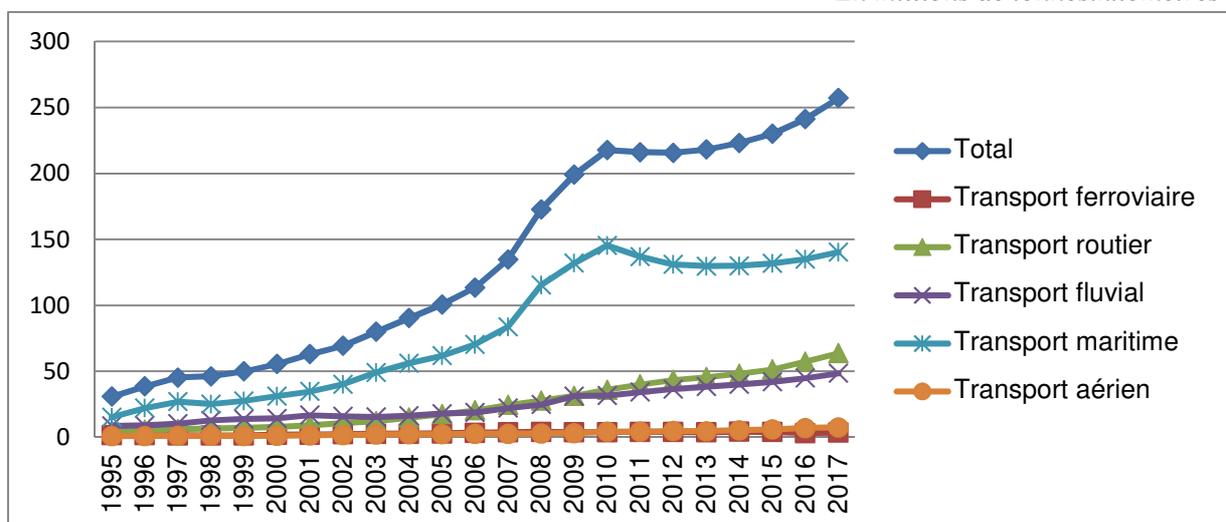
Si la tendance se poursuit, selon les estimations du Ministère de l'Environnement du Vietnam (MORE 2014), le total des émissions de GES du Vietnam sera 787 Mt CO<sub>2</sub>e en 2030.

#### 5.4.2. Transport de fret au Vietnam

Parallèlement à la croissance économique, le transport de fret du Vietnam a enregistré une forte croissance. Durant la période 1995-2017, le tonnage kilométrique total a été multiplié par 8, soit une progression de 10% en moyenne annuelle. D'après l'estimation de Almec, à l'horizon 2030, le tonnage kilométrique aura triplé par rapport à l'année 2014

Figure 5.3: Evolution du transport de fret entre 1995 et 2017

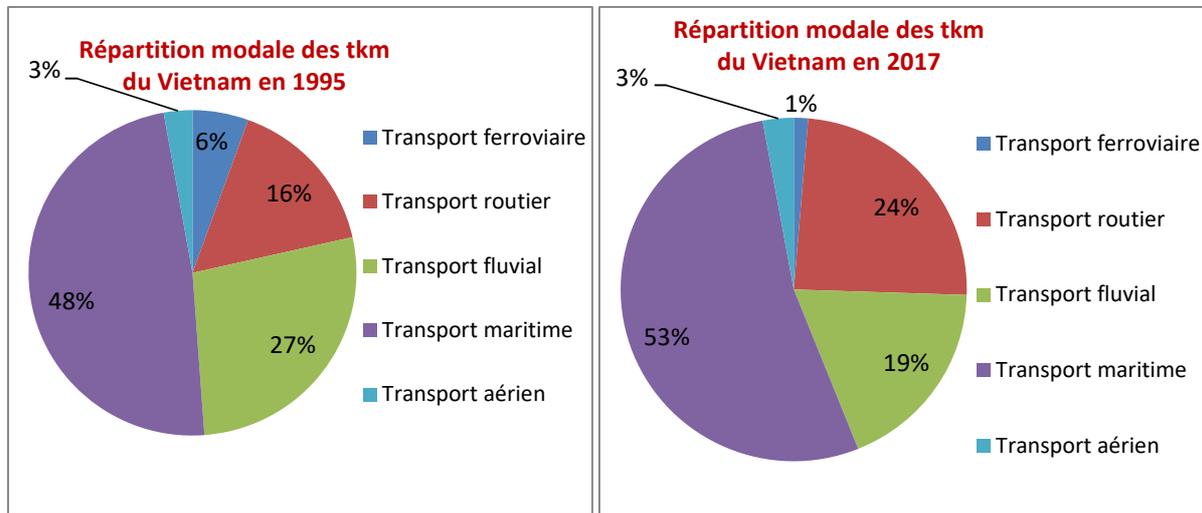
En millions de tonnes.kilomètres



Source : Graphique réalisé par l'auteur à partir des données du Général Statistique Office du Vietnam

En 2017, le transport routier assure 78% du total des tonnes transportées, pourtant, en tonnes.kilomètres, le transport maritime est dominant avec 53% du total du fret.

Figure 5.4 : Répartition modale du transport de fret du Vietnam

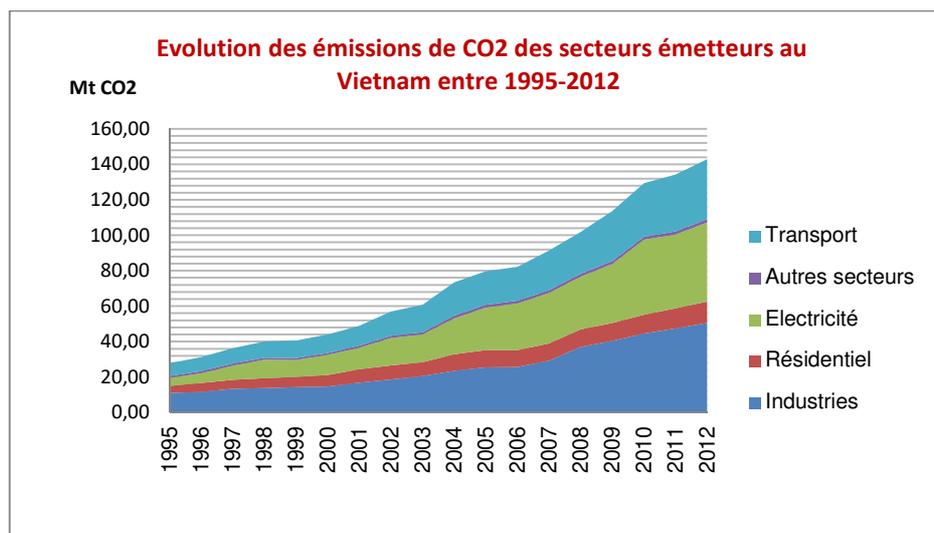


Source : Graphique réalisé par l'auteur à partir des données du Général Statistique Office du Vietnam

La part du transport routier de fret est passée de 16% en 1995 à 24% en 2017, alors que le transport fluvial et le transport ferroviaire perdent de plus en plus de parts de marché. Cette tendance entraîne une augmentation importante des émissions de GES.

### Emission de GES du transport

Figure 5.5: Evolution des émissions de CO<sub>2</sub> au Vietnam 1995-2012



Source : Graphique réalisé par l'auteur à partir des données IAE

Les émissions de CO<sub>2</sub> du transport ont été multipliées presque par cinq entre 1995 et 2012 : en 1995, ce secteur n'émettait que **7,2** Mt CO<sub>2</sub> mais en 2012, ses émissions ont atteint 33,8 Mt CO<sub>2</sub> correspondant à une part de 24% des émissions totales du Vietnam.

Si nous prenons en compte seulement les émissions de GES quantifiées selon la méthode définie par le protocole de Kyoto, en 2013 le Vietnam a émis 259 Mt CO<sub>2</sub>e, dont 151,4 Mt CO<sub>2</sub>e, soit 58% de ces émissions qui viennent du secteur de l'énergie. Les émissions du transport, qui font partie de ce secteur, étaient en 2013 d'environ 29,7<sup>41</sup> Mt CO<sub>2</sub>e (20% des émissions de GES du secteur de l'énergie et 11% du total des émissions de GES). Si la tendance se poursuit, selon les estimations du Ministère de l'Environnement du Vietnam (MORE 2014), le total des émissions de GES du Vietnam sera de 787 Mt CO<sub>2</sub>e en 2030.

#### **5.4.3. Les mesures de réduction des émissions de GES appliquées au Vietnam**

##### **Les mesures mises en place**

L'objectif du Gouvernement Vietnamien est de réduire de 8% les émissions de GES par rapport au scénario fil de l'eau à l'horizon 2030. Avec l'aide des organismes internationaux, cette réduction pourrait atteindre 25%. Pour cela, plusieurs mesures de réduction des émissions ont été mises en place (tableau 5.18)

Plusieurs études ont estimé la quantité d'émissions de CO<sub>2</sub> évité par ces différentes mesures. Par exemple, d'après l'Institut de Stratégie, de Politique des ressources naturelles et de l'Environnement (ISPONRE 2012)<sup>42</sup>, le transport de fret du Vietnam pourrait réduire ses émissions de 29 Mt CO<sub>2</sub> en 2030 suite aux mesures suivantes.

**Tableau 5.18 : Les mesures de réduction des émissions de GES du transport de fret au Vietnam**

Mesures politiques de réduction des émissions de GES du transport de fret	Quantité de réduction des émissions (Mt CO <sub>2</sub> par an)
Améliorer l'efficacité énergétique	23,9
Bio carburant	1,1
Report modal	4,0
Total	29

*Source : Institut de Stratégie, de Politique des ressources naturelles et de l'Environnement*

Une autre étude de (Grutter Consulting 2016) a montré que l'éco-conduite est aussi une mesure de réduction des émissions de GES. Selon leur résultat, cette mesure a un bénéfice économique de 400 USD par tonne de CO<sub>2</sub> évitée pour le cas du Vietnam. L'efficacité de cette mesure dépend du nombre des poids lourds qui vont participer au programme d'éco-conduite. Les auteurs ont construit deux scénarios : le scénario faible et le scénario fort qui

<sup>41</sup> Source : MONRE2017

<sup>42</sup> ISPONRE : Institut de Stratégie, de Politique des ressources naturelles et l'Environnement

correspondent à respectivement 25% et 50% du total des conducteurs de poids lourds qui suivent le programme d'éco-conduite. La diminution des émissions de CO<sub>2</sub> attendue est estimée à 0,6 MtCO<sub>2</sub> pour le scénario faible et 1,2 Mt CO<sub>2</sub> pour le scénario fort.

Pour réduire la congestion, la pollution et les émissions de GES, des grandes villes comme Ha Noi, Ho Chi Minh, Hai Phong ...ont interdit la circulation des poids lourds au centre ville de 6h à 21h mais il n'y a pas eu, à notre connaissance d'évaluation de cette mesure

- **Taxe environnementale**

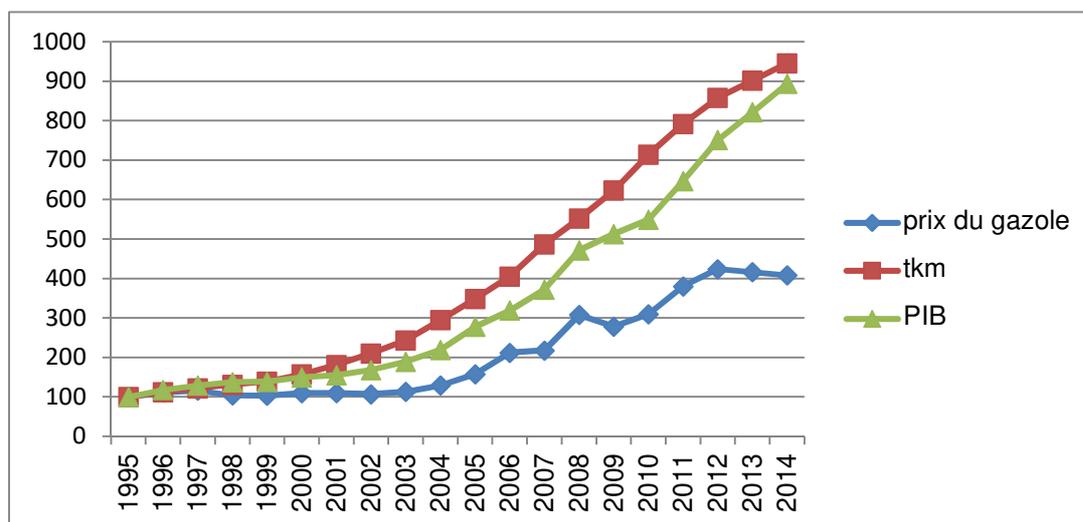
Depuis mai 2015, le Gouvernement du Vietnam a mis en place une taxe appelée « taxe environnementale » appliquée aux produits pétroliers. Le montant actuel de cette taxe est de 3 000 VND ou 11 centimes d'€ par litre. Dans la suite de cette partie, nous analysons l'impact de cette taxe sur les émissions de GES du transport de fret. Pour cela, nous calculons d'abord l'élasticité de la demande du transport de fret au prix du gazole. Sous l'hypothèse que ce montant pourrait augmenter dans le futur, nous estimons la quantité de réduction des émissions de GES dans le cas du Vietnam.

### Elasticité de la demande du transport de fret au prix du gazole – le cas du Vietnam

Pour calculer l'élasticité au prix du gazole du transport de fret, nous analysons d'abord l'évolution du prix du gazole, du PIB et du total des tonnes.kilomètres pendant la période 1995-2014. Nous présentons cette évolution dans le graphique suivant :

Figure 5.6 : Evolution du prix du gazole, du transport de fret et du PIB entre 1995 et 2014

En indice base 100 en 1995



Source : Graphique réalisé par l'auteur à partir des données du Petrolimex, Banque Mondiale et Général Statistique Office du Vietnam

Le graphique montre que la demande du transport de fret progresse régulièrement au même rythme que le PIB. Ces deux indicateurs ont enregistré une forte croissance pendant 20 ans.

Cependant, le prix du gazole a connu une croissance irrégulière avec une forte augmentation en 2008 suite à la hausse du cours du Brent.

Nous cherchons ensuite à calibrer la demande du transport de fret en tonnes.kilomètres (variable à expliquer) à partir des variables PIB et du prix du gazole (variables explicatives). Notons que dans notre modèle, nous ne prenons pas en compte l'offre des modes concurrents. Le résultat du modèle est résumé dans le tableau suivant :

**Tableau 5.19: Résultat du calibrage du modèle de la demande de transport de fret**

R <sup>2</sup> = 0,998 ; R <sup>2</sup> ajusté =0,998		Observations utilisées : 20		
Variable	Valeur estimée	Ecart-type	T	Pr >  t
Constante	-5.30989	0.78106	-6.80	<.0001
Prix du gazole	-0.74577	0.23805	-3.13	0.0061
PIB	4.18450	0.18704	22.37	<.0001

*Source : Données du Petrolimex, Banque Mondiale et Général Statistique Office du Vietnam, calcul de l'auteur*

Ce modèle est un modèle log-log, la variable dépendante et les variables indépendantes sont exprimées en logarithme. On trouve que ces coefficients sont fortement significatifs et leurs signes sont conformes à ce que l'on attendait.

Le résultat montre que la demande du transport de fret dépend du PIB et du prix du gazole. Une augmentation de 1% du prix du gazole entraîne une diminution de 0,7% du total des tonnes.kilomètres du transport de fret. Cela confirme que la demande de transport de fret au Vietnam est très sensible au prix du gazole.

**Tableau 5.20 : Comparaison de l'élasticité de la demande de transport au prix du gazole entre France et Vietnam**

	<b>France</b>	<b>Vietnam</b>
Elasticité de la demande du transport routier de fret au prix du gazole	- 0,31	- 0,74
Elasticité de la demande du transport routier de fret au PIB	1,27	4,18
Intensité du transport routier de fret dans l'économie	102 tkm par 1000 USD de PIB	257 tkm par 1000 USD de PIB

*Source : Calcul de l'auteur*

Nous prenons cette élasticité de la demande du transport au prix du gazole pour quantifier les émissions de GES réduite grâce à la hausse de la taxe environnementale en supposant que l'intensité énergétique du transport ne changerait pas dans le temps.

Tableau 5.21 : Réduction des émissions de GES au Vietnam

<b>Elasticité de la demande</b>	<b>-0,74</b>	<b>-0,74</b>	<b>-0,74</b>
Réduction des émissions du transport de fret	-8%	-15%	-23%
Taxe additionnelle	10%	21%	31%
Prix du gazole hors TVA et hors taxe d'environnement (€/litre)	1,07	1,07	1,07
Montant de la taxe (€/litre)	0,11	0,22	0,33
Prix du gazole (€/litre)	1,18	1,29	1,40

Source : Calcul de l'auteur

Nous faisons trois hypothèses sur le niveau de la taxe environnementale au Vietnam à l'horizon 2030 : la taxe est maintenue au niveau actuel, la taxe sera doublée et la taxe sera triplée. Pour le prix du gazole hors taxe, nous prenons la même hypothèse sur le prix du gazole international, 1,03 euros par litre en 2030. Donc, nous estimons la variation des émissions de GES du fret du Vietnam. Si le Gouvernement Vietnamien maintient le niveau de la taxe environnementale au niveau actuel, en 2030, le Vietnam pourrait réduire de 8% ses émissions de GES du transport de marchandises. Plus le niveau de la taxe sera important, plus nous pourrions réduire les émissions de GES. Donc, si le niveau de la taxe s'élevait à 33 centimes ou 8900 VND par litre, le transport de fret pourrait réduire de 23% ses émissions de GES par rapport au scénario fil de l'eau.

#### 5.5.4. Discussion

Sachant que les mesures comme l'électrification du fret et les PLL sont efficaces en France, nous analysons dans cette partie la faisabilité de ces mesures pour le cas du Vietnam. Faute de données, nous ne pouvons pas estimer les quantités réduites ainsi que le coût pour la collectivité de ces mesures, donc, nous discutons de ces mesures sur leur avantage et inconvénients si elles étaient mises en place au Vietnam

- **Véhicule électrique urbain**

Rappelons qu'en France un des avantages de mettre en place les véhicules électriques en zone urbaine est la réduction des émissions de GES car le facteur d'émission de l'électricité produite en France est faible.

La différence entre les cas du Vietnam et de la France est le processus de production d'électricité. La France consomme de l'électricité nucléaire, donc le facteur d'émission correspondant est de **0,048** grammes CO<sub>2e</sub> par kWh. Cependant, au Vietnam, l'électricité est produite avec du combustible fossile et le facteur d'émission est **0,432** grammes CO<sub>2e</sub> par kWh c'est-à-dire près de neuf fois plus par rapport à la France (ADEME 2010)<sup>43</sup>. C'est pourquoi, si on prend en compte les émissions de production d'énergie de la phase amont, le véhicule électrique n'est pas une mesure efficace dans le cas du Vietnam actuellement.

<sup>43</sup> Source ADEME [http://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD\\_DOC\\_FR/index.htm?moyenne\\_par\\_pays.htm](http://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?moyenne_par_pays.htm)

Supposons que dans le futur, l'électricité au Vietnam sera décarbonnée, dans ce cas le véhicule électrique sera une mesure intéressante pour diminuer les émissions de GES en générale et la pollution locale dans les grandes villes.

- **PLL**

Améliorer le parc de véhicule par l'augmentation de la taille comme le Poids longs et lourds est une bonne mesure pour réduire le coût unitaire du transport par tonne.kilomètre. En espérant que l'Etat va investir pour améliorer les infrastructures pour que le PLL puisse transporter les marchandises qui sortent et entrent dans la ville. Comme nous l'avons expliqué ci-dessus, la demande de transport de fret au Vietnam est très sensible au prix du transport donc l'augmentation de la charge utile moyenne des véhicules et en particulier la mise en place des PLL dans le futur sera aussi une piste intéressante.

- **PLG**

Remplacer les PL Diesel par le PLG est aussi une mesure faisable. En réalité, le bus GNV a déjà été mis en place dans les grandes villes comme HaNoi et Ho Chi Minh ville, afin de diminuer les émissions de GES du transport de voyageur.

La question se pose est ce que le Vietnam va adopter les mesures de réduction des émissions de GES qui ne coûtent pas cher comme l'éco-conduite, l'amélioration de l'efficacité énergétique des pneumatiques... ou faut-il se diriger vers les mesures qui sont actuellement à l'étude dans les pays développés comme la France ? Avec une croissance forte des émissions de GES dans le transport au Vietnam, selon nous, à long terme, ce serait plus efficace si le Vietnam se dirigeait vers les mesures comme les véhicules électriques, PLL et PLG. Sachant que ces mesures demandent un grand investissement de la part des Finances publiques, mais elles nous permettent de réduire une quantité plus importante des émissions de GES.

## Conclusion du chapitre 5

L'objectif de ce chapitre consistait à comparer le coût économique pour une tonne de GES évitée selon différentes mesures politiques.

Les chapitres précédents détaillent les analyses sur les trois mesures politiques : taxe carbone, l'électrification fret urbain et la réduction de la fréquence d'envoi. Concernant la **taxe carbone**. Trois scénarios (scénario PLF2018, scénario taxe carbone et scénario taxe quadruplée) ont été construits qui correspondent à différents montants de la taxe carbone à l'horizon 2030. Le résultat confirme que **la taxe carbone** permet de réduire les émissions de GES mais **le coût d'abattement du CO<sub>2</sub>e est très variable selon le montant de la taxe**. Nous aurions un bénéfice économique pour la collectivité dans le scénario PLF2018 et dans le scénario taxe optimal. Ce bénéfice s'explique par un coût externe très élevé du fret routier et le niveau de la taxe est insuffisant pour compenser tous les dommages engendrés par la route. Un niveau de la taxe très élevé dans le scénario taxe quadruplée permet de baisser de 19% les émissions de GES du fret pendant la période 2030-2050 mais cette hausse de la taxe entraînerait une perte de surplus pour les chargeurs et transporteurs qui traduit un renoncement à transporter une partie des envois en raison du prix élevé du transport. Notre test de sensibilité confirme aussi que le coût de réduction des émissions de GES via une taxe est sensible à l'élasticité de la demande du transport de fret à son prix, au prix du gazole ainsi qu'à la valeur retenue pour le coût unitaire de la congestion.

On s'intéresse également à la mesure **d'électrification du fret urbain**. Ce scénario suppose qu'à l'horizon 2030, les pouvoirs publics vont interdire totalement la circulation des véhicules diesels dans les villes. Nos résultats confirment que **l'électrification du fret urbain** est une des **mesures envisageables de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>** du transport de fret **mais** avec un **coût économique très différent selon les camions électriques disponibles** : un coût économique très élevé 811 €/tCO<sub>2</sub>e si les seuls véhicules électriques disponibles (avec une autonomie de 100 km) sont, comme aujourd'hui, les camionnettes électriques de 2 tonnes de charge utile, et un gain économique important (plus de 409€/tCO<sub>2</sub>e) s'il existe en 2030 des camions électriques avec 6 tonnes de charge utile ( et toujours une autonomie de 100 km).

Si les poids lourds diesels doivent être remplacés par des camionnettes électriques de 2 tonnes de charge utile, ceci entraîne non seulement une augmentation importante du coût du transport par tonne.kilomètre mais aussi amplifie la congestion routière en ville. Cependant, sous l'hypothèse optimiste d'une amélioration importante des camions électriques, avec des camions électriques de six tonnes de charge utile, nous aurons des bénéfices par rapport au scénario au fil de l'eau. Grâce au taux de chargement élevé des camions électriques, les transporteurs pourraient réduire leur coût de transport. Nos tests de sensibilité montrent que ces résultats sont très sensibles aux hypothèses sur l'utilisation des véhicules électriques, principalement le kilométrage annuel et le taux de remplissage moyen, qui ont des impacts directs sur le coût du transport. D'autres facteurs comme l'augmentation de la taxe, le prix de l'électricité et le niveau de congestion de la zone urbaine ont aussi un impact sur le coût d'abattement d'une tonne de CO<sub>2</sub> évitée via l'électrification du fret urbain.

Nos travaux confirment que le chargeur a la possibilité de réduire ses émissions de GES en **diminuant la fréquence d'envoi**. La fréquence d'envoi est décidée par le chargeur et son client en prenant en compte les contraintes de chacun et les coûts logistiques. Selon le résultat d'un modèle calibré avec les données de la base ECHO, cette fréquence d'envoi est une fonction croissante de la quantité annuelle expédiée par un chargeur vers un même destinataire, de la densité de valeur des marchandises, du nombre de références et du fait de disposer en propre d'un parc de véhicules. C'est une fonction décroissante de la distance, de la réglementation du stationnement et du délai de traitement d'une commande. Plus la distance est longue, moins la fréquence d'envoi est importante et enfin, les chargeurs situés dans une zone urbaine où le stationnement est réglementé ont une fréquence d'envoi moins importante. A partir de ce modèle explicatif de la fréquence, nous avons fait l'hypothèse que la réglementation du stationnement sera mise en place dans toutes les zones urbaines. Le résultat montre que cette réglementation pourrait contribuer à la réduction des émissions de GES du transport. Dans la zone urbaine de stationnement libre, après mise en œuvre de la réglementation, la réduction des émissions de GES pourrait atteindre **13%**. En terme de réduction des émissions de GES, cette réglementation permet d'économiser seulement 0,25 millions de tonne de CO<sub>2</sub>e mais il faut noter aussi que cette mesure a un coût très raisonnable pour l'entreprise (8,4 €/tCO<sub>2</sub>e). Plus généralement, quelque soit sa motivation (éviter ce problème de stationnement, éviter des taxes ou simplement améliorer son image), le chargeur peut réduire ses émissions à un coût modéré en réduisant la fréquence de ses envois.

Le chapitre 5 reprend les analyses de trois autres mesures politiques de réduction des émissions du fret routier publié récemment, en harmonisant les hypothèses avec celles des chapitres précédents : poids longs et lourds, poids lourds hybrides et poids lourds au gaz naturel.

Dans le scénario **poids longs et lourds**, le Poids Total Roulant Autorisé des poids lourds passe de 40 à 60 tonnes, ce qui permet de réduire significativement le coût du transport. C'est la raison pour laquelle ce scénario est très favorable aux utilisateurs de transport. Prenant en compte les gains d'externalités, la perte fiscale pour les finances publiques, le coût d'investissement pour renforcer les ponts et les routes ainsi que les nouveaux coûts d'entretiens des infrastructures, ce scénario a encore un bénéfice pour la collectivité. Le test de sensibilité indique que le bénéfice économique de cette mesure est très sensible au coût de la congestion. En termes de réduction des émissions de GES, dans ce scénario, seulement les envois lourds sont concernés, soit 16% du total des tonnes.kilomètres, donc la quantité de GES évitée n'est que de 8,3 Mt CO<sub>2</sub>.

Cependant, concernant la réduction des émissions de GES, la mise en place des **poids lourds hybrides** sur les autoroutes électrifiées par caténares montre son efficacité. Ce scénario permet d'éviter 132 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>e sur la période 2030-2050. Nous mettons en évidence un gain d'externalités et un gain pour les transporteurs, en contrepartie d'une perte de recette fiscale pour les finances publiques et de l'investissement initial pour que l'autoroute soit équipée de caténaire. Sur l'ensemble, cette mesure politique a un coût économique de 107 €/tCO<sub>2</sub>e évitée.

La sixième mesure politique étudiée est le remplacement des Poids lourds Diesels par des **Poids lourds au Gaz Naturels Véhicules**. Dans ce scénario, les transporteurs et chargeurs bénéficient d'une réduction du coût du transport tandis que les pouvoirs publics doivent supporter une perte de recettes fiscales importante. Tenant en compte les gains d'externalités, cette mesure enregistre un coût économique 167 € par tonne de CO<sub>2</sub>e évitée.

Selon nos résultats, en termes de quantité d'émissions de GES économisée ainsi que de coût supporté par la collectivité, les pouvoirs publics pourraient donner la priorité aux mesures comme l'augmentation de la taxe carbone, le méga-camion et l'autoroute électrique. En espérant une amélioration de la technologie dans le futur, le remplacement des poids lourds par des camions électriques dans les villes sera aussi une mesure intéressante. Pourtant, aucune mesure n'est susceptible d'offrir seule un potentiel suffisant. Pour atteindre l'objectif du facteur 4, chaque mesure doit donc être envisagée de manière complémentaire. Notons que nos tests montrent que ces résultats sont très sensibles aux hypothèses émises.

## **Conclusion et perspectives**

L'objectif de la thèse est en effet de voir quelles sont les mesures politiques qui permettrait de réduire les émissions de GES du transport routier de fret au moindre coût pour la collectivité. Pour cela, nous estimons, sur la période 2030-2050, les quantités évitées ainsi que le coût économique dans 6 scénarios correspondant à différentes politiques de réductions des émissions. Dans notre évaluation économique, nous prenons en compte les coûts pour les utilisateurs de transport, pour les pouvoirs publics ainsi que les coûts des externalités. Selon les scénarios, le coût économique pour une tonne de GES évitée est très variable. Sachant que nos résultats sont très sensibles aux hypothèses, en particulier aux valeurs unitaires retenues pour les externalités (valorisation des co-bénéfices), pour les hypothèses centrales, plusieurs scénarios présentent un coût négatif, c'est-à-dire un bénéfice pour la collectivité en plus de la réduction des émissions. Cela s'explique par un coût externe élevé du transport routier de marchandise.

Pour atteindre l'objectif de la Stratégie Nationale Bas Carbone, chaque mesure doit donc être envisagée de manière complémentaire. Par exemple, si nous mettons en place les poids lourds hybrides et l'interdiction de la circulation des véhicules diesels en zone urbaine, selon notre estimation, nous pourrions éviter environ 272 millions de tonnes de GES sur la période 2030-2050 ou plus de 13 millions de tonnes de GES en moyenne par an.

En raison des limites des données et des outils de modélisation, ainsi que du temps imparti à la thèse, nous ne prenons pas en compte le report modal. Donc, une perspective intéressante serait de comparer les résultats de notre analyse au coût économique d'une tonne GES évitée par des mesures politiques de réduction des émissions de GES visant le report modal.

## Bibliographie

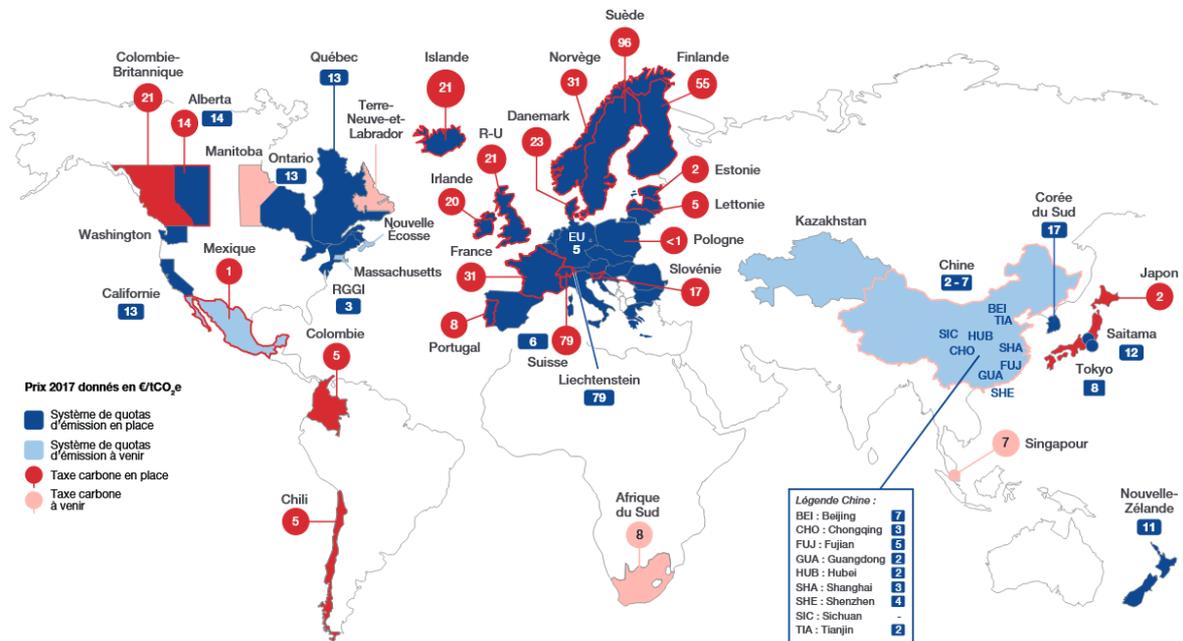
- Abate, Megersa, et Gerard de Jong. 2014. « The optimal shipment size and truck size choice – The allocation of trucks across hauls ». *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 59 (janvier): 262-77
- Afriat, Marion, Sylvain CAIL, Paula Coussy, et Philomène Portenart. 2015. « Exploring the EU ETS beyond 2020 ».
- Björn Nykvist, et Mans Nilsson. 2015. « Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles | Nature Climate Change ». 2015.
- Camilleri, Pierre, et Laetitia Dablanc. 2017. « An assessment of present and future competitiveness of electric commercial vans », 2017, *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, Scienpress LTD édition.
- CGDD. 2011. « Les véhicules électriques en perspective: Analyse coûts-avantages et demande potentielle ».
- Combes, François. 2009. « The choice of shipment size in freight transport ».
- Coulombel, Nicolas, Laetitia Dablanc, Mathieu Gardrat, et Martin Koning. 2018. « The environmental social cost of urban road freight: Evidence from the Paris region ». *Transportation Research Part D: Transport and Environment*
- Darbéra, Richard. 2010. « Fallait-il appliquer la taxe carbone aux carburants routiers ? » *Flux*
- De Perthuis, Christian, et Jeremy Elbeze. 2011. « Vingt ans de taxation du carbone en Europe : les leçons de l'expérience ». *Economics Papers from University Paris Dauphine*
- Dromigny, Thierry. 2009. « L'état de l'art de la logistique globale des entreprises en France ». ASLOG.
- Duron, Philippe. 2018. « Rapport du Conseil d'Orientation des Infrastructures ». 2018.
- Elbeze, Jeremy. 2014. « La réforme de la fiscalité de l'énergie : une extension de la tarification du carbone en France ».
- Fragnot, Ludovic. 2017. « Concept d'autoroute électrique. Évaluation socioéconomique », CGDD
- Gacogne, Valérie. 2008. « Analyse des dynamiques d'évolution du poids des envois sur la base des résultats de l'enquête ECHO et dans une perspective logistique par une modélisation en Dynamique des Systèmes ».
- GUILBAULT, M. 2008. *Enquête ECHO « Envois-Chargeurs-Opérateurs de transport »*. Résultats de référence. Synthèse INRETS. INRETS.

- Grütter Consulting. 2016. «Core environment program and biodiversity conservation corridors initiative in the greater Mekong subregion, Phase 2 – Green freight project implementation – Lao and Vietnam ADB 56 p.
- Koning, Martin, Cécilia Cruz, et Christophe Rizet. 2018. « Comment réduire les émissions de CO2 du transport de fret en France ? Évaluation socioéconomique de trois politiques publiques ». *Cahiers Scientifiques du Transport*.
- Léonardi, Jacques, et Michael Baumgartner. 2004. « CO2 Efficiency in Road Freight Transportation: Status Quo, Measures and Potential ». *Transportation Research Part D: Transport and Environment*
- Martins, Lionel, Pétronille Harnay, Gabriel Mialocq, Michel SAVY, Jean Dominique BLARDONE, Philippe Chauvineau, Philippe Duong, et Julien Harache. 2012. « Transports de marchandises : vers la durabilité ? » Actes de la journée d'échanges du Réseau des Economistes Transport et Aménagement.
- McKinnon, A. C., et M. I. Piecyk. 2009. « Measurement of CO2 emissions from road freight transport: A review of UK experience ». *Energy Policy* 37
- McKinnon, Alan. 2008. « The potential of economic incentives to reduce CO2 emissions from Goods Transport ».
- MEDDE. 2013. « Les comptes des transports en 2011 ».
- Métivier, Clément, Sébastien Postic, Emilie Alberola, et Madhulika Vinnakota. 2017. « Panorama mondial des prix du carbone en 2017 ».
- Niels, Warburg, Forell Alexander, Guillon Laura, Teulon Hélène, et Canaguier Benjamin. 2013. « Élaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émission... » Etude, Rapport. ADEME. novembre 2013
- Nierat, P. 2011. « Report modal: un problème de réseaux ou une question de services ? » *Recherche Transports Sécurité* 27
- Ovieve, Florent. 2014. « Les véhicules utilitaires légers : une bonne complémentarité avec les poids lourds ».
- Picard, Pierre. 2007. *Eléments de micro-économie*.
- Pochez, Rémi. 2016. « Projections de la demande de transport sur le long terme. » Temis - Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer. 2016.
- Quinet, Alain. 2008. « Valeur tutélaire du carbone ».
- Quinet, Emile. 2013. « L'évaluation socioéconomique des investissements publics (Tome1) ». 2013.
- Ricardo. 2014. « Update of the Handbook on External Costs of Transport ».

- Rizet, Christophe, Cécilia Cruz, Matthieu De Lapparent, et Martine Vromant. 2014. « Quantification des émissions de CO2 du transport de fret à partir de la base ECHO ».
- Rizet, Christophe, Cécilia Cruz, et Hoai Thu Tu Thi. 2015. « Une taxe carbone sur le transport de fret, quel impact sur les entreprises ? » présenté au Séminaire « Recherche et Empreinte GES ».
- Rocard, Michel. 2009. « Rapport de la conférence des experts et de la table ronde sur la contribution Climat et Énergie ».
- Salanié, Bernard. 1998. *MICROECONOMIE*.
- Savy, Michel, et Caroline Daude. 2008. « "Transport routier de marchandises et gaz à effet de serre », in Pour une régulation durable du transport routier de marchandises, vol. 2, rapports des groupes de travail de la mission présidée par Claude Abraham ». Centre d'analyse stratégique, Paris, La Documentation française.
- Savy, Michel, Caroline Daude, Johanne BUBA, et Dominique Auverlot. 2010. « Le fret mondial et le changement climatique - Perspectives et marges de progrès ». Centre d'analyse stratégique, Paris, La Documentation française.
- Soppé, Martin, et Michèle Guilbault. 2009. « Partage modal et intermodalité. Évolutions structurelles de l'économie ». *Revue d'Économie Régionale & Urbaine*
- Stelling, Petra. 2014. « Policy instruments for reducing CO2-emissions from the Swedish freight transport sector ». *Research in Transportation Business & Management, Sustainable Freight Transport*,
- Stern, Nicholas. 2006. « Stern Review: The Economics of Climate Change ».
- Taszka, Stéphane, et Silvano Domergue. 2017. « Analyse coûts bénéfiques des véhicules électriques: Les voitures ». Théma.

## Annexe

### Annexe 1.1 : Prix explicites carbone en 2017 dans le monde



Source: (Métivier et al. 2017)

### Annexe 2.1: Coût marginal des nuisances sonores selon le type d'infrastructure en 2010

€/1000 véhicule. kilomètre

	PL				
	Urbain très dense	Urbain dense	Urbain	Semi urbain	Rural
<b>Autoroute concédées</b>	3,4	2	1,3	0,5	0,1
<b>Réseau national non concédé</b>	7,1	3,8	2,4	1,4	0,8
<b>Routes départementales</b>	7,1	3,8	2,4	1,4	0,8
<b>Routes communales</b>	25,8	22,8	18,9	10,1	6,9

Source: Quinet 2013

VUL

	Urbain très dense	Urbain dense	Urbain	Semi urbain	Rural
Autoroute concédées	0,84	0,5	0,34	0,12	0,03
Réseau national non concédé	1,01	0,55	0,38	0,2	0,12
Routes départementales	1,01	0,55	0,38	0,2	0,12
Routes communales	2,58	2,28	1,89	1,01	0,63

Source: Quinet 2013

Annexe 2.2. : Répartition du trafic par type de réseau

En milliard véhicules. kilomètres

	PL						
	Urbain très dense	Urbain dense	Urbain	Urbain diffus	Interurbain	Total	%
Autoroute concédées	0	0,1	0,5	5,8	2,1	8,5	32%
Réseau national non concédé	0,4	0,8	1,4	4,7	1,4	8,7	33%
Routes départementales	0,1	0,3	0,8	5,1	2,2	8,5	32%
Routes communales	0,2	0,1	0,1	0,3	0,1	0,8	3%

	VUL						
	Urbain très dense	Urbain dense	Urbain	Urbain diffus	Interurbain	Total	%
Autoroute concédées	0	0,1	0,6	6	1,8	8,5	10%
Réseau national non concédé	2,2	2,8	3,8	8,6	1,6	19	22%
Routes départementales	1,7	2,9	5,4	22,9	7,1	40	46%
Routes communales	2,5	2,3	2	7,5	4,5	18,8	22%

Source: CGEDD 2017

Annexe 2.3: Coût marginal des nuisances sonores selon la zone géographique en 2010

€/1000 véhicule. kilomètre

PL					
Urbain très dense	Urbain dense	Urbain	Semi urbain	Rural	Total
12,4	5,1	2,8	1,2	0,7	<b>1,76</b>
VUL					
Urbain très dense	Urbain dense	Urbain	Semi urbain	Rural	Total
1,6	1,0	0,6	0,3	0,3	<b>0,52</b>

Source: Calcul de l'auteur à partir de Quinet 2013

Annexe 2.4: Coût marginal de la pollution locale en 2010

En c€/véh.km

	Urbain très dense	Urbain dense	Urbain	Urbain diffus	Interurbain
<b>Poids lourd</b>	186,6	37	17,7	9,4	6,4
<b>VUL</b>	33,7	9,1	3,5	2,5	1,6

Source: Quinet 2013

Annexe 2.5: Coût marginal l'insécurité en 2009

En c€/véh.km

	PL			
	Urbain dense	Urbain diffus	Rase campagne	Total
<b>Autoroute concédées</b>	5,9	0,6	0,6	1,1
<b>Réseau national non concédé</b>	14,4	2,8	1,5	3,7
<b>Routes départementales</b>	24,6	5,1	5,1	9,6
<b>Routes communales</b>	27,2	8,1	8,1	12,6
<b>Total</b>	17,3	2,6	2,4	<b>4,7</b>

	VUL			
	Urbain dense	Urbain diffus	Rase campagne	Total
<b>Autoroute concédées</b>	1,2	0,4	0,4	0,4
<b>Réseau national non concédé</b>	2,0	1,0	1,2	1,3
<b>Routes départementales</b>	3,3	1,6	1,6	2,0
<b>Routes communales</b>	1,2	1,5	1,5	1,4
<b>Total</b>	2,1	1,3	1,3	<b>1,5</b>

Source: Les Comptes des Transports en 2011 (MEDDE 2013)

#### Annexe 2.6: Coût marginal de l'usage de l'infrastructure

En c€/véh.km

	2030	2040	2050
<b>Poids lourd</b>	6,9	7,4	8,0
<b>VUL</b>	1,3	1,4	1,5

Source: Calcul de l'auteur à partir des comptes des transports en 2011 (MEDDE 2013)

#### Annexe 2.7 : Coût marginal de la congestion à l'horizon 2050 dans l'hypothèse H<sub>0</sub> et H<sub>1</sub>

En c€/véh.km

Hypothèse H <sub>0</sub>	2030	2040	2050
<b>PL</b>	2,1	2,3	2,5
<b>VUL diesel</b>	0,74	0,81	0,9
Hypothèse H <sub>1</sub>	2030	2040	2050
<b>PL</b>	41,4	45,3	49,6
<b>VUL diesel</b>	14,7	16,1	17,7

Source : Calcul de l'auteur

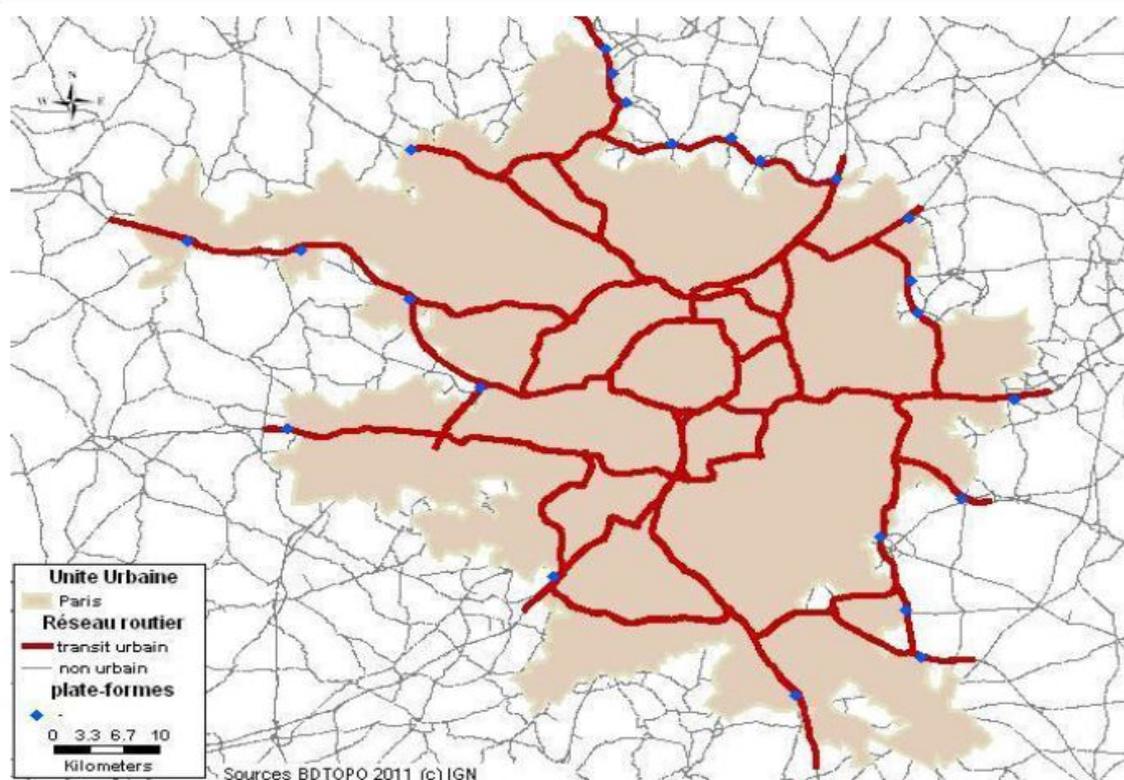
Annexe 2.8 : Taxe carbone dans l'hypothèse H<sub>0</sub> et dans le scénario de référence

En €/litre

Taxe carbone	2030	2040	2050
Hypothèse H <sub>0</sub>	0,27	0,39	0,54
Scénario de référence	0,25	0,39	0,60

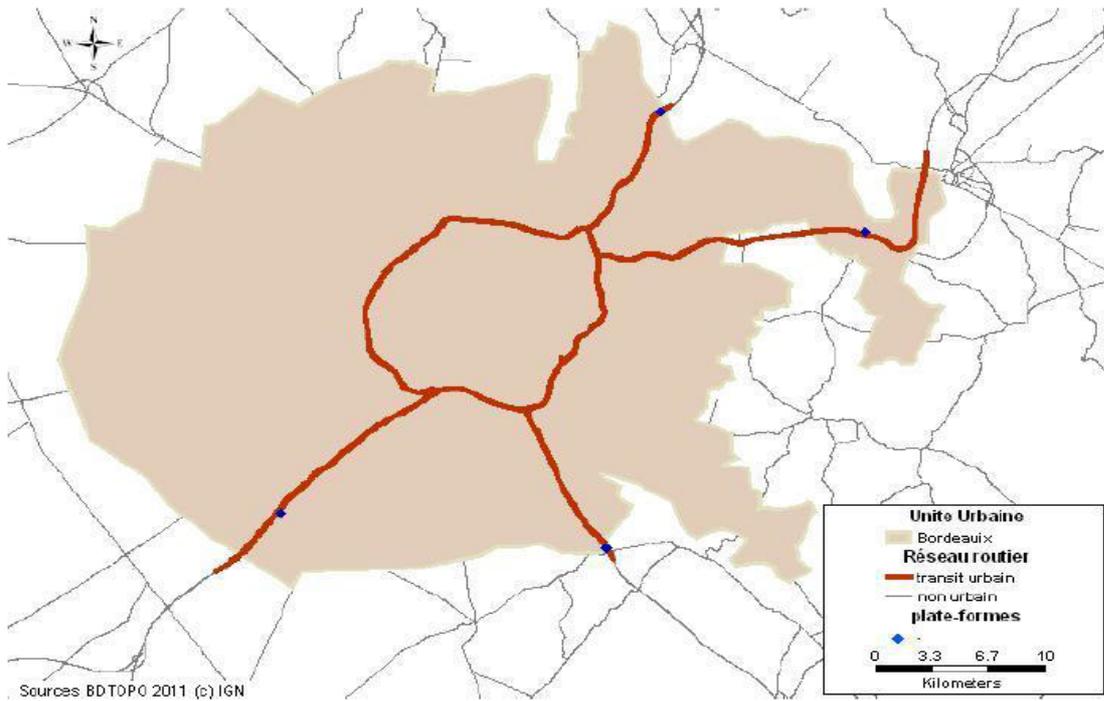
Source : Calcul de l'auteur

Annexe 3.1: Localisation des plateformes à Paris



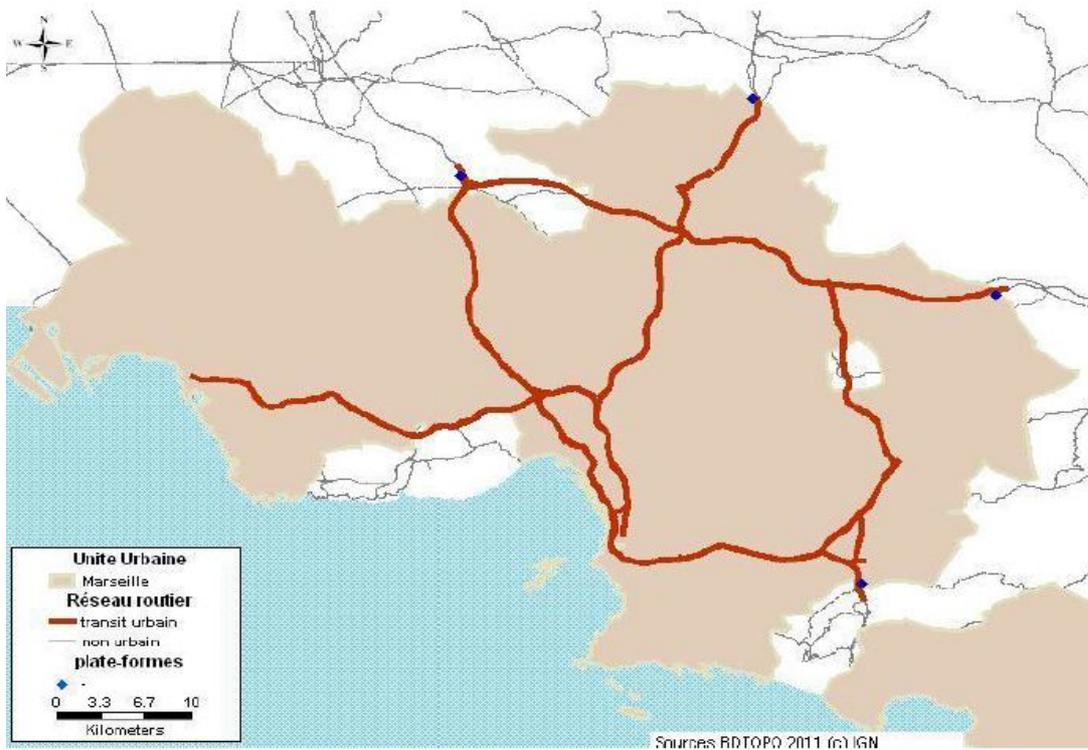
Source: Rapport ECHO (Rizet et al. 2014)

Annexe 3.2 : Localisation des plateformes à Bordeaux



Source: Rapport ECHO (Rizet et al. 2014)

Annexe 3.3 : Localisation des plates-formes à Marseille



Source: Rapport ECHO (Rizet et al., 2014)

**Annexe 3.4: Hypothèse sur le chargement moyen par PL**

	2030	2040	2050
Taux de chargement moyen du PL	<b>10,9</b>	<b>11,48</b>	<b>12,10</b>

Source: Calcul de l'auteur à partir de (Pochez 2016)

**Annexe 3.5: Facteurs d'émission des différentes sources d'énergie**

Nature de la source d'énergie	Unité de mesure de la quantité de source d'énergie	Facteur d'émission (kg de CO2 e par unité de mesure de la quantité de source d'énergie)					
		Arrêté du 10 avril 2012			Arrêté du 26 avril 2017		
		Phase amont	Phase de fonctionnement	Total	Phase amont	Phase de fonctionnement	Total
<b>Gazole</b>	Litre	0,58	2,49	3,07	0,66	2,51	3,17
<b>Electricité*</b>	kWh	0,053	0,00	0,053	0,048	0,00	0,048

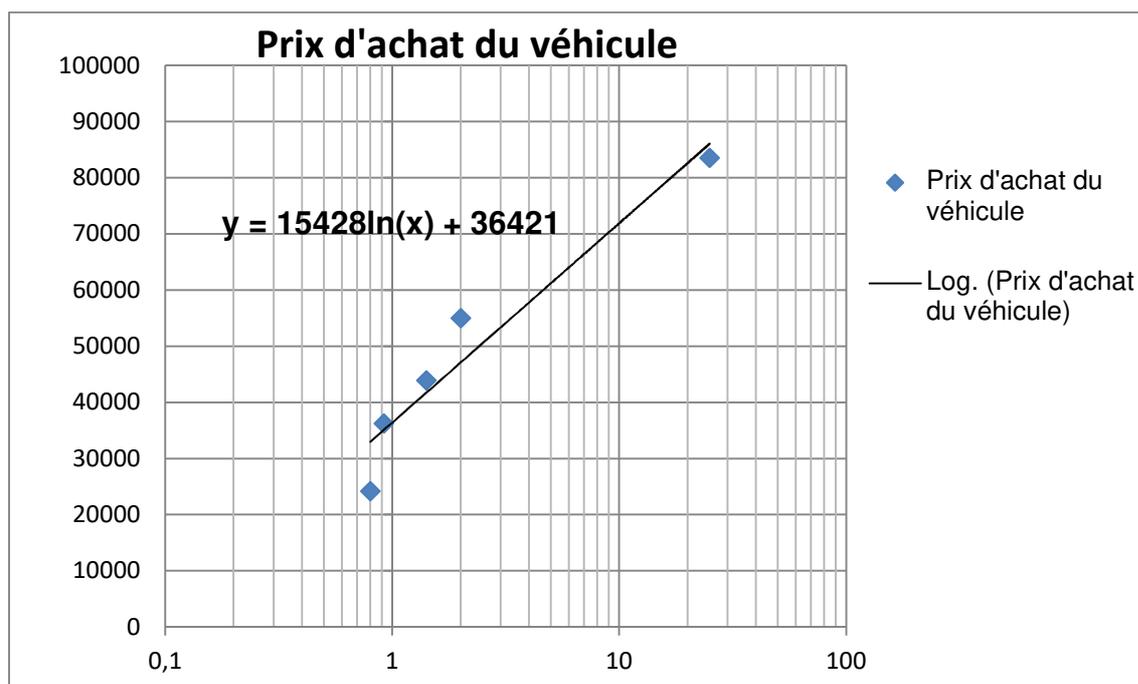
\* Electricité consommée en France métropolitaine, hors Corse

Source: Arrêté du 10 avril 2012, Arrêté du 26 avril 2017

**Annexe 3.6: Prix des véhicules en 2017**

	Charge utile (en tonnes)	Prix HT en 2017 (en €)
Renault KANGOO Express	0,8	24.213
Renault MASTER fourgon traction L1H1 euro 6	0,919	36.286
Renault MASTER traction L3H2 euro 6	1,410	43.967
Renault MASTER propulsion L3H2 euro 6	2,005	55.025
Poids lourd	25	88 400
Master ZE L1H1	1,128	48 200
Master ZE L1H2	1,100	49 100
Master ZE L2H2	1,056	50 000

Source: Renault.fr, CNR, automobile-propre.com **Annexe 3.7: Relation entre le prix des véhicules et leur charge utile**



Source: Graphique réalisé par l'auteur

**Annexe 3.8: Parc des camionnettes et camions selon la classe de charge utile**

Classes de charge utile	2017
Moins de 1 tonne	4 626 217
1,0 à 1,7 tonnes	1 567 199
1,8 à 2,9 tonnes	23 190
3,0 à 4,5 tonnes	28 017
4,6 à 6,5 tonnes	54 953
6,6 à 8,9 tonnes	65 605
9,0 à 12,9 tonnes	85 894
13,0 à 16,9 tonnes	63 238
17,0 tonnes et plus	18 479
Non déterminée	6 320
<b>Total</b>	<b>6 539 112</b>

Source: Service de la donnée et des études statistiques (SDES)

Annexe 3.9 : Répartition du trafic urbain par type de réseau

	PL	VUL diesel
Autoroutes concédées	18%	5%
Réseau national non concédé	50%	32%
Routes départementales	29%	46%
Routes communales	4%	17%
Total	100%	100%

Source : Calcul de l'auteur à partir CGEDD (2017)

Annexe 3.10: Modification du trafic pour le fret urbain à l'horizon 2050 selon la nouvelle hypothèse

En milliards de véhicules x kilomètres

Scénario 'au fil de l'eau'		
	2030	2050
Véhicule.km du PL	16,42	21,26
Véhicule.km des VUL	5,23	6,77
Total	21,65	28,03
Scénario VE1		
	2030	2050
Véhicule.km du PL	11,84	15,33
Véhicule.km du VUL	4,25	5,50
Véhicule.km du VE	9,03	11,70
Total	25,12	32,53
Scénario VE2		
	2030	2050
Véhicule.km du PL	11,63	15,06
Véhicule.km du VUL	4,25	5,50
Véhicule.km du VE	3,55	4,59
Total	19,43	25,15

Source : Calcul de l'auteur

**Annexe 4.1: La taille des envois très fréquents**

Poids des envois	Fréquence	Pourcentage
Moins d'une tonne		
Total		

Source : Données de l'enquête ECHO 2004, calcul de l'auteur

**Annexe 4.2 : Modélisation de l'intensité de carbone des envois**

R2: 0,4908 R2 ajusté: 0,4904		$\sigma^2=1,60190$		
Paramètre	Valeur estimée	Ecart-type	T	P >  t
Intercept	0,02319	0,06187	0,37	0,7079
DISTANCE_VO	-0,28221	0,00947	-29,80	<,0001
TONNAGE	-0,29699	0,00520	-57,14	<,0001
FREQ	0,26366	0,01055	24,99	<,0001
Maritime	-0,61642	0,07232	-8,52	<,0001
Aérien	1,24220	0,06483	19,16	<,0001
Rail	-1,53034	0,08404	-18,21	<,0001

Source: (Rizet et al. 2014)

Où :

**CO2/tkm** est l'intensité carbone de l'envoi,

**DISTANCE\_VO** est la distance à vol d'oiseau,

**TONNAGE** est le tonnage annuel au même destinataire,

**FREQ** est la fréquence d'envoi,

**MARITIME**, **AERIEN**, et **RAIL** sont les le mode de transport maritime, aérien et ferroviaire sous formes d'indicatrices binaires.

**Annexe 4.3 : Données manquantes dans l'enquête ECHO**

Variables	Densité valeur de marchandise	Fréquence d'envoi	Intensité carbone		
Nombre des données manquantes		1703	720		
%					

Source : Calcul de l'auteur à partir de ECHO

**Annexe 4.4 : Résultat de l'estimation du modèle de la fréquence d'envoi pour compte d'autrui**

R <sup>2</sup> =0,5869 R <sup>2</sup> ajusté =0,5863		Nombre d'observations			
Variable	Valeur estimée	Ecart-type	T	Pr >  t	
Constante	1.40612	0.13192	10.66	<.0001	
Tonnage annuel expédié	0.40904	0.00611	66.94	<.0001	
Distance totale de transport	-0.28095	0.01311	- 21.44	<.0001	
Valeur unitaire envoi euro HT/tonne	0.25444	0.01109	22.94	<.0001	
Type de contrat avec les transporteurs, longue durée	0.34907	0.03499	9.98	<.0001	
Nombre de références	0.12364	0.00765	16.16	<.0001	
Zone urbaine de stationnement réglementé	-0.54317	0.05311	- 10.23	<.0001	

Source : Données de l'enquête ECHO 2004, calcul de l'auteur

**Annexe 4.5 : Résultat de l'estimation du modèle de la fréquence d'envoi pour compte propre**

R <sup>2</sup> = 0,6361 R <sup>2</sup> ajusté = 0,6343		Nombre d'observations		
Variable	Valeur estimée	Ecart-type	T	Pr >  t
Constante	-2.18631	0.23418	-9.34	<.0001
Tonnage annuel expédié	0.40017	0.02043	19.59	<.0001
Distance totale de transport	-0.16513	0.02165	-7.63	<.0001
Valeur unitaire envoi euro HT/tonne	0.71411	0.02130	33.53	<.0001
Le nombre total des véhicules routiers	0.25110	0.05288	4.75	<.0001

Source : Données de l'enquête ECHO 2004, calcul de l'auteur

**Annexe 4.6 : Répartition des envois expédiés dans la zone urbaine**

	Nombre d'observations	Pourcentage
Zone urbaine de stationnement réglementé	457	8,6%
Zone urbaine de stationnement libre	604	11,4%
Zone urbaine	1061	19,9%
<b>Ensemble</b>	<b>5317</b>	<b>100%</b>

*Source : Données de l'enquête ECHO 2004, calcul de l'auteur*

**Annexe 4.7: La comparaison entre les chargeurs dispose un parc propre et les autres**

	Avec parc propre	Sans parc propre
Fréquence d'envoi entre chargeur et destinataire	340	182

*Source : Données de l'enquête ECHO 2004, calcul de l'auteur*

**Annexe 4.8: Effet du tonnage sur la fréquence d'envoi**

Variation du tonnage annuel expédié ( $\Delta$ TONNAGE)	-10%	-30%
$\text{TONNAGE}_{\text{après}} / \text{TONNAGE}_{\text{avant}}$	0,9	0,7
$\log (\text{TONNAGE}_{\text{après}} / \text{TONNAGE}_{\text{avant}})$	-0,1054	-0,357
$a_3$	0,46462	0,46462
$\log (\text{FREQ}_{\text{après}} / \text{FREQ}_{\text{avant}})$	-0,0489	-0,1657
$\text{FREQ}_{\text{après}} / \text{FREQ}_{\text{avant}}$	0,952	0,847
<b>Variation de la fréquence d'envoi (<math>\Delta</math> FREQ)</b>	<b>-4,77%</b>	<b>-15,3%</b>

*Source : Données de l'enquête ECHO 2004, calcul de l'auteur*

**Annexe 4.9 : Résultat de l'estimation du modèle de la fréquence d'envoi qui a le nombre de véhicule routier renseigné**

R <sup>2</sup> =0,6509 R <sup>2</sup> ajusté =0,6504		Nombre d'observations : 4588		
Variable	Valeur estimée	Ecart-type	T	Pr >  t
Constante	-0.17770	0.11955	-1.49	0.137
Tonnage annuel expédié	0.45145	0.00613	73.59	<.0001
Distance vol d'oiseau	-0.15878	0.01018	-15.59	<.0001
Valeur unitaire envoi euro HT/tonne	0.41519	0.01027	40.41	<.0001
Nombre total des véhicules routiers	0.20754	0.01438	14.43	<.0001
Nombre de références	0.09745	0.00790	12.33	<.0001
Stationnement réglementé	-0.50795	0.06686	-7.60	<.0001
Délai moyen de traitement d'une commande	-0.14400	0.00967	-14.88	<.0001

Source : Données de l'enquête ECHO 2004, calcul de l'auteur

**Annexe 4.10 Modélisation de la fréquence d'envoi au niveau d'établissement**

**Sélection des variables**

Pour modéliser la fréquence d'envoi au niveau établissement, nous testons d'abord les variables caractéristiques du chargeur qui sont déjà explicatives dans notre modèle "complet" de la fréquence au niveau envoi. A titre d'exemple, nous testons des spécifications incluant les variables : nombre de références, délai moyen de traitement d'une commande, effectif de salariés du chargeur et du destinataire, tonnage annuel, activités du chargeur, etc.. Ensuite, nous constatons que :

**Nombre d'envois total d'un établissement = nombre d'envois moyen vers ses clients \* nombre de clients**

Donc, nous trouvons que la variable « nombre de clients » sera très probablement explicative. Après plusieurs tests, le modèle retenu pour lequel les résultats sont les plus fiables est le suivant:

$$\log(\text{FREQ\_ETAB}) = b_1 * \log(\text{TONNAGE}) + b_2 * \log(\text{CONTRAT}) + b_3 * \log(\text{REF}) + b_4 * (\text{CLIENT}) + b_5 * (\text{SALARIE}) + b_6 * \log(\text{DELAJ}) + b_7 * (\text{GECHO}) + \text{Constante} + \text{Erreur}$$

Où :FREQ\_ETAB est la fréquence d'envoi en nombre d'envois par an,

TONNAGE est le tonnage annuel expédié au même destinataire en tonnes,

CONTRAT est une indicatrice qualifiant le type de contrat avec le transporteur (contrat de longue durée ou non),

REF est le nombre de références expédiées par ce chargeur,

CLIENT est le nombre de clients,

SALARIE est l'effectif salarié de l'établissement,

DELAJ est le délai moyen de traitement d'une commande standard, sans compter le transport,

GECHO est groupe d'activité du chargeur. Le résultat de l'estimation de ce modèle est le suivant :

**Résultat de l'estimation du modèle de la fréquence d'envoi au niveau établissement**

<b>R2 = 0.4440 R2 ajusté = 0,4424</b>		<b>Nb d'observations utilisées:2627</b>		
Variable	Valeur estimée	Ecart-type	T	Pr >  t
Constante	4.26182	0.15864	26.86	<.0001
Tonnage annuel expédié	0.19040	0.01274	14.94	<.0001
Type de contrat avec les transporteurs, longue durée	0.28389	0.05405	5.25	<.0001
Nombre de références	0.13752	0.01152	11.94	<.0001
Nombre de clients	0.16015	0.01216	13.17	<.0001
Nombre de salariés du chargeur	0.37014	0.02656	13.94	<.0001
Délai moyen de traitement d'une commande	-0.17461	0.01608	-10.86	<.0001
VPC et CG biens de consommation	0.88380	0.14555	6.07	<.0001
Industries biens intermédiaires	-0.39871	0.07176	-5.56	<.0001
CG biens intermédiaires et Récupération	-0.28279	0.09472	-2.99	0.0029
Industries biens de production	-0.19894	0.08499	-2.34	0.0193
CG biens de production	0.52243	0.15542	3.36	0.0008
CG biens agro-alimentaires	0.46080	0.11437	4.03	<.0001

*Source : Données de l'enquête ECHO 2004, calcul de l'auteur*

Ce résultat confirme que le **tonnage** annuel expédié, le **nombre de références**, le **nombre de salariés** du chargeur, le **nombre de clients** ainsi que le type de **contrat (longue durée)** avec le transporteur favorisent la fréquence d'envoi de l'établissement. Seul le **délai moyen de traitement d'une commande** a un impact négatif sur la fréquence d'envoi du chargeur vers tous les destinataires. Pourtant, ce sont les variables que les décideurs publics ne pourraient pas modifier afin de proposer des solutions visant à réduire la fréquence d'envoi du chargeur.

Ce modèle nous apporte un éclairage sur les groupes d'activités du chargeur qui sont favorables à la fréquence d'envoi. Ce sont le commerce de gros biens de consommation, de production et agro-alimentaires. Au contraire, les industries de biens intermédiaire et de production et le commerce de gros biens intermédiaire et récupération ont une fréquence d'envoi moins élevée que les autres groupes d'activité.

**Annexe 5.1 : Hypothèse de la répartition du trafic des Poids lourds**

	<b>Urbain diffus</b>	<b>Interurbain</b>
<b>PL Diesel</b>	20%	80%
<b>PLH</b>	20%	80%
<b>PLG</b>	20%	80%
<b>PL Diesel 40t</b>	50%	50%
<b>PLL</b>	50%	50%

Source : (Koning et al.2018)

**Annexe 5.2 : Hypothèse sur le coût externe en 2030 dans littérature**

En c€/véh.km

<b>Coûts externes</b>	<b>PLH</b>	<b>PLG</b>	<b>PLL</b>
<b>Pollution locale</b>		0,011	0,085
<b>Bruit</b>	0,001	0,00	0,001
<b>Accidents</b>	0,006	0,006	0,008
<b>Congestion</b>	0,304	0,304	0,849

Source : (Koning et al.2018)

Annexe 5.3 : Coût unitaire du transport des Poids lourds

**A l'horizon 2030:**

		PL Diesel	PLH	PLG	PL40t	PLL
kilométrage	km/an	113000	113000	113000	90000	87480
tonnage transporté	t/véh.	18	18	18	25	40
Vitesse moyenne	ans	70	70	70	60	54
Part utilisation autoroute	%	80	80	80	50	50
durée de possession	ans	10	10	10	10	10
Actualisation	%	8	8	8	8	8
Taux de dépréciation	%	4	4	4	4	4
<b>Coûts fixes</b>						
Achat	€	103000	128000	128000	103000	136990
Valeur résiduelle	€	29369	36497	36497	29369	39061
Assurances véhicule	€/an	2060	2560	2560	2060	2740
Assurances marchandises	€/an	410	410	410	497	796
Charges administratives	€/an	18387	18387	18387	19945	19945
Taxe à l'essieu	€/an	516	516	516	516	774
<b>Coûts variables</b>						
Entretien	€/ km	0,110	0,088	0,165	0,115	0,173
Salaire chauffeur	€/ km	0,321	0,321	0,321	0,403	0,403
Cout énergie TTC	€/ km	0,525	0,192	0,338	0,525	0,709
Péages	€/ km	0,190	0,190	0,190	0,190	0,247
Coût unitaire selon la distance	€/ km	1,457	1,388	1,387	1,634	2,133
Cout unitaire à la tonne. kilomètre	€ /tkm	0,081	0,077	0,077	0,065	0,053

Source: (Koning et al.2018)

**Annexe 5.4 : Taxe par kilomètre selon des véhicules**

*En c€/véh.km*

	<b>2030</b>	<b>2050</b>
<b>PL Diesel</b>	20,2	27,4
<b>PLH</b>	7,6	7,6
<b>PLG</b>	6,3	6,3
<b>PLL</b>	27,2	37,0

*Source : Calcul de l'auteur*