



CO2-ECHO

Quantification des émissions de CO2 du transport de fret à partir de la base ECHO

Christophe Rizet, Cécilia Cruz et Matthieu de Lapparent (Ifsttar)

Martine Vromant (CEREMA)

mars 2014

Réalisé avec le soutien du ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer en charge des technologies vertes et des négociations sur le climat, direction générale des infrastructures, des transports et de la mer, Convention n°10/269

Ce rapport n'engage que ses auteurs ; le ministère n'est pas responsable de l'usage qui pourrait être fait des informations contenues dans cette publication.

Sommaire

Résumé en une page	V
Note de synthèse en quatre pages	VII
Introduction générale : contexte et objectifs de la recherche	1
1 Calcul des émissions de CO2 par envoi à partir de la base ECHO	4
2 Emissions de CO2 du transport de fret par établissement chargeur	31
3 Analyse de l'intensité carbone des envois	61
4 Scénarii de réduction des émissions urbaines	79
Conclusion du rapport	107
Références bibliographiques	113
Table des figures	117
Table des tableaux	118
Table des matières	120
Annexes	125
Annexe 1 : La mise en cohérence de la base trajets	126
Annexe 2 : Emissions de CO2 par établissement	178
Annexe 3 : Intensité carbone des envois	210

Résumé

Mise au point de la base Chargeur et calcul du CO₂ : A partir des données de l'Enquête Chargeurs Opérateurs (ECHO), nous avons mis au point la base trajets, puis quantifié l'énergie dépensée et les émissions de CO₂ au "format Kyoto" pour être en mesure de comparer avec les estimations nationales des Comptes Transports de la Nation (CTN) et "du puit à la roue" pour permettre en particulier des comparaisons intermodales. La différence entre nos estimations (bottom-up) et celles des CTN (top down) s'explique en grande partie par le champ couvert par ECHO. Ces données sur le CO₂ viennent enrichir les bases Trajets et Envois de ECHO et constituent un outil puissant pour l'analyse détaillée des émissions du fret.

Intensité carbone des établissements chargeurs : Pour faire remonter cette information CO₂ au niveau de l'établissement, deux approches ont été suivies: d'une part nous établissons une typologie des établissements en 10 types et estimons un volume d'émissions par type et par établissement ; d'autre part nous modélisons le CO₂ d'une tonne expédiée en utilisant, comme variables explicatives, les caractéristiques de l'établissement chargeur. Les deux approches, typologie et modèle, donnent des résultats raisonnablement concordants. Le CO₂ émis par un chargeur de la base ECHO en 2004 est en moyenne d'un peu plus de 600 t par an ; il varie entre 78 t par an pour le type des établissements les moins émetteurs à 4700 t par an pour le type des établissements les plus émetteurs, soit un rapport de 1 à 60. Par salarié, le niveau moyen d'émission annuel est de 16,5 tonnes de CO₂ sur l'ensemble des établissements de la base et varie selon les types d'établissements entre 4,3 et 27,2 t par salarié et par an.

Intensité carbone des envois : Les envois ayant une 'bonne' efficacité carbone (moins de 100 g de CO₂/tkm) représentent un cinquième des émissions de CO₂ de la base ECHO et les envois qui ont une efficacité carbone 'faible ou très faible' (plus de 600 g de CO₂/tkm) représentent plus de la moitié de ces émissions (57%). Pour mettre en évidence l'impact des choix logistiques sur le niveau des émissions, nous cherchons à expliquer cette intensité carbone (CO₂/tkm) de l'envoi avec deux types de variables explicatives: les variables de choix logistiques (fréquence de l'envoi et choix du mode principal) et les variables caractéristiques 'intrinsèques' de la demande, c'est-à-dire celles que les choix logistiques ne peuvent guère modifier (distance et volume annuel de la demande du client). Les variations d'intensité carbone induites par un changement de choix logistiques sont très importantes.

Scénarios de réduction des émissions : Enfin nous quantifions les réductions d'émissions correspondant à différents scénarii : électrification du fret urbain, taxe carbone, GNV. Deux scénarii d'électrification du fret dans les agglomérations de plus de 100 000 habitants se différencient principalement par la capacité du camion électrique considéré ; ils aboutissent à une réduction de 4,0 millions de tCO₂ pour un camion de 2 t de CU et à 4,2 millions de tCO₂ si l'on fait l'hypothèse que les camions électriques ont une capacité de 6t de CU. C'est surtout la congestion qui bénéficie de cette hypothèse de 'gros' camions électriques. Pour le fret 'interurbains', deux scénarii sont considérés : un scénario 'taxe carbone' et un scénario 'mise au GNV du parc fret'. Enfin un scénario de réduction maximum, combinant à la fois l'électrification du fret urbain et une taxe de 1,09 euros par litre de gazole, est analysé. Un tel scénario, très contraignant pour l'économie, aboutirait à une réduction des émissions du fret routier de 38% seulement, très en deçà du facteur 4.

Note de synthèse

Quantification des émissions de CO₂ du transport de fret à partir de la base ECHO
Christophe Rizet, Cécilia Cruz, Matthieu de Lapparent (Ifsttar) et Martine Vromant (CEREMA),
Convention DGITM-Ifsttar n°10/269

Mise au point de la base Chargeur et calcul du CO₂

Dans une première phase, la base trajet de l'enquête ECHO, a été mise au propre, vérifiée, puis les consommations d'énergie et émissions de CO₂ ont été calculées pour chaque trajet d'envoi. Deux types d'émissions ont été calculées : au "format Kyoto" pour être en mesure de comparer avec les estimations nationales des Comptes Transports de la Nation et "du puit à la roue" pour permettre en particulier des comparaisons intermodales. La comparaison entre les émissions estimées à partir d'ECHO et celles estimées dans les Comptes Transports de la Nation, malgré des approches très différentes, montre que les écarts s'expliquent en grande partie par la différence de champs couverts entre les sources utilisées : nos estimations qui partent des envois pour estimer le volume d'émissions, sont cohérentes avec les valeurs estimées par les Comptes Transport de la Nation, ce qui confirme la qualité de la base trajets et de son enrichissement en énergie et CO₂. Cette base constitue à présent un outil puissant pour analyser dans le détail ces émissions et les possibilités de les réduire.

Analyse de l'intensité carbone par établissement chargeur

Nous voulions connaître le CO₂ du transport de fret par établissement chargeur, afin de le rapprocher de l'activité et de l'emploi. Une fois calculées les émissions par envoi-trajet, il a été facile de calculer les émissions de chaque envoi, en sommant sur les différents trajets. Estimer les émissions de CO₂ de l'établissement a demandé davantage de réflexion car l'enquête ECHO ne décrit, en règle très générale, que trois envois par établissement. Compte tenu de la dispersion de l'intensité carbone des envois, ceci ne permet pas d'estimer une valeur par établissement. Deux approches ont alors été développées pour estimer ce volume d'émissions par établissement chargeur : d'une part nous établissons une typologie des établissements ayant des caractéristiques proches, ce qui permet en regroupant un très grand nombre d'établissements et donc d'envois, d'estimer un volume d'émissions par type, donc par établissement. D'autre part, nous modélisons le CO₂ d'une tonne expédiée en utilisant, comme variables explicatives, les caractéristiques de l'établissement chargeur. Pour chaque établissement chargeur, nous multiplions ensuite la valeur du CO₂/tonne ainsi estimée par le tonnage émis par ce chargeur, ce qui nous donne une estimation des émissions de l'ensemble de ses envois. Les deux approches, typologie et modèle, donnent des résultats raisonnablement concordants mais avec une faible précision. Le CO₂ émis par un chargeur de la base ECHO en 2004 est en moyenne d'un peu plus de 600 t par an et les établissements du type des plus gros émetteurs, avec 4700 t par an, émettent 60 fois plus que ceux de la classe des petits émetteurs, avec 78 t par an. Par salarié, le niveau moyen d'émission est de 16,5 tonnes de CO₂ sur l'ensemble des établissements et les établissements qui émettent le moins par salarié sont à 4,3 t / salarié alors que les plus gros contributeurs selon ce critère sont à 27,2 t par salarié et par an : une 'fiscalité verte' visant à réduire

le coût de la main-d'œuvre en diminuant les charges salariales et en les compensant par les recettes d'une taxe sur le carburant, favoriserait donc les établissements de façon très différenciée. Les établissements du type 10, avec 4,3 t/salarié seraient les grands bénéficiaires d'une telle fiscalité alors que les établissements du type 9, avec 27,2 t/employé en seraient les grands perdants.

Analyse de l'intensité carbone des envois

A partir des résultats de la première phase, nous avons analysé, à un niveau très désagrégué, l'intensité carbone du transport des envois ainsi que les facteurs qui l'influencent. Nous cherchons en particulier à mettre en évidence l'impact des comportements, c'est-à-dire des choix logistiques que font les opérateurs, chargeurs et transporteurs, sur ces émissions de CO₂, pour apprécier dans quelle mesure il serait possible de réduire les émissions à côté des réductions apportées par les changements technologiques sur les véhicules ou l'énergie.

Dans la distribution des envois selon leur intensité carbone, deux éléments sont à retenir :

- Les envois ayant une 'bonne' efficacité carbone (moins de 100 g de CO₂/tkm) représentent un cinquième des émissions de CO₂ de la base ECHO ;
- Les envois qui ont une efficacité carbone 'faible ou très faible' (plus de 600 g de CO₂/tkm) représentent plus de la moitié de ces émissions (57%).

Pour estimer dans quelle mesure un changement de choix logistiques pourrait contribuer à réduire ces émissions, nous cherchons à expliquer le niveau de CO₂/tkm de l'envoi à l'aide d'un modèle comportant deux types de variables explicatives: les variables de choix logistiques et les variables caractéristiques 'intrinsèques' de la demande, c'est-à-dire celles que les choix logistiques ne peuvent guère modifier. Ainsi, le poids du chargement est décomposé en deux variables : le tonnage annuel commandé par le client est une variable intrinsèque, indépendante des choix logistiques alors que le nombre annuel d'envois ou fréquence des livraisons résulte de l'organisation logistique décidée entre le chargeur et son client. L'autre variable de choix logistiques que nous considérons ici est le choix du mode de transport principal de l'envoi et l'autre variable intrinsèque est la distance de transport à vol d'oiseau. Une fois le modèle calibré, nous évaluons l'impact de ces variables de choix logistiques sur l'intensité carbone. Ces variations de CO₂/tkm induites par un changement de choix logistiques apparaissent très importantes : toutes choses égales par ailleurs, une augmentation du nombre annuel d'envois vers un même destinataire pour une demande annuelle donnée, du 25^{ème} au 75^{ème} centile, provoque une augmentation de 91 % des émissions de CO₂. Et un changement de mode principal de l'air au rail diminue les émissions de carbone de 94 %. Ceci suggère que la réduction des émissions de CO₂ du fret est à rechercher autant dans les solutions logistiques que dans l'amélioration technologique.

Résultats des scénarii de réduction des émissions

La part de l'urbain est très importante dans l'ensemble de nos émissions : près de la moitié des émissions de la route (49%) sont produites dans les unités urbaines définies comme les communes françaises appartenant à une unité urbaine au sens de l'INSEE et plus du quart de ces émissions sont produites dans les unités urbaines de plus de 100 000 habitants. Ces résultats ont conduit à développer des scénarii centrés sur la réduction des émissions urbaines de CO₂ du fret.

Pour estimer un potentiel de réduction de ces émissions correspondant à différentes politiques, nous distinguons d'une part les mesures visant la réduction des émissions du fret en zone urbaine, où la priorité porte souvent sur la congestion et la pollution locale et où la réduction du CO₂ n'est qu'un co-bénéfice et, d'autre part, les mesures visant l'ensemble du fret urbain et interurbain (prix du carburant par véhicule) où la réduction de CO₂ peut être l'objectif principal.

Nous considérons deux scénarii d'électrification du fret urbain : le premier avec une camionnette de 2 t de charge utile, déjà disponible sur le marché et le second avec un camion d'une capacité de 6 t. A l'entrée des agglomérations, nous faisons l'hypothèse que se trouvent des plates-formes sur les principaux axes routiers : le fret à destination de l'agglomération y est déchargé et réparti sur ces camions électriques ; le fret partant de cette ville doit aussi en sortir sur un camion électrique, au moins jusqu'à une plate-forme. Comme l'ensemble du fret entrant et sortant passe par ces plates-formes, les camions électriques ont un excellent taux de remplissage (au moins 80%) et un taux de retour à vide de 50% des kilomètres en charge. Les envois de plus de la capacité des camions électriques correspondant au scénario sont scindés, sur leur partie urbaine, en plusieurs camions. Le fret en transit et, dans le premier scénario urbain les envois de plus de 20 tonnes, ont une dérogation pour circuler dans la ville en diesel.

Dans le scénario avec des camions électriques de 2 t de CU, la réduction de CO₂ est de 4 millions de tonnes mais, en ville, la circulation des camions augmente du fait que les camions électriques sont petits, augmentant la congestion. Dans le scénario des camions électriques de 6 t de CU, le gain de CO₂ est légèrement plus important (4,2 millions de t. soit 12 % des émissions du fret) et le trafic urbain de camions diminue très sensiblement dans les grandes villes, y compris par rapport à la situation initiale (-31 %). En revanche, le trafic de camions reste inchangé par rapport au scénario précédent dans les unités urbaines de moins de 100 000 habitants et donc la congestion augmente par rapport à la situation initiale. La réduction des émissions de CO₂, dans les scénarii électriques, est importante par rapport aux émissions des grandes unités urbaines concernées (-57 % et -60 %) mais limitée au regard de l'ensemble des émissions du fret (-11 et -12 %) ; elle pourrait être environ deux fois plus importante si l'électrification du fret urbain était étendue à l'ensemble des unités urbaines, c'est-à-dire aux unités urbaines de moins de 100 000 habitants mais, il est vrai, au prix d'une perturbation nettement plus importante du fret interurbain.

Deux scénarii 'interurbains' sont également considérés : un scénario 'taxe carbone' et un scénario 'mise au GNV du parc fret'. Nous estimons les gains potentiels en CO₂ de la mise au GNV du parc fret, à partir de données de l'AFGNV qui nous permettent d'estimer un gain qui varie de 2,6 à 8,4 % selon le type de véhicules. Le gain en CO₂ obtenu en changeant la totalité du parc serait de 7,5 % pour l'ensemble du fret ECHO et de seulement 6,4 % pour les trajets interurbains. L'impact d'une taxe carbone est analysé par le biais d'une élasticité de la demande de transport de fret au prix du carburant. Cette élasticité, estimée à partir des données TRM pour le trafic et du CNR pour le prix du carburant est supposée constante et d'une valeur de -0,33 : une taxe qui viendrait augmenter de 10 % le prix du carburant réduirait alors de 3 % les émissions de CO₂ du transport routier et, inversement, pour réduire de 20% les émissions il faudrait, toutes choses égales par ailleurs, augmenter le prix du gazole de 60 %.

Avec un scénario maximum combinant l'électrification du fret urbain avec des camions de 6 t de CU et une taxe 1,09 € par litre (354€/tonne de CO₂), qui conduit à doubler le prix HTVA du gazole, la

réduction globale serait de 38% des émissions du fret routier, tenant compte de la réduction liée à l'électrification du fret urbain, et de la réduction du trafic.

Conclusion de la recherche

Un tel scénario serait très contraignant pour l'économie, même en se plaçant dans l'hypothèse d'une contrainte progressive et annoncée (par exemple à l'horizon de 20 ans, pour avoir le temps d'installer les infrastructures de recharges et d'utiliser les camions existants). Pourtant il ne réduirait qu'assez peu les émissions et resterait très en deçà du facteur 4.

Une piste qui se dégage de cette recherche, pour réduire les émissions, est celle de la réduction de la fréquence des envois : un nombre non négligeable d'envois (8,3% des envois de la base ECHO) ont une fréquence très élevée : plus de 300 envois par an, soit plus d'un envoi au même destinataire par jour ouvrable. En termes d'intensité carbone, ces envois très fréquents ne sont pas homogènes. Une faible proportion (7 % d'entre eux) a une intensité carbone faible, inférieure à la moyenne des envois ECHO. Le gain potentiel de CO₂ sur ces envois est très limité ; ils ont une fréquence élevée en raison de quantités annuelles très importantes, qui permettent un très bon remplissage des véhicules. Mais la majorité (54%) des envois très fréquents ont une intensité carbone très supérieure à la moyenne et pourraient être à l'origine de substantielles réductions d'émissions. Ce sont des envois :

- qui ont une intensité carbone très élevée (7123 gCO₂/tkm), notamment de médicaments et de vente par correspondance, en très faibles quantités (quelques kilos par envoi), sur de très courtes distances et le plus souvent en compte propre dans le cadre de tournées. Le gain potentiel par tkm est probablement très important pour ce type d'envoi mais le gain potentiel total est relativement faible car ce groupe représente une faible masse de CO₂ (moins de 3 % de la masse de CO₂ estimée par ECHO) ;
- ou des envois dont l'efficacité carbone est faible (de 1000 à 2000 gCO₂/tkm) mais moins que celle du groupe précédent et dont le volume d'émissions (9,5 % du CO₂ estimé par ECHO) reste aussi limité. Ce groupe comprend des produits médicaux, machines et pièces, expédiés eux aussi en très faible quantité (5 kg par envoi), sur de courtes distances, par les industries des biens de consommation, en compte d'autrui.

En termes d'implication pour la recherche, beaucoup reste à faire pour préciser par segments de marché l'importance des gains d'émissions qui pourraient être faits ainsi que les moyens de les obtenir, notamment sur cette question de la fréquence : comment inciter les établissements qui émettent ces envois à en réduire la fréquence quand celle-ci a pour conséquence une forte intensité carbone ?

Une piste à explorer serait le redéveloppement du stockage en milieu urbain par les entreprises qui permettrait d'optimiser les chargements des plus grands véhicules notamment. Il reste à définir une politique suffisamment incitative pour que les entreprises y participent.

Introduction générale : contexte et objectifs de la recherche

La part des émissions de CO₂ du secteur des transports ne cesse de croître par rapport à celle des autres secteurs. La route représente la grande majorité de ces émissions du transport avec plus de la moitié imputable aux véhicules légers, 25% aux poids-lourds et 16% aux véhicules utilitaires légers.

L'ensemble des émissions du transport de fret (35 millions de tonnes de CO₂ au format Kyoto soit un quart du transport) sont dues elles aussi en quasi-totalité à la route. Ramené au total national, le transport de fret tous modes confondus représente environ 10% des émissions de CO₂, et ce pourcentage est croissant.

Les objectifs définis par le Grenelle de l'Environnement pour le transport de fret sont ambitieux compte tenu des inerties importantes qui caractérisent le transport ; ils s'inscrivent en rupture par rapport aux tendances passées et dans une perspective à relativement court terme. Pour réduire les émissions de CO₂, il s'agit principalement d'augmenter très substantiellement la part des modes non routiers et d'améliorer les performances environnementales du fret routier.

Les leviers identifiés par le Grenelle dans cette perspective, concernent principalement l'amélioration de l'offre des modes non routiers. Le Comité opérationnel sur le fret (COMOP 5) souligne que l'objectif de 25% de croissance des modes non routiers en 2012, est « en rupture forte » par rapport aux tendances de ces vingt dernières années où la part de la route n'a cessé de progresser et celle du ferroviaire de diminuer : en 2006, la route représente 86% du trafic, contre 74% en 1994 et 58% en 1984. Sur la même période, la part du fret ferroviaire a diminué de moitié, passant de 24% à 12%. La part du fluvial, en dépit de sa progression, est restée marginale (2,2% en 2006).

La part du trafic de transit élevée (20% du trafic routier) est en croissance de 5% par an sur ces dix dernières années, supérieure à celle du trafic national. Les grands enjeux de report modal du Grenelle se situent sur trois grands axes : projets de trains longs, services d'autoroutes ferroviaires et de la mer, où les retombées socio-économiques peuvent être les plus fortement positives pour la collectivité. Ce report modal devrait permettre la majeure partie de la réduction des émissions de CO₂ attendue à court terme, le reste étant lié aux améliorations de la performance écologique des transports routiers. Quelle que soit la réussite des actions engagées en faveur des reports modaux, le COMOP note aussi que transport routier de marchandises restera, et de loin, le mode de transport dominant. L'amélioration de sa performance écologique est donc une question cruciale mais ses préconisations en la matière (formation à l'éco-conduite et engagements volontaires des transporteurs) paraissent bien faibles au regard des enjeux, alors que les possibilités d'amélioration des performances logistiques ont été à peine évoquées.

La recherche présentée vise à quantifier les émissions de CO₂ à un niveau très détaillé, à partir des résultats de l'enquête ECHO, pour contribuer à l'analyse des enjeux et des possibilités de réduction par le biais de mesures applicables au transport de fret.

Objectifs et présentation du rapport

Cette recherche a pour objectif de quantifier les émissions de CO₂ du transport de marchandises en France à un niveau très détaillé, afin de repérer les types d'envois et les activités qui sont les plus émettrices de CO₂, en valeur absolue, par tonne produite, par emploi ou en termes d'efficacité carbone (par tkm). Cet exercice vise à connaître la contribution des différents types d'envois ou d'entreprises aux émissions de CO₂ du transport de fret et donc la sensibilité de ces activités à d'éventuelles mesures contraignantes de réduction des émissions. La recherche vise aussi à quantifier un potentiel de réduction par des mesures spécifiques et ainsi d'identifier un potentiel d'émission que la France pourrait éviter, notamment par une organisation logistique plus appropriée.

Les objectifs de la recherche sont donc les suivants :

- quantifier les émissions de CO₂ du transport de marchandises, à partir de la base ECHO, par envoi. Le périmètre de la quantification est donc déterminé par le champ de l'enquête ECHO, qui exclut notamment les matériaux de construction et l'agriculture.
- établir une typologie d'activités (produits, secteurs, principales caractéristiques, notamment logistiques de l'entreprise) ayant des caractéristiques proches, notamment en termes d'émissions et les facteurs déterminants de ces différences de niveaux d'émissions (distances de transport, choix modal, taille des envois, ...).
- et analyser un potentiel de réduction des émissions dans différents scénarii de mesures de réduction des émissions.

Méthodologie

Cette recherche s'appuie sur des données issues de l'enquête ECHO réalisée en 2004. Celle-ci s'intéresse aux envois de marchandises de l'établissement expéditeur jusqu'au destinataire. L'unité d'observation est l'envoi, c'est-à-dire une expédition générée par un établissement vers un unique destinataire à un instant donné. L'envoi est suivi depuis l'établissement expéditeur jusqu'au destinataire permettant ainsi d'identifier les différents trajets qui le composent.

Cette recherche se situe dans le prolongement de travaux antérieurs sur l'impact CO₂ des choix logistiques des entreprises, notamment des travaux s'appuyant sur l'enquête ECHO (Rizet & Keïta 2002 ; Rizet et al. 2008). Elle contribue :

- à l'enrichissement de la base trajets ECHO avec le CO₂ ;
- à préciser les principaux 'points faibles' de notre économie en matière d'émissions de CO₂ du fret et à cerner les activités sur lesquelles devraient se focaliser notre attention pour réduire ces émissions ;
- et à quantifier un potentiel de réduction.

Plan du rapport

La première partie du rapport est intitulée « Quantification des émissions de CO₂ du transport de fret par envoi » ; elle a permis de nettoyer la base trajets de ECHO, de calculer la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ par trajet et envoi puis par envoi. Afin de pouvoir vérifier la vraisemblance de nos estimations, nous comparons le volume d'émissions estimé par mode à partir de ECHO aux estimations de la Commission des Comptes Transports de la Nation (CCTN). Un double calcul des émissions a donc été mené, au format Kyoto d'une part pour pouvoir comparer nos estimations à celles de la CCTN et 'du puits à la roue' d'autre part, pour une approche plus complète de l'impact du transport.

Dans la seconde partie du rapport nous nous efforçons de faire remonter cette information sur le CO₂ au niveau de l'établissement chargeur, en particulier pour être en mesure de le rapprocher de l'emploi. Le nombre très faible d'envois enquêté par établissement (environ 3) ne permet pas d'estimer directement le volume d'émissions de cet établissement. Pour préciser le niveau d'émission d'un établissement, nous avons utilisé deux méthodes parallèles, dont nous comparons ensuite les résultats. D'une part nous avons établi une typologie d'établissements en regroupant un nombre important d'établissements ayant des 'profils' aussi proches que possible, pour obtenir un nombre d'envois suffisant qui permet d'estimer un volume d'émissions des établissements de ce type. D'autre part nous avons modélisé le niveau d'émission d'un envoi en n'utilisant que les caractéristiques de l'établissement comme variables explicatives. Ce modèle une fois calibré nous permet d'estimer le niveau moyen d'émissions par envoi d'un établissement qui, multiplié par le nombre d'envois, fournit une estimation du niveau d'émissions de l'établissement.

La troisième partie porte sur l'intensité carbone des envois. Un modèle simple a été construit, expliquant le niveau des émissions à partir de deux types de variables : des variables caractéristiques de la structure de la demande d'une part (distances, quantités) et des variables caractéristiques des choix logistiques de l'entreprise d'autre part (fréquence, choix du mode). Il apparaît que ces choix logistiques ont un très fort impact sur le niveau des émissions, en particulier la fréquence des envois.

La quatrième partie s'intéresse de façon plus précise au potentiel de réduction des émissions de CO₂. Nous établissons différents scénarii de réduction des émissions, scénarii portant sur les émissions urbaines d'une part, interurbaines d'autre part et sur les émissions totales, combinant les mesures urbaines et interurbaines.

1. Calcul des émissions de CO₂ par envoi à partir de la base ECHO

L'objectif principal de cette première partie de la recherche CO₂-ECHO est de calculer les émissions de CO₂ par envoi dans la base ECHO ; pour être aussi complète que possible, ces émissions sont calculées 'du puit à la roue'. D'autre part, afin de vérifier la vraisemblance de nos estimations nous les comparons avec celle des Comptes Transport de la Nation (CTN).

Ces deux objectifs impliquent deux méthodes différentes de calcul des émissions :

- Une méthode de calcul des émissions correspondant au 'format Kyoto' des CTN, qui d'une part, exclut les transports qui ne sont pas réalisés sur le territoire national dont les trajets maritimes et aériens internationaux et d'autre part, comptabilise les émissions 'du puits au réservoir' dans la branche 'énergie', non dans la branche utilisatrice de cette énergie ;
- une autre méthode, inspirée par le projet de décret d'application de la loi Grenelle 2 sur l'affichage carbone du transport, et donc sur les travaux de la Commission Technique Marchandises de l'Observatoire Energie Transport Environnement (CTM-OEET), qui prend en compte les émissions d'un envoi, y compris la partie située en dehors du territoire français et qui comptabilise les émissions 'du puit à la roue', afin de pouvoir notamment comparer les émissions de différents modes de transport ayant recours à des énergies d'origine différentes.

Avant d'estimer les consommations d'énergie et les émissions de CO₂ correspondantes, un important travail d'apurement de la base a été nécessaire pour la mise en cohérence de la chaîne de transport pour chaque envoi. Ce travail est détaillé dans l'Annexe 1.

Cette première partie du rapport comprend quatre sous-parties :

La distance parcourue ainsi que les taux de chargement des camions ont un impact sur la consommation d'énergie, ces deux éléments ont fait l'objet d'une attention particulière dans la phase d'apurement de la base (1.1). En effet, pour être en mesure de calculer des émissions de CO₂ 'au format Kyoto', il est nécessaire de distinguer, pour chaque trajet, la distance parcourue en France de celle parcourue à l'étranger.

La seconde sous-partie porte sur les calculs de consommation d'énergie (1.2.) et la suivante porte sur la méthodologie mise en œuvre pour le calcul des émissions de CO₂ par trajet, en tenant compte du mode et du type d'énergie, puis par envoi, par agrégation des trajets d'un même envoi (1.3). Enfin, la dernière sous-partie (1.4) s'attache à comparer les estimations obtenues avec celles des Comptes Transport de la Nation.

1.1. Mise au point de la base trajets : distance et estimation des variables manquantes pour la route

Pour la mise au point de la base trajets, au-delà de corrections sur les origines-destinations des trajets (Annexe 1), il a été nécessaire d'estimer les distances parcourues selon les différents modes mais également estimer des variables liées au chargement pour le mode routier qui constitue le premier mode de transport pour les trajets.

1.1.1. Calcul des distances par mode de transport

La distance à vol d'oiseau ou orthodromie désigne le chemin le plus court entre deux points d'une sphère : c'est l'arc de grand cercle qui passe par ces deux points. Sachant que le rayon de la terre R mesure 6 371 kilomètres, et en notant latA et longA les latitudes et longitudes du point de départ A et latB et longB les latitudes et longitudes du point d'arrivée B, la formule donnant la distance orthodromique entre les points A et B est calculée comme :

$$\text{arc}(AB) = 6371 * \text{ArcCOS}(\text{COS}(\text{RADIANS}(90-\text{latB})) * \text{COS}(\text{RADIANS}(90-\text{latA})) + \text{SIN}(\text{RADIANS}(90-\text{latB})) * \text{SIN}(\text{RADIANS}(90-\text{latA})) * \text{COS}(\text{RADIANS}(\text{longD}-\text{longA})))$$

La **distance routière** a été estimée en fonction des différents cas :

- Lorsque le trajet n'a pas été modifié depuis la table du 28 décembre 2006¹, la distance réseau calculée comme étant la plus rapide [km_le_plus_rapide]² a été retenue.
- Pour les nouveaux trajets, la distance routière retenue a été estimée comme 1,286 fois³ la distance à vol d'oiseau.
- Enfin, pour les trajets qui ont le même lieu de départ et d'arrivée, la distance réseau est ré-estimée à 5 km. Pour les trajets ayant le nom de ville à l'origine et à la destination et trouvant avant ou après un trajet aérien, la distance a été portée à 15 km afin de tenir compte des distances d'approche aux aéroports depuis le centre des villes.

Les **distances maritimes** ont été estimées en miles nautiques à l'aide du site web : http://www.maritimechain.com/port/port_distance.asp puis converties en kilomètres (1 MN = 1,852 km).

Les **distances aériennes** ont été estimées en réutilisant la relation entre distance à vol d'oiseau et distance de vol estimée à partir des données BADA (Base of Aircraft Data) d'Eurocontrol : distance aérienne = 1,12 distance à vol d'oiseau + 33,311.

¹ Cette table constitue la première table de travail après la phase d'apurement.

² Les termes entre crochets indiquent le nom des variables utilisées dans la base ECHO.

³ Ratio constaté à partir de précédentes mesures (Rizet, Mbacké, 2008).

Les **distances ferroviaires** ont été calculées à la main, à partir du site web Ecotransit des compagnies de chemin de fer européennes (<http://www.ecotransit.org/ecotransit.en.phtml#>), qui permet de calculer des distances ferroviaires totale, en France puis par pays à l'étranger⁴.

Les **distances par voie navigables** ont été calculées à la main, à partir du site web de VNF calculateur d'itinéraire fluvial (<http://www.vnf.fr/calculitinerairefluvial/app/Main.html>) qui calcule les distances entre tous les sites fluviaux en France et permet donc de calculer les distances des trajets français et la partie intérieure des trajets internationaux, sous réserve de choisir un point frontière. Les distances fluviales totales des trajets internationaux ont été calculées à partir de l'Ecocalcateur de la Voie d'Eau (EVE de VNF : <http://www.vnf.fr/eve/>) pour les trajets entre les principaux ports à fluviaux à conteneurs de France, Belgique, Pays-Bas et Allemagne. Là où il était possible de comparer les distances web avec les distances antérieures (elles aussi calculées par VNF 'à la main', avant l'existence de ces sites web, les écarts sont non négligeables (de l'ordre de 5 %) et le plus souvent EVE donne une distance plus importante que la distance antérieure. Ce sont ces valeurs EVE qui sont conservées là où elles sont disponibles.

1.1.2. Répartition des distances routières entre intérieur et international

Nous avons séparé les distances intérieures et internationales de chaque trajet, afin de calculer d'une part l'ensemble des émissions imputables au transport de nos envois et, d'autre part les émissions au format Kyoto, c'est-à-dire émises sur le territoire national. Dans chaque trajet, nous devons donc estimer la distance parcourue en France (DISTF) de la distance parcourue à l'international (DISTI). La séparation de ces deux distances, en France et à l'international, se pose en termes différents selon le mode.

Tableau 1 : Répartition des trajets entre intérieurs (France métropolitaine) et internationaux : nombre de trajets observés selon le mode

	France-France	France-étranger	Etranger-étranger (dont transit en France)	Etranger-France	Total
Maritime	79	449	216	1	745
Aérien	152	596	490	5	1243
Fluvial	18	36	5	0	59
Ferroviaire	269	99	11 (2)	1	380
Route	16267	1061	1077 (1)	15	18420
Total	16785	2241	1799	22	20847

Source : Données ECHO

Pour les modes maritimes et aériens, seuls les trajets ayant leur origine et leur destination en France sont pris en compte dans le format 'Kyoto' : il suffit donc, pour ces deux modes, de sélectionner les

⁴ Ce site permet aussi de calculer par envoi et trajet, des consommations d'énergie en Mj/100t. et des émissions en t.CO2, mais n'indique pas l'énergie de traction (diesel ou électrique).

trajets ayant leur origine et leur destination en France, auxquels on affecte la totalité de leur distance en DISTF, alors que les autres trajets ayant au moins l'origine ou la destination à l'étranger voient leur distance réseau totalement affectée en DISTI.

L'effectif des trajets ferroviaires et fluviaux est réduit par rapport aux autres modes. Le traitement effectué « à la main » à l'aide des sites web Ecotransit et VNF pour déterminer sur chaque trajet sortant de France, la part du chemin effectué à l'international a été présentée précédemment. Notons que l'itinéraire emprunté répond aux logiques de ces sites web, seul le point frontière est choisi, en suivant la règle du plus court chemin lorsque plusieurs choix sont possibles. La règle du plus court chemin ne choisit pas forcément le chemin le plus rapide ou celui qui aurait le bon gabarit.

La route représente à elle seule 88% des trajets répertoriés. La méthode appliquée revient à tendre une ligne droite entre les points de départ et d'arrivée définis par leurs coordonnées géographiques, à repérer l'intersection avec les frontières françaises à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG) -ArcInfo, à calculer la proportion de la distance à vol d'oiseau réalisée au-dessus de la France et enfin à appliquer cette répartition entre parties française et internationale à la distance réseau du trajet. (Etapes décrites dans l'annexe 1, voir p. 129)

Cette méthode est cependant inutilisable lorsque la distance 'vol d'oiseau' passe au-dessus de la mer, c'est-à-dire pour une partie des trajets partant de France et à destination de l'Italie, la Grèce, l'Espagne, le Portugal, et le Royaume-Uni. Ces trajets ont été traités manuellement avec Google Maps qui permet de repérer le point de passage de la frontière et la distance routière en France par la règle du plus court chemin.

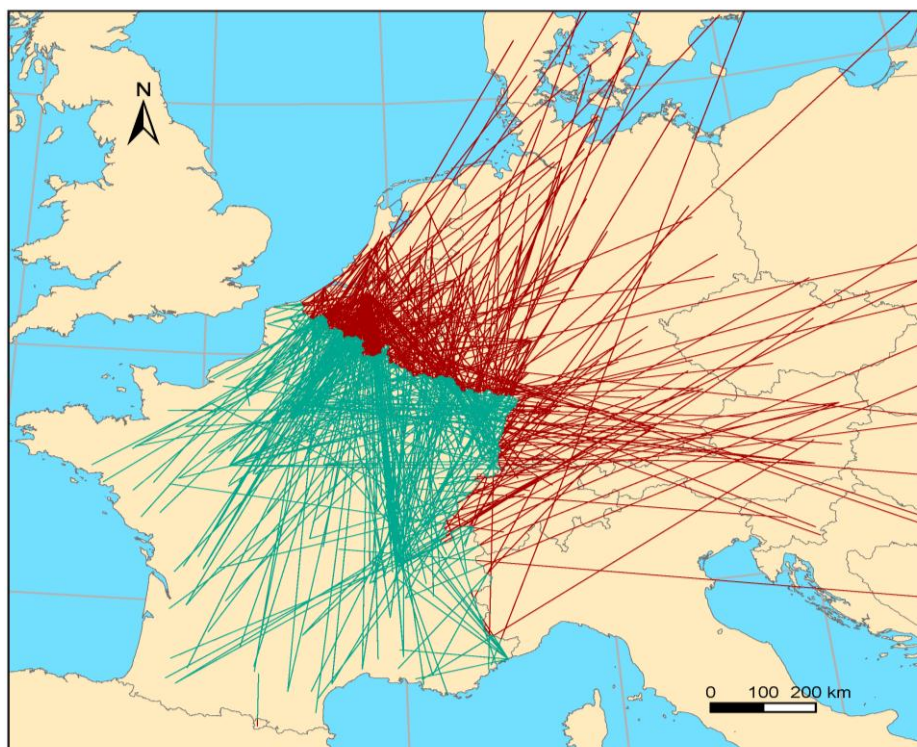


Figure 1 : Détermination de la partie Française des trajets routiers à partir du logiciel ArcInfo

Le Tableau 2 donne la décomposition du nombre de trajets suivant leur pays de départ et d'arrivée (France / étranger). Entre parenthèses sont indiqués les nombres de tournées. Les trajets ayant au moins une partie en France sont : 16267 trajets France-France, (1062 + 15) trajets ayant une extrémité en France métropolitaine et une partie à l'étranger, soit un total de 17344 trajets ayant des émissions en France (Kyoto).

Tableau 2 : Répartition des trajets routiers (dont tournées) entre France et étranger

Arrivée Départ	France	Etranger	Total
France	16267 (6131)	1062 (163)	17329 (6294)
Etranger	15 (0)	1076 (97)	1091 (97)
Total	16282 (6131)	2138 (250)	18420 (6391)

NB : Dans ce tableau, 14 trajets routiers dans les DOM-TOM sont classés en France

1.1.3. Estimation des variables manquantes pour la route

Les variables indispensables au calcul de la consommation d'énergie et des émissions de GES (gaz à effet de serre) du transport routier sont, outre le poids de l'envoi et la distance, la charge utile du véhicule qui entre dans le calcul de la consommation unitaire, en litres par cent kilomètres et le poids du chargement qui entre aussi dans ce calcul et permet surtout de répartir la consommation au prorata du poids de l'envoi. Pour les envois nouvellement classés en messagerie⁵ ([type_trajet] = « messagerie »), s'il s'agit d'un premier ou d'un dernier trajet (collecte ou distribution) le poids du chargement a été mis à 0,4 t (ou poids de l'envoi si celui-ci est supérieur à 0,4 t) et la charge utile a été mise à 0,8 (respectivement 1 t). Pour les trajets principaux (ni premier ni dernier) le poids du chargement a été mis à 16 t. et la charge utile à 20 t.

Pour les autres envois, non messagerie, l'estimation des variables manquantes a été améliorée et le nouveau programme est reproduit en annexe. On reproduit seulement ci-dessous deux graphes de contrôle des résultats sur les variables les plus importantes. La Figure 2 illustre le poids du chargement par véhicule, en ordonnée, en fonction du poids de l'envoi en abscisse, avec des échelles logarithmiques. On observe :

- Que les points se trouvent au-dessus de la bissectrice : le poids du chargement par véhicule est supérieur au poids de l'envoi sauf dans les cas où cet envoi est réparti sur plusieurs véhicules (donc plusieurs chargements, uniquement pour les envois de plus de 20 t.) ;
- Que la bissectrice est très marquée : pour un grand nombre de trajets, le poids du chargement est égal au poids de l'envoi (pas de groupage) ;

⁵ L'identification des trajets « messagerie » a fait l'objet d'un traitement spécifique récapitulé dans l'Annexe 1, p. 122).

- Que certains chargement sont plus fréquents (lignes horizontales marquées à 500 kg et 1 t. correspondent aux trajets de messagerie, tandis les chargements de 25 t correspondent au chargement complet d'une semi-remorque).

Poids du chargement selon le poids de l'envoi (hors messagerie 'type_data')

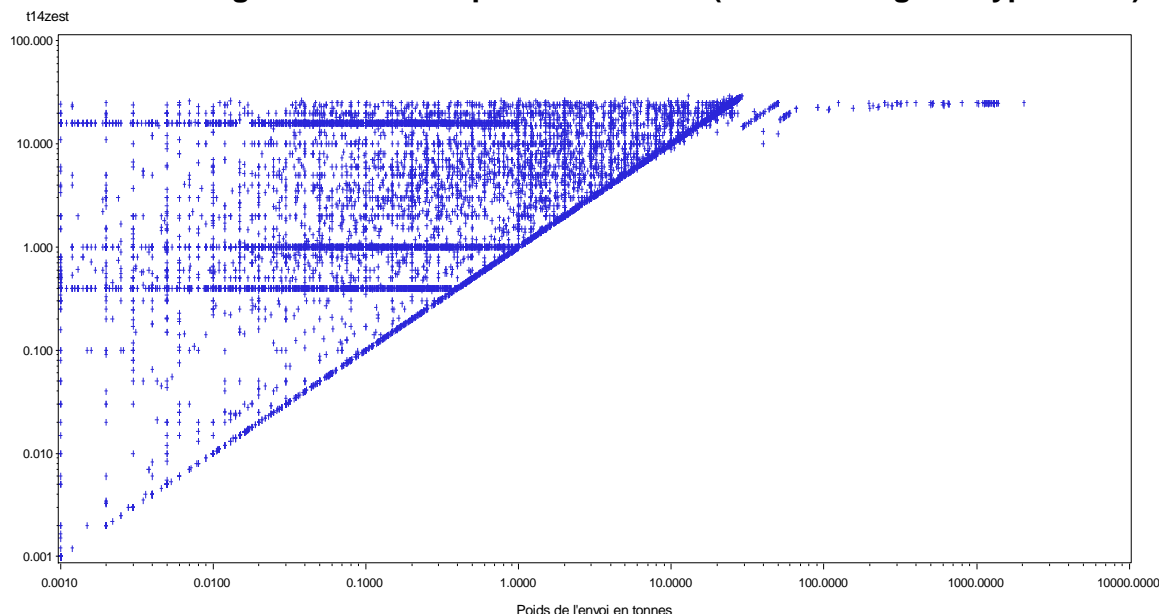


Figure 2 : Poids du chargement selon le poids de l'envoi à la fin des estimations

De même, la Figure 3 illustre la relation entre le poids de l'envoi en abscisse et la charge utile du véhicule, en ordonnée, avec des échelles logarithmiques. On vérifie que la charge utile est comprise entre 0,8 et 25 tonnes, et on observe :

- que certaines charges utiles sont plus fréquentes (lignes horizontales marquées à 0,8 et 2 t (trajets de messagerie) et 25-26 t;
- que les envois lourds correspondent à des véhicules lourds.

Charge utile en fonction du poids de l'envoi

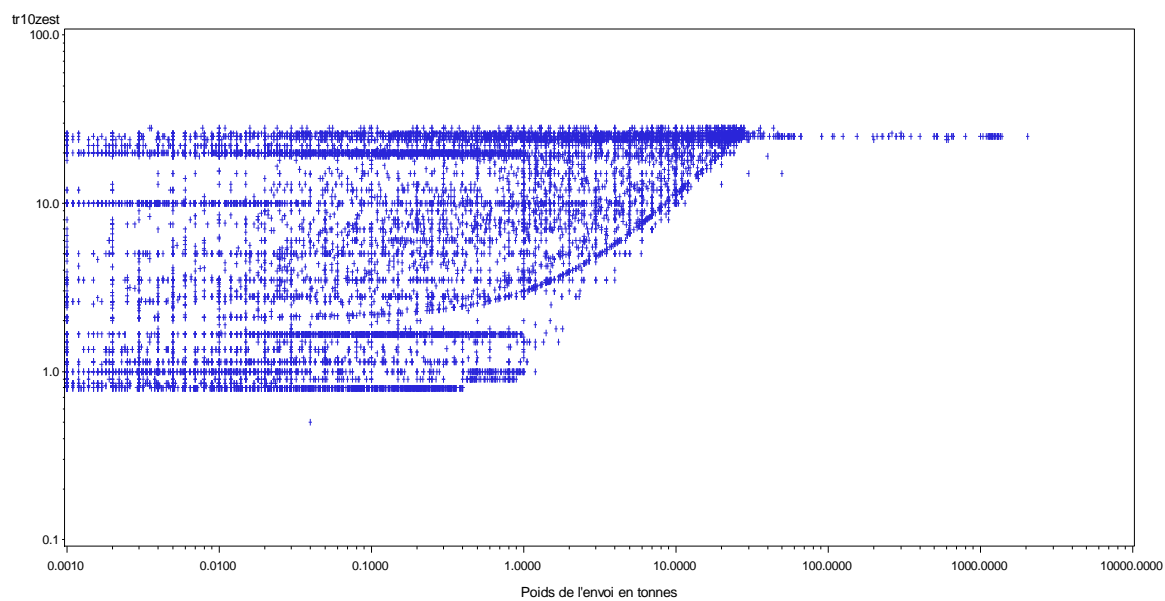


Figure 3 : Charge utile selon le poids de l'envoi à la fin des estimations

1.2. Calcul de la consommation d'énergie

Un certain nombre de modifications ont été introduites par rapport à la démarche de calcul de la consommation d'énergie décrite dans le rapport d'avril 2008 (Rizet, Mbacké, 2008) (programme in Annexe 1, §5).

Nous voulons analyser l'énergie utilisée par l'ensemble des transports qui comprend donc différentes formes d'énergie. Pour comparer l'impact énergétique et environnemental des différents carburants et de l'électricité, il faut considérer non pas seulement l'énergie dépensée dans le moteur (TW) mais aussi l'énergie primaire qui a été utilisée pour produire cette énergie 'de combustion' et l'apporter jusqu'au véhicule. Pour les carburants pétroliers, la chaîne de production comprend l'exploration, l'extraction du pétrole, le raffinage et la distribution des carburants. L'efficacité énergétique de ce processus ou ratio entre énergie primaire et énergie finale est repris de la base Ecoinvent ; il vaut 78% pour le diesel et 79% pour le kérosène et le HFO (*Heavy Fuel Oil*) des navires. Pour l'électricité utilisée par le ferroviaire, le ratio entre énergie primaire et énergie finale est variable selon les pays.

Modification de la consommation d'énergie routière

Pour la route, la fonction de consommation a été modifiée de façon à caler la totalité de notre consommation d'énergie routière sur celle des CTN, en tenant compte du fait que, compte tenu de la différence de champs couvert, notre tonnage kilométrique est inférieur à celui des CTN. La nouvelle fonction de consommation, en litres au 100 km en fonction du poids total est :

$$C = 3.5 \times (\text{Poids total} + 4)^{0.65}$$

La Figure 4 ci-dessous montre cette consommation en fonction du poids du chargement : on observe deux courbes (deux 'traînées'), bien séparées pour les chargements les plus lourds, à droite et qui se rejoignent pour les chargements les plus légers à gauche de la figure. La traînée supérieure, la plus marquée (qui compte le plus grand nombre d'observations) culmine à 44 litres/100 km environ ; ce 'triangle' correspond au fait que, pour les chargements les plus lourds (25 t.) un seul type de véhicules est possible donc une seule consommation unitaire, alors que les chargements légers sont transportés soit dans les plus gros véhicules (courbes du haut) soit dans des véhicules moins importants et moins lourds qui ont donc une consommation moins importante. A mesure que le chargement devient plus léger, le choix est plus ouvert et la courbe du bas correspond au plus petit véhicule (le plus léger) pouvant contenir un tel chargement. La forme des courbes de ces traînées est celle de la fonction ci-dessus. La traînée inférieure, qui culmine à 32 litres/100 km, correspond aux tournées, pour lesquelles la consommation unitaire en charge est calculée avec la moitié du poids du chargement pour tenir compte du fait que, sur l'ensemble de la tournée de livraison par exemple, le véhicule part avec son chargement, décharge à mesure de sa tournée et rentre avec le camion vide ; nous avons retenu, pour calculer la consommation en moyenne sur la tournée, un poids de la moitié du chargement.

Pour les envois de moins d'une tonne, on observe une petite traînée en-dessous des autres, en bas à gauche du graphique, qui correspond aux camionnettes ; leurs consommations se situent entre un peu moins de 10 et 12 litres au cent.

Consommation en l/100 km en fonction du poids du chargement

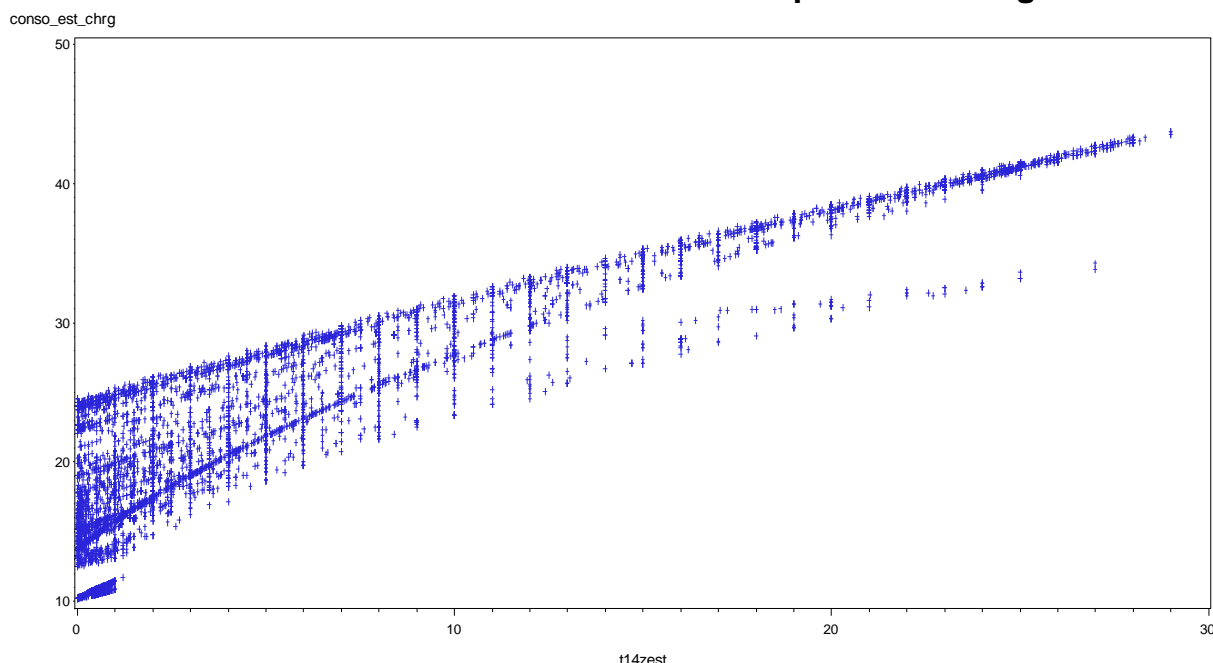


Figure 4 : Consommation unitaire du véhicule en charge (l/100 km) selon le poids du chargement

Pour les poids lourds elle s'échelonne entre 12 litres pour un petit camion vide et 44 litres pour un très gros véhicule de 45 t. avec surcharge. Les consommations à vide plafonnent aux environ de 30 l.

La Figure 5 qui est en lien direct avec la figure précédente, montre la consommation en gep/tkm en fonction du poids de l'envoi. Pour les envois de moins de 26 t. correspondant le plus souvent à un seul véhicule, on observe un triangle sombre qui nous indique que la consommation unitaire, en gep par tkm, est supérieure à 12 gep/tkm, ce qui correspond au véhicule le plus efficace au plan énergétique, c'est-à-dire un ensemble de 44 tonnes de poids total, donc totalement rempli, avec son trajet de retour à vide. Pour des envois moins lourds, en se déplaçant à gauche sur la figure, l'envoi peut être groupé et il se retrouve alors quelque part dans le triangle en fonction du poids du chargement d'une part et du type de véhicule utilisé d'autre part ; s'il n'est pas groupé, l'envoi se trouve en haut du triangle où la ligne la plus haute correspond au véhicule le plus lourd (16 t ; de poids à vide) selon le poids du chargement, qui peut transporter exceptionnellement de tout petits chargements (moins de 100 kg).

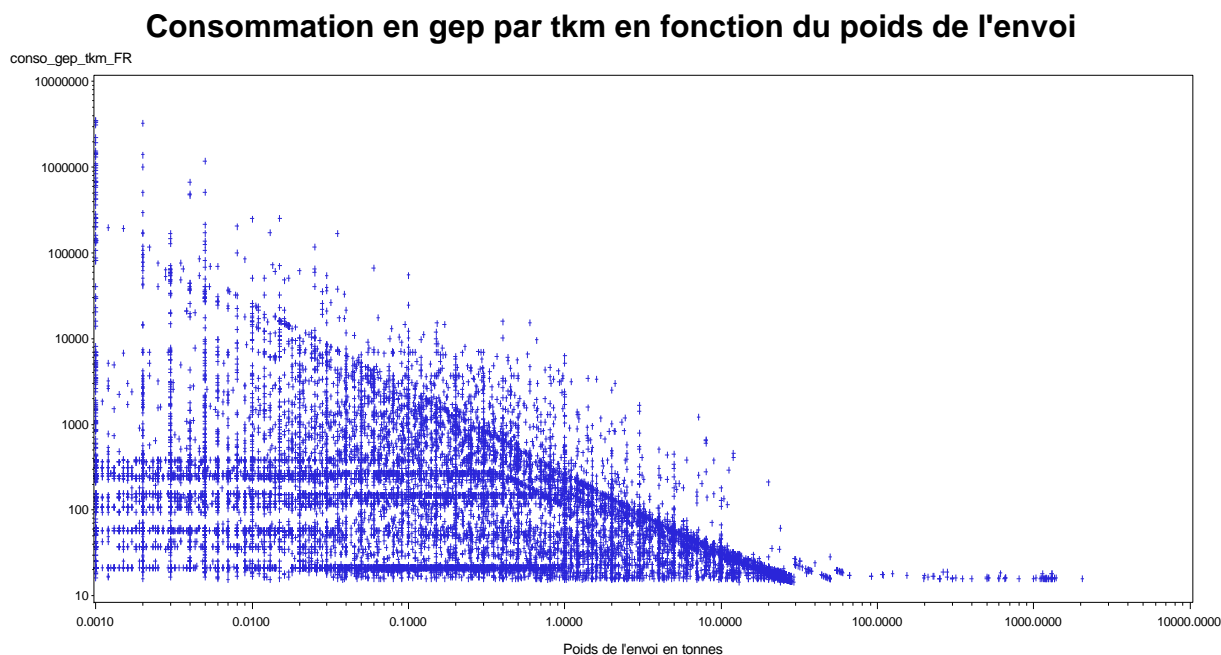


Figure 5 : Consommation unitaire de l'envoi (gep/tkm) selon le poids de l'envoi

On observe un nombre important de points au-dessus du triangle principal ; il s'agit de tournées pour lesquelles la consommation de carburant a été calculée sur la distance déclarée de la tournée, en comptant pour la consommation unitaire le poids total du véhicule comme la somme entre le poids à vide et la moitié seulement du poids de chargement et sans retour à vide, alors que le tonnage kilométrique est calculé sur la distance réseau entre point de chargement et de déchargement : si par exemple, une tournée de livraison fait 100 km et que le point de livraison du colis suivi se situe à 10 km seulement du point de chargement, la consommation de cet envoi sur ce trajet pourra être environ cinq fois plus importante pour le même poids de chargement que si le trajet n'était pas une tournée.

1.2.1. Consommation d'énergie du fret ferroviaire

Pour les trajets ferroviaires en France (les deux extrémités en France), on ne connaît pas l'énergie de traction (électrique ou diesel). Nous prenons donc des valeurs moyennes pondérées par l'importance relative de ces deux types d'énergie. Pour estimer la consommation d'énergie du fret ferroviaire, le Guide des facteurs d'émissions de la méthode Bilan Carbone (2010) se base sur les résultats de l'étude (T&L et Associés, 2008) sur l'efficacité énergétique du transport ferroviaire de marchandises. A partir de valeurs sur les trafics et les consommations d'énergie de traction du fret ferroviaire en France en 1999, nous calculons le Tableau 3 ci-dessous, en utilisant le coefficient de conversion de l'énergie à la consommation : 1 kWh = 86 gep ou 1 MW=0,86 tep, correspondant à l'énergie finale.

Tableau 3 : Trafic et consommation d'énergie finale des trains de fret en France

	Traction électrique				Traction diesel			Total		
	G tkm	G Wh	Wh/ tkm	gep/ tkm	G tkm	1000 m ³	gep /tkm	G tkm	Tep	gep /tkm
trains complets	21,4	797	37,2	3,2	3,48	56,9	13,9	24,9	117	4,68
rail route	13,1	689	52,5	4,5	0,18	3,0	14,0	13,3	61,8	4,64
lotissem.	12,1	886	73,0	6,3	1,76	53,4	25,8	13,9	121	8,74
Total	46,7	2372	50,8	4,4	5,42	113,3	17,8	52,1	300	5,7

Source : d'après la méthode Bilan carbone, l'étude T&L et les travaux de l'OEET

Pour convertir dans ce tableau l'énergie finale en énergie primaire nous divisons les quantités d'énergie finale par l'efficacité de la production, soit 0,26 pour l'électricité en France et 0.78 pour le diesel. Nous obtenons alors le Tableau 4.

Tableau 4 : Trafic et consommation d'énergie primaire des trains de fret en France

	Traction électrique				Traction diesel			Total		
	G tkm	G Wh	Wh/ tkm	gep/ tkm	G tkm	1000 m ³	gep /tkm	G tkm	Tep	gep /tkm
Trains complets	21,4	3065	143	12,3	3,48	72,9	17,7	24,9	326	13,1
Rail route	13,1	2650	202	17,4	0,18	3,8	17,8	13,3	231	17,4
Lotissement	12,1	3408	281	24,2	1,76	68,5	32,9	13,9	351	25,3
Total	46,7	9123	195	16,8	5,42	145,3	22,6	52,1	908	17,4

Source : calculé à partir des résultats du Tableau 3 ci-dessus

Les valeurs retenues pour les trajets français sont donc celles des colonnes de droite de ces deux derniers tableaux, en gep/tkm : 8,74 et 25,3 pour le lotissement respectivement en énergie finale et énergie primaire ; 4,68 et 13,1 pour les trains complets ; 4,64 et 17,4 pour le rail route.

Pour le tunnel sous la manche nous retenons, en énergie finale une valeur double de celle du rail-route (on transporte le poids lourd de 15 t. en plus d'un chargement de 15 t. en moyenne) soit 9 gep/tkm nette en énergie finale et 20 gep/tkm en énergie primaire.

1.2.2. Énergie des trajets ferroviaires internationaux

Les 105 trajets ferroviaires internationaux de notre base trajets-ECHO (au moins une extrémité hors de France) se répartissent entre 15 pays de destination dont 4 principaux : Allemagne (17 trajets), Belgique (23), Italie (27) et Suisse (14).

Afin de tenir compte des différents mix de l'électricité utilisée par les différents réseaux, donnant des efficacités de production électrique ainsi que des coefficients d'émissions sensiblement différents entre pays, les distances ferroviaires ont été réparties entre les différents pays traversés, permettant ainsi de répartir, pour chaque trajet ferroviaire international, les tkm entre pays. Pour ceci nous avons utilisé, le simulateur EcoTransit (www.ecotransit.org) qui dispose à la fois d'un réseau avec

l'énergie disponible et tient compte du type de traction (électrique ou diesel) dans son calcul de CO₂ et de facteurs d'émission WW de l'électricité par pays selon la répartition entre les différentes énergies primaires utilisées pour produire cette électricité. Nous avons constaté après coup que tous les trajets ferroviaires internationaux de notre base trajets sont entièrement en traction électrique.

Dans EcoTransit les consommations sont calculées, en Watt heure par tkm brute remorquée (Wh*/tkbr), à partir de la masse brute du train ($1200 \times \text{masse du train}^{-0,62}$) soit une valeur de 16,6 Wh/tkbr pour un train électrique 'moyen' de 1000 t. brutes, ce qui est inférieur au 19,0 Wh/tkbr trouvés pour l'ensemble du trafic ferroviaire de fret en France en 1999. Ensuite, le ratio tonnes nettes (tkm) sur tonnes brutes (tkbr), qui prend en compte le taux de remplissage, le taux de parcours à vide et le poids du wagon vide, permet de passer de cette consommation par train à une consommation par tkm. Les valeurs utilisées dans EcoTransit sont reproduites au tableau 7 ci-dessous.

Tableau 5 : Energie finale de traction des trains de fret électriques en Europe

Train Type	Final Energy Consumption			
	Train	Freight		
		Bulk	Average	Volume
Unit	Wh/Gtkm	Wh/Ntkm		
Light Train (500t)	25.5	42.7	49.5	63.9
Average Train (1000t)	16.6	27.8	32.2	41.5
Large (1500t)	12.9	21.6	25.0	32.3
Extra Large (2000t)	10.8	18.1	20.9	27.0
Heavy (>2000t)	10.0	16.8	19.4	25.1

Source : Ecotransit – Methodology and data update 2011, tableau 23, p. 46

Ce sont ces valeurs EcoTransit que nous retenons pour estimer la consommation d'énergie du trafic ferroviaire international. Notons qu'elles sont légèrement inférieures aux valeurs françaises du Tableau 5. Avec l'hypothèse que le train complet correspond en moyenne à 1000 t., la consommation unitaire pour des marchandises de densité moyenne est de 32,2 Wh/tkm nette dans EcoTransit contre 37,2 dans le Tableau 5. Pour le lotissement, avec l'hypothèse de trains moyens de 500 t. et des marchandises de faible densité (volume), la consommation unitaire est de 63,9 Wh/tkm nette dans EcoTransit contre 73 dans le Tableau 5. Pour le rail-route nous retenons le même ratio avec le lotissement qu'en France soit $52,5 / 73 = 72\%$ de la consommation du lotissement. Ainsi les valeurs retenues sont les suivantes en Wh/tkm nette : Lotissement 63,9 ; trains complets 32,2 ; rail-route 46,0. Pour les autoroutes ferroviaires (2 trajets dans la base ECHO) les marchandises sont transportées avec la caisse soit environ 4 t, nous retenons la même consommation que celle du rail-route mais en majorant le poids du chargement de 4 t.

Enfin, ces valeurs correspondent à l'énergie finale ; pour passer à l'énergie primaire (à la production) il faut tenir compte du coefficient d'efficacité de la production de l'électricité de chaque réseau. Nous avons utilisé les coefficients d'efficacité par pays d'EcoTransit, issus de la base de données Energie-CO₂ de l'UIC.

1.2.3. Consommation d'énergie du fret maritime

Pour le fret maritime, la consommation d'énergie distingue entre les conteneurs et les autres types de bateaux. Pour les porte-conteneurs les deux principaux paramètres qui expliquent la consommation unitaire, en gep/tkm, sont le poids des marchandises dans le conteneur et la capacité du navire. On trouvera dans le programme en annexe la méthode de calcul. (Annexe 1, p. 167).

gep/tkm et nb de tonnes par EVP

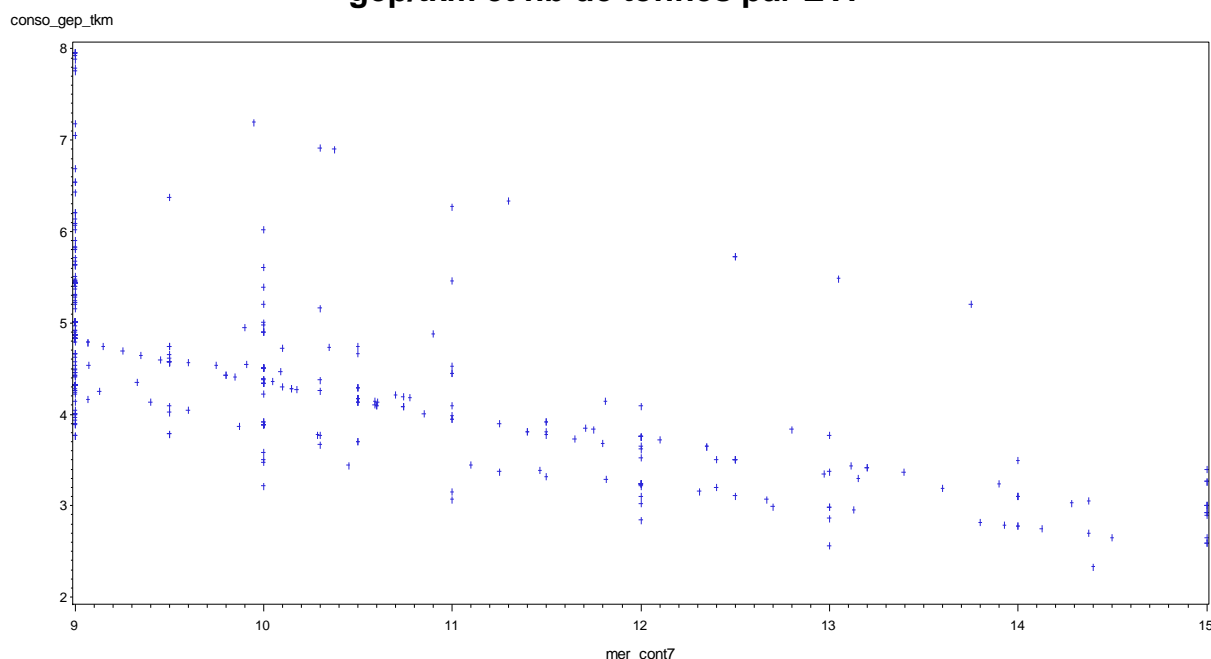


Figure 6 : Relation entre la consommation unitaire et le poids de marchandises dans un EVP

Dans la Figure 6, le poids de marchandises dans un EVP varie entre 9 et 15 tonnes (par construction) alors que la capacité du navire, dans la figure 7, varie elle entre 700 et 8000 EVP. Dans les 2 cas, la consommation par tkm varie entre 2,5 et 8 gep. Sur chacune des Figure 6 et Figure 7, la variation de l'autre paramètre important (celui qui ne figure pas en abscisse) peut expliquer les variations verticales.

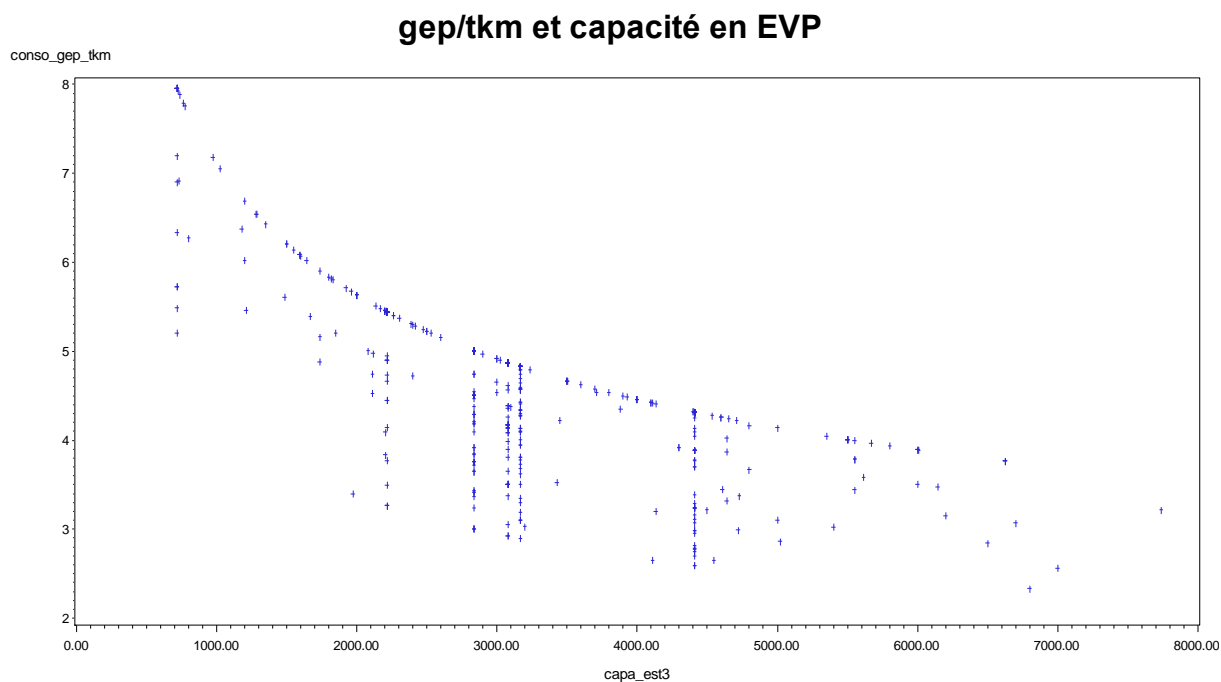


Figure 7 : Consommation unitaire selon la capacité du navire en EVP

Pour les marchandises non conteneurisées, une consommation unitaire par tkm (gep/tkm) selon le type de navires a été appliquée au tonnage kilométrique de l'envoi. Ces valeurs sont tirées des travaux de l'OEET et rappelées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 6 : Consommations unitaires par type de navire

Type de navire	Gep/tkm
Vraquiers	1,7
Citernes	2,16
Général cargo	3,4
Mer non spécifié	3
Ro-ro	27,1
Ferry	20,3

La Figure 8 met en relation la consommation d'énergie en gep/tkm avec le poids de l'envoi. Les deux lignes supérieures correspondent à des trajets en ferry et ro-ro (respectivement 20 et 27 gep/tkm) ; en-dessous de 10 gep/tkm, on retrouve les conteneurs et les autres types de bateaux. Les vraquiers sont tout en bas, à 1,7 gep/tkm.

gep/tkm et poids de l'envoi

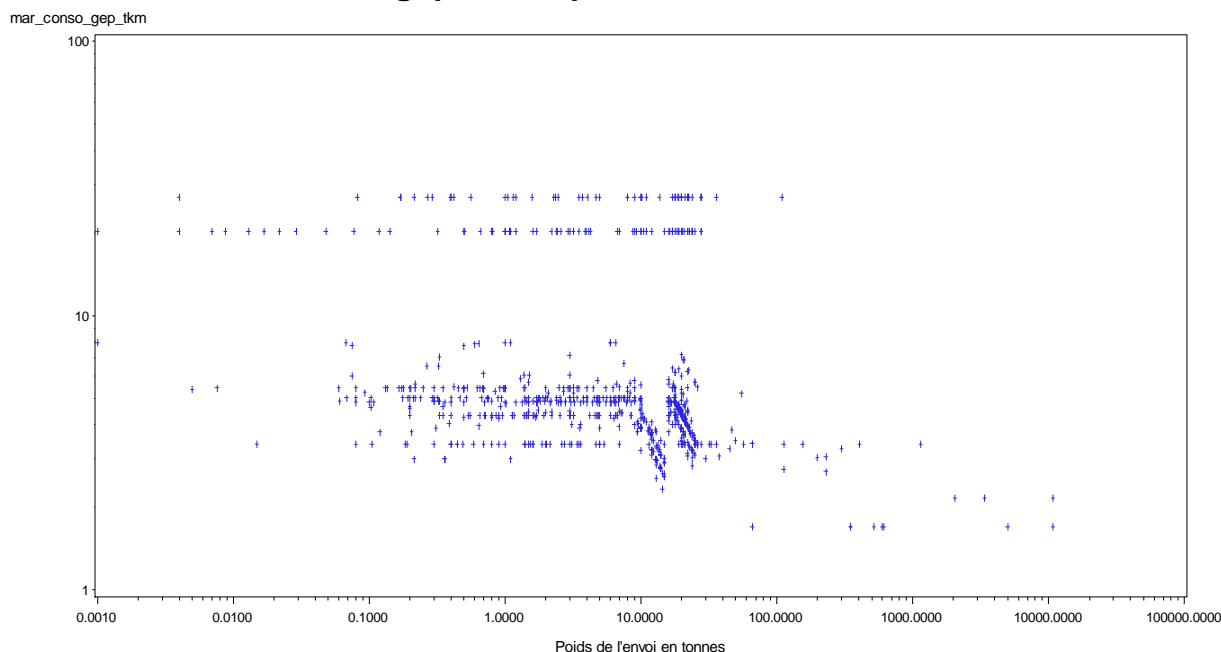


Figure 8 : Consommation par tkm en fonction du poids de l'envoi pour les envois maritimes

1.3. Calcul des émissions de CO₂ par envoi et trajet

Les émissions de CO₂ sont calculées en multipliant la quantité d'énergie finale par un facteur d'émission de cette énergie. Le type d'énergie utilisée pouvant être différent pour deux trajets, les émissions d'un envoi sont donc calculées par trajet, puis additionnées sur les différents trajets de l'envoi.

1.3.1. Deux objectifs pour le calcul des émissions

Le calcul des émissions de gaz à effet de serre vise principalement à permettre l'analyse fine des émissions ainsi que l'analyse des mesures de réduction de ces émissions. D'autre part, nous avons aussi pour objectif de vérifier la cohérence entre les émissions que nous allons estimer à partir de l'enquête ECHO et celles que l'on trouve dans les Comptes Transport de la Nation (CTN⁶). Ce double objectif implique deux méthodes différentes de calcul des émissions. Les principales divergences entre ces méthodes portent d'une part sur les coefficients d'émission des énergies, (« du puits à la roue » ou « à la combustion ») et sur le périmètre des transports pris en compte.

Pour analyser des mesures de réduction, la méthode doit en particulier permettre de comparer des situations différentes, notamment en ce qui concerne la source d'énergie utilisée. Pour calculer les émissions d'un service de transport nous faisons le produit entre :

- La consommation d'énergie finale affectée à cet envoi sur ce trajet, par type d'énergie ;

⁶ http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/documents/temis/4011/4011_2005_1.pdf
(p. 126)

- Et le facteur d'émission en CO₂ de cette énergie.

Dans le présent travail d'enrichissement de la base ECHO, pour comparer nos estimations de CO₂ émis par le transport de fret aux estimations des CTN, nous devons veiller à utiliser la même méthode et le même champ que le CITEPA qui fait ces calculs destinés en particulier aux Nations Unies pour les comptes du protocole de Kyoto et, donc selon le format Kyoto. Ceci implique en particulier de ne retenir que les émissions réalisées sur le territoire national et, d'autre part, de comptabiliser les émissions « du puits à la roue » dans le secteur de l'énergie (pour le pétrole ou l'électricité) ou dans l'agriculture (pour les biocarburants d'origine agricole) et non dans le secteur consommateur de cette énergie (le transport).

Dans les Comptes Transport de la Nation (CTN), les émissions de la route sont calculées comme le produit des consommations d'énergie estimées dans le 'bilan de la circulation' par des facteurs d'émission. Chaque année, le bilan de la circulation estime les trafics exprimés en véhicules.km des différentes catégories de véhicules, à partir de l'ensemble des sources statistiques disponibles. Les principales sources utilisées pour le transport de marchandises sont le fichier central des automobiles, à partir duquel sont estimés les parcs avec des lois de survie, les enquêtes TRM et VUL (+ panel Sofres pour les VUL) pour le kilométrage moyen par type de véhicules et les consommations moyennes par véhicule.km. Le produit des trafics et des consommations unitaires ainsi estimés donnent une première estimation de l'énergie consommée. On y ajoute une estimation de la consommation des véhicules étrangers en France, des véhicules divers (tondeuses, ...) et on compare aux ventes de carburants en tenant comptes des soldes aux frontières (achats à l'étranger ...). Pour les véhicules utilitaires légers, une incertitude importante porte sur la répartition de la circulation et de la consommation entre le transport de marchandises et celui de voyageurs.

Tableau 7 : Consommation d'énergie du transport de marchandises en France

	Parc moyen (1 000 véh.)	Km/véh.	Circulation fret Mds véh.km	Conso. Unit. l/100 km	Conso fret 1 000 m ³
Véh. utilitaires légers	5 465	16 421	44,9	9,46	4 195
Poids lourds	557	49 261	27,4	36,53	9 683
Ensemble véh. français	6 022		72,3		13 878
Véhicules étrangers			14,4	15,23	2 239
Total Transport routier de marchandises			86,7		16 117

Source : d'après les CTN 2004, tome 1 p. 73

On note que, compte tenu des hypothèses d'affectation au fret retenues ci-dessus les VUL français pèseraient 26% de la consommation d'énergie du transport routier de marchandise en France (essence 3% et diesel 23%) les poids lourds français 60% et les véhicules étrangers 14%.

Sur la base de cette consommation de carburant, le calcul des émissions de gaz à effet de serre des CTN est réalisé par le CITEPA selon les règles fixées par la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques : le format UNFCC ou format Kyoto.

1.3.2. Le format Kyoto

Pour le périmètre, le format des nations Unies UNFCC intègre l'outre-mer dans les émissions de la France. Les émissions y sont réparties en secteurs d'activité : les émissions amont (du puits au réservoir) sont donc prises en compte dans le secteur énergie et non dans le secteur consommateur. Pour les transports, il s'agit donc d'émissions 'à la combustion' (notés TW pour Tank to Wheel, du réservoir à la roue) : la consommation d'énergie électrique dans les trains n'émet pas de gaz à effet de serre et, par convention, les émissions liées à la combustion des biocarburants ne sont pas prises en compte.

Les CTN présentent aussi des résultats au format Secten du CITEPA, qui correspond aux émissions en France métropolitaine (hors outremer), réparties selon un découpage sectoriel légèrement différent du format UNFCCC. Les émissions de CO₂ des transports, aux formats UNFCCC et Secten, excluent du total national les émissions liées aux trafics maritime et aérien internationaux. Ainsi, les émissions du transport routier représentent 94 % des émissions de CO₂ de l'ensemble des transports, qui représentent eux-mêmes 26 % du total.

1.3.3. Facteurs d'émission de CO₂ des carburants

Concernant les facteurs d'émissions du CO₂ par type de carburant, le CITEPA tient compte du mélange de biocarburant : les carburants utilisés en France sont mélangés avec des agro carburants : essence + éthanol et gazole + EMHV. Conformément au format Kyoto, les émissions de la partie biogénique ne sont pas prises en compte. Les facteurs d'émissions de CO₂ par type de carburant doivent donc être calculés en tenant compte de la part d'agro-carburant incorporée dans le produit pétrolier, afin d'extraire la partie biogénique (OMINEA in CITEPA, 2011, p. 464). Pour le gazole le pourcentage massique d'incorporation de bio gazole dans le 'mélange gazole + EMHV' était de 1,01% en 2004 ; il était de 0% jusqu'en 1991 et 6,76% en 2009. Pour l'essence, il était de 0,93 % en 2004 (0% jusqu'en 1991 et 8,13% en 2009 ; OMINEA pp. 463 et 464). Le Tableau 8 indique les facteurs d'émissions retenus ici pour l'année 2004.

Tableau 8 : Facteurs d'émissions utilisés pour les carburants pétroliers en 2004

Mélange pétroliers	Amont (kgCO ₂ WT)	Combustion (kgCO ₂ TW)	Du puits à la roue (kgCO ₂ WW)
1 litre Gazole + EHMV ⁷	0,15	2,65	2,80
1 kg carburéacteur (air)	0,28	3,10	3,38
1 kg Fuel lourd (HFO, mer)	0,42	3,11	3,53

Source : d'après travaux de la commission OEET-TM, données CITEPA et méthode Bilan Carbone

⁷ Nous retenons les mêmes facteurs d'émissions pour le gazole routier et non routier.

Ce tableau indique les facteurs d'émissions utilisés, exprimés en kgCO₂ par litre de gazole et par kilogramme de carburacteur ou de fuel lourd : la seconde colonne indique les émissions amont ou du puits au réservoir (WT pour *Well-to-Tank*), la colonne trois indique les facteurs 'à la combustion' ou du réservoir à la roue, correspondant à ceux qui ont été utilisés dans les CTN, qui seront utilisés pour comparer avec nos estimations d'émissions basées sur ECHO ; nous notons ce coefficient TW (*Tank-to-Wheel*). La colonne de droite indique les facteurs d'émissions 'du puits à la roue' ou 'combustion plus amont', que nous utiliserons notamment pour comparer différents modes de transport ayant recours à des sources d'énergie différentes et donc pour analyser les mesures de réduction des émissions du transport de fret. Nous notons ce coefficient WW (*Well-to-wheel*).

Notons que la commission marchandises de l'Observatoire Energie Environnement des Transports (OEET) a défini, après nos propres calculs des émissions, une méthode de calcul des émissions dans le cadre de la préparation du décret et des arrêtés sur l'information CO₂ des prestations de transport. Les facteurs d'émission que nous avons utilisés (Tableau 8) diffèrent de ceux publiés dans l'annexe I de l'arrêté du 10 avril 2012 (Tableau 9) et devenus la règle officielle pour le calcul des émissions.

Tableau 9 : Facteurs d'émission des différentes sources d'énergie retenus dans l'arrêté du 10 avril 2012 (en kgCO₂ par unité de mesure)

		Facteur d'émission (kg de CO ₂ par unité de mesure de la quantité de source d'énergie)	
		Format « Kyoto »	Du puits à la roue
	Unité de mesure de la quantité de source d'énergie		
Gazole	litres	2,49	3,07
Electricité	kWh	-	0,053
Kérosène	litres	2,52	3
Fioul lourd (HFO)	kg	3,12	3,58

Source : Arrêté du 10 avril 2012

Les travaux de l'OEET ont été menés en parallèle avec ceux du projet de norme européenne (CEN/TC 320) sur la « Méthodologie pour le calcul et la déclaration de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre (GES) des prestations de transport ». Le projet de norme est comme pour l'OEET, une première version principalement axée sur 'la consommation d'énergie et les émissions de GES associées aux véhicules (tous modes : terrestre, maritime, fluvial, aérien) pendant la phase opérationnelle du cycle de vie (à la combustion). Toutefois, lors du calcul de la consommation d'énergie et des émissions associées aux véhicules, la consommation d'énergie et les émissions associées aux processus de production et mise à disposition des énergies des véhicules (du puits au réservoir) sont également prises en compte. La norme adopte ainsi une approche globale, « du puits à la roue », lors des calculs et dans les déclarations à destination des utilisateurs de prestations de transport⁸.

⁸ Il est prévu que les éditions ultérieures de la norme puissent avoir un domaine d'application plus étendu afin d'inclure des aspects supplémentaires tels que les terminaux de transport, les activités de transbordement et

1.3.4. Emissions de CO₂ pour le fret ferroviaire en France

La valeur d'émissions retenue pour l'électricité du trafic ferroviaire français est de 0,073 kgCO₂/Wh. Pour les trains à traction diesel, nous retenons les mêmes coefficients que pour la route soit 2,65 TW ou 2,80 WW. Pour les trajets ferroviaires français, nous ne connaissons pas l'énergie de traction et nous avons donc calculé un coefficient moyen d'émission par tkm tenant compte à la fois des émissions de la traction électrique et de la traction diesel, pondérées par les trafics, à partir des valeurs indiquées dans les tableaux 6 et 7. Ces valeurs moyennes, en g de CO₂ par tkm sont comprises entre 0.6 et 10 pour les émissions de traction (TW) et entre 4 et 15 pour les émissions du puits à la roue (WW), avec des valeurs moyennes pour l'ensemble du fret ferroviaire de respectivement 5,76 (TW) et 9,41 (WW).

Tableau 10 : Facteurs d'émissions utilisés pour les trajets ferroviaires en France

	Traction électrique				Traction diesel				Ensemble			
	gep/tkm		gCO ₂ /tkm		gep/tkm		gCO ₂ /tkm		gep/tkm		gCO ₂ /tkm	
	finale	primaire	WW	TW	finale	primaire	WW	TW	finale	primaire	WW	TW
Total Fret	4,37	16,8	3,71	0	17,7	22,6	58,5	55,4	5,76	17,4	9,41	5,76
dont												
trains entiers	3,20	12,3	2,71	0	13,8	17,7	45,8	43,33	4,69	13,1	8,73	6,05
rail route	4,52	17,4	3,83	0	13,9	17,8	46,0	43,5	4,64	17,4	4,40	0,59
lotissement	6,28	24,2	5,33	0	25,7	32,9	85,0	80,5	8,76	25,3	15,4	10,2

Pour les autoroutes ferroviaires (2 trajets dans la base), comme cela a été indiqué p. 15 pour l'énergie, le coefficient d'émissions retenu est le même que celui du rail-route en majorant le poids du chargement de 15 tonnes (poids du camion vide). Notons que ces coefficients du puits à la roue (entre 5 et 15 gCO₂WW/tkm) sont bien dans la fourchette des valeurs proposées par l'OEET (entre 5 et 52).

1.3.5. Emissions de CO₂ des trajets ferroviaires à l'étranger

Comme pour l'énergie, les émissions de la partie hors France de chaque trajet ont été évaluées à l'aide du simulateur EcoTransit (www.ecotransit.org). Celui-ci dispose à la fois d'un réseau avec l'énergie disponible et tient donc compte du type de traction dans son calcul de CO₂ et de facteurs d'émission WW de l'électricité par pays selon la répartition entre les différentes énergies primaires utilisées pour produire cette électricité (le mix). En Europe, non seulement ce mix est différent dans chaque pays mais, de plus, dans certains pays, les chemins de fer produisent une partie de leur électricité ou ont un mix, différent de celui du pays. EcoTransit retient, pour les trajets ferroviaires internationaux, des coefficients d'émission par compagnie de chemins de fer par pays, issu de la base de données Energie-CO₂ de l'UIC, reproduits au

d'autres étapes du cycle de vie. Les informations nécessaires pour ce type de calculs ne sont pas disponibles aujourd'hui.

Tableau 11. Dans ce tableau, nous avons également indiqué, quand ils sont disponibles, les coefficients moyens par pays indiqué par l'AIE, que l'on peut ainsi comparer au coefficient moyen du réseau ferroviaire. Notons que pour la France, EcoTransit retient un facteur d'émission de l'électricité de 73 gCO₂WW/kWh.

Tableau 11 : Facteurs d'émission de l'électricité (gCO₂/kWh) et par tkm (gCO₂/tkm) pour le fret ferroviaire en Europe

Pays \ Source	AIE	EcoTransit- UIC	
	gCO ₂ WW/kWh	gCO ₂ WW/kWh	gCO ₂ WW/tkm
Allemagne	517,3	527	31,9
Autriche	205,5	112	12,5
Belgique	267,8	381	18,7
Danemark	333,9	390	37,8
Espagne	429,3	399	34,5
Finlande	253,2	452	20,2
France	84,4	73	7,3
Hollande	440,3	483	30,5
Italie	510,0	464	29,0
Luxembourg	304,5	692	25,3
Pologne		1018	0,0
Portugal	502,7	523	44,4
Royaume-Uni	455,0		
Slovénie (SK)	814,5	196	41,1
Suède (SE)	44,0	4	4,4
Suisse		5	3,7
Moyenne Europe (17)	352,2	?	22,8

Sources : AIE et UIC – INFRAS - IWW et Guide des facteurs d'émissions de la méthode bilan-carbone Chap. 4, p. 62

Pour le cas particulier du tunnel sous la Manche, Eurotunnel donne sur son site web une valeur moyenne de 197 kg de CO₂ pour la traversée d'une navette Eurotunnel fret, soit 8,8 kg par poids lourd transporté (contre 158 kg pour un poids lourd qui prend le ferry Calais Douvres <http://www.eurotunnelfreight.com/fr/developpement-durable/eco-comparateur/>).

1.3.6. Résultats du calcul des émissions de CO₂ par trajet selon le mode

Pour chaque trajet de chaque envoi nous avons calculé deux types d'émissions, en kg de CO₂ : les émissions au format Kyoto, pour les 17 953 trajets ayant au moins une partie en France et les émissions WW pour l'ensemble des trajets (20 816 trajets). Notons que dans les deux tableaux suivants (Tableau 12 et Tableau 13), les émissions moyennes par trajets ont été calculées en tenant compte des coefficients de pondérations de l'enquête ECHO.

Tableau 12 : Résultats de l'estimation pondérée des émissions de CO₂ Kyoto par envoi.trajet

Kg CO ₂ Kyoto / trajet	Nb obs	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Route	17 304	22	1 044	0,0003	39 126
Fer	256	38	933	0,008	7 293
Fluvial	54	1 783	2 262	0,5	62 508
Maritime	79	77	831	0,007	7 983
aérien	152	24	4 104	0,4	26 863
Tous modes	17 845	23	1 113	0,0003	62 508

Dans le format Kyoto, les valeurs moyennes d'émission par envoi sur un trajet sont de 22 kg pour un trajet routier, 38 kg pour le ferroviaire, 1,7 t pour un trajet fluvial, 77 kg pour un maritime, 24 kg pour l'aérien et 23 kg pour l'ensemble des modes. Les émissions très importantes des trajets fluviaux correspondent à des envois de tonnage très importants. Les valeurs minimums dans ce tableau sont peu significatives (distances nulles). Les valeurs maximum sont de 39 tonnes pour la route, 7,2 t pour le fer, 62 t pour le fluvial 7,9 t pour le maritime et 26 t pour l'aérien. Ces maximums correspondent à des envois très lourds.

Le tunnel sous la manche n'apparaît pas dans les émissions Kyoto, bien qu'une partie du trajet se fasse sur le territoire national : en effet l'énergie utilisée est de l'électricité qui ne donne pas d'émission au format Kyoto.

Tableau 13 : Résultats de l'estimation pondérée des émissions de CO₂ WW par envoi.trajet

Kg CO ₂ WW / trajet	Nb obs	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Route	18 356	24	1 189	0,0003	74 182
Fer	364	86	1 834	0,01	29 695
Fluvial	59	4 670	6 145	5,9	62 508
Maritime	746	801	11 497	0	213 186
aérien	1 243	86	5 814	0,25	218 366
Tunnel \ manche	48	0,7	14	0,003	14,1
Tous modes	20 816	28	2 888	0	218 366

Les niveaux d'émissions WW (du puits à la roue), moyens et surtout maximums, sont supérieurs à ceux du tableau 'Kyoto' précédent pour deux raisons : les distances sont plus longues en moyennes et les coefficients d'émission sont également plus importants. Le niveau moyen d'émission pour un trajet routier est de 24 kg (contre 22 kg en format Kyoto), il est de 86 kg pour un trajet ferroviaire, 4,6 t pour un trajet fluvial, 801 kg pour un trajet maritime, 86 kg pour l'aérien. La valeur moyenne d'un envoi dans le tunnel sous la Manche est très faible (0,7 kg) parce qu'il s'agit de traction électrique, que la distance est courte et les envois ne sont pas lourds. Les maximums pour ces différents modes sont de 29 t pour le ferroviaire, 62 t pour le fluvial, 213 t pour le maritime, 218 t pour l'aérien et 74 t pour le routier. Ces maximums correspondent le plus souvent à des envois très lourds sur de longues distances. Ainsi, selon ce tableau, un trajet fluvial émet en moyenne beaucoup plus qu'un trajet maritime ou aérien. Ceci s'explique principalement par les poids moyens des envois plus dans le mode fluvial.

1.4. Comparaison des valeurs estimées à partir d'ECHO avec les résultats des CTN

Les valeurs estimées à partir d'ECHO sont comparées ici à celles des Comptes Transport de la Nation ou à celles de la base Sitram dont sont issus les CTN. Les données en tonnes ont déjà fait l'objet d'une telle comparaison en 2008⁹ et, plus récemment, les données ECHO en tkm et en énergie ont été comparées aux estimations des comptes Transport de la Nation¹⁰ mais, compte tenu des modifications apportées dans les distances et dans le mode de calcul de la consommation d'énergie, ces dernières doivent être refaites. Ces cadrages ont montré que les différences de champ avec Sitram sont importantes : elles portent sur les activités des chargeurs (toutes les activités ne sont pas enquêtées dans ECHO), sur les tranches d'effectif salarié (les établissements chargeurs de moins de 10 salariés, de 5 salariés pour les entrepôts, la vente par correspondance et les coopératives agricoles, sont exclus du champ de ECHO) et sur le parc (Sitram ne retient pour la route que les tonnages effectués par des véhicules immatriculés en France de 3 tonnes et plus de charge utile et de moins de 15 ans d'âge tandis que l'enquête ECHO n'introduit aucune exclusion à ce niveau). Rappelons que, de plus, les données Sitram ne permettent pas de quantifier les transports maritimes et fluviaux ; notre comparaison ne porte donc que sur les modes terrestres : chemin de fer, voie d'eau, poids lourds routiers, en compte d'autrui et en compte propre, véhicules utilitaires légers. Enfin, l'enquête ECHO partant des chargeurs français ne comptabilise pas les importations ; nous nous limitons donc aussi dans Sitram au trafic national (origine et destination en France métropolitaine) et à la partie intérieure des exportations.

1.4.1. En tonnage

Tableau 14 : Comparaison des tonnages estimé par ECHO et par Sitram en millions de tonnes 2004

millions de tonnes	Sitram (1)			ECHO (2)			(2)/(1)
	National	Export (3)	Σ Sitram	National	Export (3)	Σ ECHO	
Fer	74,2	18,0	92,2	76,2	5,2	81,4	0,88
Fluvial	27,0	16,0	43,0	2,4	7,0	9,4	0,22
Route CA	1200,0	30,7	1230,7	653,6	96,7	750,3	0,61
Route CP	806,0	3,7	809,7	265,0	2,1	267,1	0,33
VUL<3.5t	nd	nd	nd	11,6	0,0	11,6	nd
Total Route	2006,0	34,4	2040,4	930,2	98,8	1029,0	0,50
Total tous modes	2107,2	68,4	2175,6	1008,8	111,0	1119,8	0,51

Par rapport aux données Sitram (national plus sorties), le taux de couverture global de ECHO est de 51 % des tonnages, en raison principalement de l'absence des pondéreux : produits agricoles (NST 0) saisis uniquement au travers des commerces de gros et des coopératives agricoles (taux de couverture estimé de l'ordre de 40 % des tonnages), combustibles minéraux solides (NST2) et

⁹ Cf. Guilbault (2008) : Enquête ECHO - Premiers résultats d'analyse. Chapitre 4 Chaînes modales et organisationnelles, 4.1.1b 'Comparaison avec Sitram'.

¹⁰ Cf. Rizet et al. 2008 : Modélisation de l'énergie consommée en transport de fret – Base trajets ECHO

produits pétroliers bruts (NST3A) totalement absents de l'enquête, même au travers des commerces de gros, minéraux ferreux et minerais non ferreux (NST4) saisis uniquement au travers des commerces (de l'ordre 14 % des tonnages), matériaux bruts ou manufacturés et matériaux de construction (NST6A) pour lesquels seuls sont enquêtés les commerces de gros et les industries de matériaux de construction élaborés : verre, céramique... (taux de couverture de l'ordre de 15 % à 18 % des tonnages). Compte tenu de ces produits manquants, les taux de couverture par mode sont de l'ordre de 50% pour les poids lourds routiers, avec une meilleure couverture du compte d'autrui (61%) que du compte propre (33 %), 88 % pour le ferroviaire, et 22 % pour le fluvial. Notons qu'on ne connaît pas, dans Sitram, les tonnages réalisés par les véhicules de moins de 3,5 tonnes de poids total autorisé (PTAC estimé par la somme du poids à vide et de la charge utile).

1.4.2. En tonnage kilométrique

Pour comparer les résultats ECHO avec ceux de Sitram sur le tonnage kilométrique, nous retenons, dans ECHO, les transports domestiques (l'origine et la destination du trajet se situent en France) et la partie française des exportations (correspondant à la distance calculée pour le format Kyoto) : le transit et les trajets entièrement réalisés hors de France sont exclus de la comparaison. Pour la route, afin de rapprocher les champs couverts par l'enquête TRM (Sitram) et ECHO, nous isolons les VULs.

Le tableau ci-après compare, par mode, le trafic en tkm estimé à partir de Sitram d'une part et de l'enquête ECHO d'autre part.

Tableau 15 : Comparaison du trafic estimé par ECHO et Sitram en milliards de tkm en 2004

Milliards de tkm	Sitram (1)			ECHO (2)			(2)/(1)
	National	Export (3)	Σ Sitram	National	Export (3)	Σ ECHO	
Fer	26,6	7,2	33,8	29,0	3,0	32,0	0,95
Fluvial	4,2	1,6	5,8	0,3	1,0	1,3	0,22
Route CA	148,9	9,0	157,9	146,7	29,3	176,0	1,11
Route CP	30,4	0,3	30,7	26,0	0,1	26,1	0,85
VUL<3.5t	21,0		21,0	1,0	0,0	1,0	0,05
Total Route	200,3	9,3	209,6	173,7	29,4	203,1	0,97
Total tous modes	231,1	18,1	249,1	203,0	33,4	236,4	0,95

(1) Source : MTETM/SESP Sitram (SNCF, VNF, TRM) utilisé dans les CTN

(2) Source : Base trajets ECHO ; (3)

(3) Export : partie réalisée sur le territoire français ;

(4) Source CTN, Les comptes des transports en 2004, annexe, tableau A II 2.15 p.221

Le trafic ferroviaire national estimé par ECHO est proche du trafic SITRAM (95%), et même légèrement supérieur pour le trafic national, alors qu'un taux de couverture de 88% des tonnages devrait conduire à une sous estimation du tonnage kilométrique. Le fait que ce soit les pondéreux, généralement transportés sur de courtes distances, qui sont exclus de la base ECHO contribue à expliquer ce taux de couverture meilleur pour les tkm que pour les tonnes. Il se peut aussi que la base ECHO surestime légèrement les distances ferroviaires par rapport à Sitram. Notons que le trafic ferroviaire estimé par ECHO était nettement supérieur dans le rapport énergie de 2008 ; il y a donc eu une nette amélioration de ce côté.

Le trafic fluvial, faiblement estimé par ECHO en tonnes (22%), compte tenu du fait qu'un grand nombre de pondéreux, les principaux clients de la voie navigable, sont exclus du champ, est tout aussi faiblement estimé en tkm (22%).

Le trafic routier total estimé par ECHO est proche de la valeur Sitram (97%) alors que le tonnage ECHO ne représente que 50 % du tonnage Sitram. Comme pour le ferroviaire, le fait les pondéreux sont exclus de ECHO alors qu'ils sont en moyenne transportés sur de courtes distances, contribue à expliquer l'écart entre les taux de couverture en tkm versus en tonnes. Les décompositions, entre poids lourds et VULs d'une part et, pour les poids lourds, entre compte propre et compte d'autrui d'autre part ne sont pas satisfaisantes : le compte propre dans ECHO est inférieur de 15% aux valeurs de Sitram, alors qu'en compte d'autrui au contraire, l'estimation ECHO est supérieur de 11 % à celle de Sitram ; et le transport réalisé en VUL, représenterait, selon les Comptes Transport de la Nation, 21 milliards de tkm contre 1 dans ECHO.

Il faut noter que le transport sous pavillon étranger sur le territoire français est exclu dans le tableau ci-dessus du champ Sitram mais non du champ ECHO. Il représente selon les CTN 77,1 milliards de tkm dont 46,8 de transit soit 30,4 milliards d'imports plus exports soit environ 15 milliards de tkm à l'export. En ajoutant ces 15 milliards de tkm au trafic routier total de Sitram, le trafic routier ECHO n'est plus qu'à 90 % de Sitram en tkm.

1.4.3. En consommation d'énergie

La consommation d'énergie en transport est estimée chaque année par le Commission des Comptes transports de la Nation. Nous utilisons ici l'annexe C des CTN 2006 (C.5a Consommations sur le territoire français et livraisons de carburants, téléchargeable sur le site du SESP <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>). Le tableau 19 ci-après compare, par mode, la consommation d'énergie estimée en milliers de tonnes d'équivalent pétrole (tep) par les Comptes Transports de la Nation d'une part et à partir de l'enquête ECHO d'autre part. Comme dans les tableaux précédents, nous nous sommes efforcés de rétablir des champs comparables là où les données étaient disponibles.

Tableau 16 : Consommations d'énergie de traction en milliers de tep 2004, estimées à partir des CTN et ECHO

milliers de tep	CTN (1)	ECHO (2)			(2)/(1)
		National	Export	Σ ECHO	
Fer	195,0	156,0	12,4	168,4	0,86
Fluvial	60,0	3,4	11,3	14,7	0,25
Route PL (France +étr.)	9264	9578	879	10457	1,13
VUL<3.5t	1753	333	0	333	0,19
Total Route fret	11017	9911	879	10790	0,98
Total terrestre	11272	10070	903	10973	0,97

Pour le fer nous avons estimé la colonne 'CTN' avec une consommation fret SNCF de 1999, recalculée au prorata du tonnage kilométrique de 2004. La consommation d'énergie estimée dans la colonne Σ

ECHO est de 168 milliers de tep soit 86% de la consommation 'CTN'. Pour le fluvial, la base ECHO avec 15 milliers de tep ne couvre que 25% de la consommation recensée dans les CTN pour l'année 2005 contre 24 % du trafic en tkm.

Pour la route, la colonne CTN est basée sur l'annexe « C.5a Consommations sur le territoire français et livraisons de carburants » des CTN. Dans ce 'bilan de la circulation', nous avons compté :

- le quart de la consommation des VUL français soit, en milliers de m³, 203 d'essence et 1918 de gazole ou 1753 milliers de tep (l'enquête VUL estime que 28% des camionnettes sont utilisées pour transporter des marchandises). Les VUL étrangers qui ne sont pas distingués des voitures particulières (véhicules légers étrangers) ne sont pas comptés ici.
- la consommation des poids lourds français (10 015 milliers de m³ de gazole), et le tiers de celle des PL étrangers (949 000 m³) pour exclure les cars et tenir compte du fait qu'ECHO ne couvre pas les importations, soit 9 264 milliers de tep.

Soit un total de 11 017 milliers de tep estimés pour la route à partir du bilan de la circulation (CTN), à comparer aux 10 790 milliers de tep estimés à partir de la base ECHO. On voit que la consommation des VUL (comme le trafic) est très sous estimée ; en revanche la totalité de la consommation routière est satisfaisante. Il faut noter qu'il y a un vrai problème sur la connaissance de la consommation d'énergie des camionnettes pour le transport de marchandises : on a d'un côté le bilan de la circulation qui, partant du parc, estime la circulation à partir d'un kilométrage moyen puis la consommation à partir d'une consommation moyenne. Nous obtenons alors, avec la méthode indiquée ci-dessus 1753 milliers de tep ; d'un autre côté, le tableau AII 2.15 de l'annexe des CTN 2004 indique, pour le transport routier de marchandises en 2004, une consommation de 6,41 millions de tep de gazole pour les VUL français auxquels il faut ajouter les consommations des autres carburants.

Pour l'aérien, nous ne disposons pas de chiffre à comparer aux résultats de ECHO. Les CTN donnent le chiffre de 6,44 millions de tep livrés en France aux aéronefs français et étrangers en 2005, mais ce carburéacteur est destiné en priorité aux avions de passagers. La consommation fret, estimée à partir d'ECHO (toutes origines et destinations confondues), se monte à 1,16 million de tep.

Pour le maritime, la consommation indiquée par les CTN 2,68 millions de tep de diesel marine fioul, livrées en France en 2005 aux soutes maritimes françaises et étrangères, hors lubrifiant. La consommation, estimée à partir d'ECHO pour le fret émis par les établissements français (toutes origines et destinations confondues), est de 875 milliers de tep.

1.4.4. En émissions de CO₂

Selon les CTN (2006) les transports ont émis 149,1 millions de tonnes d'équivalent CO₂ au format Kyoto en 2004 dont 138 de CO₂, 23 milliers de CH₄, 14 000 de N₂O et 2 167 milliers de HFC. Nous ne comptabilisons ici que le CO₂ soit 138/149,1 = 93% des émissions. Pour la route, nous basons les valeurs de la colonne 'CTN' sur le tableau de l'annexe C5a (bilan de la circulation) déjà utilisé pour le Tableau 16.

Tableau 17 : Emissions de CO₂, en millions de tonnes, estimées à partir d'ECHO et comparaison CTN

Millions de t. de CO ₂	CTN(1)	ECHO (2)			(2)/(1)
		National	Export (3)	Σ ECHO	
Fer	(0,7)	0,12	0,0	0,12	nd
Fluvial	0,19	0,01	0,04	0,05	0,28
Route PL (Fr +étr)	29,2	30,0	2,76	32,8	1,12
VUL<3.5t	5,6	1,05	0,02	1,07	0,19
Total Route	34,8	31,1	2,78	33,8	0,97
Total terrestre	35,7	31,2	2,82	34,0	0,95

Pour le fer, la valeur CTN donne les émissions des trafics voyageurs et marchandises. Les deux valeurs ECHO et CTN du tableau ci-dessus ne sont donc pas comparables. Aucune valeur n'est donnée pour le fluvial dans les CTN ; nous avons repris la valeur énergie du tableau précédent et l'avons multipliée par le ratio (3,13) des tCO₂ par tep.

1.4.5. Récapitulation de la comparaison ECHO/CTN au format Kyoto

Tableau 18 : Tonnes, tkm, énergie et CO₂, au format Kyoto dans ECHO et comparaison CTN

	Nb d'obs	millions de tonnes		milliards de tkm		milliers de tep		millions de t CO ₂	
		ECHO	E/CTN	ECHO	E/CTN	ECHO	E/CTN	ECHO	E/CTN
Fer	369	81,4	0,88	32,0	0,95	168,4	0,86	0,12	nd
Fluvial	54	9,4	0,22	1,3	0,22	14,7	0,25	0,05	0,28
Route P lourds	14536	1017	0,50	202	1,07	10 457	1,13	32,8	1,12
Route VUL	2763	11,6	nd	1,00	0,05	333	0,19	1,07	0,19
Total Route	17299	1029,0	0,50	203	0,97	10 790	0,98	33,8	0,97
Total terrestre	17722	1119,8	0,51	236,4	0,95	10 973	0,97	34,0	0,95

Pour le fer, ECHO sous estime les tonnages (88%) et l'énergie (86%) ; les tkm sont moins sous-estimées (95%) et les émissions de CO₂ ne sont pas comparables.

Pour la voie navigable, ECHO compte peu d'observations et sous-estime beaucoup les tonnes, les tkm, l'énergie et le CO₂.

Enfin, pour la route, ECHO sous-estime beaucoup les tonnes (51%), nettement moins les tkm, l'énergie et le CO₂ (97%). Le trafic, l'énergie et les émissions des poids lourds sont supérieurs à ceux des CTN (qui ne comptabilisent pas les poids lourd étrangers) alors que les VULs sont nettement sous estimés.

Conclusion de la première partie

L'enquête ECHO, pour connaître et quantifier le transport de marchandises, part de la demande de transport, c'est-à-dire des chargeurs et de leurs envois, alors que l'approche habituelle part des véhicules, c'est-à-dire de l'offre. Cette nouvelle approche, entièrement différente, permet notamment de mieux relier l'activité de transport aux besoins et comportements des chargeurs. La première partie du projet avait pour objectif la quantification de l'énergie consommée et les émissions de CO₂ correspondantes. Ces résultats ont été confrontés à ceux publiés dans les Comptes Transports de la Nation issus d'une approche plus classique.

La comparaison entre les résultats de l'enquête ECHO et ceux de « l'approche classique » montre qu'il existe des différences importantes mais que, pour une large part, ces différences s'expliquent par le champ couvert : l'enquête ECHO ne porte pas sur l'ensemble des chargeurs. Cependant, au-delà de la différence des champs, il reste des écarts. Ainsi, l'importance des VUL semble très sous-estimée dans ECHO. Ceci est sans doute dû à l'absence de petites entreprises dans l'échantillon de l'enquête.

2. Emissions de CO₂ du transport de fret par établissement chargeur

2.1. Objectifs et méthodes

Après avoir calculé le niveau d'émissions de chaque envoi dans la première partie, l'objectif de cette deuxième partie de la recherche CO₂-ECHO, est de 'faire remonter' cette information sur le CO₂ du transport au niveau des établissements afin de connaître les établissements émetteurs et les activités correspondantes. La difficulté de l'exercice vient du fait que nous n'avons observé en moyenne que trois envois par établissement, ce qui est tout à fait insuffisant pour estimer les émissions de cet établissement. Deux approches ont été testées :

- Etablir une typologie des établissements pour calculer les émissions d'un groupe d'établissements suffisamment important pour que l'ensemble des envois de ce groupe permette de calculer le niveau d'émissions avec une précision suffisante ; le niveau d'émissions d'un établissement de ce groupe sera alors le total des émissions de ce groupe divisé par le nombre d'établissements ;
- Modéliser les émissions par tonne d'un envoi à partir des variables caractéristiques de l'établissement uniquement, afin d'être en mesure de calculer les émissions moyennes d'une tonne pour un établissement dont on connaît les caractéristiques (variables explicatives utilisées dans le modèle) puis, connaissant le nombre de tonnes émises par cet établissement, de calculer le niveau total des émissions de l'établissement.

Dans cette partie nous considérons les émissions 'du puits à la roue' (WW) et non les émissions au 'format Kyoto' que nous avons également calculé dans la première partie de cette recherche. Notons enfin, que le CO₂ étudié ici correspond au champ de l'enquête ECHO et, en particulier, ne couvre que les envois, non les approvisionnements de l'établissement.

Une troisième approche a été suivie notamment par Beauvais (2006), qui s'est efforcé d'estimer les ordres de grandeur de la consommation d'énergie du transport (en kep) et des émissions correspondantes (en kg de CO₂) qui peuvent être imputés à chacune des principales catégories de produits pour leurs transports. Dans cette recherche Predit, J.M. Beauvais cumule, à partir de l'enquête TRM, les véhicules.km pour 17 catégories de produits ainsi que les émissions liées à ces parcours et rapporte ces dernières aux tonnages chargés. Puis, il définit comme indicateur le rapport entre les émissions de CO₂ et les tonnages chargés. Les écarts entre les catégories extrêmes sont si importants qu'il en conclut, avec beaucoup de précautions compte tenu de la faible précision de ses estimations, que :

- Les émissions de CO₂ à la tonne sont faibles pour les matériaux de construction (qui ne sont que peu représentés dans ECHO¹¹). Cela est principalement dû à la conjonction d'une faible distance d'acheminement des marchandises et d'un fort taux de chargement des véhicules ;

¹¹ Le taux de couverture est de l'ordre de 15 à 18% des tonnages (Guilbault, 2008).

- Les émissions de CO₂ à la tonne sont importantes pour les produits manufacturés. Cela est principalement dû à la conjonction d'une importante distance d'acheminement des marchandises et d'un faible taux de chargement des véhicules.

Une analyse de ce type a également été menée aux Etats-Unis à partir de l'enquête *Commodity Flow Survey* de 2002 (Gao, 2011) ; les principaux résultats sont présentés dans la Figure 9. Il apparaît que le transport du charbon consomme peu d'énergie relativement au volume important de transport (en tkm) qu'il représente, à l'opposé de la nourriture qui est la principale consommatrice d'énergie de transport alors que son tonnage kilométrique est nettement inférieur à celui du charbon.

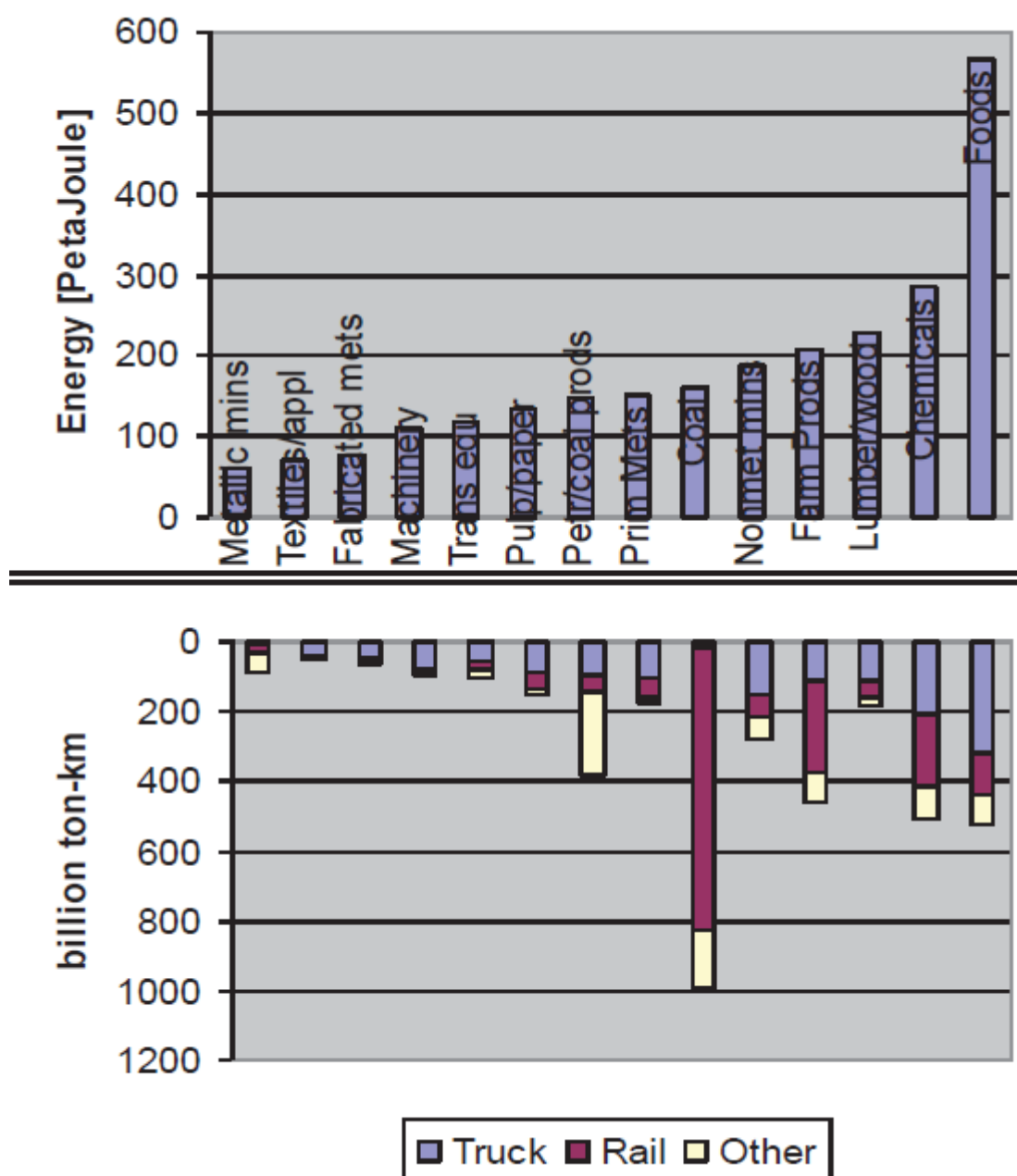


Figure 9 : Consommation d'énergie transport et quantités de transport par type de marchandises aux Etats-Unis en 2002 (d'après Gao, 2011)

Ces enquêtes, TRM et *Commodity Flow Survey*, sont très riches en nombre d'observations mais cette approche semble peu adaptée à l'enquête ECHO, pour laquelle nous ne disposons que de relativement peu d'observations par type de marchandises. Compte tenu de la richesse des variables explicatives disponibles dans ECHO, nous lui préférons les deux approches mentionnées ci-dessus, à savoir par typologie et par un modèle, qui visent à estimer le CO₂, par tonne puis par établissement chargeur.

2.2.Approche par typologie des établissements

L'échantillon d'envois de l'enquête ECHO est obtenu par un premier sondage parmi les établissements (près de 3000 établissements enquêtés). Une fois l'établissement enquêté, un deuxième sondage est effectué parmi ses envois. Le coefficient d'extrapolation de l'envoi est donc le produit d'un coefficient 'établissement' et d'un coefficient 'envois de cet établissement'. Le nombre très faible d'envois retenus par établissement (trois) ne permet pas d'estimer directement le volume d'émissions de cet établissement. L'idée est donc ici de regrouper un nombre important d'établissements ayant des 'profils' aussi proches que possible pour obtenir un nombre d'envois qui permette d'estimer le volume d'émissions de ce type d'établissements. C'est cette notion de profils des établissements proches en termes d'organisation de flux de transports que la typologie des établissements cherche à cerner.

Compte tenu de la très grande dispersion du niveau de CO₂ par envoi (de quelques grammes à quelques tonnes) et du nombre d'envois par établissement (de quelques dizaines à quelques milliers), pour obtenir une relative précision de l'estimateur de CO₂ d'un type d'établissement, il est nécessaire de regrouper un très grand nombre d'établissements.

2.2.1. Une typologie des établissements

Notre objectif est donc de constituer une typologie des établissements à partir des variables qui caractérisent le volume d'émissions : tonnage annuel et nombre annuel d'envois, répartition des envois en tranches de poids, répartition du tonnage annuel selon la destination géographique et selon le mode, taille de l'établissement en nombre de salariés. Ces variables sont de type quantitatif. Nous prenons également en considération la possession d'un parc en compte propre qui peut influencer sur les taux de remplissage des véhicules. Cette variable comptabilise 215 non réponses et on note que certains établissements indiquent ne pas avoir de parc propre mais transporter néanmoins – les déchets notamment – en compte propre. La variable portant sur le nombre total de véhicules routiers dans le parc propre, de type quantitatif, recense 371 valeurs manquantes ; elle ne sera donc pas utilisée dans l'analyse. Les variables portant sur la répartition des tonnages expédiés suivant la destination (région, reste de la France, reste de l'Europe, reste du monde) ne sont pas toujours renseignées (687 établissements avec des valeurs manquantes). Les variables portant sur la répartition des tonnages vers la France et vers l'Etranger sont mieux renseignées (87 établissements ne présentent pas de valeurs).

De fait, un premier travail de cette typologie a consisté à tester différentes variables, formatées ou non. Les variables finalement utilisées sont les suivantes :

- Le nombre de salariés [e3]
- Le nombre annuel d'envois [p2r]
- La distribution des envois selon leur poids [p3a à p3f] sachant que les variables p3e et p3f ont été regroupées pour n'en former qu'une seule mieux représentée que les deux autres ,
- La distribution en tonnage des envois selon leur destination vers la France [p4f], vers l'Etranger [p4g] ;
- La distribution des tonnes expédiées selon le mode principal (routier, ferroviaire, rail-route, fluvial, maritime et aérien) [p5b1r à p5b6r].

Compte-tenu des valeurs manquantes de ces différentes variables sélectionnées, la base de données utilisée ne comporte pas l'ensemble des établissements enquêtés, seuls 2879 établissements ont été pris en compte dans l'analyse typologique. Ces établissements concernent 9316 envois. Du fait de valeurs absentes, 193 établissements ne sont pas pris en considération dans l'analyse.

Quatre typologies ont été testées : deux typologies réalisées à partir d'une analyse en composantes principales (ACP), ne prenant en compte que les variables quantitatives et deux à partir d'une analyse des correspondances multiples (ACM) permettant de traiter également les variables qualitatives. Les typologies sont ensuite réalisées par deux méthodes de classification appliquées aux coordonnées des établissements sur chacun des axes retenus. Après avoir testé deux méthodes différentes (classification selon la méthode des nuées dynamiques et classification hiérarchique selon la méthode de Ward), nous avons finalement retenu une typologie réalisée par analyse des correspondances multiples (ACM) et classification non hiérarchique, limitée à 10 classes. Les résultats des typologies non retenues sont indiqués dans l'Annexe 2 (§(5)1, p.178).

L'analyse des correspondances multiples (ACM) permet d'étudier la population des établissements qui sont décrits par des variables qualitatives ou par des variables quantitatives transformées. Les variables citées précédemment sont scindées en modalités ou classes d'effectifs égaux dans la mesure du possible.

Ainsi, les variables utilisées pour l'analyse des correspondances multiples sont les suivantes :

- Effectifs salariés (e3) répartie en 4 modalités correspondant aux quantiles :
 - *eff1* : nb sal. entre 0 et 30 ;
 - *eff2* : nb sal. entre 30 et 60 ;
 - *eff3* : nb sal. entre 60 et 150 ;
 - *eff4* : nb sal. 150 et plus.
- Nombre annuel d'envois (p2r), répartie en 4 modalités correspondant aux quantiles :
 - *val1* : 1-1200 ;
 - *val2* : 1200-3900 ;
 - *val3* : 3900-13120 ;
 - *val4* : 13120 et plus.
- Répartition géographique des envois (zonexp) en 4 modalités :
 - *etr* : ceux dont 50% ou plus des expéditions sont à destination de l'étranger ;
 - *reg* : ceux dont 50% ou plus des expéditions sont à destination de la région ;
 - *rest_fr* : le reste ;

- *rnr* : correspond aux non réponses.
- Compte propre *cp* correspond à la réponse oui ou non de la variable p15a
- Répartition des envois selon leurs poids en [p3] 4 modalités :
 - *i30kg* pour inférieur à 30kg : p3a supérieur ou égal à 40% ;
 - *s30kg* pour un poids compris entre 30 kg et 300kg : p3b supérieur ou égal à 40% ;
 - *s300kg* pour compris entre 300kg et 3t : p3c supérieur ou égal à 40% ;
 - *s3t* pour sup : p3d, p3e, p3f ou (p3d+p3e+p3f) supérieur ou égal à 40%.
- Utilisation des modes en 2 modalités
 - *rtes* pour ceux qui utilisent la route à 100% ;
 - *++mo* pour ceux qui utilisent d'autres modes en plus de la route.

L'ACM permet de réaliser une typologie basée sur la ressemblance. Deux établissements seront d'autant plus proches qu'ils possèdent un grand nombre de modalités en commun. L'observation porte également sur l'association entre modalités : par exemple, la modalité *etr* de la variable [zonexp] se retrouve souvent dans les établissements où l'on retrouve la modalité *++mo* de la variable sur le mode de transport (test du Khi-2).

C'est la procédure SAS corresp qui a été utilisée pour réaliser cette analyse. Dans la présente analyse nous n'avons pas cherché à expliquer un phénomène mais simplement à regrouper l'ensemble des établissements. C'est dans le choix des variables qui a précédé l'analyse que, comme indiqué précédemment, nous nous sommes efforcés de retenir les variables caractéristiques des volumes de transport et d'émissions.

De nouvelles variables sont fournies en sortie de la procédure, elles correspondent aux coordonnées des individus (établissements) et des variables dans un espace multidimensionnel. Cet espace est défini par des axes plus ou moins nombreux selon le nombre de variables ou la qualité de l'analyse. La qualité de l'explication du nuage de points sera fonction de la part d'inertie de ce nuage qui est expliquée par les axes (comme l'indique le tableau 19 ci-dessous).

Valeur singulière	Inertie principale	Khi-2	Pourcentage	Pourcent. cumulé	3 6 9 12 15
0.57745	0.33344	5519.8	13.34	13.34	*****
0.46590	0.21706	3593.3	8.68	22.02	*****
0.45725	0.20908	3461.1	8.36	30.38	*****
0.42488	0.18052	2988.4	7.22	37.60	*****
0.41853	0.17517	2899.8	7.01	44.61	*****
0.41324	0.17077	2826.9	6.83	51.44	*****
0.40732	0.16591	2746.5	6.64	58.08	*****
0.40228	0.16183	2678.9	6.47	64.55	*****
0.40111	0.16089	2663.3	6.44	70.99	*****
0.39697	0.15758	2608.6	6.30	77.29	*****
0.38495	0.14819	2453.1	5.93	83.22	*****
0.37201	0.13839	2291.0	5.54	88.75	*****
0.35165	0.12366	2047.0	4.95	93.70	*****
0.29002	0.08411	1392.4	3.36	97.06	*****
0.27092	0.07340	1215.0	2.94	100.00	*****
Total	2.50000	41385.0	100.00		

Tableau 19 : Décomposition de l'inertie et du Khi-2

Valeur singulière	Inertie principale	Khi-2	Pourcentage	Pourcent. cumulé	3	6	9	12	15
0.57745	0.33344	5519.8	13.34	13.34	*****	*****	*****	*****	*****
0.46590	0.21706	3593.3	8.68	22.02	*****	*****	*****	*****	*****
0.45725	0.20908	3461.1	8.36	30.38	*****	*****	*****	*****	*****
0.42488	0.18052	2988.4	7.22	37.60	*****	*****	*****	*****	*****
0.41853	0.17517	2899.8	7.01	44.61	*****	*****	*****	*****	*****
0.41324	0.17077	2826.9	6.83	51.44	*****	*****	*****	*****	*****
0.40732	0.16591	2746.5	6.64	58.08	*****	*****	*****	*****	*****
0.40228	0.16183	2678.9	6.47	64.55	*****	*****	*****	*****	*****
0.40111	0.16089	2663.3	6.44	70.99	*****	*****	*****	*****	*****
0.39697	0.15758	2608.6	6.30	77.29	*****	*****	*****	*****	*****
0.38495	0.14819	2453.1	5.93	83.22	*****	*****	*****	*****	*****
0.37201	0.13839	2291.0	5.54	88.75	*****	*****	*****	*****	*****
0.35165	0.12366	2047.0	4.95	93.70	*****	*****	*****	*****	*****
0.29002	0.08411	1392.4	3.36	97.06	*****	*****	*****	*****	*****
0.27092	0.07340	1215.0	2.94	100.00	*****	*****	*****	*****	*****
Total	2.50000	41385.0	100.00						

15 axes factoriels expliquent le nuage des établissements. Pour la classification nous utiliserons 6 axes, ce qui porte la part d'inertie expliquée à 51 %.

La typologie est alors réalisée par la méthode de classification des nuées dynamiques appliquée aux coordonnées des établissements sur chacun des axes retenus.

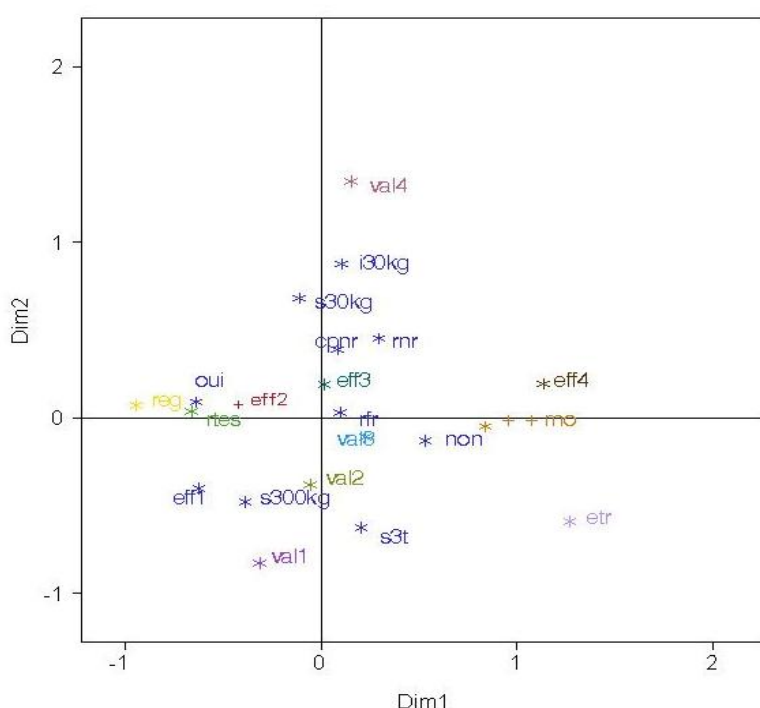


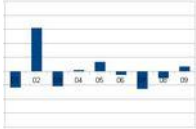

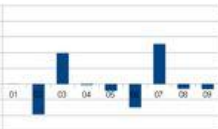
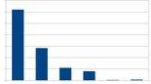
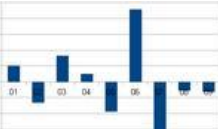
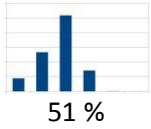
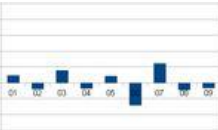
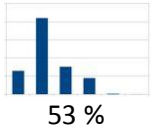
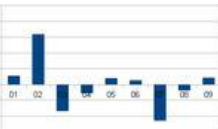
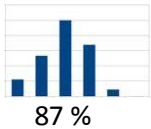
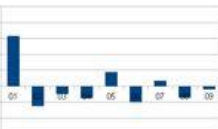
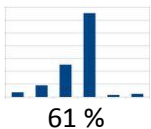
Figure 10 : Résultats de l'ACM

Les deux premiers axes expliquent 22% de l'inertie totale. L'axe 1 oppose les établissements d'effectifs importants, expédiant beaucoup vers l'étranger et utilisant d'autres modes que la route aux établissements expédiant une grande part de leurs envois en région et qui n'utilisent que la route ; l'axe 2 oppose les établissements expédiant des envois de faible poids et en grand nombre aux établissements expédiant en faible nombre des envois de poids souvent supérieur à 3t. L'analyse

fournit également les coordonnées des établissements sur chacun des axes retenus. La visualisation ne peut se faire à cause du nombre important de points (2879 établissements).

L'étape suivante consistera à regrouper les établissements dans des classes en fonction de leur positionnement sur les axes. Deux établissements proches dans l'espace seront regroupés dans un même type. La typologie est alors réalisée par la méthode de classification des nuées dynamiques appliquée aux coordonnées des établissements sur chacun des axes retenus.

Il s'agit de regrouper en un nombre limité de classes d'établissements de manière à ce que les établissements d'un même groupe se ressemblent du point de vue des variables utilisées pour l'analyse. La méthode est basée sur le nombre de classes à réaliser. Nous avons choisi de limiter à 10 le nombre de classes à constituer. A partir de 10 noyaux et par itérations successives, la procédure fournit un ensemble de classes en y regroupant les établissements les plus proches. Les procédures SAS *cluster* et *fastclus* ont été utilisées pour définir les classes à partir des coordonnées issues de l'ACM (Jambu, 1989). Quelques caractéristiques de ces classes sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Type	Valeurs médianes			Zone d'expédition des tonnages ⁽¹⁾	Part d'établissements n'utilisant que la route ⁽²⁾	Part d'étab ayant un parc propre ⁽³⁾	Représentativité comparée avec la référence échantillon global (1 ligne=5%) ⁽⁴⁾	Répartition des envois du type selon le poids ⁽⁵⁾
	Tonnages annuels	Nombre d'envois annuels	Effectifs salariés					
1	3000	1200	19	Région 80% Reste 16% France Etranger 4%	100%	75%	 +15 % secteur2	 47%<300kg
2	8780	23746	380	Région 19% Reste 48% France Etranger 33%	7%	18%	 +9 % secteur3 +12 % secteur7	 81%<300kg
3	1250	750	50	Région 10% Reste 67% France Etranger 23%	52%	31%	 +22 % secteur 6	 51 % entre 300kg et 3t
4	3070	2700	80	Région 25% Reste 61% France Etranger 14%	46%	25%	 +14 % Industrie	 53 % entre 30kg et 300kg
5	20000	4550	54	Région 83% Reste 15% France Etranger 2%	90%	86%	 	 87 % entre 30kg et 30t
6	23500	3500	200	Région 14% Reste 36% France Etranger 50%	14%	22%	 +15 % secteur 1	 61 % entre 3t et 30t

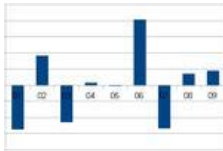
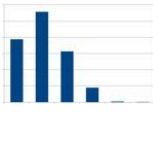
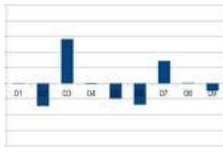
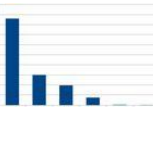
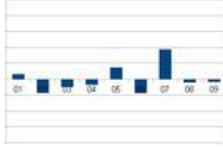
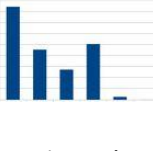

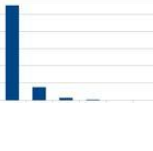
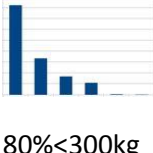
Type	Valeurs médianes			Zone d'expédition des tonnages ⁽¹⁾	Part d'établissements n'utilisant que la route ⁽²⁾	Part d'étab ayant un parc propre ⁽³⁾	Représentativité comparée avec la référence échantillon global (1 ligne=5%) ⁽⁴⁾	Répartition des envois du type selon le poids ⁽⁵⁾
	Tonnages annuels	Nombre d'envois annuels	Effectifs salariés					
7	12800	29850	80	Région 82% Reste 15% France Etranger 3%	74%	90%	 +20 % secteur 6	 69%<300kg
8	230	480	19	Région 20% Reste 54% France Etranger 26%	67%	22%	 +14 % secteur 3	 60%<300kg
9	4700	4140	70	Région 1% Reste 83% France Etranger 16%	47%	25%	 +9 % secteur 7	 61%<300kg
10	1200	28830	50	Région 24% Reste 63% France Etranger 13%	75%	42%	 +28 % secteurs 4 et 8	 85%<300kg
Ensemble	4600	3905	62	Région 37% Reste 40% France Etranger 23%	56%	43%	Sec- % Sec- % teur teur '01 22,2 '06 6,8 '02 12,7 '07 20,0 '03 15,1 '08 4,4 '04 3,5 '09 3,3 '05 11,9	 80%<300kg

Tableau 20 : Caractéristiques de la typologie par ACM plus classification non hiérarchique en 10 types

- (1) répartition par zone des tonnages expédiés
- (2) pourcentage d'établissements n'utilisant que la route en mode principal pour les expéditions
- (3) pourcentage d'établissements ayant déclaré disposer d'un parc de véhicules routiers en propre ou en location longue durée
- (4) graphique visualisant la différence avec la situation de référence indiquée en dernière ligne du tableau. Le détail des secteurs est : 01=Industries(Ind) Biens intermédiaires ;02=Commerce de gros(CG) biens intermédiaires et récupération ;03=Ind biens de production ; 04=CG biens de production ; 05=Ind agro-alimentaires ; 06=CG biens agro-alimentaires ; 07=Ind biens de consommation ; 08=VPC et CG biens de consommation ; 09=entrepôts
- (5) de la gauche à la droite, ce graphique visualise les envois expédiés par tranche de poids dans l'ordre suivant <30kg ; 30-300kg ; 300kg-3t ; 3-30t ; 30-300t ; >=300t

Ces résultats sont issus de l'observation de l'échantillon. Nous avons cependant constaté que la prise en compte de la pondération des établissements ne modifie pas les tendances constatées.

Le Tableau 21 ci-dessous présente les types de manière synthétique. Chaque type y est comparé à l'échantillon complet pris comme référence. Les signes '-' et '+' signifient respectivement sous et au-dessus de la référence (dernière ligne du tableau ci-dessus).

	Tonnages	Envois	Effectifss alariés	Zone d'expédi- tion= Région	Zone d'expédi- tion= reste France	Zone d'expédi- tion= Etranger	Utilisation de la route seule	Parc en compte propre	Secteurs sur- représentés	Poids (classe modale)
1	-	--	--	++	--	--	++	++	2	3t-30t
2	+	++	++	-	+	++	--	--	3 et 7	<30kg
3	--	--	-	--	++	+	-	-	6	300kg-3t
4	-	-	+	-	++	-	-	-	Industrie	30kg-300kg
5	++	+	-	++	--	--	++	++	2	300kg-3t
6	++	-	++	--	-	++	--	-	1	3t-30t
7	++	++	+	++	--	--	+	++	6 et 9	30kg-300kg
8	--	--	--	-	+	+	+	-	3	<30kg
9	+	+	+	--	++	-	-	-	Industrie	<30kg
10	--	++	-	-	++	-	+	-	4, 7 et 8	<30kg

Tableau 21 : Synthèse des caractéristiques de la typologie retenue

2.2.2. Prise en compte des envois incomplets dans la pondération

Dans la première partie de cette recherche, il n'a pas été possible de calculer les émissions de CO₂ de tous les envois. En particulier, pour les envois dont la destination se trouve hors d'Europe, les trajets hors d'Europe n'étaient pas toujours connus du fait de la définition de l'enquête : ces envois sont donc considérés comme incomplets et leurs émissions sont, elles aussi, incomplètes. Parmi nos établissements, certains n'ont donc aucun envoi complet où le CO₂ a pu être calculé et d'autres comportent certains envois complets avec CO₂ et des envois incomplets pour lesquels le CO₂ n'a pas pu être calculé.

Pour les premiers (établissements sans envoi complet avec CO₂), il convient de renforcer le coefficient de pondération des autres établissements de la strate de sondage. Le coefficient de pondération des établissements utilisés dans la strate [pondetab] est alors multiplié par le coefficient λ = somme des pondetab de l'ensemble des établissements de la strate / somme des pondetab des établissements de la strate avec envois complets et CO₂ calculé, pour donner un nouveau coefficient de pondération établissement : pondetab2. Le coefficient de pondération établissement étant utilisé dans calcul du coefficient envoi, ce dernier devra donc être lui aussi recalculé pour ces établissements avec le coefficient pondetab2 corrigé.

Pour les établissements dans lesquels le CO₂ a pu être calculé pour une partie seulement des envois, il convient de modifier les coefficients de pondération des envois complets avec CO₂, afin qu'ils représentent l'ensemble des envois de cet établissement. La méthode retenue consiste à corriger les coefficients de pondération des envois [pondenv] avec CO₂ par le coefficient δ = somme des pondenv de l'ensemble des envois de l'établissement / somme des pondenv des envois complets avec CO₂ calculé de cet établissement.

Enfin, si l'on ne peut connaître l'importance exacte de ces envois incomplets dans le total des émissions on peut s'en faire une idée en regardant ce que pèse la partie calculée du CO₂ de ces envois incomplets. Cette partie calculée des envois incomplets, qui est donc sous estimée, représente 3527 milliers de tonnes de CO₂ soit 7% du total (envois complets + incomplets : 45747 milliers de tonnes de CO₂). En ne traitant que les envois complets, nous sous-estimons de près de 10% les émissions de CO₂ du puits à la roue.

2.2.3. *Calcul du niveau moyen d'émissions d'un établissement par type*

Pour chaque type d'établissements ainsi obtenu nous calculons alors (cf. tableau 2 ci-dessous):

- Les émissions totales du transport comme la somme des émissions des envois de ce type pondérée par les coefficients de redressement des envois ;
- Les émissions moyennes d'un établissement de ce type, en divisant les émissions totales de la classe par la population des établissements (somme des coefficients de pondération des établissements).

Pour apprécier la dispersion de ces estimateurs selon les types, nous avons calculé pour chaque type, le rapport entre l'estimateur des émissions totales de ce type et l'estimateur du type le moins émetteur (ratio 1 dans le tableau 2 ci-dessous) d'une part et, d'autre part, l'estimateur des émissions moyennes par établissement de ce type aux émissions moyennes par établissement du type le moins émetteur (ratio 2). Bien que cette typologie ait été construite sans variable de CO₂, il apparaît que les types d'établissements ont des niveaux d'émissions très variables. Le type 2 est le plus gros émetteur tant par le total des émissions de la classe que par le niveau moyen d'émissions par établissement : selon cette estimation un établissement de ce type émet en moyenne 56 fois plus qu'un établissement du type 8. En revanche les différents types ne se différencient pas tous par leur niveau moyen d'émissions par établissement : avant le calcul de la précision de ces estimateurs, certains types (5 et 9 ou bien 7 et 10) semblent ainsi avoir des niveaux d'émissions annuels proches.

Tableau 22 : Emissions de CO₂ par type d'établissements

N° de type	Nombre d'établissements observés	Nombre d'établissements redressés (Population d'établissements)	Emissions totales du type (milliers de tonnes de CO ₂ WW)	Ratio 1	Emissions moyenne / établissement (tonnes de CO ₂ WW)	Ratio 2
0* (hors type)	120	1 869	1 970	1,5	1054	13,3
1	287	13 731	1 089	1	79	1
2	265	2 228	10 614	9,7	4 764	60,3
3	227	4 999	1 261	1,2	252	3,2
4	399	7 260	4 632	4,3	638	8,1
5	300	4 626	1 860	1,7	402	5,1
6	324	3 340	5 189	4,8	1 554	19,7
7	246	3 810	4 612	4,2	1 210	15,3
8	236	15 127	1306	1,2	86	1,1
9	261	4 897	2 421	2,2	494	6,2
10	214	7 335	8 031	7,4	1 095	13,8
TOTAL	2879	69 222	42 985		621	

* : Etablissements pour lesquels la typologie n'a pu être mise en œuvre (données manquantes)

2.2.4. Précision de l'estimateur du CO₂ par établissement ainsi obtenu

A l'intérieur de chaque classe d'établissements résultant de la typologie, l'estimateur du CO₂ par établissement a donc été calculé comme la somme pondérée des émissions des envois des établissements divisée par la somme pondérée des établissements. Pour calculer la précision de cet estimateur, dans chaque type nous tirons aléatoirement un ensemble important de sous-échantillons d'établissements et, sur chacun de ces sous-échantillons nous calculons un nouvel estimateur du CO₂ par établissement avec la même méthode. La distribution de ces indicateurs entre les différents sous-échantillons d'un même type nous permet alors de calculer la précision de l'estimation du CO₂ par établissement de ce type. La procédure SAS *surveyselect* permet de faire ce sondage de sous-échantillons et facilite cette méthode dite du bootstrap. La Figure 11 ci-dessous montre la distribution du CO₂ moyen par établissement ainsi estimé dans les différents sous échantillons du type 1. Les autres figures montrant la distribution des estimateurs pour chaque type d'établissements sont reproduites dans l'Annexe 2 (§3).

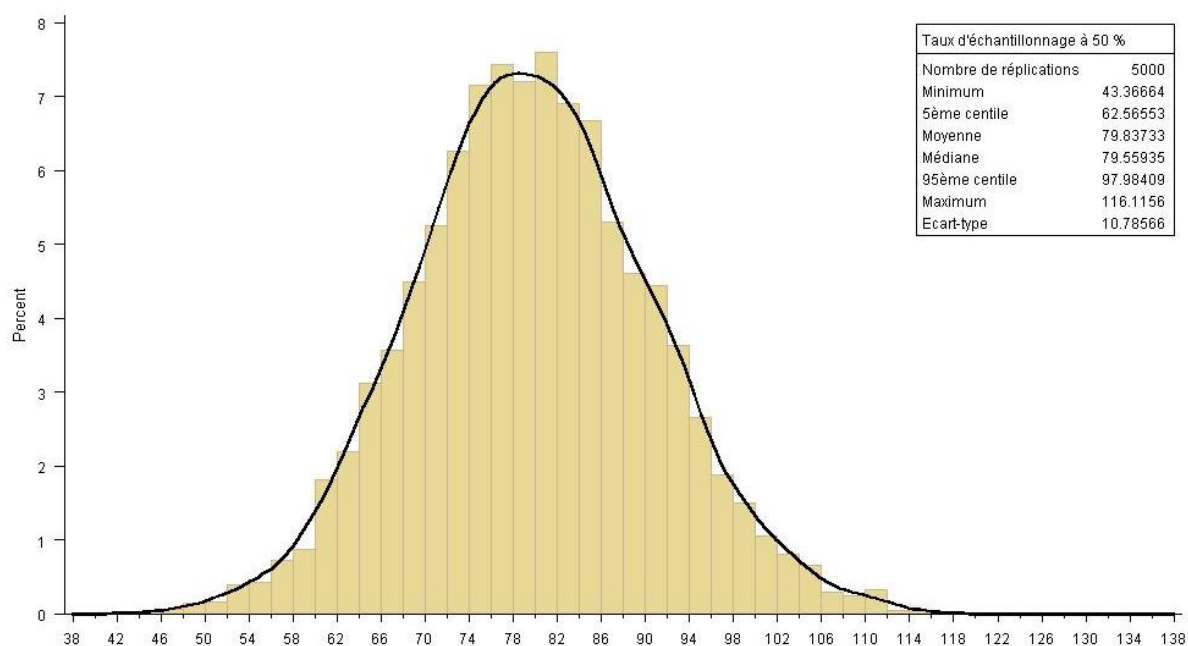


Figure 11 : Distribution des estimateurs du CO₂ par établissements du type 1, en kg de CO₂ / établissement

Cette représentation graphique de la distribution des sous-échantillons nous a aussi permis de repérer, dans la classe 1, une sous-population d'établissements ayant des émissions supérieures à celles des autres établissements du type (Figure 12).

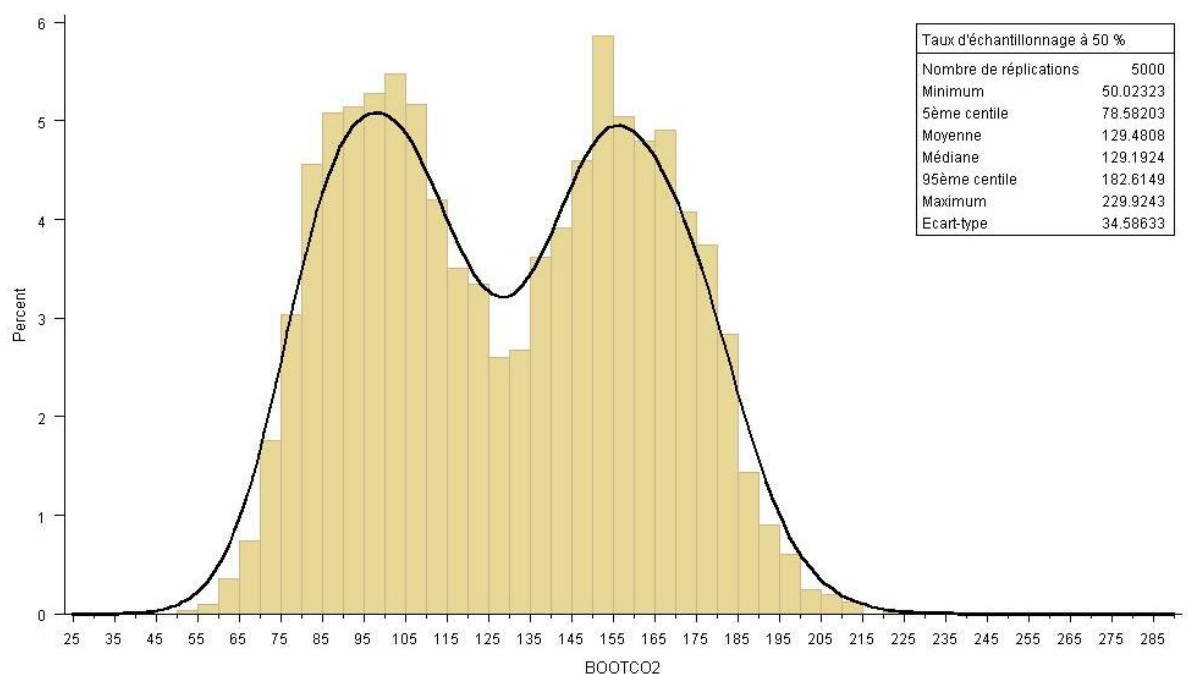


Figure 12 : Distribution des estimateurs du CO₂ par établissements du type 1, avant correction

Une analyse des établissements de cet ancien type 1 a montré que 22 établissements (7%) ont recours à différents modes de transport et, après la phase de modélisation qui sera présentée en deuxième partie, nous nous sommes aperçus que ces établissements ont aussi un niveau d'émissions nettement supérieur à celui des autres. En ne conservant que les entreprises qui n'utilisent que la route on obtient le graphe de la figure 11.

Tableau 23 : Comparaison de l'ancien type 1 et de ses deux parties (11 qui constitue le nouveau type 1 et 12 qui a été regroupé avec le type 7)

Type	Nb d'établis. enquêtés	Nb d'envois enquêtés	Population d'étab. pondérés	Emissions de CO ₂ pondérées (en tonnes)
11 (nouveau 1)	287	835	13 731	1 089 387
12 (regroupé avec 7)	22	84	763	778 414
Σ type 1(ancien)	309	919	14 494	1 867 801

Les valeurs médianes, moyennes et l'écart-type de ces estimateurs résultant du bootstrap, en tonnes de CO₂ par établissement et par an selon le type sont indiquées au Tableau 23 ainsi que les bornes de l'intervalle de confiance à 95 % (calculées à partir de la '*moyenne vraie*' indiquée au Tableau 24). Ces bornes sont indiquées dans le Tableau 24 et la Figure 13.

Tableau 24 : Résultats du bootstrap sur la précision des estimateurs de CO₂ par établissement selon le type

Type	Estimations du CO ₂ par établissement				Intervalle de confiance à 95%	
	médiane	moyenne		écart type	Valeur inf.	Valeur sup.
		Boostr	vraie			
1	79,56	79,8	79,8	10,79	110	152
2	4746	4770	4 763	916,9	3063	6657
3	251,8	254	252	60,05	139	374
4	639,2	636	638	125,7	404	896
5	398,9	403	402	87,7	239	583
6	1558	1570	1 554	290,6	1014	2154
7	1259	1277	1 210	252,3	840	1723
8	86,73	86,8	86,8	23,8	41	134
9	496,3	500	494	76,18	355	654
10	1087	1097	1095	279,7	562	1659
0 (hors type)	1021	1045	894	332,7	525	729
Ensemble	622,0	621,5	616	51,90	241	1546

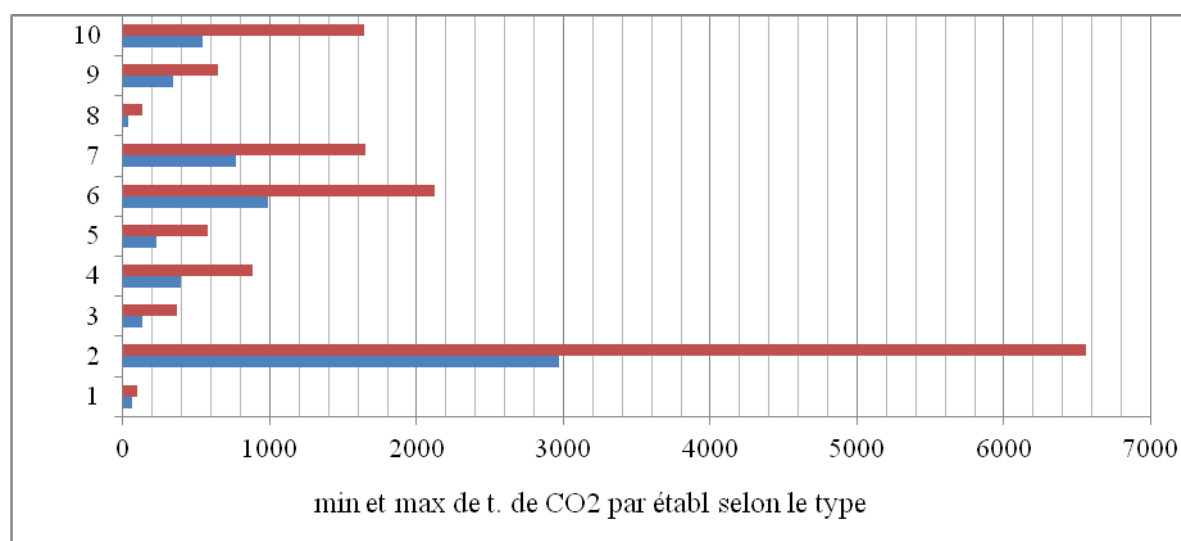


Figure 13 : Précision des estimateurs de CO₂ par type d'établissements résultant du bootstrap (en t.)

Il apparaît sur cette Figure 13 que seul le type 2, avec 4770 t de CO₂ par établissement et par an en moyenne et un intervalle de confiance compris entre 3000 et 6600 t, se différencie nettement des autres types pour le volume d'émissions. Les types 1 et 8, qui ont un faible niveau d'émission, sont très proches l'un de l'autre avec un tonnage moyen de respectivement 80 et 87 t et des intervalles de confiance qui se recouvrent très largement. Les intervalles de confiance des autres types se recouvrent : les types 3, 4, 5, et 9 d'une part et les types 6, 7 et 10 d'autre part.

2.2.5. Caractéristiques des différents types : ce qui explique le niveau d'émissions d'un établissement dans cette approche par typologie

Les **établissements des types 1 et 8** sont ceux qui émettent le moins avec respectivement 80 et 90 t de CO₂ par an en moyenne : ils sont petits (effectifs médian de 19 salariés dans les deux cas), expédient un faible tonnage annuel (respectivement 3000 et 230 t de tonnage médian) et une faible nombre d'envois (1200 et 480) et dans le cas du type 1, sur de faibles distances (80% à destination de leur région) en n'utilisant que la route (à 100%). Dans le type 1, près de 37% des envois pèsent entre 3 et 30 t alors que, dans le type 8, 60% des envois sont inférieurs à 30 kg. Le commerce de gros représente 41% du type 1, alors que les établissements du type 8 sont à 83% industriels.

Viennent ensuite les établissements des **types 3** (250 t de CO₂ par an), **5** (400 t), **9** (500 t) et **4** (638 t) dont le niveau d'émissions est peu différent mais avec des raisons parfois très différentes. Le type 3 expédie peu d'envois (médiane 750), majoritairement entre 300 kg et 30 t (à 65%), en France hors de leur région (67%), le Commerce de Gros y atteint 47% dont 32% pour le seul CGBAA. Les établissements du type 5 sont assez proches de ceux du type 1 par le poids et la destination des envois, la part modale de la route et l'importance du parc propre. Cependant, ils sont plus grands (effectif médian de 55 salariés contre 19 dans le type 1) et expédient beaucoup plus (20 000 tonnes contre 1200) et plus souvent (nombre d'envois médian de 4550 contre 1200 dans le type 1). Les établissements du type 9 expédient surtout des lots (54% entre 300 kg et 30 t) ; une majorité utilise plusieurs modes (53%), pour des envois en France et hors région à 83%. Ceux du type 4 sont proches du type 9 avec un tonnage annuel et un nombre d'envois plus faibles, le secteur industriel représente

une part importante des établissements (81%), le CGBAA¹² représente une part faible des établissements de ce type (2,26%).

Avec les types 10 (1100 t de CO₂ par an), 7 (1200 t) et 6 (1600 t) nous entrons dans les catégories des gros émetteurs. Les établissements du **type 10** émettent de nombreux envois (médiane à 28 830), souvent de faible poids (85% inférieurs à 30 kg) essentiellement en France et même en région (54%). La VPC et le commerce de gros des biens de consommation y atteignent 21%. Ceux du **type 7** émettent aussi de nombreux envois (médiane à 29 850), majoritairement en région (82%), %. dont 92% sont inférieurs à 3 tonnes ; ils possèdent un parc en compte propre à 90% et le commerce de gros représentent une forte proportion des établissements du type (56%) dont 30% sont des établissements de commerces de gros de biens agro-alimentaires. Le **type 6** comprend des établissements qui expédient beaucoup à l'étranger (50%), ces établissements ont recours à plusieurs modes (86% des tonnages expédiés). Ces envois lourds et expédiés majoritairement à l'étranger correspondent relativement bien au profil de l'industrie de biens de production qui compte pour 38% des établissements de ce type.

Enfin, le type 2 correspond à l'ensemble le plus émetteur de CO₂ pour ses expéditions (4800 t.). Ses caractéristiques ressemblent à celles des établissements du type 6 : 50% qui expédient à l'étranger, 93% en utilisant plusieurs modes et ce sont à 87% des établissements industriels. A la différence des établissements du type 6, les établissements du type 2 sont plus importants : nombre d'envois médian 23746 contre 3500 pour le type 6 et tonnage annuel médian 23 500 contre 8 779.

On constate que les effectifs salariés d'une part, le nombre d'envois et le tonnage annuel des envois d'autre part, permettent assez bien de reconstituer l'ordre croissant des émissions de CO₂, à l'exception de la classe 10 qui regroupe à elle seule 38% de la V.P.C. (nombre important de colis pour un effectif réduit et un tonnage faible).

2.3.Approche par modélisation des émissions

Nous cherchons à développer et calibrer un modèle reliant le CO₂ émis par le transport aux caractéristiques du chargeur. Si l'on fait abstraction de l'estimation des niveaux d'émissions par type d'établissements qui viennent d'être calculés, le CO₂ émis durant le transport n'est connu pour l'instant qu'au niveau des envois, en résultat de la première partie de cette recherche. Différents modèles ont été testés pour expliquer le CO₂ d'un envoi par les variables caractéristiques de l'établissement chargeur. Dans la mesure où seules les caractéristiques du chargeur sont utilisées ici comme variables explicatives du niveau d'émission, un tel modèle permet d'estimer les émissions moyennes d'un envoi de ce chargeur. En multipliant ce niveau moyen d'émission par le nombre d'envois de cet établissement, on obtient une estimation de l'ensemble des émissions transport de cet établissement. En pratique, le niveau d'émission unitaire que nous avons modélisé n'est pas le niveau par envoi mais le niveau par tonne.

2.3.1. Variable à expliquer : le CO₂ par tonne de l'envoi

¹² Commerces de gros de biens agro-alimentaires.

Nous cherchons à estimer un niveau d'émission unitaire que nous pourrions ensuite multiplier par le nombre d'unités de l'établissement pour estimer le niveau d'émissions total de l'établissement. Les deux grandeurs qui sont connues au niveau de l'établissement et dont nous pouvons estimer le niveau d'émission unitaire sont le nombre d'envois et le tonnage. Les variables correspondantes (CO₂ par envoi et CO₂ par tonne) ont été testées dans le modèle avec différentes formes fonctionnelles : c'est la variable 'CO₂ par tonne', qui a été retenue.

Les variables explicatives potentielles sont uniquement les caractéristiques du chargeur, c'est-à-dire les variables 'pré-entretien' et les variables 'établissement' de la base ECHO, afin de pouvoir calculer un niveau moyen d'émission pour l'établissement, indépendamment des caractéristiques de l'envoi. Dans cet ensemble de plus de 300 variables disponibles au niveau établissement, un compromis a été recherché entre les variables explicatives et celles qui ne présentaient pas trop de valeurs manquantes : une quinzaine de variables se sont révélées explicatives tout en étant suffisamment renseignées ; les variables de classes ont été transformées en indicatrices. Ces 15 variables sont introduites dans un modèle de la forme $f_v(\text{kgCO}_2/\text{ton}) = \text{Constante} + \alpha_i * f_{vi}(\text{variable}_i)$, sur le fichier des envois pondérés. Les résultats de ce modèle sur l'ensemble des observations sont reproduits dans l'Annexe 2 (§ 5) et commentés ci-dessous.

2.3.2. Estimation des paramètres du modèle sur les données envois

Différents types de modèles ont été testés, notamment des combinaisons de niveaux et de log. Le modèle retenu est de la forme :

$$\log(\text{CO}_2 \text{ par tonne}) = \alpha_1 * x_1 + \alpha_2 * x_2 + \alpha_3 * x_3 + \dots + \alpha_{15} * x_{15}$$

Il est basé sur 7573 envois observés dont le CO₂ a pu être calculé et qui disposaient de toutes les variables explicatives retenues ; le coefficient de corrélation obtenu est de 0,40 et 14 variables sont explicatives au seuil de 5%. (cf. Annexe 2, § 5). Ce sont les variables caractéristiques :

- de la distribution en pourcentage des envois de l'établissement selon leur poids [p3a à p3f],
- de la distribution des envois selon leur répartition géographique [p4a à p4d],
- du recours de cet établissement aux différents modes de transport [p5a2cor_reg à p5a6cor_reg]
- et de son 'secteur d'activité' [gecho01 à gecho09].

On sait que le poids du chargement, pour un véhicule donné, est une fonction croissante du poids des envois et qu'en moyenne les 'petits' envois ont donc un niveau d'émissions par tonne plus important que les gros, c'est-à-dire ont une moins bonne efficacité carbone. La distribution des envois selon leur poids est saisie dans l'enquête ECHO par les variables p3a à p3d (Pourcentage d'envois expédiés < 30 kg ; de 30 à < 300 kg ; de 300 kg à < 3 t ; de 3 t à < 30 t ; de 30 à < 300 t ; >= 300 t). Les variables retenues ici sont le pourcentage d'envois de moins de 30kg parmi l'ensemble des envois expédiés par l'établissement dans l'année, le log du pourcentage d'envois entre 30 et 300 kg, le log du pourcentage d'envois entre 300 kg et < 3 t ; Pour éviter la redondance de l'information (colinéarité des variables), la dernière classe (envois > 3 tonnes) est laissée comme référence, et son pourcentage n'est pas indiqué. Le fait que le premier pourcentage soit en niveau alors que les deux

suivants sont en log correspond à l'hypothèse d'une élasticité du CO₂ par tonne croissante quand le pourcentage augmente jusqu'à 30 kg (l'élasticité passe de $2 \cdot 10^{-5}$ à $6 \cdot 10^{-4}$) puis stable (indépendante de ce pourcentage) pour la part des envois de plus de 30 kg (elle vaut 0,27 entre 30 et 300 kg puis 0,13 entre 300 kg et 3 t. Ces variables sont significatives.

Pour un envoi donné, la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ correspondantes sont directement proportionnels à la distance, *caeteris paribus*. La répartition géographique des envois est retenue ici comme approximation de la distance. Elle est caractérisée par le pourcentage des tonnes expédiées dans la région de l'établissement, dans le reste de la France, dans le reste de l'Europe et dans le reste du monde. Les variables retenues sont le pourcentage des tonnes (en niveau) expédiées dans le reste de l'Europe (hors France), et le pourcentage d'envois expédiés dans le reste du monde (coefficient estimé de 0,024). La répartition des envois entre 'région de l'établissement' et 'reste de la France' n'a pas été conservée car de trop nombreux établissements ne l'avaient pas renseignée ; cet ensemble 'pourcentage des tonnes expédiées en France' n'a pas été retenu : il sert de référence. On note que les élasticités ne sont pas constantes mais liées à la valeur du pourcentage considéré, avec un coefficient deux fois plus important pour la destination 'reste du monde' (coefficient estimé de 0,024) que pour la destination 'Europe' (coefficient estimé de 0,011). Comme les variables de distribution des poids, les variables de distribution géographique sont significatives.

Le mode de transport est aussi un facteur important de l'efficacité carbone du transport. Dans la base ECHO, trois types de variables relatives à l'usage des différents modes de transport sont disponibles au niveau établissement : les p5a (*avez-vous eu recours à tel mode ?*), les p5b (*pourcentage des tonnes expédiées par tel mode*) et les 'tonfer, tonair, tonmode' calculées à partir des précédentes. Pour ne pas trop augmenter le nombre de variables manquantes et donc réduire le nombre d'observations utilisées, ce sont les variables p5a, indicatrices de recours aux modes, qui ont été utilisées. Les variables retenues dans le modèle caractérisent le recours aux modes ferroviaire (paramètre : -0,41) et aérien (paramètre : 0.64) : il y a donc un écart de 1 entre les logs des 'kgCO₂/tonne air' et kgCO₂/tonne fer', soit $\log \text{'kgCO}_2\text{parTonne air} / \text{kgCO}_2\text{Tonne fer} = 1$ soit encore $\text{'kgCO}_2\text{parTonne air} / \text{kgCO}_2\text{Tonne fer} = e = 2,71$. En moyenne les établissements qui déclarent avoir recours au transport aérien émettent 2,7 fois plus par tonne transportée que les établissements qui déclarent avoir recours au ferroviaire.

Pour caractériser l'activité de l'établissement, nous avons retenu un découpage en 9 secteurs ; définis à partir des codes INSEE d'activité principale exercée (APE). Les activités ont été classées de façon à identifier les différents maillons de la chaîne de production : les industries de biens intermédiaires, de biens de production et de biens de consommation, les commerces de gros associés à chacun des types de biens et enfin, les entrepôts. Cette définition des groupes d'activité avait déjà été entreprise lors de la précédente enquête chargeur de 1988 (Guilbault, 1994). Pour l'enquête ECHO de 2004, les groupes d'activité précédemment définis ont été affinés. On trouvera en annexe 2 (§4) les regroupements de code INSEE qui donnent nos 9 groupes d'activités. Huit indicatrices ont été construites sur les huit premiers secteurs, le dernier secteur (09 : entrepôts) servant de référence. On note (cf. annexe 2 (§5) qui reproduit les résultats détaillés de l'estimation par SAS des paramètres du modèle) que :

- 2 secteurs ont un coefficient négatif ('Commerce ce Gros des biens intermédiaires et récupération' -0,26 et 'Commerce de Gros des biens agro-alimentaires -0,28) ; Ces secteurs émettent moins de CO₂ que la moyenne des autres établissements de même caractéristiques.
- trois secteurs ont un coefficient compris entre 0,1 et 0,4 ('Industries Agro-alimentaires' 0,16 ; 'Industries des biens intermédiaires' 0,28 et 'Commerce de Gros des biens de production' 0,39) et
- 3 secteurs ont un coefficient supérieur à 0,6 ('Ventes par Correspondance et Commerce de Gros des biens de consommation' 0,61 ; 'Industries biens de production' 0,64 et 'Industries biens de consommation' 0,71). Ce sont les activités qui émettent le plus de CO₂ pour transporter leurs envois.

Ces coefficients des secteurs d'activité sont très significatifs, sauf pour le groupe 5 (Industries agro-alimentaires, où le t de Student vaut 1,30). Les établissements du groupe 7 (Industries biens de consommation 0,71) émettent en moyenne $\exp[0,71 - (-0,28)] = 2,7$ fois plus que ceux du groupe 6 (Commerce de Gros des biens agro-alimentaires -0,28).

2.3.3. Précision de l'estimateur

Comme indiqué dans le manuel SAS 'introduction to Regression Procedures', il existe deux types d'intervalles pour évaluer la précision de la valeur calculée par un modèle de régression linéaire : l'intervalle de confiance pour la valeur (moyenne) calculée et l'intervalle de prévision pour une observation individuelle. Les deux intervalles sont basés sur l'écart type (*mean squared error*) de la valeur simulée, en fonction de l'adaptation (fit) du modèle. La différence entre les deux vient du fait que, pour l'intervalle de confiance on cherche à estimer une valeur moyenne ; l'incertitude sur le résidu n'est alors pas prise en compte.

$$\text{LowerM} = \mathbf{x}_i' \hat{\boldsymbol{\beta}} - t_{\alpha/2, v} \sqrt{s^2 h_i / w_i}$$

$$\text{UpperM} = \mathbf{x}_i' \hat{\boldsymbol{\beta}} + t_{\alpha/2, v} \sqrt{s^2 h_i / w_i}$$

L'intervalle de prévision au contraire s'applique à une variable aléatoire (une nouvelle observation) et prend en compte l'incertitude sur le résidu. La formule est alors la suivante :

$$\text{LowerI} = \mathbf{x}_i' \hat{\boldsymbol{\beta}} - t_{\alpha/2, v} \sqrt{s^2 (1 + h_i) / w_i}$$

$$\text{UpperI} = \mathbf{x}_i' \hat{\boldsymbol{\beta}} + t_{\alpha/2, v} \sqrt{s^2 (1 + h_i) / w_i}$$

Nous présentons ci-dessous ces deux intervalles pour l'estimateur du CO₂ par tonne. Dans notre cas, l'intervalle de prévision est considérablement plus large que l'intervalle de confiance.

Intervalle de confiance du CO₂ par tonne

L'intervalle de confiance à 95% a été calculé par SAS en utilisant l'option '*lclm*'=borne inférieure '*uclm*'=borne supérieure). Dans la Figure 14 ci-dessous, chaque établissement est figuré par trois points qui ont pour abscisse le CO₂ estimé de l'établissement et, pour ordonnée, la même valeur de CO₂ de l'établissement, ainsi que les bornes inférieure et supérieure de l'intervalle de confiance de cette valeur estimée. Pour permettre une meilleure lisibilité, l'axe des y qui montre l'intervalle de confiance est en échelle logarithmique et la Figure 15 propose un agrandissement de la Figure 14 pour les établissements dont le CO₂/tonne est inférieure à une tonne.

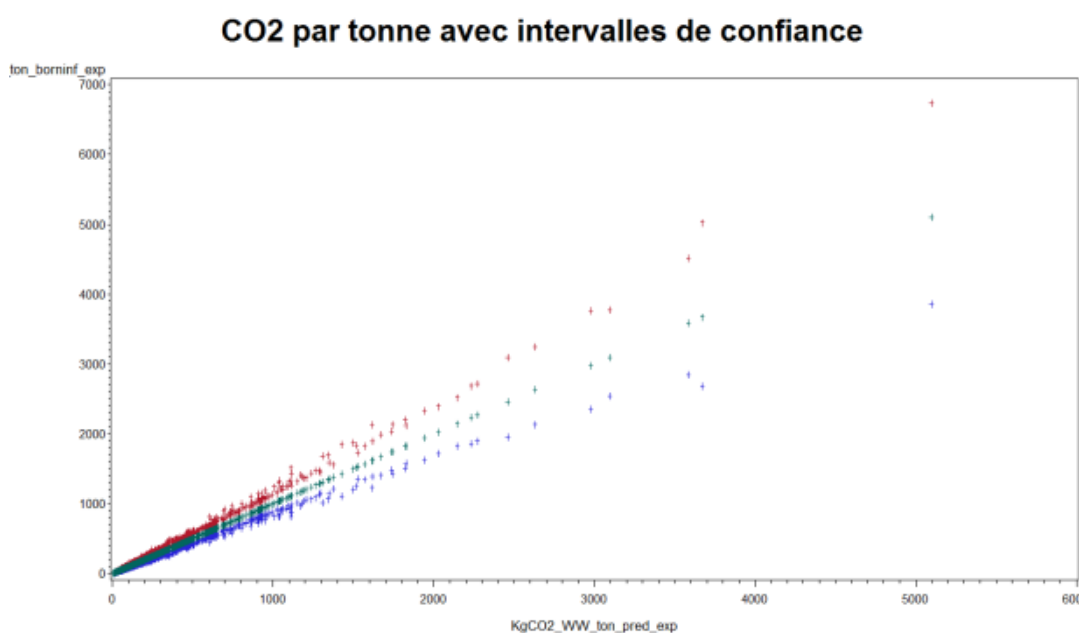


Figure 14 : Intervalle de confiance du CO₂ par tonne de chaque établissement

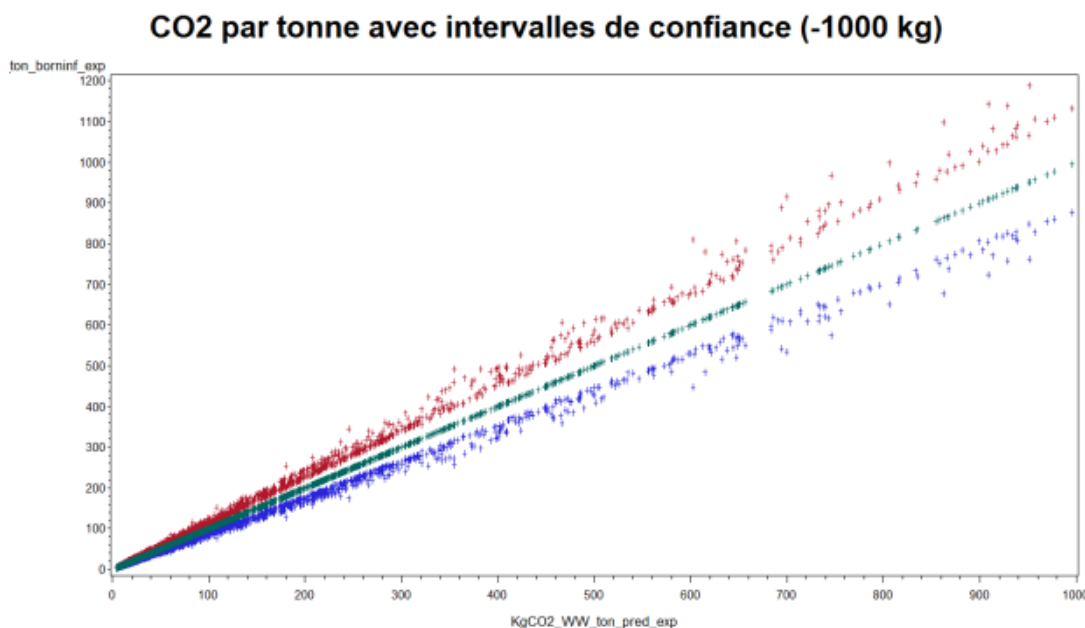


Figure 15 : Intervalle de confiance du CO₂ par tonne de chaque établissement (zoom de la Figure 14)

Le CO₂ par tonne transportée varie d'une dizaine de kilogrammes à quelques 3 tonnes avec une grande majorité en dessous d'une tonne. Les bornes de l'intervalle de confiance sont d'environ 20% en dessus et en dessous de la valeur estimée. Cet intervalle de confiance varie d'un établissement à l'autre, mais cette variabilité est elle-même limitée : il y a donc une différence importante entre les établissements sur la gauche de la figure, qui émettent moins de 100 kg par tonne transportée et les établissements de droite, qui émettent plus de 700 kg par tonne.

Intervalle de prévision du CO₂ par tonne

Dans la Figure 16 et la Figure 17 ci-dessous, les intervalles de confiance ont été remplacés par les intervalles de prévision. Chaque établissement y est donc figuré par trois points qui ont pour abscisse le CO₂ estimé de l'établissement et, pour ordonnée, la même valeur de CO₂ de l'établissement, ainsi que les bornes inférieure et supérieure de l'intervalle de prévision de cette valeur estimée. Pour une meilleure lisibilité, dans la Figure 17 ce sont les deux axes qui ont été mis en échelle logarithmique.

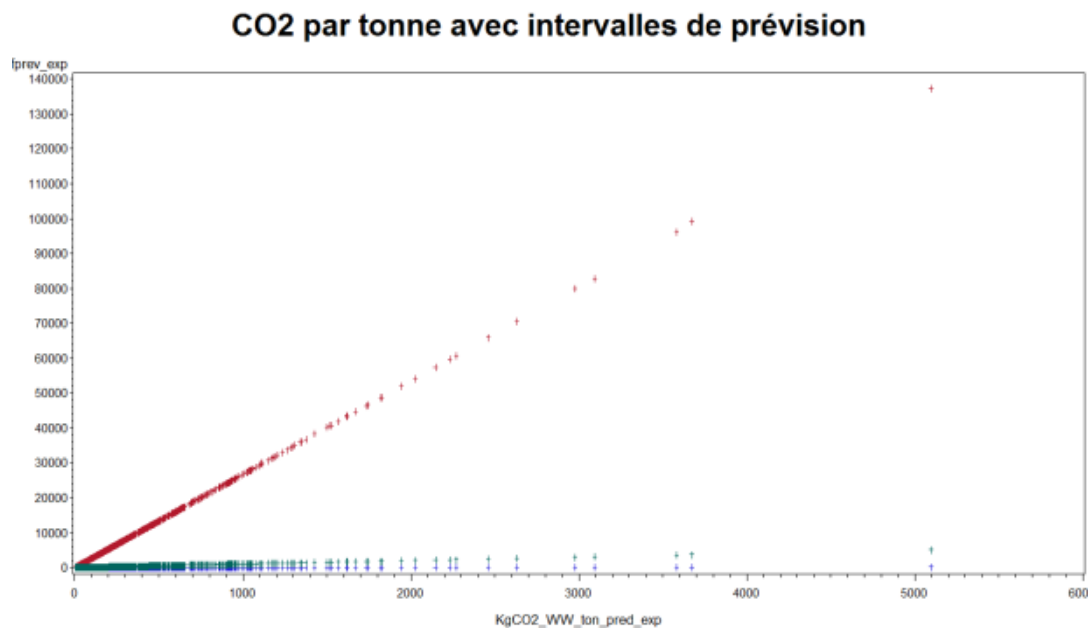


Figure 16 : Intervalle de prévision du CO₂ par tonne de chaque établissement

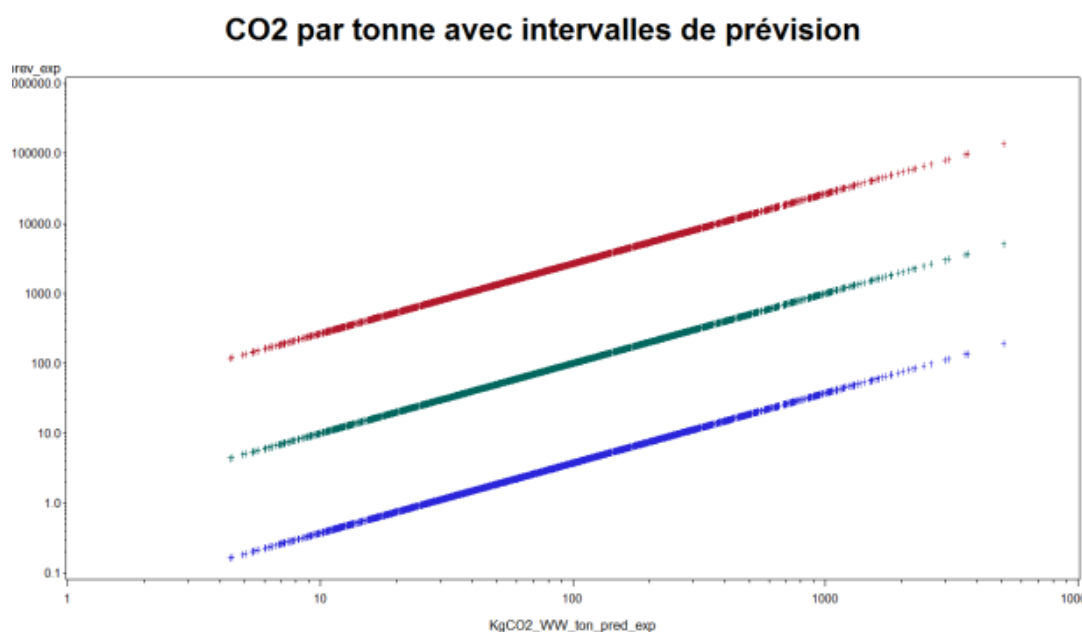


Figure 17 : Intervalle de prévision du CO₂ par tonne de chaque établissement (échelles log log)

Lorsque l'on considère non plus l'intervalle de confiance mais l'intervalle de prévision du CO₂ par tonne transportée ainsi estimé, la différence entre les établissements n'est plus significative. Sur la Figure 16, les intervalles se chevauchent entre les établissements les moins émetteurs à la tonne (à gauche) et les plus émetteurs (à droite).

Les émissions de CO₂ du transport de l'établissement

Le CO₂ par établissement est calculé comme le produit du CO₂ par tonne, estimé par établissement selon la méthode décrite ci-dessus, par le tonnage émis par cet établissement. Le tonnage émis de l'établissement est considéré comme une quantité connue et les limites inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance pour le CO₂ par établissement sont calculées comme le produit des limites de l'intervalle de confiance du CO₂ par tonne multiplié par le tonnage de l'établissement.

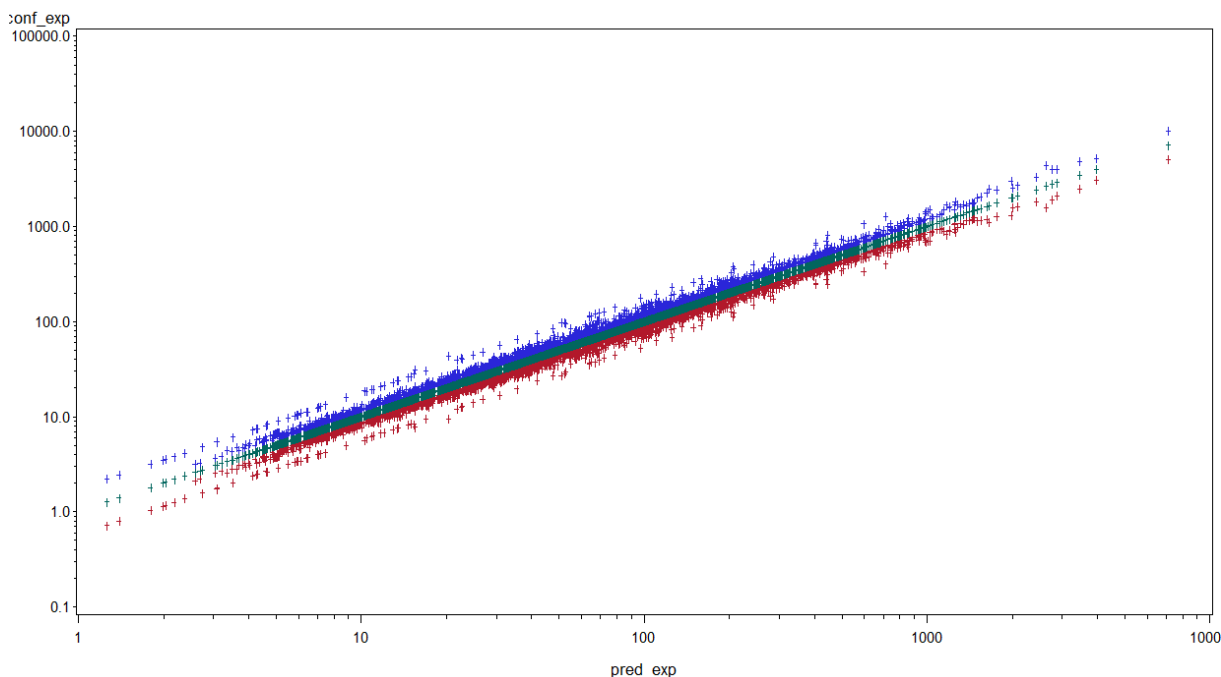


Figure 18 : Emissions de CO₂ en tonnes par établissement et intervalles de confiance

Le CO₂ émis par le transport des expéditions d'un établissement en un an varie entre une tonne (à gauche de la Figure 18) et plus de 100 000 tonnes à droite. Les intervalles de confiance y sont certes importants en valeur absolue mais, compte tenu de la dispersion de ces valeurs estimées du CO₂ par établissement, il est possible de définir des groupes d'établissements nettement différenciés du point de vue des émissions, où le chevauchement des intervalles de confiance sera faible.

Ayant estimé le niveau d'émissions par établissement nous pouvons calculer des émissions par secteur. Sans aller jusqu'à estimer les impacts macroéconomiques et les potentielles 'fuites carbone', ceci permettra d'apprécier la charge que représenterait une taxe carbone pour ces secteurs fortement consommateurs de transport.

2.4. Comparaison des résultats de ces deux approches

Pour chaque établissement nous disposons maintenant de deux estimateurs du CO₂ émis par le transport des envois, l'un établi par la typologie et l'autre par la modélisation. Il nous faut comparer ces deux estimateurs. Nous menons cette comparaison par type d'établissements, sur la population des établissements pour lesquels a pu être estimée un niveau de CO₂ par la typologie et par le modèle. Dans le tableau ci-dessous, nous calculons par type les quantités de CO₂ émises à partir du résultat de la modélisation (somme sur les établissements du CO₂ estimé par établissement, colonne A) puis les quantités de CO₂ émises par les envois (somme sur les envois du CO₂ estimé par

envoi, colonne B). En divisant ces résultats par la population des établissements on obtient, par type, un indicateur de CO₂ par établissement qui a été soit estimé par le modèle (colonne D) soit calculé à partir des CO₂ par envoi (colonne E).

Tableau 25 : Comparaison des niveaux de CO₂ par établissement par les deux approches

Type	Nbre Obs ⁽¹⁾	milliers de t. de CO ₂			Population des établis.	milliers de tonnes de CO ₂ par établissement	
		A (estimé)	B (calculé)	B/A		D (estimé par le modèle)	E (calculé)
1	277	1915	1047	0,55	13405	0,1429	0,0781
2	209	6350	8730	1,37	1875	3,3865	4,656
3	199	1229	1046	0,85	4506	0,2728	0,2321
4	357	2476	4343	1,75	6366	0,389	0,6822
5	293	2378	1755	0,74	4422	0,5378	0,3969
6	283	5125	4639	0,91	3106	1,65	1,4936
7	235	3030	4090	1,35	3660	0,828	1,1175
8	207	1587	1262	0,79	13657	0,1162	0,0924
9	110	586	1071	1,83	1849	0,3167	0,5792
10	170	8336	6620	0,79	6519	1,2788	1,0155
total	2340	33013	34603	1,05	55705	0,5382	0,5478

(1) Le nombre total d'observations correspond aux établissements ayant fait l'objet de l'analyse typologique et d'une modélisation. Le total du nombre d'établissements est donc inférieur à celui observé pour l'analyse typologique.

Sur l'ensemble de cette sous population du champ ECHO, le niveau de CO₂ moyen émis par un établissement pour le transport de ses expéditions est de 538 ou 548 t de CO₂ par an selon l'approche (alors qu'il est de 621 t pour l'ensemble de la population ECHO de 2879 obs.). Ce niveau d'émissions par établissement varie selon le type et selon l'approche mais les résultats par type, sans être identiques, sont très concordants, comme le souligne la Figure 19 ci-dessous.

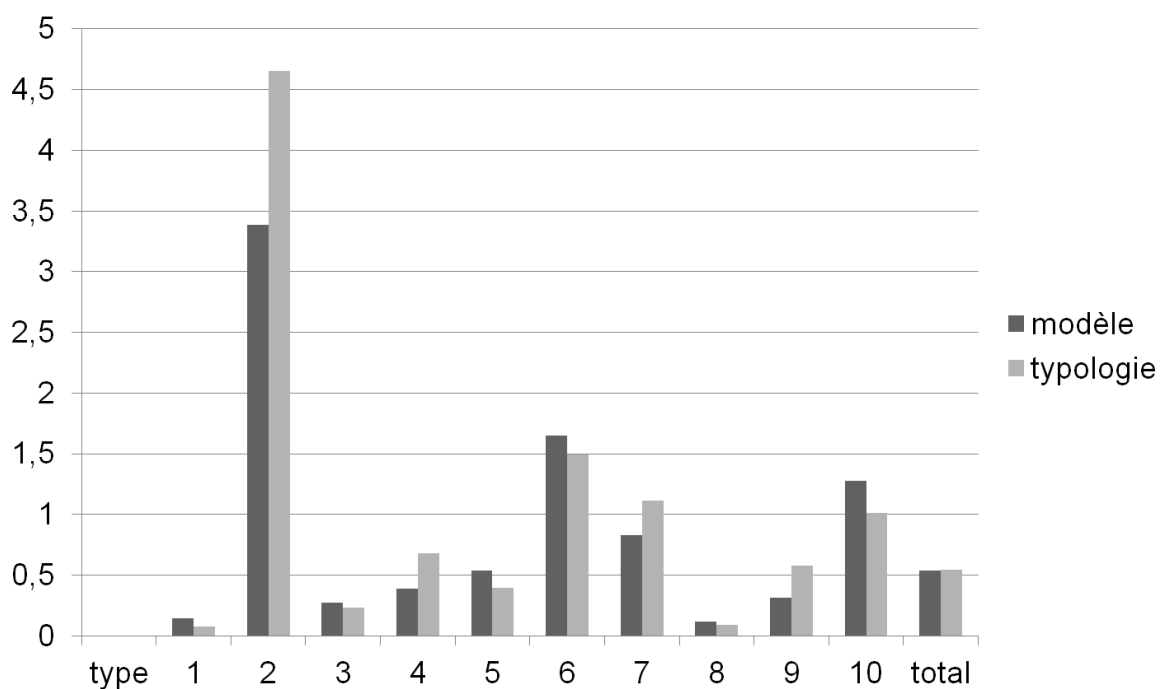


Figure 19 : Comparaison des émissions moyennes par type (t de CO₂ / étab.) selon les 2 approches

Pour analyser comment ce niveau de CO₂ par établissement varie selon le type nous avons calculé pour chaque approche, le ratio de l'indicateur de CO₂/étab de chaque type à celui du type qui présente le niveau le plus bas (Tableau 26).

Tableau 26 : Comparaison des niveaux de CO₂ par établissement par les deux approches

type	1000 t de CO ₂ / étab		Ratio au plus petit	
	estimé	calculé	estimé	calculé
1	0,1429	0,0781	1,23	1,00
2	3,3865	4,656	29,14	59,62
3	0,2728	0,2321	2,35	2,97
4	0,389	0,6822	3,35	8,74
5	0,5378	0,3969	4,63	5,08
6	1,65	1,4936	14,20	19,12
7	0,828	1,1175	7,13	14,31
8	0,1162	0,0924	1,00	1,18
9	0,3167	0,5792	2,73	7,42
10	1,2788	1,0155	11,00	13,00
Ensemble	0,5382	0,5478	4,63	7,01

Selon l'approche estimée par le modèle, le ratio varie de 1 pour le type 8 à 29 pour le type 2 et selon l'approche calcul par les envois et par type, le ratio varie de 1 pour le type 1 à 60 pour le type 2.

2.5. Niveaux d'émissions et efficacité carbone

Les types d'établissements correspondent à des niveaux d'émissions différents par établissement mais correspondent-ils pour autant à des efficacités différenciées en termes de carbone ? Le Tableau 27 ci-dessous apporte des éléments de réponse à cette question en rapportant la quantité d'émissions calculée par type à la population des établissements de ce type (colonne tonnes de CO₂/établissement), au nombre de salariés (tonnes de CO₂/salarié), au tonnage émis par les établissements (kg de CO₂ par tonne d'envoi) et enfin au tonnage kilométrique expédié par les établissements de ce type (kg de CO₂/tkm).

Tableau 27 : Niveau d'émissions global et unitaire selon le type d'établissement

Type	N Obs	Milliers de t. de CO ₂	Tonnes de CO ₂ par		Kg de CO ₂ par	
			établissement	salarié	tonne expédiée	par tkm
0	120	1970	1054	13,0	28,9	0,078
1	287	1089	79	4,3	11,8	0,110
2	265	10614	4 764	12,3	89,6	0,111
3	227	1261	252	4,4	61,0	0,102
4	399	4632	638	9,6	52,3	0,124
5	300	1860	402	6,9	18,5	0,082
6	324	5189	1 554	7,9	44,8	0,046
7	246	4612	1 210	16,5	24,0	0,136
8	236	1306	86	4,7	59,5	0,151
9	261	2421	494	6,1	38,6	0,089
10	214	8031	1 095	27,2	208,4	0,678
Total	2879	42985	621	10,2	46,7	0,108

Le CO₂ émis par un établissement est en moyenne, d'un peu plus de 620 t par an et les établissements du type 2, les plus gros émetteurs, avec 4700 t émettent 60 fois plus que ceux de la classe 1 (79 t par an).

Par salarié, le niveau moyen d'émission est de 16,5 tonnes de CO₂ sur l'ensemble des établissements et les salariés des établissements du type 10 sont ceux qui émettent le moins avec 4,3 t ; les plus gros contributeurs sont ceux du type 9 avec 27,2 t par employé et par an, soit un rapport de 1 à 6.

Les émissions par tonne expédiée (24 kg de CO₂ en moyenne), varient un peu plus entre les différents types ; le rapport est de 1 à 18 entre la classe 1 ou la quantité de CO₂ émise par tonne expédiée est la plus faible (12 kg) et la classe 10 ou elle est la plus forte (208 kg).

Enfin, les émissions par tkm varient de 46 g de CO₂ pour le type 6 à 678 g pour le type 10 (rapport de 1 à 15), avec une valeur moyenne de 140 g/tkm.

Ces quatre indicateurs du niveau d'émission de CO₂ sont complémentaires pour analyser les émissions du transport de marchandises. En effet, la vision des émissions globales par établissement « désavantage » les établissements avec de forts tonnages alors que leur efficacité carbone peut être

comparable à celle d'autres établissements voire meilleure dans certains cas. Les émissions unitaires (par tonne et tkm) permettent de minimiser cet effet de taille et donc de rendre plus facile la comparaison entre des établissements très hétérogènes tant en termes de taille d'envoi que de niveau d'émissions.

Ainsi, nous avons remarqué précédemment (§ 2.2.3) que le type d'établissements n° 2 constituait le groupe qui émettait au total la valeur la plus importante de CO₂ par établissement. Ce Tableau 27 permet de nuancer cette première analyse. En effet, si le nombre de tonnes de CO₂ est le plus élevé par établissement, lorsqu'on rapporte ces émissions à la tonne expédiée ou à la tkm, nous constatons que ces mêmes établissements ont des émissions unitaires similaires aux autres établissements voire même inférieures : 89 kg de CO₂ par tonne expédiée contre 208 pour les établissements du type 10. Ces différences s'expliquent essentiellement par le poids des envois, plus élevé pour les établissements du type 2 que ceux du type 10. Ceci tient à la nature des produits puisque dans le type 2, nous retrouvons essentiellement des industries tandis que dans le type 10, ce sont davantage des commerces de gros et plus particulièrement la vente par correspondance. Ces derniers sont particulièrement consommateurs de transport mais le type de produits et l'utilisation de leurs véhicules dans le cadre de tournées ne permettent pas d'atteindre un poids de chargement équivalent à celui observé dans les industries lourdes.

Le type 6 (des petits émetteurs par tkm) est celui des établissements qui exportent une forte proportion de leur production, par lots le plus souvent compris entre 3 et 30 t, alors que le type 10 (des gros émetteurs par tkm) expédie très majoritairement en France et principalement des envois de moins de 30 kg.

La Figure 21 ci-dessous a été obtenue en rangeant les types par ordre croissant d'émissions par établissement ; le premier point en partant de la gauche figure le type le moins émetteur (type 1) : l'ensemble des 13 405 établissements émettent 1047 t ; en ajoutant le type 8, on obtient le second point : 13405 + 13657 soit 27 062 établissements ont émis ensemble 1 047 + 1 262 = 2 309 t, etc. Le dernier point est obtenu en ajoutant le type 2 (le plus émetteur) soit 1875 établissements (3 % de la population considérée ici) mais 8 700 t de CO₂ soit un quart des émissions. Une politique qui viserait la moitié des chargeurs les plus émetteurs toucherait plus de 90 % des émissions.

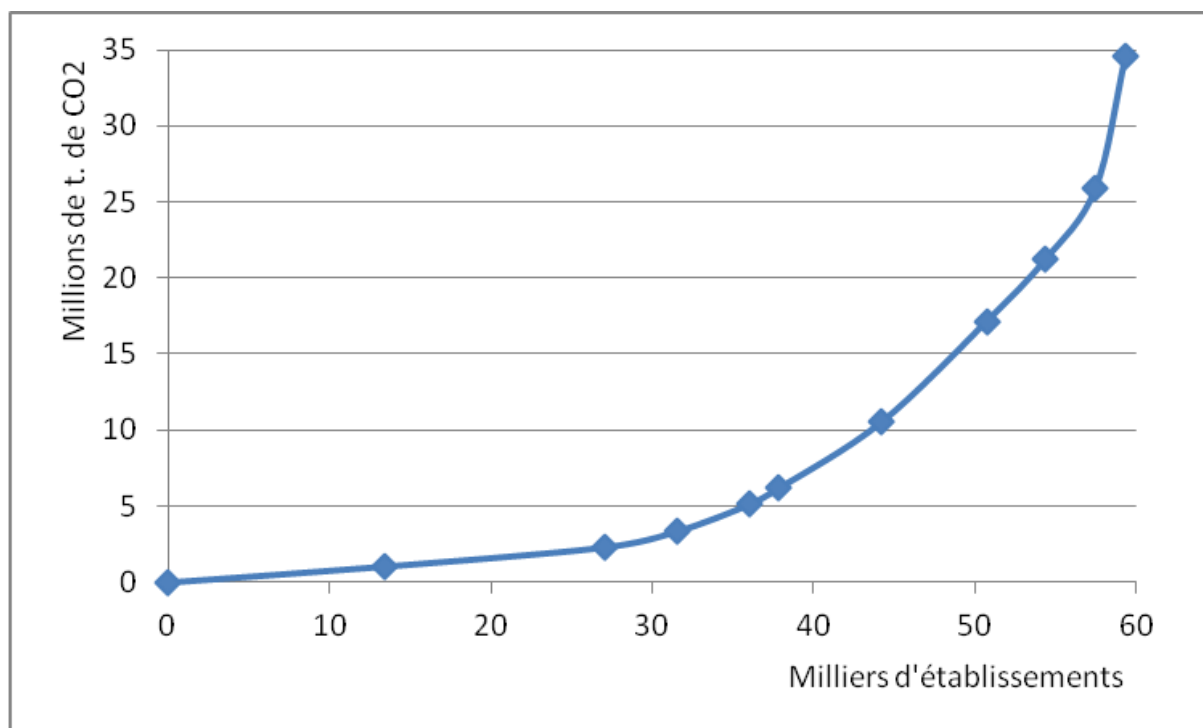


Figure 20 : CO₂ cumulé émis des établissements classés par ordre croissant d'émissions

2.6. Sensibilité des établissements chargeurs à la mise en place d'une fiscalité verte

Une taxe sur les émissions du transport, de type taxe carbone ou éco-tax, permet en théorie d'influer sur les comportements pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. C'est, du point de vue de l'économiste, un instrument efficace de couverture des coûts du changement climatique générés par les transports. Les émissions de CO₂ étant directement liées à la consommation de carburant, le prélèvement d'une taxe sur les carburants, modulée sur la base des quantités moyennes de CO₂ émises par la combustion de chaque type de carburant, est le moyen le plus direct qui soit d'influer sur ces émissions. Une modulation complémentaire de la taxe sur les véhicules permettrait de compenser le fait que les consommateurs achètent souvent un nouveau véhicule sans tenir aucun compte, ou presque, des économies de carburant qu'ils pourraient réaliser à l'avenir. Une telle taxe sur les carburants ne coûte en outre pas cher à gérer et existe déjà dans de nombreux pays. Elle devrait donc être l'arme idéale des stratégies de réduction des émissions de CO₂, mais elles sont déjà utilisées à une multitude d'autres fins allant du financement des travaux routiers à la simple collecte de recettes fiscales. Elles peuvent de ce fait difficilement passer pour des moyens de sauvegarde du climat et peuvent par conséquent être hautement impopulaires. De telles taxes, anciennes, ont pour objectif principal la collecte de recettes fiscales pour le budget public, et n'ont donc pas été pensées comme des taxes environnementales. La taxe carbone, en revanche, n'est pas conçue pour être une taxe de financement mais une taxe incitative. Pour qu'elle soit bien perçue comme telle, il faut que les recettes qu'elle engendre se substituent en totalité ou en grande majorité à d'autres recettes fiscales. Il sera probablement nécessaire d'en utiliser une partie. Il est parfois proposé qu'elles soient utilisées pour compenser l'effet de cette taxe carbone sur les ménages et les entreprises les plus touchées et les plus vulnérables et/ou pour financer la recherche en énergies de substitution ou processus de production moins émetteurs de carbone. Ces options,

bien qu'ayant un sens clair, ont le défaut de noyer ces recettes dans un ensemble plus large de crédits destinés au financement de la solidarité ou de la recherche et de faire ainsi perdre sa lisibilité. La redistribution peut prendre différentes formes : elle peut concerner les ménages ou les entreprises, être forfaitaire ou avoir une base plus complexe. Elle peut notamment s'effectuer sous forme de baisse d'un autre impôt ou de cotisations sociales (coût du travail), option qui a été très largement étudiée dans la littérature théorique aussi bien qu'empirique et a donné lieu à un grand espoir, celui du «double dividende » (réduction des émissions et relance de l'emploi).

La Finlande est le premier pays à avoir introduit une taxe carbone (en 1990, 1,20 €/tCO₂), transformée ultérieurement en taxe carbone-énergie pour atteindre aujourd'hui 20 €/t en 2012. Aucun mécanisme particulier de recyclage des recettes de la taxe n'a été prévu au moment de son introduction et les recettes sont reversées au budget général. Cependant, le gouvernement finlandais a annoncé une augmentation de la fiscalité sur l'énergie pour compenser la suppression des cotisations sociales employeurs décidée en janvier 2009. Le nouveau composant CO₂ est basé sur une approche de cycle de vie, plutôt que sur les émissions à la combustion seulement.

La Suède a introduit une taxe carbone en 1991, avec un taux de 23 euros/tCO₂. Dès 1993, les secteurs de l'industrie, de l'agriculture, de la forêt et de la pêche ont obtenu des exemptions généreuses et en 2007, la taxe carbone appliquée à ces secteurs, qui sont par ailleurs totalement exonérés de la taxe sur l'énergie, est 21 % de celle appliquée aux ménages, qui est de 97 euros/tCO₂. En outre, le montant de taxe carbone payé par une entreprise est plafonné. Enfin, depuis 2005, les installations assujetties à l'EU ETS sont remboursées de 85 % de la taxe qu'elles ont acquittée, et devraient dans le futur, être totalement exonérées. À partir de 2001, la Suède a mis en place une politique de *green tax shift*, consistant à compenser chaque année l'augmentation des taxes environnementales par une diminution des taxes sur le travail.

Au Danemark, la taxe carbone a été introduite en 1993 au taux de 13,30 euros/tCO₂, taux qui est parvenu en 2009 à 20,60 euros/tCO₂. Les secteurs industriels intensifs en énergie ne paient que 3,50 euros/t CO₂, les autres 12,50 euros/tCO₂. Le cas danois présente une particularité intéressante : la taxe est utilisée conjointement avec un système d'accords volontaires sur l'amélioration de l'efficacité énergétique dans l'industrie. Les entreprises qui signent l'accord reçoivent un remboursement de 11/45e de la taxe. L'accord peut être collectif, sectoriel par exemple, ou individuel. Dans le cadre du *Green Tax Package* adopté par le Parlement en 1995, les recettes de la taxe sont reversées à l'industrie à travers une baisse des cotisations sociales employeurs et des subventions aux améliorations de l'efficacité énergétique.

C'est en 1991 que la Norvège a mis en place une taxe carbone dont le taux atteignait 40 euros/tCO₂ pour l'essence en 2005 ; le transport maritime paient environ un tiers de ce taux et la pêche en est exemptée.

L'Allemagne a mis en place une réforme fiscale écologique le 1^{er} avril 1991. Elle n'a pas introduit de taxe carbone à proprement parler, mais depuis 1999 on assiste à une augmentation des taxes sur l'énergie à visée explicitement écologique. Les recettes sont utilisées pour réduire les cotisations de retraite des employeurs et des salariés. Une entreprise qui paie un montant de taxes sur l'énergie

supérieur à la réduction de cotisations sociales employeurs à laquelle elle a droit reçoit de la part de l'État le remboursement de la différence.

Pour la France, nous faisons ici l'hypothèse que, pour éviter l'effet récessif d'une telle taxe, les recettes publiques correspondantes vont être utilisées pour financer la sécurité sociale et les retraites afin de permettre une baisse des charges sociales et du coût de la main d'œuvre afin d'améliorer la compétitivité des salariés français et de favoriser l'emploi. Une telle 'fiscalité verte' préparerait ainsi la politique de transition énergétique, en conjuguant l'incitation à réduire les émissions et la relance de l'emploi. (Ces recettes pourraient aussi, d'autre part, être utilisées pour compenser la perte de pouvoir d'achat de certaines catégories de ménages mais ce n'est pas ici notre objet).

Concernant le transport de fret, une taxe carbone pèserait davantage sur les entreprises à forte intensité en transport et, si l'on retient l'hypothèse de fiscalité verte annoncée précédemment, les recettes correspondantes bénéficieraient principalement aux entreprises à forte intensité de main d'œuvre : les entreprises à forte intensité en carbone et à faible intensité en main d'œuvre seraient largement perdante et, à l'opposé, les entreprises à faible intensité en carbone et à forte intensité en main d'œuvre tels que les services, seraient fortement gagnante. Le nombre de tonnes émises par salarié est donc un bon indicateur de la sensibilité d'un établissement ou type d'établissement à une telle mesure.

Conclusion de la deuxième partie

Les deux approches que nous avons suivies pour estimer le niveau de CO2 émis par un établissement chargeur pour le transport de ses expéditions donnent des résultats raisonnablement convergents et permettent d'analyser les types d'activités et le nombre des emplois qui seraient concernés par différentes mesures politiques de réduction des émissions.

Une taxe carbone pèserait davantage sur les entreprises à forte intensité en transport et, si l'on retient l'hypothèse de fiscalité verte énoncée précédemment, les recettes correspondantes bénéficieraient principalement aux entreprises à forte intensité de main d'œuvre : les entreprises à forte intensité en carbone et à faible intensité en main d'œuvre seraient largement perdante et, à l'opposé, les entreprises à faible intensité en carbone et à forte intensité en main d'œuvre tels que les services, seraient fortement gagnante. Le nombre de tonnes émises par salarié est donc un bon indicateur de la sensibilité d'un établissement ou type d'établissement à une telle politique.

3. Analyse de l'intensité carbone des envois

L'analyse des principaux déterminants logistiques du niveau d'émissions de CO₂ par types d'activités mené dans la partie 2 a mis en évidence quelques variables clefs du niveau d'émissions telles que distance, comportement modal ou le tonnage par chargement. Cette troisième partie de la recherche est centrée sur la quantification du potentiel de réduction des émissions. Pour cela, nous cherchons à modéliser l'influence des principaux déterminants des émissions afin de distinguer dans ces déterminants, ceux qui relèvent des choix opérés dans le système de transport, par les chargeurs ou par les transporteurs, de ceux qui sont liés à la structure de la demande.

3.1. Volume d'émissions et potentiel de réduction

Pour identifier et comprendre les effets d'une mesure politique sur les différents secteurs d'activité, l'enquête ECHO réalisée en 2004 par l'INRETS se prête particulièrement à l'analyse des comportements logistiques. En effet, elle permet d'observer l'ensemble de la chaîne de transport d'un envoi entre un chargeur et un expéditeur¹³. Cette enquête se prête donc bien à analyser et modéliser les politiques qui visent à changer les comportements des chargeurs et transporteurs.

Il convient tout d'abord de rappeler que l'enquête ECHO ne couvre pas la totalité du transport de fret français ni la totalité de émissions de ce fret. Nous avons estimé dans la première partie de cette recherche, qu'au format Kyoto, ECHO ne couvre que 95% des émissions du fret comptabilisées par la CCTN (Tableau 28 ci-dessous).

Tableau 28 : Tonnes, tkm, énergie et CO₂, au format Kyoto dans ECHO et comparaison CTN

	Nb d'obs.	millions de tonnes		milliards de tkm		milliers de tep		millions de t CO ₂	
		ECHO	E/CTN	ECHO	E/CTN	ECHO	E/CTN	ECHO	E/CTN
Fer	369	81,4	0,88	32,0	0,95	168,4	0,86	0,12	nd
Fluvial	54	9,4	0,22	1,3	0,22	14,7	0,25	0,05	0,28
Route P lourds	14536	1017	0,50	202	1,07	10 457	1,13	32,8	1,12
Route VUL	2763	11,6	Nd	1,00	0,05	333	0,19	1,07	0,19
Total Route	17299	1029,0	0,50	203	0,97	10 790	0,98	33,8	0,97
Total terrestre	17722	1119,8	0,51	236,4	0,95	10 973	0,97	34,0	0,95

Pour les émissions du puits à la roue (WW), nous ne disposons pas de point de comparaison ; les valeurs que nous avons estimées à partir d'ECHO sont récapitulées dans le Tableau 29 ci-dessous.

¹³ Voir la première partie de ce rapport pour des informations plus détaillées.

Tableau 29 : Répartition par mode des émissions de CO₂ dans ECHO selon le format

Mode	Nb Obs	1000 t. CO ₂ WW (et %)	1000 t. CO ₂ Kyoto (et %)
Aérien	1243	3 016 (6,6)	205 (0,6)
Ferroviaire	380	283 (0,6)	123 (0,4)
Fluvial	59	169 (0,4)	46 (0,1)
Maritime	745	3 579 (7,8)	144 (0,4)
Routier CA	16554	34 234 (74,8)	30 085 (85,9)
Routier CP	1866	4 464 (9,8)	4 427 (12,6)
Tunnel sous la manche	48	2,8 (0,01)	0 (0,0))
Total ECHO	20895	45748 (100)	35030 (100)

(NB : Emissions de la base ECHO sommées sur les trajets ; ne concernent pas uniquement le territoire français)

La grande majorité des émissions des chargeurs français vient de la route : 85 % du volume émis au format WW et 99% au format Kyoto. Comme d'autre part les informations nécessaires au calcul des émissions étaient plus sommaires pour les modes non routiers, notamment le poids du chargement, c'est sur la route que nous focalisons notre attention.

On remarque dans le Tableau 29 que les émissions au format Kyoto sont légèrement supérieures à celles du tableau précédent. Ceci tient au fait que, dans le Tableau 28, seuls les envois complets sont pris en compte alors que, dans le Tableau 29 figurent tous les trajets, y compris ceux des envois incomplets.

3.1.1. Volumes d'émissions selon le niveau d'efficacité carbone

Nous avons vu que l'efficacité carbone du transport routier est extrêmement variable : de quelques grammes à plusieurs tonnes de CO₂/tkm ; il est donc important de repérer ces envois qui ont une faible efficacité carbone et d'apprécier leurs poids dans l'ensemble des émissions.

Mais, auparavant, tentons de fixer les ordres de grandeur de l'efficacité énergétique et carbone d'un transport routier de fret : un ensemble articulé de 25 tonnes de charge utile, quand il roule à pleine charge consomme en moyenne, selon le modèle Artémis, 35,9 litres/100 km (à une vitesse moyenne de 60km/h) soit 1,5 litres / 100 tkm. Avec un facteur d'émission WW de 3,07 kgCO₂/litre de gazole, ceci correspond à une émission de 1,10 kgCO₂ par km soit 45 g de CO₂/tkm. Cette valeur constitue la meilleure performance de la route : sauf exception, tout autre type de véhicule diesel ou tout taux de remplissage inférieur entraîne une augmentation de ce niveau d'émission unitaire. Le Tableau 30 ci-dessous indique comment varie la consommation de gazole et les niveaux d'émission par tkm selon le type de camion et le taux de remplissage.

Tableau 30 : Consommation et émission des poids lourds selon le taux de chargement

Charge utile (tonnes)	Taux de chargt (%)	Consommation de gazole		Emissions de CO ₂	
		Litres /100km	litres/100tkm	kgCO ₂ /km	gCO ₂ /tkm
1,0	50	8,7	17,4	0,27	534
	100	10,7	10,7	0,33	328
5,0	50	15,2	6,1	0,47	187
	100	16,9	3,4	0,52	104
8,4	50	19,3	4,6	0,59	141
	100	21,7	2,6	0,67	79
24,7	50	28,9	2,3	0,89	72
	100	35,9	1,5	1,10	45

Source : pour les consommations, Artemis (à 60 km/h) + estimation des auteurs pour la camionnette.

Selon ce tableau, un fonctionnement ‘normal’ du transport routier, avec un véhicule au moins à moitié plein en tonnage, devrait entraîner une émission maximum inférieure à 600 gCO₂/tkm, sans compter les retours à vide. Il est clair cependant que le CO₂/tkm peut monter beaucoup plus haut lorsque le taux de chargement diminue : il est infini pour un chargement nul. L’amélioration de l’efficacité carbone du transport passe donc en priorité par un meilleur taux de remplissage du véhicule, puis par le choix d’un véhicule plus grand lorsque la quantité de fret le permet. Le Tableau 31 ci-dessous indique quelle est, dans la base ECHO des envois, la répartition des émissions de CO₂ selon l’efficacité carbone de l’envoi.

Tableau 31 : Répartition des émissions de CO₂WW routier dans ECHO selon l’efficacité carbone de l’envoi

Classe efficacité carbone	Tonnes de CO ₂ pondérées	%
< 100 g CO ₂ / tkm	7 374	20%
de 100 à 150 g CO ₂ / tkm	2 777	8%
entre 150 et 200 g CO ₂ / tkm	1 387	4%
entre 200 et 300 g CO ₂ / tkm	3 275	9%
entre 300 et 400 g CO ₂ /tkm	1 173	3%
entre 400 et 600 g CO ₂ / tkm	2 985	8%
entre 600 et 1 000 g CO ₂ / tkm	3 588	10%
Supérieur à 1 000 g CO ₂ /tkm	14 322	39%

Ce tableau montre que, dans la base ECHO, un cinquième des émissions de CO₂ provient des envois qui ont une ‘bonne’ efficacité carbone (moins de 100 g de CO₂/tkm) mais plus de la moitié de ces émissions (57%) est le fait des envois qui ont une efficacité carbone ‘faible ou très faible’ (plus de 600 g de CO₂/tkm). Dans quelle mesure ces émissions correspondent-elles à de nombreux petits envois qui ont chacun une faible émission, donc un faible tonnage kilométrique, c'est-à-dire un faible poids d’envoi et une faible distance ? Les graphes suivants apportent quelques éclairages sur ces caractéristiques des envois qui ont une faible efficacité carbone.

3.1.2. Intensité carbone et poids de l’envoi

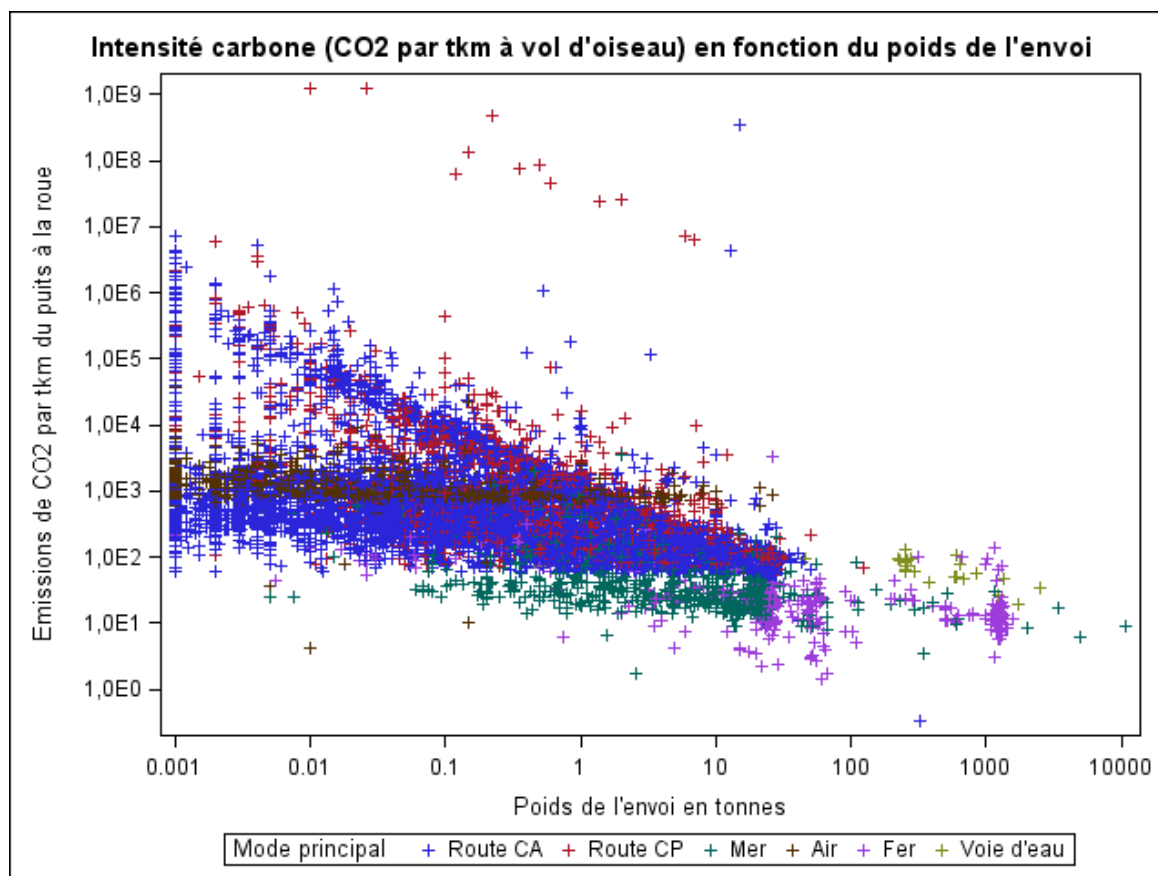


Figure 21 : Intensité carbone des envois en fonction de leurs poids

La Figure 21 montre une relation claire entre le poids de l'expédition (tonnes, en abscisse) et l'intensité carbone (gCO_2/tkm , en ordonnée). Cette relation est facile à comprendre quand l'envoi comprend un seul trajet : pour la route, un envoi de 25 t., transporté en semi-remorque, a une intensité carbone minimale, en-dessous de $50 \text{ gCO}_2/\text{tkm}$. Lorsque le poids de l'envoi diminue, l'intensité carbone ne change pas si le chargement du véhicule est complété à 25 t par ajout d'autres envois mais, s'il n'y a aucune consolidation, l'intensité carbone augmente jusqu'à l'infini pour un poids d'expédition proche de zéro. Pour l'air et le rail, le poids du chargement n'était pas connu dans ECHO et les valeurs indiquées sont donc des valeurs moyennes qui varient selon d'autres caractéristiques de l'expédition, notamment la destination et la distance.

Pour cette relation entre poids de l'envoi et efficacité carbone, la Figure 22 fait un zoom sur les envois de faible efficacité carbone ($> 500 \text{ gCO}_2/\text{tkm}$). Il apparaît que la grande majorité des envois dont l'intensité carbone est supérieure à $500 \text{ gCO}_2/\text{tkm}$, est d'un tonnage inférieur à une tonne. La consolidation des petits colis constitue donc un élément clef de l'efficacité carbone.

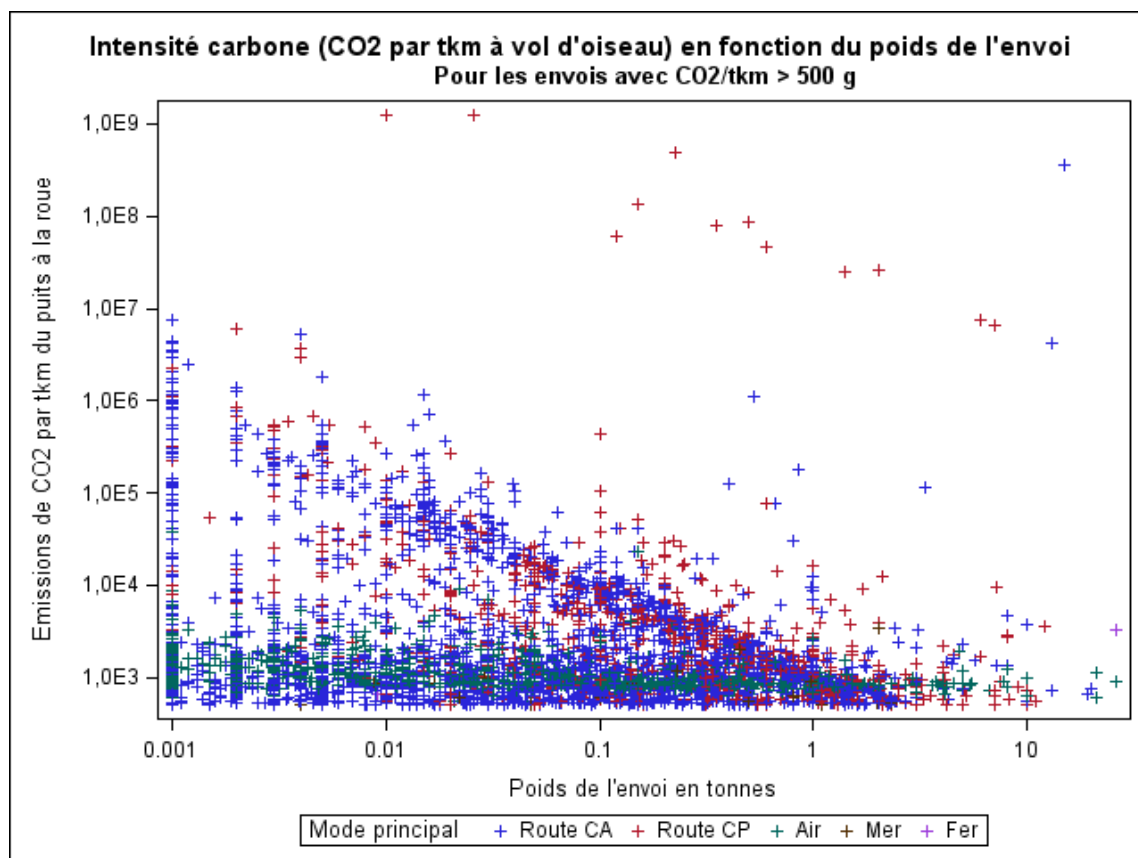


Figure 22 : Intensité carbone des envois de CO₂/tkm > 500 g selon leur poids

3.1.3. Intensité carbone et distance

La Figure 23 montre la relation entre intensité carbone et distance à vol d'oiseau de l'envoi. Ces deux caractéristiques semblent liées principalement par le choix du mode principal : les transports maritimes et fluviaux, efficaces en carbone, sont principalement utilisés sur de longues ou très longues distances. Pour la route, le transport en compte propre, généralement moins efficace que le compte d'autrui, est aussi utilisé pour des distances plus courtes en moyenne. Seul le transport aérien va contre cette tendance avec de fortes émissions pour de longues distances. Pour le transport routier en compte d'autrui, une meilleure optimisation du chargement lorsque la distance augmente contribue aussi à expliquer le lien entre l'intensité carbone et la distance.

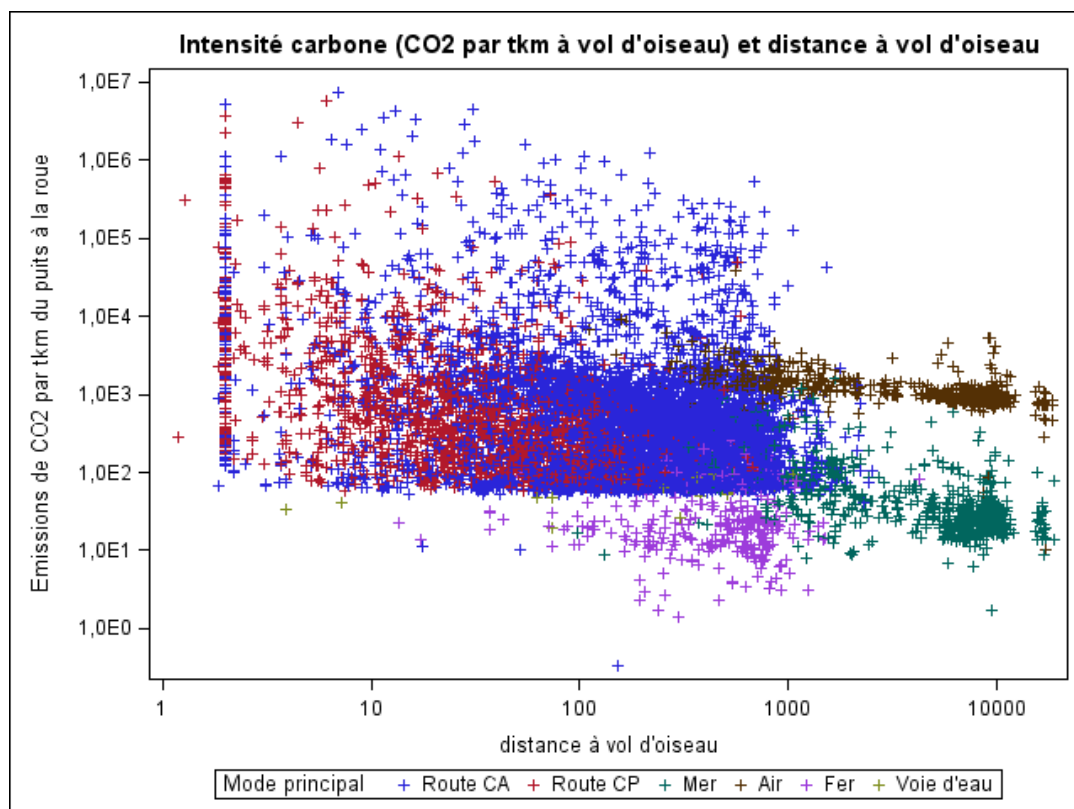


Figure 23 : Intensité carbone des envois selon leur distance à vol d'oiseau

La Figure 24 se concentre sur les envois ayant une faible efficacité carbone ($> 500 \text{ gCO}_2/\text{tkm}$). Une part importante de ces envois à faible efficacité carbone correspond aussi à de faibles distances ($< 100 \text{ km}$) en particulier parmi ceux qui ont la plus forte intensité carbone. La plupart d'entre eux relève probablement d'une approche urbaine mais il reste malgré tout un nombre important d'envois à plus de 100 km à vol d'oiseau qui ont des émissions supérieures à $500 \text{ gCO}_2/\text{tkm}$.

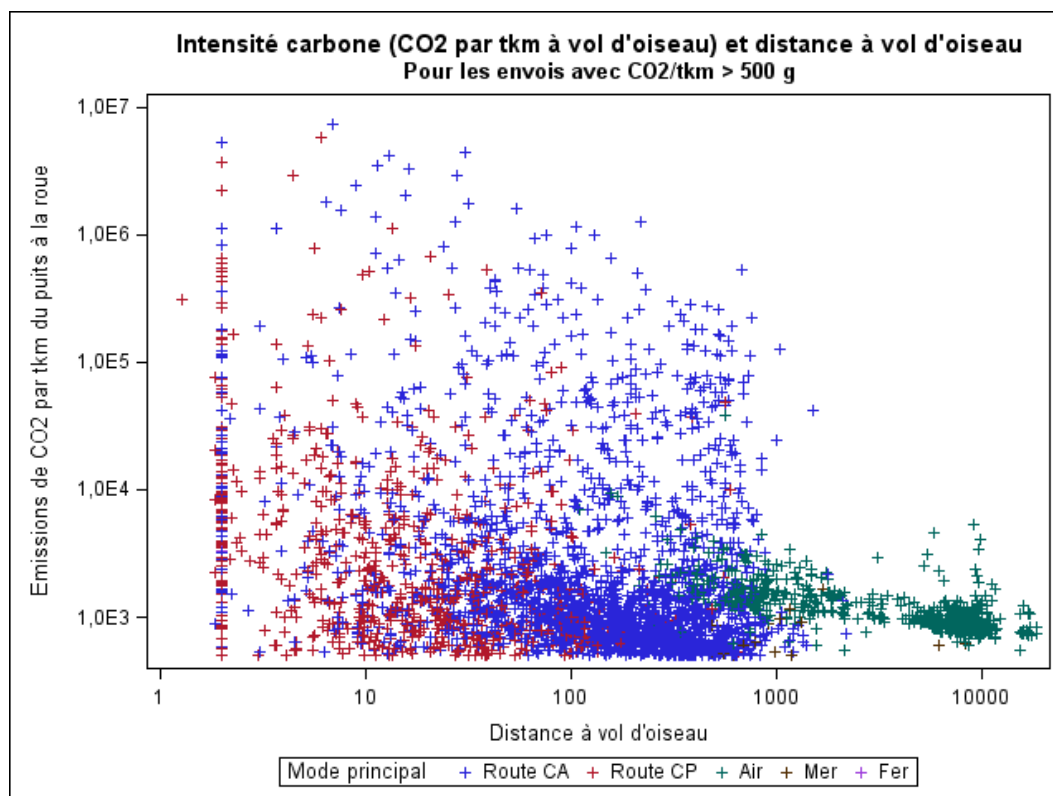


Figure 24 : Intensité carbone des envois > 500 g CO₂/tkm selon leur distance à vol d'oiseau

3.1.4. Intensité carbone et tonnage annuel expédié au même destinataire

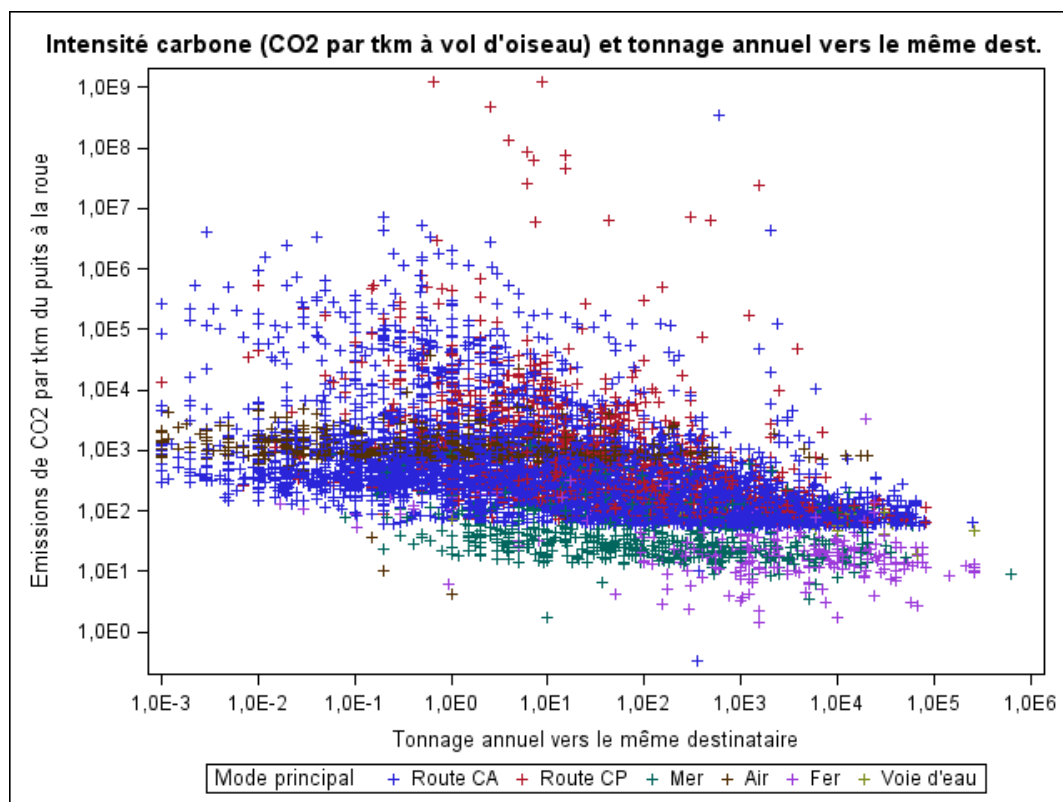


Figure 25 : Intensité carbone des envois selon le tonnage annuel expédié à ce destinataire

Cette variable mesurant le tonnage annuel expédié au même destinataire n'est pas indépendante du poids de l'envoi comme nous l'avons vu précédemment. Le lien entre cette variable et l'efficacité carbone de la Figure 25 apparaît comme le résultat du choix modal et de l'optimisation du chargement :

- Le choix modal parce que des modes efficaces ont une forte capacité et sont utilisés pour des tonnages annuels importants;
- L'optimisation de charge parce que plus importante est la quantité annuelle expédiée, plus il est facile d'optimiser le chargement du véhicule et plus l'efficacité carbone est grande.

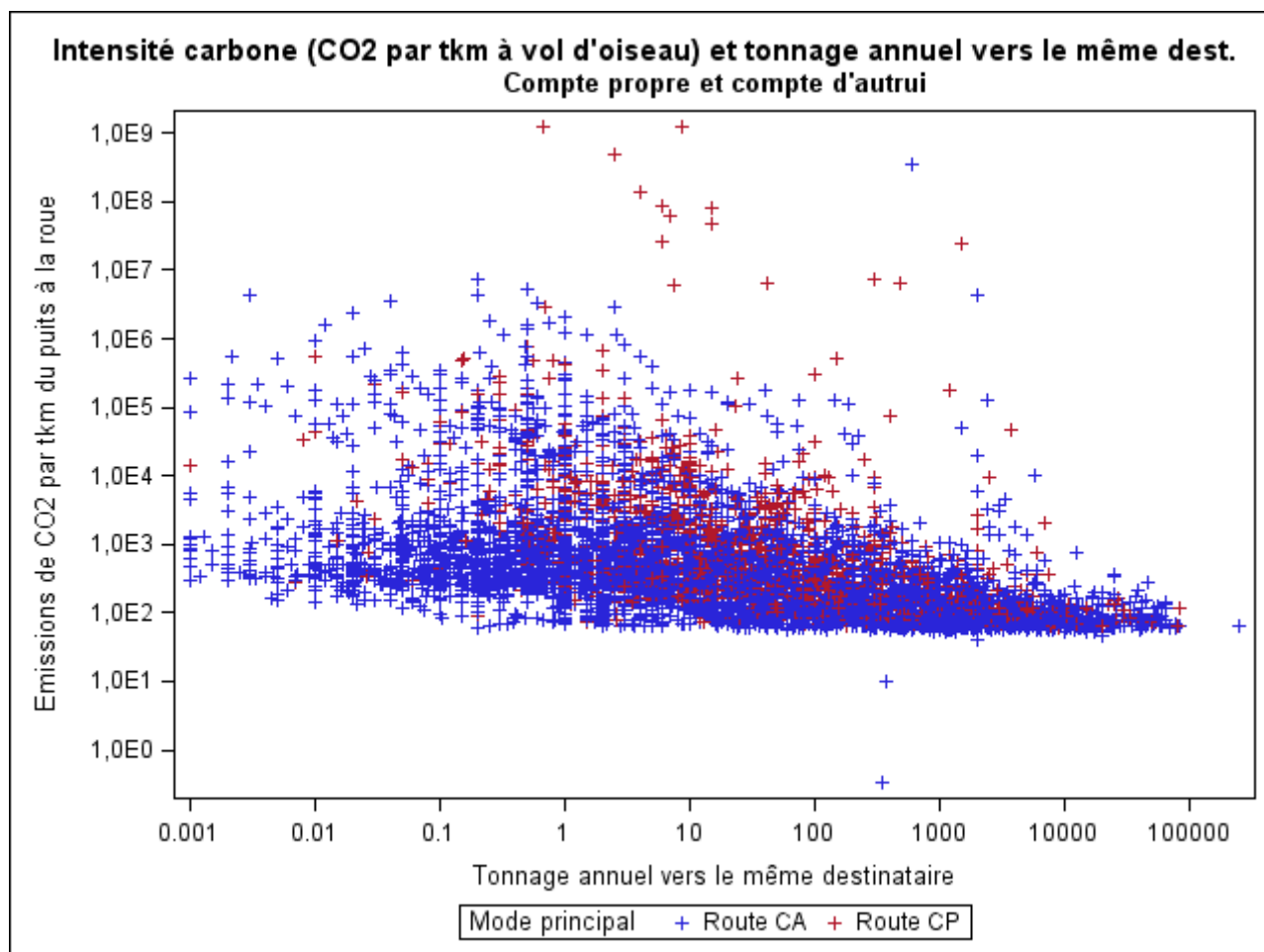


Figure 26 : Efficacité carbone et tonnage annuels vers le même destinataire en fonction des deux modalités routières (CP et CA¹⁴)

La Figure 26 se concentre sur les envois transportés principalement par la route ; elle montre clairement que l'intensité carbone décroît lorsqu'augmente le volume annuel expédié au même destinataire : au-delà de 1000 tonnes par an, l'intensité carbone dépasse rarement 500 gCO₂/tkm mais elle n'est pas toujours au maximum pour autant. Même pour les clients avec des volumes annuels très importants, des gains d'efficacité semblent possibles.

3.1.5. Intensité carbone et fréquence des envois au même destinataire

¹⁴ CP : Compte propre

CA : Compte d'autrui

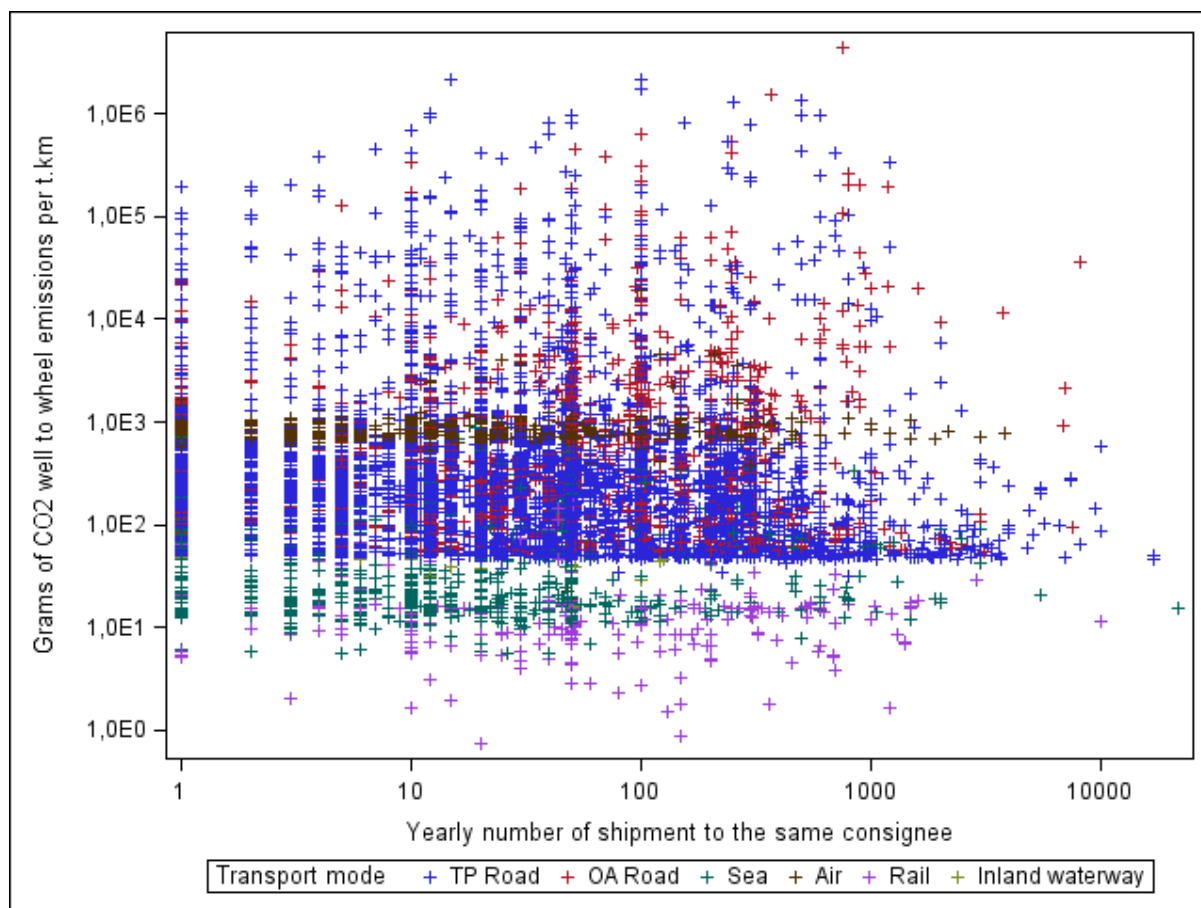


Figure 27 : Intensité carbone selon le nombre annuel d’envois au même destinataire

Cette Figure 27 ne montre pas de lien apparent entre l’intensité carbone et le nombre annuel d’envois vers le même destinataire et ce, quel que soit le mode de transport utilisé. Nous verrons pourtant en 3.3.3 et 3.3.4 ci-dessous, que la réduction de la fréquence des envois permettrait une réduction très importante de l’intensité carbone, caeteris paribus.

3.2. Amélioration de l'efficacité carbone par les choix logistiques

A partir de l'enquête ECHO, nous pouvons analyser, à un niveau très désagrégué, les variables qui peuvent influencer l'efficacité carbone du transport de fret. Nous cherchons en particulier à mettre en évidence l'impact des comportements, c'est-à-dire des choix logistiques que font les opérateurs, chargeurs et transporteurs, sur ces émissions de CO₂, pour apprécier dans quelle mesure il serait possible de réduire les émissions en dehors des réductions apportées par les changements technologiques sur les véhicules ou l'énergie.

Nous considérons pour cela deux types de variables explicatives du niveau de CO₂/tkm : les variables de choix logistiques et les variables caractéristiques 'intrinsèques' de la demande, c'est-à-dire celles que les choix logistiques ne peuvent guère modifier. Ainsi le poids du chargement est décomposé en deux variables : le tonnage annuel commandé par le client destinataire et le nombre d'expéditions qui seront envoyées à ce client pour satisfaire sa demande annuelle : le tonnage annuel est une variable intrinsèque, indépendante des choix logistiques alors que le nombre annuel d'envois ou la fréquence des livraisons résulte de l'organisation logistique décidée entre le chargeur et son client. L'autre variable de choix logistiques que nous considérons ici est le choix du mode de transport principal de l'envoi et l'autre variable intrinsèque est la distance de transport à vol d'oiseau.

Le Tableau 32 ci-dessous résume la distribution de la variable kgCO₂/tkm (variable à expliquer) et des trois variables explicatives : distance à vol d'oiseau, tonnage annuel vers le même destinataire et nombre annuel d'envoi vers le même destinataire. A ces trois variables explicatives continues, nous ajoutons le choix modal, caractérisé par des variables indicatrices (dummy).

Tableau 32 : Distribution des principales variables utilisées

Variable	Minimum	10 ^{ème} centile	25 ^{ème} centile	Médiane	75 ^{ème} centile	90 ^{ème} centile	Maximum
WW gCO ₂ /tkm	0,74	49,1	71,7	202	661	1 632	4 394 000
Distance à vol d'oiseau (km)	0	18,6	74,1	277	610	5 228	18 821
Tonnes / an au même destinataire	0,0010	0,150	1,10	17,0	350	3 300	630 000
Nb d'envois/an au même destinataire	1	3	11	40	128	312	21 700
Poids de l'envoi (tonnes)	0,001	0,005	0,050	0,65	7,8	23,0	10 800

L'intensité carbone par envoi, exprimée ici en CO₂ du puits à la roue (WWkgCO₂/tkm) est notre indicateur de l'efficacité carbone : quand l'intensité carbone augmente, l'efficacité diminue.

3.2.1. Intensité carbone et autres caractéristiques des chaînes de transport

Tableau 33 : Caractéristiques moyennes des chaînes de transport selon le mode principal

	Route			Mer	Air	Rail	Fluvial	TOTAL
	CA	CP	Σ					
Nb d'envois observés	6 059	1 777	7 836	484	656	312	28	9 316
Poids moyen de l'envoi (tonnes)	1,15	1,13	1,15	7,66	0,03	24,7	497	1,26
Distance moyenne à vol d'oiseau (km)	265	35	192	4 340	2 468	597	295	266
Tonnage annuel moyen vers le même destinataire (tonnes)	418	318	388	997	7	1 801	45 598	386
Nb moyen annuel d'envoi vers le même destinataire	153	504	274	91	60	114	26	267
Poids moyen d'un envoi vers le même destinataire (tonnes)	1,5	1,5	1,5	7	0,07	17	517	1,53
Délai de livraison moyen demandé hors programme pré-établi	131	44,7	111	329	87,9	74,2	335	111
Intensité carbone moyenne (gCO ₂ /tkm)	162	189	165	20	493	18	41	108

Dans le Tableau 33, les expéditions ont été classées selon le mode principal de transport déclaré par l'expéditeur. Ce tableau indique les caractéristiques moyennes de chaque type de chaînes de transport, pour comparer leurs spécificités.

Parmi ces caractéristiques moyennes des chaînes de transport, certaines sont bien connues : le transport routier en compte propre est utilisé principalement sur des distances très courtes (35 km) et pour des expéditions très fréquentes. Les chaînes de transport aérien sont pour des expéditions légères et de longues distances tandis que les chaînes de transport maritime sont pour de longues distances et des expéditions de poids moyens. Les voies navigables transportent des envois très lourds.

En revanche, la quantité annuelle expédiée au même client, le délai de livraison demandé par ce client et l'efficacité carbone du transport sont des caractéristiques beaucoup moins bien connues : ce tableau indique par exemple que le nombre annuel moyen d'expéditions vers le même destinataire est très important, principalement pour la route : 274 pour toutes les chaînes de transport routier, ce qui signifie plus d'un envoi par jour ouvrable. C'est pour les envois fluviaux que la fréquence est la plus faible (26 envois/an) suivis par les envois aériens (60 envois/an).

Dans l'enquête ECHO, la question sur le délai de livraison est posée seulement si le destinataire ne fait pas partie d'un programme pré-établi. Pour ces envois, le délai de livraison demandé varie entre moins de deux jours pour la route en compte propre, 3 jours pour le rail, 4 jours pour l'air, 5,5 jours pour la route en compte d'autrui et 14 jours pour les modes maritimes et fluviaux.

Les chaînes ferroviaires, maritimes et par voie navigable (dernière ligne du tableau), sont clairement les plus efficaces pour leur intensité carbone, avec des moyennes de respectivement 18, 20 et 36 gCO₂/tkm. À l'opposé, des chaînes aériennes sont les plus intensives en carbone avec 493 gCO₂/tkm. Les chaînes de transport routier émettent une moyenne de 111 gCO₂/tkm.

3.3. Modélisation de l'intensité carbone des envois

Pour analyser l'influence des caractéristiques logistiques de l'envoi sur son intensité carbone, nous exprimons dans une première étape, l'intensité carbone de l'envoi en fonction des caractéristiques 'intrinsèques' (non logistiques) de l'expédition : distance en ligne droite (SLDIST) et tonnage annuel au même destinataire (YTSC) ; puis nous calibrons un second modèle dans lequel nous introduisons comme variables explicatives, outre les deux variables intrinsèques précédentes, nos deux variables de choix logistiques : nombre annuel d'envois au même destinataire (YNSSC) et le choix du mode de transport. C'est la comparaison de ces deux modèles qui nous permet de comprendre le poids de ces variables logistiques.

3.3.1. Intensité carbone selon les caractéristiques intrinsèques de l'envoi

Après différents tests sur les variables d'une part et sur la forme fonctionnelle, le modèle retenu est le suivant :

$$\log(\text{CO}_2/\text{tkm}) = a \cdot \log(\text{SLDIST}) + \beta \cdot \log(\text{YTSC}) + \text{Constante} + \text{erreur} \quad (\text{Modèle 1})$$

Où CO₂/tkm est l'intensité carbone de l'envoi, SLDIST est la distance à vol d'oiseau, YTSC est le tonnage annuel au même destinataire. Le résultat de l'estimation est présenté dans le Tableau 34 ci-dessous.

Tableau 34 : Résultats de l'estimation des paramètres du modèle 1 (variables non logistiques)

R ² : 0,3684		σ ² =1,97857		
Paramètre	Valeur estimée	Ecart-type	T	P > t
Intercept	0,91376	0,04992	18,30	<,0001
SLDIST	-0,28981	0,00846	-34,25	<,0001
YTSC	-0,25889	0,00423	-61,16	<,0001

Avec ces deux variables 'non logistique ' SLDIST et YTSC (la distance et le tonnage annuel au même destinataire), ce modèle très simple explique seulement 37 % de l'intensité carbone par expédition. Les coefficients de ces deux variables sont fortement significatifs et, comme attendu, négatifs. Quand la distance ou le tonnage annuel augmente, l'intensité carbone diminue. Autrement dit, plus le flux annuel pour un client est important, en tonnage ou en distance, plus il est optimisé en carbone.

3.3.2. Introduction de variables logistiques dans le modèle

Dans le modèle 1, nous introduisons maintenant les variables qui représentent les choix logistiques principaux de l'expéditeur : le nombre annuel (fréquence) d'envois à ce client (YNSSC), qui détermine le poids moyen des envois à ce client et le mode de transport principal de la chaîne de transport.

Les modes de transport sont ajoutés sous formes d'indicatrices binaires (dummy). Le mode routier qui est la référence n'est pas indiqué et la voie d'eau pour laquelle nous avons trop peu d'observations n'a pas été conservée. Il nous reste donc 2 variables binaires de mode, l'une pour le mode aérien et l'autre pour le ferroviaire.

Tableau 35 : Résultats de l'estimation du modèle avec variables de choix logistiques

R ² : 0,4908 R ² ajusté: 0,4904		σ ² =1,60190		
Paramètre	Valeur estimée	Ecart-type	T	P > t
Intercept	0,02319	0,06187	0,37	0,7079
SLDIST	-0,28221	0,00947	-29,80	<,0001
YTSC	-0,29699	0,00520	-57,14	<,0001
YNSSC	0,26366	0,01055	24,99	<,0001
Mode maritime	-0,61642	0,07232	-8,52	<,0001
Mode aérien	1,24220	0,06483	19,16	<,0001
Mode rail	-1,53034	0,08404	-18,21	<,0001

Ce nouveau modèle explique 49% du CO₂/tkm : en introduisant deux variables caractéristiques du choix logistique dans le modèle précédent nous avons amélioré le R2 de 0,37 à 0,49.

Les coefficients (élasticités) sont négatifs pour la distance et le tonnage annuel (YTSC), comme dans le modèle 1, mais aussi pour les indicatrices des modes maritimes et ferroviaires : l'intensité carbone diminue pour les chaînes maritimes ou aériennes par rapport aux chaînes routières. Au contraire, elle augmente quand le nombre annuel d'envois augmente ou pour les chaînes aériennes. Ici de nouveau, les élasticités ont le signe attendu : l'efficacité carbone du maritime ou du ferroviaire est meilleure que celle de la route et elle est moins bonne pour les chaînes aériennes ; une augmentation du nombre annuel d'envois pour un tonnage annuel donné, c'est-à-dire une réduction du poids moyen des envois à ce destinataire, réduit l'efficacité carbone.

3.3.3. Réduction de l'intensité carbone selon les choix logistiques

L'étape suivante consiste à évaluer l'impact de ces variables de choix logistiques sur l'intensité carbone et les comparer avec l'impact des variables caractéristiques de la structure de la demande (tonnage annuel et distance). Dans le tableau suivant nous avons calculé, pour chacune de ces variables (les autres variables étant fixées à leur valeur médiane), la variation d'intensité carbone induite par un changement de valeur. Pour les variables quantitatives, nous estimons la valeur de CO₂/TKM avec la variable qui prend sa valeur de 25^{ème} centile d'une part et de 75^{ème} centile d'autre part et, pour le mode de transport, du transport aérien (le mode de forte émission) au rail (émission basse).

Tableau 36 : Impact d'une variation des caractéristiques (logistiques ou non) sur l'intensité carbone

Variables quantitatives	25^{ème} centile	75^{ème} centile	% variation
Distance	346	191	-45%
YTSC	538	97,2	-82%
YNSSC	170	324	91%
	Air	Rail	% variation
Mode	826	51,7	-94%

Dans de telles conditions, les variations de CO₂/tkm induites par un changement de choix logistiques apparaissent très importantes : toutes choses égales par ailleurs, une augmentation du nombre annuel d'envois vers un même client (pour une demande annuelle donnée) du 25^{ème} au 75^{ème} centile, provoque une augmentation de 91 % des émissions de CO₂. Et un changement de l'air au rail comme mode principal diminue les émissions de carbone de 94 %.

Pour les politiques, ceci suggère que la réduction des émissions de CO₂ du fret est à rechercher autant dans les solutions logistiques que dans l'amélioration technologique. En termes d'implication pour la recherche, beaucoup reste à faire sur la modélisation de ces données pour préciser par segments de marché l'importance des gains d'émissions qui pourraient être faits ainsi que les moyens de les obtenir.

3.3.4. Fréquence des envois et émissions de CO₂

8,3% de l'ensemble des envois de la base ECHO (811 envois observés) ont une fréquence très élevée (plus de 300 envois par an vers le même destinataire, soit plus d'un envoi par jour ouvrable) ; leur fréquence moyenne est 5,5 fois plus élevée (1446 contre 265) que celle de l'ensemble des envois. Ces 60,9 millions d'envois très fréquents représentent, 134 millions de tonnes expédiées, 38749 millions de tkm et 3,3 millions de tCO₂, soit respectivement 14% du tonnage, 2% des tkm et 10% du CO₂ émis.

En terme d'intensité carbone, ces envois très fréquents émettent en moyenne 4,2 kgCO₂ par envoi contre 3,2 pour la moyenne de l'ensemble des envois, 20 kgCO₂ par tonne expédiée contre 30 pour l'ensemble des envois et, 84 gCO₂/tkm contre 144 pour l'ensemble des envois. Ces envois fréquents sont donc, par rapport à la moyenne de l'ensemble des envois d'ECHO, plus émetteurs par envoi, mais moins émetteurs par tonne expédiée ou par tkm. En fait, ces envois 'très fréquents' ne sont pas du tout homogènes. Pour tenter de rendre compte de cette diversité nous avons établi une typologie des envois à partir des variables volume, poids de l'envoi, nature du produit, conditionnement, mode de transport et nombre de transporteurs, effectif salarié de l'établissement. Nous obtenons ainsi 14 groupes dont les caractéristiques sont données en Annexe 3. Parmi ces 14 groupes, 5 ont une intensité carbone, en gCO₂/tkm, inférieure à la moyenne et trois groupes ont une intensité carbone très supérieure à la moyenne.

Les groupes d'envois qui ont une faible intensité carbone par tkm (groupes 10, 14, 3, 4, 5) sont souvent des produits chimiques et métallurgiques, du matériel de transport, des matériaux de

construction et autres produits manufacturés, agricoles, alimentaires, dont le poids (moyen ou médian) par envoi est de l'ordre de 25 tonnes ; ils sont le plus souvent transportés par la route en compte d'autrui (CA1 trajet) avec parfois du ferroviaire (groupe 10) ou du maritime (groupe 14). Ce sont des envois sur lesquels le gain potentiel de CO₂ est très limité : ils ont une fréquence élevée en raison de quantités annuelles très importantes, qui permettent un bon remplissage des véhicules.

Plus intéressants pour nous sont les groupes d'envois qui ont une forte intensité carbone par tkm (groupes 1, 12 et 13). Les envois du groupe 1 ont une intensité carbone très élevée (7123 gCO₂/tkm contre 84 pour l'ensemble des envois très fréquents). Ce groupe comprend principalement des médicaments, envoyés notamment par des établissements de Vente Par Correspondance et Commerce de Gros des biens de consommation (variable gecho9r), en très faible quantité (médiane : 11 kilos par envoi), sur de très courtes distances (7,5 km) et le plus souvent en compte propre dans le cadre de tournées. Le gain potentiel par tkm est probablement très important pour ce premier groupe mais le gain potentiel total est relativement faible car ce groupe ne représente pas une masse de CO₂ très importante (94 000 tCO₂ soit moins de 0,3% de la masse de CO₂ estimée par ECHO). Le groupe 12 au contraire, est l'un des plus importants par le volume de ses émissions (304 milliers de t soit 0,9 % du CO₂ estimé par ECHO) et l'efficacité carbone de ces envois est également faible (1713 gCO₂/tkm). Ce groupe comprend des produits médicaux, machines et pièces, expédiés eux aussi en très faible quantité (4,8 kg par envoi), sur de courtes distances (168 km), par les Industries des Biens de Consommation (GECHO7), en compte d'autrui. Le groupe 13 a également une efficacité carbone faible (1014 gCO₂/tkm) mais il est peu important en terme de volume d'émissions (5,5 millions de tCO₂).

3.3.5. *Quels sont les établissements qui émettent ces envois très fréquents ?*

Les envois très fréquents décrits précédemment sont émis par 456 établissements, soit 13% de l'ensemble de l'échantillon d'établissements observé dans ECHO ; en valeur pondérée il s'agit de 6452 établissements. Il faut noter que certains établissements peuvent émettre plusieurs envois d'un même groupe, et que d'autres effectuent des envois classés dans des groupes différents (66 établissements sont concernés). Pour les exploitations ci-dessous, chaque établissement a été affecté au groupe pour lequel la fréquence des envois au même destinataire est la plus élevée.

Ces établissements qui émettent des envois 'à fréquence élevée' ont souvent un nombre de clients plus limités que la moyenne : en moyenne ils réalisent 80% de leur Chiffre d'Affaire avec 300 clients contre 620 sur l'ensemble des établissements. Les groupes 5, 10, 13 et 14 enregistrent des moyennes faibles (respectivement 50, 75, 21 et 93). La grande distribution constitue une part importante de leurs clients : 16%, contre 9% sur l'ensemble des établissements. Dans le groupe 5 ils sont plus de la moitié (51%) et dans les groupes 4, 6, 8 et 9 ils sont plus de 20% (respectivement 23%, 22%, 35% et 35%).

Le délai moyen de traitement de la commande est plus faible. La moitié des établissements de nos 14 groupes demandent moins de 24 heures de traitement (ce délai médian est de 96 heures sur l'ensemble des établissements) mais il existe de gros écarts entre les groupes.

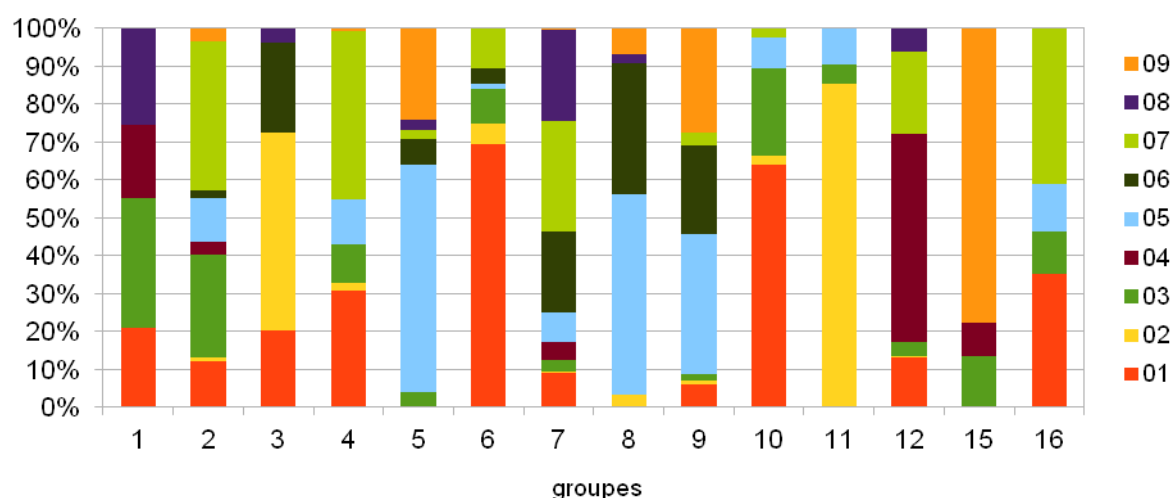
La part moyenne du tonnage produit en grandes séries est plus élevée pour ces établissements émetteurs d'envois fréquents : elle est de 51% au lieu de 38% sur l'ensemble de la population et les groupes 5, 6 et 11 approchent les 80%.

Globalement, 91% des établissements ne disposent pas d'un entrepôt alors que, parmi les établissements 'à haute fréquence' ils ne sont plus que 87%. Les groupes 2, 5, 10 et 16 disposent de plus d'entrepôts (jusque 50% pour le groupe 16). Concernant les plateformes 86% des établissements ne disposent pas d'une plateforme. La différence sur l'ensemble des groupes est faible (-5%). On remarquera les groupes 2, 5, 6 et surtout le groupe 15 où 78% des établissements possèdent au moins une plateforme.

Concernant le groupe d'activité chargeur :

Commerce de Gros des Biens Intermédiaires et récupération sont majoritairement représentés dans les groupes 11 et 3. Il en est de même pour les IAA dans les groupes 5 et 8. Les groupes 6 et 10 sont constitués à plus de 60% par l'Industrie des Biens Intermédiaires. Le CG des biens de production représente près de 55% du groupe 12. Les entrepôts sont très bien représentés dans le groupe 13.

Groupe d'activité chargeur



Groupes d'activité :

"01" ="Industries biens intermédiaires"

"02" ="CG biens intermédiaires et Récupération."

"03" ="Industries biens de production"

"04" ="CG biens de production"

"05" ="Industries agro alimentaires"

"06" ="CG biens agro-alimentaires"

"07" ="Industries biens de consommation"

"08" ="VPC et CG biens de consommation"

"09" ="Entrepôts"

Par rapport à la typologie des établissements définie dans la deuxième partie de cette recherche (typologie avec niveau d'émissions) les établissements qui émettent des envois très fréquents sont

surreprésentés dans les types 2 et 6 qui sont les établissements les plus émetteurs et, dans une moindre mesure, dans les types 71 et 10 qui sont eux aussi de gros émetteurs.

typo phase 2	dans les étab 'fréquents'	observés du type	pop redressée du type		émissions moyenne tCO2/étab		
	COUNT	PERCENT					
0	19	4,2	120	4,2%	1869	2,7%	894
1	29	6,4	287	10,0%	13731	19,8%	79
2	73	16,0	265	9,2%	2228	3,2%	4763
3	14	3,1	227	7,9%	4999	7,2%	252
4	48	10,5	399	13,9%	7260	10,5%	638
5	55	12,1	300	10,4%	4626	6,7%	402
6	78	17,1	324	11,3%	3340	4,8%	1554
8	5	1,1	236	8,2%	15127	21,9%	86
9	45	9,9	261	9,1%	4897	7,1%	494
10	42	9,2	214	7,4%	7335	10,6%	1095
71 ou 7	48	10,5	246	8,5%	3810	5,5%	1210
total	456	100,0	2879	100%	69222	100%	616

Conclusion de la troisième partie

La richesse de la base ECHO permet une analyse très fine de l'intensité carbone des envois, qui s'est révélée extrêmement variable. Le modèle calibré pour rendre compte de cette intensité carbone indique que les variables caractéristiques des choix logistiques permettent de rendre compte d'une grande partie de sa variabilité. On estime en particulier qu'en augmentant la fréquence des envois de 170 (25^{ème} centile) à 324 (75^{ème} centile) on augment de 91% le volume des émissions *caeteris paribus*. Et parmi ces envois fréquents un certain nombre correspondent effectivement à des petits chargements qui ont une forte intensité carbone.

4. Scénarii de réduction des émissions urbaines

Après avoir examiné les déterminants du potentiel de réduction des émissions, cette quatrième partie s'attache à estimer les réductions d'émissions selon différents scénarii.

Afin de comprendre dans quels contextes, ces scénarii pourraient être mis en œuvre, nous passons en revue les principales mesures politiques de réduction des émissions du transport de fret (4.1.), puis sur la base des résultats (4.2), nous testons deux types de scénarii : deux scénarii de réduction des émissions urbaines, par électrification du fret urbain (4.3), puis deux scénarii non spécifiques au milieu urbain (4.4) et enfin un scénario, dit « de réduction maximum » (4.5), dans lequel nous combinons les mesures les plus efficaces des scénarii précédents.

4.1. Une revue des politiques de réduction des émissions de GES du transport de fret

Le transport est indispensable à l'activité économique mais sa consommation d'énergie et ses émissions de gaz à effet de serre (GES) augmentent dangereusement et de nombreux pays et organismes internationaux cherchent à réduire ces émissions ou au moins, leur croissance. Différents modèles explicatifs permettent de relier les émissions de CO₂ au transport de fret : celui de McKinnon (2008) est très détaillé et comprend notamment des variables qui permettent de relier la production (en tonnes) aux émissions de CO₂ du transport par le biais d'indicateurs clefs (*Key Performance Indicators, KPI*) tels que la répartition modale, le nombre de manutentions (*handling factor*), la distance moyenne, le poids moyen du chargement, la proportion de voyages à vide et l'intensité carbone de l'énergie utilisée. Le modèle ASIF de l'AIE (Schipper et al., 2000) est quant à lui plus simple dans sa formulation et les émissions de CO₂ y apparaissent comme le produit de l'activité de transport (A, pour Activity, en tkm) par la répartition modale (S pour Share), par l'intensité de consommation d'énergie de chaque mode (I pour Intensity en kgep / tkm) et par l'intensité carbone de l'énergie utilisée par le mode (F pour Fuel mix). Tous ces modèles sont inspirés par l'équation développée par Kaya (1993) qui permet de décomposer le CO₂ émis en différents facteurs multiplicatifs : la population, le PIB par habitant, l'intensité énergétique par unité de PIB produite, l'intensité d'émission de CO₂ par unité d'énergie consommée.

4.1.1. Décomposition des émissions de CO₂ du fret (d'après Kaya)

Cette décomposition de Kaya en facteurs est très utile pour comprendre ce qui influence les émissions et leurs évolutions. Elle joue un rôle central dans les travaux du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) : les statistiques économiques, la démographie et l'économétrie indiquent les tendances en matière d'évolution du PIB par tête, et de la quantité d'énergie par unité de PIB selon les situations économiques ; les productions de CO₂ par unité d'énergie finale sont connues pour les différentes techniques et les filières de production d'énergie. En fonction des variables imposées (par exemple, la population qui devrait doubler vers 2050), et des objectifs (par exemple, diviser par quatre les émissions de GES), on en déduit les contraintes qui pèsent sur les autres variables. Adaptée aux émissions du transport de fret, cette équation devient :

$$\text{CO}_{2\text{fret}} = (\text{CO}_{2\text{fret}} / \text{ENERGIE}) \times (\text{ENERGIE} / \text{KM}) \times (\text{KM} / \text{TKM}) \times (\text{TKM} / \text{PIB}) \times (\text{PIB} / \text{POP}) \times \text{POP}$$

où, $\text{CO}_{2\text{fret}}$ est le volume d'émissions de CO₂ générée par le transport de fret ;

ENERGIE est la quantité d'énergie dépensée pour le transport de fret (en TEP) ; $\text{CO}_{2\text{fret}} / \text{ENERGIE}$ désigne donc l'intensité carbone moyenne de l'énergie utilisée pour transporter le fret ou facteur d'émission ;

KM est la distance parcourue par les véhicules de transport de marchandise ; le facteur $(\text{ENERGIE} / \text{KM})$ désigne donc la consommation unitaire moyenne (intensité énergétique) des véhicules de transport de fret.

TKM est l'activité de transport de fret, en tonnes kilomètres ;

(KM / TKM) indique le nombre de km qu'il faut parcourir en moyenne pour réaliser une tkm ; c'est l'inverse du ratio TKM / KM qui désigne le tonnage moyen du chargement pondéré par les distances, en tenant compte des trajets à vide.

PIB est la richesse produite ; TKM / PIB désigne donc la quantité de tkm produite par unité de richesse, c'est-à-dire l'intensité transport de l'économie ;

POP désigne la population et PIB / POP la richesse produite par habitant.

Dans cette décomposition, les 4 premiers facteurs sont ceux qu'on s'efforce de réduire en priorité pour diminuer les émissions du transport de fret :

- l'intensité carbone de l'énergie du transport, liée au mix énergétique et à la manière de produire l'électricité,
- l'intensité énergétique des véhicules, liée aux véhicules, à la structure du parc,
- l'inverse du tonnage moyen des chargements, lié notamment aux choix logistiques,
- et l'intensité transport de l'économie (quantité de transport en tkm par euro de PIB).

En revanche la réduction des deux derniers facteurs (richesse par habitant et population) est politiquement difficile à afficher comme objectif, même si ces facteurs ont un impact certain sur les émissions, notamment dans les pays à forte croissance économique ou à forte croissance démographique ; nous les considérons ici comme en dehors de la politique des transports et nous concentrons sur les quatre premiers.

Les problèmes qui se posent alors sont :

- Dans quelle mesure est-il possible de réduire les émissions du transport tout en maintenant la croissance de l'activité économique ?
- Quel est le coût de ces réductions et par qui sera-t-il supporté ? Même si le coût de réduction des émissions par tonne de CO₂ est plus important dans le secteur de transports que dans la

plupart des autres secteurs, ceci ne signifie pas que ce secteur puisse être exempté de participer à la réduction de l'ensemble.

Les émissions des transports de marchandises sont beaucoup moins importantes que celles liées aux transports de voyageurs et elles ont fait l'objet de moins d'attention, tant dans la recherche de mesures politiques que dans l'analyse de ces mesures, notamment pour les émissions de GES (les émissions de polluants locaux ont fait l'objet de différentes mesures, en particulier les normes Euro). Cependant, avec un peu de retard sur les politiques visant le transport de voyageurs, de plus en plus de pays, de scientifiques et de publications portent maintenant une attention spécifique au transport de fret, y compris sur le point spécifique des GES¹⁵. Parmi les politiques qui cherchent à réduire le volume d'émissions, on peut distinguer celles qui visent à faire évoluer la technologie et celles qui cherchent à faire changer les comportements des acteurs. En suivant le modèle de décomposition en facteurs évoqué précédemment, les changements de technologie ont deux composantes principales :

- L'efficacité énergétique des véhicules et de leurs composants (moteurs, transmission, pneumatiques, etc.) d'une part,
- L'intensité carbone de l'énergie du transport d'autre part (carburants alternatifs au diesel et biocarburant en mélange dans le diesel, électricité moins carbonée et surtout favoriser le développement des modes et véhicules qui ont recours à l'énergie la moins carbonée).

On trouvera dans cette catégorie les politiques visant à favoriser la recherche et le développement : en premier lieu, la normalisation et les accords constructeurs, mais aussi financement de la recherche et la politique d'achat de véhicules du secteur public. Pour ce type de politiques visant des changements technologiques, un point important est d'estimer à quelle vitesse cette 'nouvelle' technologie va se répandre dans le parc, soit par renouvellement 'naturel' du parc, soit par adaptation du parc ancien (*retrofit*). Compte tenu de la durée de vie des poids lourds, plus longue que celle des voitures, une nouvelle norme touchant les véhicules neufs va se diffuser lentement dans le parc en circulation. Il est donc nécessaire d'utiliser des mesures complémentaires visant l'organisation du transport pour un effet plus rapide.

4.1.2. Politiques économiques, réglementaires, d'amélioration de la connaissance et décisions d'infrastructure

Les mesures politiques visant à faire évoluer les comportements sont nombreuses. Nous en distinguons ici quatre catégories : les mesures économiques, réglementaires, celles qui visent l'amélioration de la connaissance et les décisions d'infrastructure.

Certaines mesures économiques visent à modifier le coût des différentes options de transport et en particulier, leurs coûts relatifs. La justification de telles mesures est d'internaliser les coûts externes : si tous les types de transport internalisaient totalement leurs coûts externes, par exemple au moyen

¹⁵ Voir en particulier la session « Mitigations policies » de la WCTR Rio 2013 dont les meilleurs papiers seront publiés dans un numéro spécial de la revue *Research in Transportation Business & Management* (RTBM) de 2014.

de taxes, leurs parts respectives (la répartition modale) seraient différentes et la demande totale pour le transport de fret serait probablement moins importante. Les principales mesures économiques sont la fiscalité et les taxes, qui prennent de nombreuses formes et seront développées dans le paragraphe 4.1.3, et le système de permis d'émissions négociables.

Les mesures réglementaires visent parfois directement les émissions (normes d'émissions des poids lourds au Japon puis dans plusieurs pays européens) mais, même si leur objectif premier est souvent différent du CO₂ (la sécurité pour les limitations de vitesse, la pollution locale pour les Zones à Faibles Émissions, la congestion pour les voies réservées aux véhicules largement occupés ou la limitation des places de stationnement) la réglementation du transport peut aussi avoir un impact assez direct sur les émissions.

Parmi les mesures de formation et d'amélioration de la connaissance on peut citer l'obligation d'informer le client sur les émissions de son transport (Affichage CO₂ du transport dans le cadre de la loi Grenelle II) et son corollaire la normalisation de la comptabilité du CO₂ du transport, les programmes de Formation à l'éco-conduite, contribuent également, à un faible coût, à réduire les émissions ou le label de l'Union européenne pour les pneumatiques.

Les investissements d'infrastructures constituent souvent la partie la plus visible de la politique des transports, par exemple le développement des prises publiques de rechargement des véhicules électriques, ainsi que les décisions d'infrastructure, même lorsque celle-ci n'est pas payée par l'Etat et la définition de la méthode d'évaluation des projets, en particulier la valeur du carbone.

4.1.3. Taxes sur le carburant et taxes carbone

Indépendamment de la question de l'acceptabilité politique, une taxe sur les carburants est, en théorie, l'instrument le plus économique de couverture des coûts des changements climatiques générés par les transports. Les émissions de CO₂ étant directement liées à la consommation de carburant, le prélèvement d'une taxe sur les carburants, modulée sur la base des quantités moyennes de CO₂ émises par la combustion de chaque type de carburant, semble le moyen le moins coûteux pour freiner ces émissions. Pour les camionnettes en particulier, une modulation complémentaire de la taxe sur les véhicules pourrait permettre de compenser le fait que l'acheteur d'un véhicule ne tient pas toujours compte des économies de carburant qu'il pourrait réaliser à l'avenir.

Contrairement à la taxe carbone, dont nous avons vu (cf 2.6 p. 58) qu'elle n'est pas conçue pour être une taxe de financement mais une taxe incitative, les taxes sur les carburants qui ont été instituées dans presque tous les pays, servent plus souvent à collecter des recettes fiscales (Rème-Harnay, 2012) qu'à réduire les émissions de carbone. L'Allemagne n'a pas introduit de taxe carbone à proprement parler mais, depuis 1999, on assiste à une augmentation des taxes sur l'énergie à visée explicitement écologique dont les recettes sont utilisées pour réduire les cotisations de retraite. .

4.1.4. Système de quotas ou permis d'émission de CO₂

Les échanges de permis d'émission de CO₂ donnent en théorie des résultats plus ou moins comparables à la taxation des carburants, mais le coût administratif en est beaucoup plus élevé.

Comme ce coût est proportionnel au nombre de titulaires de permis, les échanges de permis d'émission sont normalement exclus sur des marchés aussi dispersés que ceux que constituent les transports routiers. Il a néanmoins été envisagé, au niveau purement théorique, d'organiser des systèmes d'échange de droits d'émission entre les distributeurs agréés de carburants routiers. Et il est, toujours en théorie, possible d'user d'un système d'échange de permis d'émission pour partager équitablement les coûts entre des constructeurs automobiles contraints de se conformer à des normes de consommation moyenne de toute leur gamme de modèles. L'intégration de l'aviation civile dans le système communautaire d'échange de quotas d'émission prévu dans une Communication de la Commission européenne de 2005 semble actuellement en panne, compte tenu de l'opposition rencontrée.

Les modalités de délivrance des permis auraient de toute façon une incidence déterminante sur la contribution que l'échange des permis pourrait apporter à la réduction des émissions de CO₂. La valeur des permis doit en théorie être établie au terme d'une procédure d'adjudication mais, dans le système communautaire, ces permis ont jusqu'ici été délivrés gratuitement aux émetteurs de CO₂ en place. Cette façon de faire non seulement complique la fixation du prix des permis, mais est aussi discriminatoire à l'égard des candidats à l'entrée sur le marché et de nature à préserver les parts de marché des opérateurs, c'est-à-dire des compagnies aériennes déjà en place. Le nombre de permis délivrés et la valeur nominale des émissions de CO₂ qu'ils représentent déterminent également dans une large mesure le prix de ces permis et donc le coût attribué aux émissions de CO₂. La distribution d'un nombre généreux de permis gratuits, comme cela s'est passé dans les premiers temps de la mise en œuvre du système communautaire, prive le système d'impact sensible sur le volume total des émissions. La fixation du volume total d'émissions de CO₂ autorisées, a un impact déterminant sur l'efficacité du système.

Beaucoup de pays ont des normes d'émissions de CO₂ en plus des normes d'émissions de polluants locaux. C'est le cas de l'Union Européenne, des États-Unis, de la Californie, du Japon, de la Chine, de Taïwan et de la Corée du Sud qui ont leurs normes obligatoires, tandis que l'Australie et le Canada ont des normes volontaires. Mais, alors que les normes de polluants locaux concernent l'ensemble des véhicules routiers, les normes CO₂ s'appliquent seulement aux véhicules de passagers, délaissant les émissions de GES des poids-lourds. Le Japon, fait exception à cette règle : une norme de consommation de carburant y a pris effet pour les poids-lourds dès 2006.

Différents facteurs ont limité la mise en œuvre de telles normes pour les poids lourds : considérant que le coût du carburant constitue une part significative des coût d'exploitation du transport de marchandises (environ 25%), on fait souvent l'hypothèse que les économies de carburant constituent déjà une préoccupation majeure des transporteurs et, qu'à ce titre, les innovations destinées à favoriser les économies d'énergie pénètrent facilement sur le marché des poids-lourds ; établir des normes ou règlement en la matière apparaît alors superflu. Cependant, le marché du poids-lourds est étroit relativement à celui de la voiture particulière ce qui n'encourage pas la recherche et le développement de nouvelles technologies de réduction de la consommation. L'avantage d'une telle réduction est partagé entre le transporteur et le chargeur : parfois le contrat de transport prévoit que l'augmentation du prix du carburant sera automatiquement répercutée au chargeur (par exemple le *Bunker Adjustment Factor* des *Liner terms* en maritime). Les informations fournies au

client quant à l'économie de carburant réalisée sont parfois difficiles à interpréter selon le modèle de véhicule et surtout selon son utilisation. Toutes ces raisons ont freiné le développement et la pénétration de ces technologies sur le marché des poids lourds (Langer, 2004; Onoda, 2008). Des normes d'économie de carburant pour les poids lourds accéléreraient la demande pour ces dispositifs d'économie de carburant et favoriseraient ainsi les économies d'échelle pour la production de ces dispositifs.

Il est beaucoup plus difficile de 'normaliser' la consommation de carburant des poids lourds que celle des voitures parce qu'ils sont utilisés dans des situations très variables. Un tracteur peut être utilisé pour déplacer des types différents de marchandises, avec des poids de chargement très différents. Non seulement il est difficile de connaître la consommation de carburant mais la responsabilité de cette consommation est partagée entre le chargeur, le transporteur et le conducteur. Dans son rapport de 2004 préparé pour la Commission US sur la Politique énergétique, Langer (2004) recommande d'inclure les camionnettes, les 4 x 4 et les camions pesant moins de 10,000 livres (soit environ 4,5 t) dans les normes CAFÉ¹⁶ qui offrent des primes pour l'achat de véhicules entre 10,000 et 30,000 livres (soit environ entre 4,5 t et 16,6 t) économes en carburant.

Les normes ne sont que l'un des moyens politiques pour réduire la consommation de carburant et des émissions de dioxyde de carbone des véhicules. L'affichage obligatoire des performances et les primes financières constituent d'autres mesures politiques visant à promouvoir les véhicules à faible consommation de carburant. Cependant, pour le transport de marchandises, il faut probablement d'autres méthodes pour améliorer la consommation de carburant. Pour les camionnettes et camions de poids moyens, qui sont souvent utilisés pour les livraisons urbaines et doivent s'arrêter et à repartir fréquemment, la propulsion électrique ou hybride peut être une solution. Pour les poids lourds, le plus souvent utilisés en longue distance, l'avantage de telles motorisations, semble plus douteux dans l'état actuel de la connaissance mais de nombreuses recherches sont menées à travers le monde (Boer et al. 2013).

Les normes de consommation et d'émissions kilométriques appliquées par le Japon aux poids lourds (

¹⁶ Le programme de CAFÉ, fixe des normes de consommation de carburant pour les voitures et camionnettes : Consommation moyenne de la flotte d'un fabricant pondérée par les ventes des différents types de véhicules, exprimé en miles par gallon (mpg), au cours d'une année

Tableau 37) sont basées principalement sur la performance du moteur. Malheureusement, bien d'autres composants que le moteur affectent aussi la consommation de carburant des camions et ne sont pas pris en compte par les tests. Ces normes devaient conduire à une amélioration de la consommation et donc des émissions de 12 % avant 2015 pour les véhicules japonais pesant plus de 3,5 tonnes (Goto, 2007).

Tableau 37 : Objectifs de consommation de carburant pour les poids lourds au Japon

PTRA (tonnes)	CU max (t.)	Efficacité énergétique	Consommation de carburant	
			l/100 km	l / 100 tkm
3,5 – 7,5	<1,5	10,83	9,23	6,16
	1.5 - 2	10.35	9,66	4,83
	3 - 3	9.51	10,52	3,51
	>3	8,12	12,32	2,74
7,5 - 8	5	7,24	13,81	2,76
8 – 10	6,5	6.52	15,34	2,36
10 – 12	8	6,00	16,67	2,08
12 – 14	9	5,69	17,57	1,95
14 – 16	11	4,97	20,12	1,83
16 – 20	13	4,15	24,10	1,85
20	13	4,04	24,75	1,90
Tracteurs < 20	13	3,09	32,36	2,49
Tracteurs > 20	25	2.01	49,75	1,99

Dans nos scénarios, nous distinguons d’une part les mesures visant la réduction des émissions du fret en zone urbaine, où la priorité porte sur la congestion et la pollution locale, notamment de particules et de NO_x et où la réduction de CO₂ n’est qu’un co-bénéfice - la mise en place des *Low Emission Zones* en Europe est un exemple d’une telle politique urbaine - et, d’autre part, les mesures visant l’ensemble du fret, urbain et interurbain où la réduction de CO₂ peut être l’objectif principal ; les politiques visant le carburant (prix du carburant ou bio carburant) sont un exemple de telles politiques qui visent aussi bien le trafic urbain qu’interurbain.

4.2. La répartition des émissions entre urbain et non urbain

Nous commencerons donc par essayer de quantifier les émissions urbaines et non urbaines. Nous définissons ici comme ‘urbain’ les communes françaises appartenant à une unité urbaine au sens de l’INSEE, découpage qui privilégie la continuité du bâti et rend mieux compte des espaces les plus denses, à la différence des aires urbaines.

En raison de cette définition, nous avons évalué les émissions de CO₂ par type de trajets, uniquement pour les communes françaises. Dans le Tableau 38 ci-dessous, les émissions ne concernent que les trajets routiers (98,5% des émissions de CO₂, au format Kyoto et 84,6 du puit à la roue, cf. Tableau 29 page 62) c’est pourquoi, les différents scénarii esquissés ici s’attachent à mettre en exergue le potentiel de réduction de ce mode. Nous remarquons que la quasi-totalité des émissions de CO₂ (99%) concerne le milieu urbain à un moment donné :

- soit au début du trajet uniquement, les trajets sortants de l’urbain;
- soit à la fin du trajet, pour les trajets entrant dans l’urbain;
- soit au début et à la fin, pour les trajets interurbains ;

- soit enfin sur la totalité du trajet, il s'agit de trajets intra-urbains.

Les émissions des trajets qui ne concernent pas l'urbain ne représentent que 1% des émissions.

Tableau 38 : Répartition des émissions de CO₂ à partir de la base ECHO entre les différents types de trajets

Type de trajets	N Obs	Tonnes de CO ₂ WW	%
1 trajets non urbains (agglo France uniquement)	426	543 655	1%
2 Trajets intra-urbains (agglo France uniquement)	3243	2 710 005	7%
3 trajets urbains-sortant (agglo France uniquement)	1402	3 675 301	9%
4 trajets urbains-entrant (agglo France uniquement)	1845	4 446 476	11%
5 trajets interurbains (agglo France uniquement)	10425	27 900 136	71%

Ce tableau des émissions de CO₂ en fonction du type de trajet est à rapprocher de celui de la répartition des trajets eux-mêmes suivant cette même typologie (Tableau 39). En effet, si les trajets intra-urbains représentent 31 % de l'ensemble des trajets, en termes d'émissions de CO₂ ces trajets ne représentent que 7% des émissions totales. Au contraire, les trajets interurbains qui ne représentent que 51 % des trajets, comptent pour 71% des émissions de CO₂. Ce décalage dans la répartition entre émissions de CO₂ et nombre de trajets s'explique par la distance parcourue, plus grande dans les trajets interurbains.

Tableau 39 : Répartition des trajets en fonction de la typologie urbaine

Type de trajet	Nombre d'envois. trajets	%
1 trajets non urbains (agglo France uniquement)	16 361	1
2 trajets intra-urbains (agglo France uniquement)	458 486	31
3 trajets urbains-sortant (agglo France uniquement)	144 991	10
4 trajets urbains-entrant (agglo France uniquement)	100 556	7
5 trajets interurbains (agglo France uniquement)	753 045	51

Ces tableaux du nombre de trajets concernés par l'urbain et de leurs émissions de CO₂ montrent qu'il ne faut pas sous-estimer l'enjeu que constitue le milieu urbain pour la réduction des émissions de CO₂. Pour estimer plus précisément la part de l'urbain dans les émissions de CO₂, nous avons utilisé le modèle Transcad : chaque trajet routier a été affecté sur un réseau et la part de la distance urbaine a été calculée dans la distance totale. C'est ce ratio des distances urbaines / total qui a été repris pour estimer la part du CO₂ urbain dans le tableau ci-après : ce ratio est donc sous estimé puisque la consommation de carburant et les émissions de CO₂ par kilomètre parcouru sont en réalité plus importantes en urbain qu'en rase campagne.

Tableau 40 : Importance de l'urbain dans les émissions de CO₂ de la route

	Emissions de CO ₂ WW		Superficie	
	tonnes	%	(km ²)	%
France métropolitaine	32 046 719	100%	552 000	100%
Dont intra commune	660 636			
Ensemble des unités urbaines	15 621 645	48,8 %	117 574	21,3%
Dont intra commune	577 923	87,5%		
Unités urbaines > 100 000 hb.	8 119 486	25,3%	23 611	4,3%
Dont intra commune	577 923	87,5%		

NB : Pondération urbaine ; sur 15223 + 881 = 16 104 trajets de la base ECHO concernés i.e. trajets entièrement en France + trajets qui dont destination = origine

Il apparait ainsi dans la base ECHO, qu'en France métropolitaine (avant de prendre en compte les trajets qui ont une extrémité hors de France), près de la moitié des émissions de la route (48,8%) sont produites dans les unités urbaines, dont la superficie ne représente que 21,3 % du territoire français ; et plus du quart (25,3%) de ces émissions sont produites dans les unités urbaines de plus de 100 000 habitants qui ne font que 4,3% de la superficie de la France métropolitaine.

Notre scénario d'électrification du fret urbain dans les unités urbaines portera donc sur environ la moitié des émissions soit un potentiel de réduction beaucoup plus important que celui de passage au GNV (environ 10% de réduction des émissions si l'ensemble du parc est concerné, *caeteris paribus*).

4.3.Scénarii d'électrification du fret urbain

L'électrification du trafic de fret urbain peut se faire plus ou moins complètement par deux voies principales : une politique de réglementation de la circulation des camions, de type *Low Emission Zone* (LEZ, à Londres, à Utrecht ...), ou / et par une offre de services logistiques 'verts', de type *Binnenstadservice* au Pays-Bas, location de véhicules électriques –Ariamia- en Emilie-romagne ou Elcidis à La Rochelle. Nous retenons ici l'hypothèse d'une politique contraignante, interdisant la circulation des camions et camionnettes diesel en ville, avec certaines exceptions, notamment le trafic de transit (trajets ne faisant que passer dans l'agglomération) quand il passe sur des axes de type autoroutes urbaines.

L'offre de véhicules électriques est aujourd'hui limitée à des camionnettes, ce qui constitue une limite importante à l'électrification du transport de fret. Nous retenons ici deux scénarii, l'un, noté E1, avec des camions de 2 t de charge utile et l'autre, E2, avec des camions de 6 t de charge utile.

4.3.1. Les 2 types de camions électriques (2 et 6 t. de CU), leurs émissions et le taux de remplissage.

Dans le premier scénario (E1), les camions électriques ont une charge utile de 2 t, approximativement celle du Maxity de Renault Trucks. Nous faisons l'hypothèse qu'à l'entrée des

agglomérations se trouve des plates-formes sur les principaux axes routiers de pénétration : le fret à destination de l'agglomération y est déchargé et réparti sur ces camions électrique ; de même, le fret partant de cette ville doit en sortir sur un camion électrique, au moins jusqu'à une plate-forme. Comme l'ensemble du fret entrant et sortant passe par ces plates-formes, les camions électriques ont un excellent taux de remplissage, d'au moins 80% (et plus pour les envois qui pèsent entre 1,6 et 2 tonnes) et un taux de retour à vide de 50% des kilomètres en charge. Les envois de plus de 2 tonnes sont scindés, sur leur partie urbaine, en plusieurs camions électriques. Répartir un chargement de 25 t sur ces petits camions électriques correspond à remplacer un ensemble tracteur plus semi-remorque de 25 tonnes de charge utile par 13 camions électriques, ce qui pose des problèmes de congestion de la ville. Pour cette raison, dans ce scénario d'électrification du fret urbain avec de petits véhicules, les envois lourds (envois > 20 tonnes, par exemple ceux de la grande distribution qui viennent approvisionner les hypermarchés) obtiennent une dérogation pour circuler dans la ville en diesel.

Dans le scénario suivant (E2) les camions ont 6 t. de CU pour un PTAC de 10 t. Nous faisons des hypothèses semblables à celles du scénario précédent : pour les camions électriques qui passent par une plate-forme, un taux de remplissage d'au moins 80% et un taux de retour à vide de 50% des kilomètres en charge. Les envois de plus de 6 tonnes sont scindés, sur leur partie urbaine, en plusieurs camions électriques.

Pour estimer la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ de ces camions électriques, nous sommes partis du rapport « Zero Emissions Trucks » de [Boer et al. \(2013\)](#) qui estime des consommations de 1 kWh/km pour un camion de 10t. et 2 kWh/km pour un de 40 t. ; nous y ajoutons une consommation fournie par Renault Truck de 0.96 kWh/km pour un 16 t. et nous faisons l'hypothèse d'une relation linéaire entre consommation d'énergie et poids. Nous obtenons une relation linéaire entre le PTAC du camion électrique et sa consommation : $\text{conso (kWh/km)} = 0,43 + 0,033 \times M \text{ (tonne)}$, qui donne une consommation de :

0,55 kWh/km pour un petit camion de 3,5 t. de PTAC (2 t. de CU) et

0.76 kWh/km pour un camion de 10 t. de PTAC (6 t. de CU).

Pour obtenir le niveau d'émission des camions, nous multiplions ces valeurs par un facteur d'émission du puits à la roue de 53 gCO₂/kWh, ce qui donne un niveau d'émission de :

29 gCO₂/camion.km soit à pleine charge, 10 gCO₂/tkm (camions de 2 t. de CU) ou

40 gCO₂/camion.km soit à pleine charge, 4 gCO₂/tkm (camions de 6 t. de CU)

Ces valeurs sont multipliées par 1,5 pour tenir compte des retours à vide ; les émissions d'un envoi sur un trajet sont alors calculées comme :

$0,029 \times \text{km} \times 1,5 \times \text{poids de l'envoi} / \text{poids du chargement}$ (camions de 2 t. de CU) ou

$0,040 \times \text{km} \times 1,5 \times \text{poids de l'envoi} / \text{poids du chargement}$ (camions de 6 t. de CU).

4.3.2. Zones urbaines, plates-formes de transbordement et distance électrique

Dans un tel scénario, la définition géographique des zones concernées par l'électrification est une variable déterminante du volume de réduction d'émissions qui pourra être obtenu. Nous avons donc retenu comme 'urbain' les communes françaises appartenant à une unité urbaine de France métropolitaine (selon la définition de l'INSEE). Nous regarderons le CO₂ concerné par l'ensemble des unités urbaines mais nous nous intéresserons davantage aux unités urbaines de plus de 100 000 habitants, que nous jugeons plus susceptibles de mettre en place des politiques de circulation contraignantes pour les véhicules diesel.

Nous avons imaginé des plates-formes de transbordement sur les principaux axes routiers à l'entrée des villes. En fonction de la taille de la ville, du nombre et de la localisation des plates-formes, les distances à parcourir en véhicules électriques vont s'allonger. Pour étudier le nombre de plate-forme par unité urbaine nous considérons que, pour être efficace, une plate-forme doit être le point de départ ou d'arrivée d'au moins 30 tournées par jour soit, compte tenu d'un chargement de 1.5 t et de 350 jours ouvrables par an, d'au moins $350 * 1,5 * 30 = 11\,700$ t. par an. On obtient le nombre maximum de plates-formes d'une UU en divisant son tonnage entrant + sortant par cette valeur de 11 700. A partir du tableau indiquant le poids total des envois entrants ou sortants de chaque aggro, il est possible de faire le compte du nombre maximum de plates-formes par taille d'agglomération en calculant :

tonnage annuel entrant + sortant de la catégorie d'UU / (nb de jours ouvrables * 2*15 * nb d'UU de la catégorie). On trouve les valeurs suivantes :

- UU de moins de 100 000 hab (1143 UU) : 51 plates formes au maximum par UU
- UU de 100 à 200 000 hab (23 UU) : 295 plates formes au maximum;
- UU de 200 000 à 2000 000 hab (29) : 360 plates formes au maximum;
- UU Paris : 5645 plates formes au maximum.

Sur ce critère, nous pouvons donc envisager un très grand nombre de plates-formes pour toutes les UU (y compris celles de moins de 100 000 habitants que nous ne traitons pas ici): nos limites pratiques seront la complexité du réseau et le temps de préparation et de calcul. Selon le réseau routier (nombre de grands axes) nous retenons entre 2 (Montbéliard) et plus de 20 (Paris) plates-formes par unité urbaine de plus de 100 000 h, localisées aux endroits où les grands axes routiers coupent la limite de l'unité urbaine. Les graphes ci-après montrent la localisation des plates-formes retenues (sur les axes de transit) pour les agglomérations de Paris, Bordeaux et Marseille.

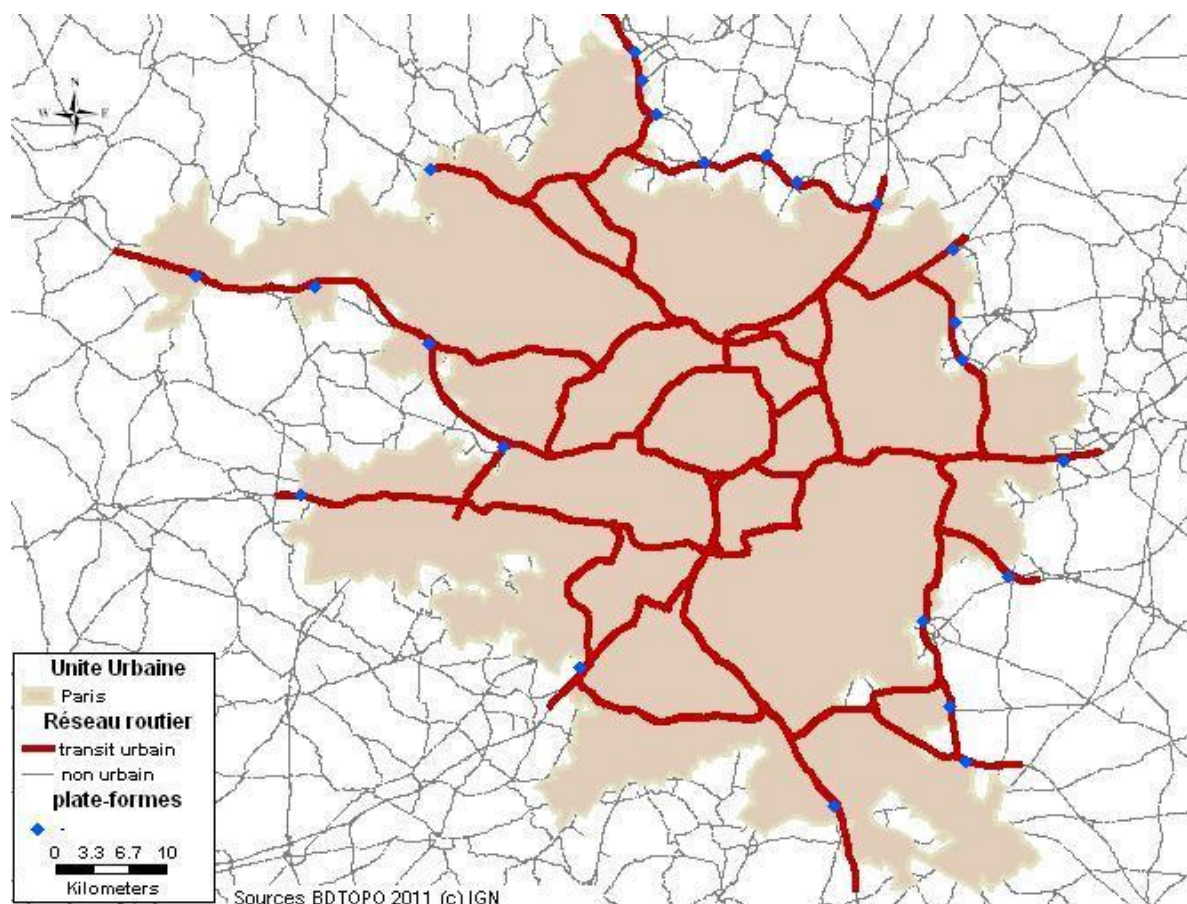


Figure 28 : Unité Urbaine de Paris (dessinée avec BD TOPO 2011© IGN)

L'unité Urbaine de Paris est bien sûr la plus grande et c'est là que pourrait se poser le plus souvent le problème de l'autonomie des camions électriques. Le choix du périmètre de la zone d'une part et celui des plates-formes d'autre part pourrait être déterminant.

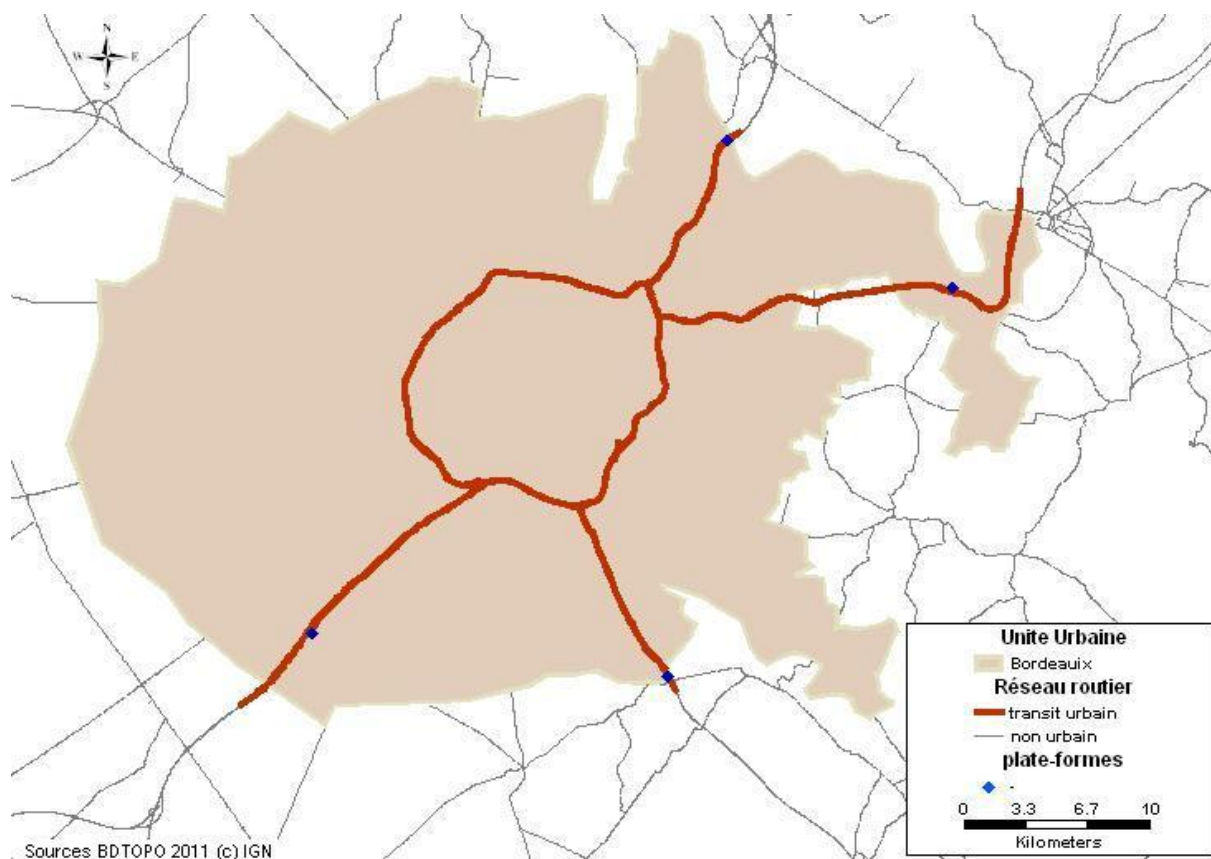


Figure 29 : Unité Urbaine de Bordeaux (dessinée avec BDTOPO 2011© IGN)

L'unité Urbaine de Bordeaux est relativement simple et sa taille 'raisonnable' permettrait de la desservir aisément par camions électriques.

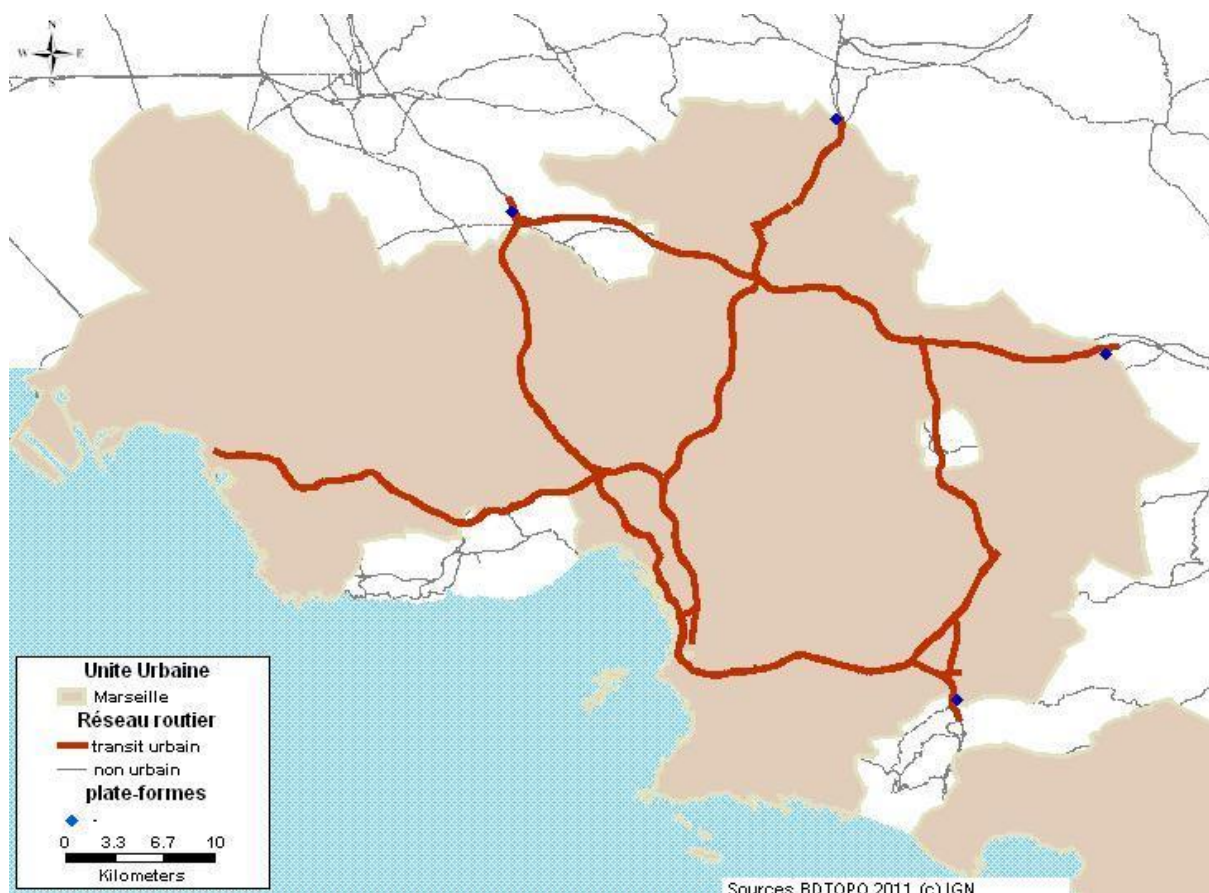


Figure 30 : Unité Urbaine de Bordeaux (dessinée avec BDTOP0 2011© IGN)

Pour Marseille, l'axe qui se dirige vers l'est et démarre au niveau de Fos sur Mer montre que le transit ne peut s'effectuer par l'ouest de l'Unité Urbaine, ce qui peut expliquer des allongements de parcours entre situation initiale et scénario. Le port de Marseille est au centre sud de l'Unité Urbaine et n'est pas concerné par le transit.

4.3.3. Distances des trajets urbains et autonomie des camions électriques

L'autonomie des camions électriques est une limite importante à l'électrification du fret urbain : pour chaque type de trafic étudié et pour l'ensemble du trafic électrifié dans le scénario 1, nous avons analysé la distribution du trafic en fonction de la distance des trajets.

Le graphe ci-dessous montre la distribution du nombre de trajets urbains selon leur distance et donc la proportion de ces trajets qui pourraient être électrifiés dans le scénario électrique, en fonction de la distance retenue comme maximale pour ces trajets en camions électriques. Cette proportion est d'un peu plus de 90% des trajets à 50 km. La plupart des trajets de plus de 30 km en agglomération se situent en région parisienne. Le graphe ci-dessous montre aussi la distribution des émissions de CO₂ urbaines selon la distance du trajet. Avec une autonomie permettant d'aller à 50 km, on couvre un peu plus de 80% des émissions.

L'autonomie actuellement annoncée pour les camions électriques (de l'ordre de 100 km) permettrait donc de couvrir environ 90% des trajets électriques aller-retour de nos scénarii urbains. Pour les 10% restant, il conviendrait soit d'améliorer l'autonomie des camions électriques, (jusqu'à 140 km

environ), soit de trouver un moyen de recharger la batterie avant de terminer l'aller-retour (recharge en route, à destination ou changement de batterie), soit encore d'optimiser la localisation des plates-formes en acceptant de réduire les zones de limitation du trafic diesel de fret en deçà des Unités urbaines.

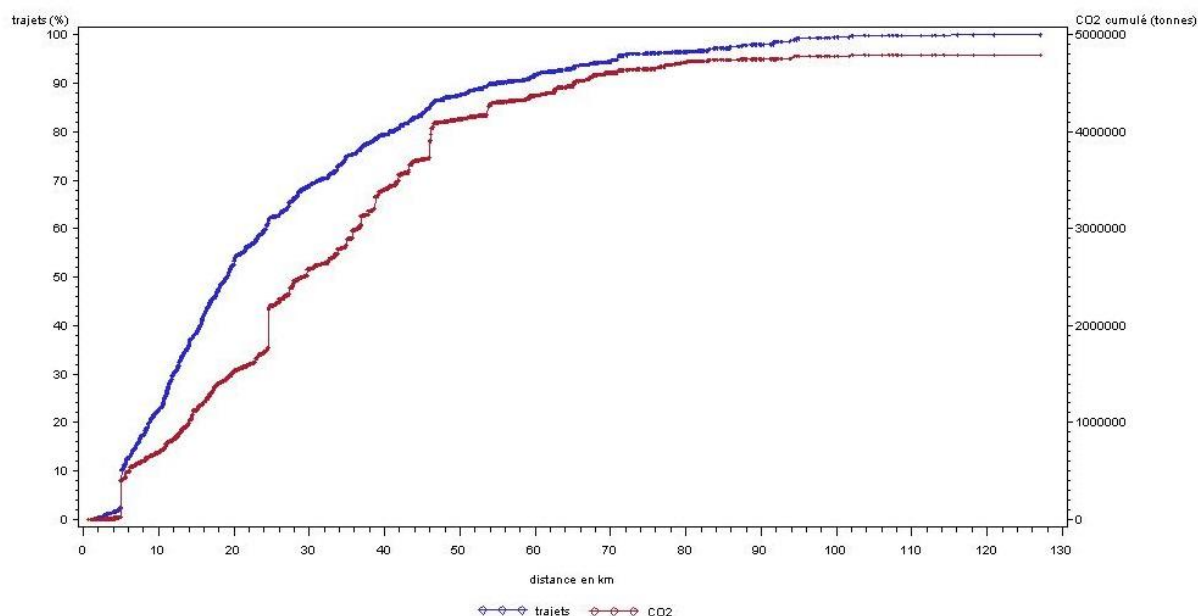


Figure 31: Distribution des trajets et du CO₂ selon la distance des trajets

Le pourcentage de trajets se lit sur l'axe de gauche et l'émission correspondante de CO₂ se lit sur l'axe de droite. A 50 km nous couvrons donc 87.6% des trajets qui émettent 4,134 millions de tonnes de CO₂ soit 86% du CO₂ total qui est de 4793640 tonnes. A 70 km nous couvrons près de 95% des trajets pour 4,612 millions de tonnes de CO₂ (96.22%) et les trajets au-delà de 100 km ne représentent que 0,45 % des trajets et émettent 0,010 millions de tonnes de CO₂.

4.3.4. Affectation du trafic sur le réseau routier et calcul du CO₂ urbain

Nous utilisons le réseau BD TOPO (pour la France) où la description du réseau routier (profil et types de voies et urbanisation) permet d'affecter une vitesse. Pour le transport de marchandises seules les voies 'importantes' sont conservées (réseau européen, liaisons entre métropoles, liaisons de ville à ville à l'intérieur d'un département), ce qui permet de limiter la pénétration des poids lourds dans les communes aux seuls axes de transit. L'affectation se fait sans contrainte de capacité, en minimisant le temps de parcours.

On commence par affecter le trafic dans la situation initiale (situation 2004 décrite dans ECHO avant d'introduire les véhicules électriques), ce qui permet de calculer les véhicules.km et le CO₂, pour l'ensemble du trafic routier et à l'intérieur des unités urbaines. La figure ci-dessous illustre l'affectation du trafic ECHO sur le réseau national.

Puis pour chaque UU, on introduit les plates-formes et on modifie le réseau pour tenir compte des nouvelles contraintes introduites dans le scénario Urbain Electrique : interdiction de circuler en ville pour les camions diesel sauf les autoroutes urbaines. Enfin, pour les différentes catégories de trajets

distinguées, on calcule leur nouvel itinéraire et, pour les trajets entrant ou sortant des UU, on divise le trajet initial en deux parties qui se rejoignent sur la plate-forme la plus proche du point situé dans l'UU. Le trajet extérieur à l'agglomération reste en diesel ; ses caractéristiques ne sont pas modifiées (type de véhicule, poids du chargement, ..) et l'émission de CO2 du trajet suivi est modifiée au prorata des distances.

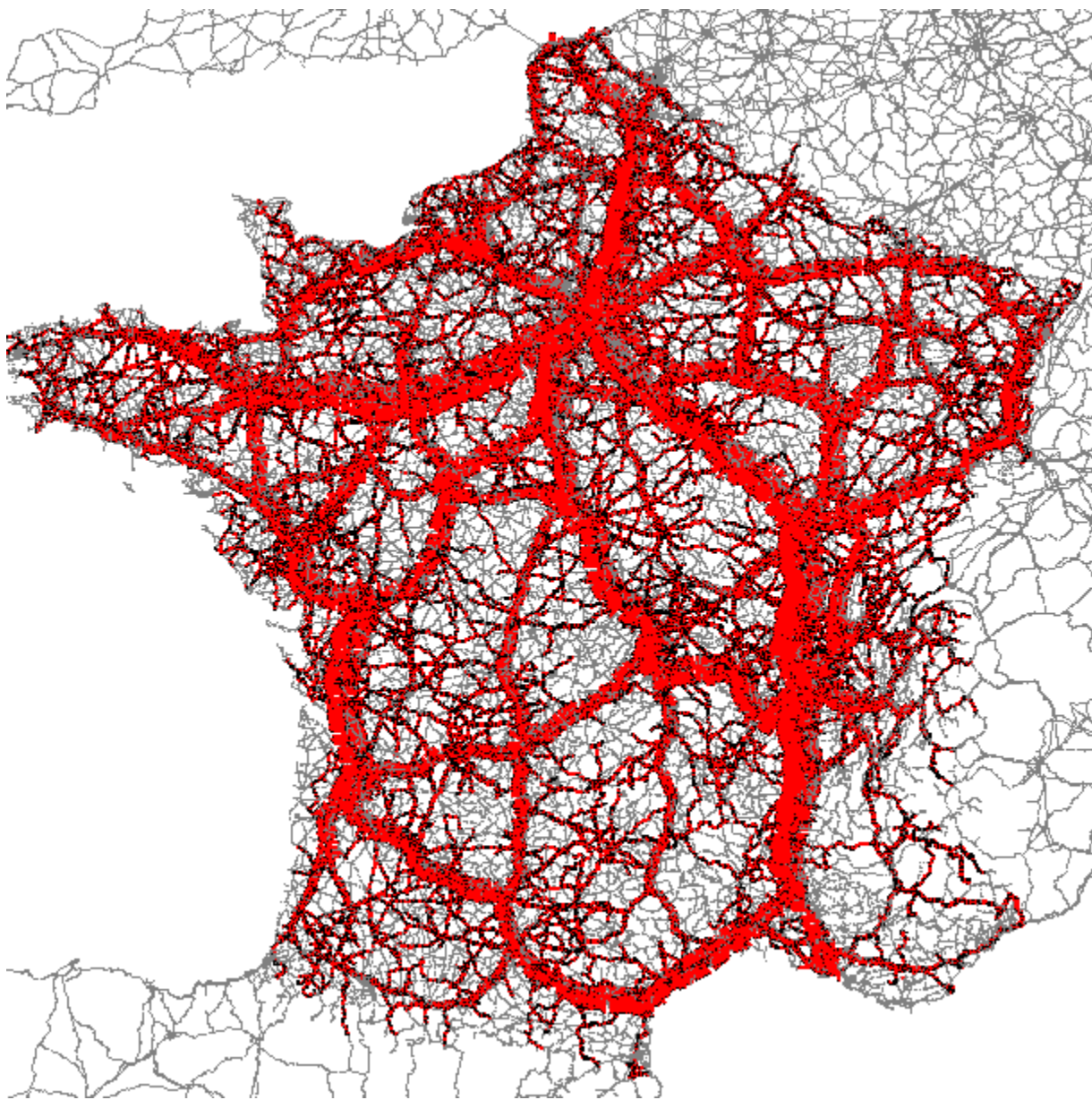


Figure 32 : Carte des trajets routiers ECHO affectés sur le réseau dans la situation initiale (2004)

Le nouveau trajet de pénétration ou de sortie de l'agglomération est alors supposé réalisé en camion électrique, de la manière suivante.

Dans le scénario E1, avec les camions électriques de 2 tonnes de CU, on commence par les envois de poids supérieur ou égal 20 tonnes, qui restent en diesel, puis

- trajets internes :

- si le poids de l'envoi est inférieur à 20 tonnes et supérieur ou égal à 2 t., alors l'envoi ne transite pas par une plate-forme et garde les mêmes OD que le trajet initial ; le nombre de camions électriques est alors l'arrondi supérieur du poids de l'envoi divisé par 2 et le poids du chargement est égal au poids de l'envoi divisé par le nombre de camions électriques
- si $0,5 \text{ t} \leq \text{poids de l'envoi} < 2 \text{ t}$. l'envoi ne transite pas par une plate-forme, le nombre de camions électriques = 1 ; poids du chargement = poids de l'envoi ;
- si $0,5 \text{ t} > \text{poids de l'envoi}$ l'envoi transite par une plate-forme et le trajet diesel est découpé en 2 trajets électriques pour lesquels poids du chargement = 1,6 ; nombre de camions électriques = poids de l'envoi / poids du chargement.

- trajets entrants ou sortants : ces envois transitent tous (sauf transit) par une plate-forme pour le trajet électrique :

- si $2 \text{ t} \leq \text{poids de l'envoi} < 20 \text{ t}$ l'envoi est réparti entre plusieurs camions électriques, le nombre de camions électriques = arrondi supérieur de poids de l'envoi / 2 ; poids du chargement = poids de l'envoi / nb de camions électriques.
- si $1,6 < \text{poids de l'envoi} \leq 2 \text{ t}$. l'envoi n'est pas regroupé. Nombre de camions électriques = 1 ; poids du chargement = poids de l'envoi.
- si poids de l'envoi $< 1,6$ l'envoi est regroupé avec d'autres envois dans un chargement de 1,6 tonnes ; poids du chargement = 1,6 ; nombre de camions électriques = poids de l'envoi / poids du chargement.

Le CO₂ de l'envoi sur chaque trajet électrique est alors calculé comme : $0.029 \times \text{dist } 1,5 \times \text{nb de camions électriques}$.

Dans le scénario E2, avec les camions électriques de 6 tonnes de CU, il n'y a plus de dérogation pour les envois de plus de 20 tonnes ; les formules sont identiques aux précédentes, mutatis mutandis.

- trajets internes :

- si le poids de l'envoi est supérieur à 6 t., l'envoi ne transite pas par une plate-forme et garde les mêmes OD que le trajet initial ; le nombre de camions électriques = arrondi supérieur de poids de l'envoi / 6 ; poids du chargement = poids de l'envoi / nb de camions électriques.
- Si le poids de l'envoi est compris entre 6 et 4,8 t., l'envoi n'est pas regroupé : le poids du chargement = poids de l'envoi ; nombre de camions électriques = 1.
- Si le poids de l'envoi est $< 4,8 \text{ t}$. l'envoi est regroupé avec d'autres envois dans un chargement de 4,8 tonnes. Le nombre de camions électriques = poids de l'envoi / poids du chargement.

- trajets entrants ou sortants : ils transitent tous par une plate-forme :

- Si le poids de l'envoi est supérieur à 6 t, l'envoi est réparti entre plusieurs camions électriques, nombre de camions électriques = arrondi supérieur de poids de l'envoi / 6 ; poids du chargement = poids de l'envoi/nb de camions électriques.
- Si le poids de l'envoi est compris entre 4,8 < poids d'envoi ≤ 6 t, l'envoi n'est pas regroupé ; le nombre de camions électriques = 1 ; poids du chargement = poids de l'envoi.
- Si le poids de l'envoi est inférieur à 4,8 t, l'envoi est regroupé avec d'autres envois dans un chargement de 44,8 tonnes; le nombre de camions électriques = poids de l'envoi / poids du chargement.

Le calcul du CO₂ de l'envoi par trajet électrique devient alors (avec des camions électriques de 6 t de CU) : 0,040 x dist x 1,5 x nb de camions électriques.

Dans les 2 cas scénarii (2 ou 6 t. de CU) les véhicules.km sont le produit de la distance par le nb de camions électriques.

Pour les trajets en transit à travers une Unité Urbaine, c'est l'affectation sur le réseau qui est modifiée : soit il existe une autoroute traversant l'agglomération et l'itinéraire choisi ne doit pas sortir de cette autoroute, soit le véhicule doit contourner l'unité urbaine.

4.3.5. Résultats des scénarii électriques

Tableau 41 : Evolution des émissions de CO₂ww et des Veh.km dans les scénarii, en tonnes¹⁷

	Situation initiale	scénario E1 (CU 2t.)	scénario E2 (CU 6t.)
veh.km (milliards)¹⁸	41,7	42,8 (+ 3%)	39,6 (-5%)
dont vkm en UU ≥ 100 000 habitants	7,7	8,4 (+ 9%)	5,3 (-31%)
dont vkm en UU < 100 000 habitants	7,8	7,9 (+ 2%)	7,9 (+ 2%)
CO₂ route (millions de tonnes)	35,0	31,0 (-11%)	30,8 (-12%)
dont CO ₂ en UU ≥ 100 000 habitants	7,5	3,2 (-57%)	3,0 (-60%)
dont CO ₂ en UU < 100 000 habitants	7,6	7,9 (+ 4%)	7,9 (+ 4%)

Sur le Tableau 41, le total des émissions WW du trafic routier de fret pris en compte dans ECHO (situation 2004 sans scénario) s'élève à 35,0 millions de tonnes de CO₂, dont 7,5 millions de tonnes dans les unités urbaines françaises d'au moins 100 000 habitants et 7,6 dans celles de moins de 100 000 habitants. Près de la moitié des émissions du transport de fret (43%) sont émises dans les unités urbaines.

¹⁷ Les résultats détaillés sont présentés en Annexe 3.

¹⁸ En 2004, le Bilan de la circulation indique 21,7 milliards de vkm pour les poids lourds (source TRM) et 89,7 milliards de vkm pour les VULs (source enquête VUL) mais ces VULs roulent très majoritairement pour d'autres raisons que le transport de marchandises.

Dans le scénario E1 (fret urbain en camions électriques de 2 t. de charge utile), la réduction de CO₂ est de 4 millions de tonnes. Ce sont les grandes unités urbaines qui réduisent leurs émissions (-57 %) alors que les petites unités urbaines voient au contraire leurs émissions augmenter légèrement (+4 %) en raison d'un détournement du trafic qui 'fuit' les grandes agglomérations. La contrepartie de cette réduction des émissions est une augmentation de la circulation des camions en ville, principalement dans les grandes unités urbaines (+9 %), du fait que les camions électriques sont limités à 2 t. de charge utile mais aussi dans les petites (+2 %) en raison du détournement de trafic indiqué précédemment. Cette augmentation de la congestion urbaine serait un vrai problème pour les villes qui sont déjà près de la saturation.

Dans le scénario E2 (fret urbain en camions électriques de 6 t. de charge utile), le gain de CO₂ est légèrement plus important (4,2 millions de t. soit 12 % des émissions du fret) principalement du fait que l'on supprime les dérogations aux camions diesel pour les envois de plus de 20 tonnes. En revanche, le trafic urbain de camions diminue très sensiblement dans les grandes villes, y compris par rapport à la situation initiale (-31 %). En revanche la situation du trafic de camions reste inchangée par rapport au scénario E1 dans les unités urbaines de moins de 100 000 habitants et donc dégradée par rapport à la situation initiale.

La réduction des émissions dans les scénarii électriques apparaît importante par rapport aux émissions des grandes unités urbaines concernées (-57 % et -60 %). Elle est limitée par le fait que les trajets de transit par les autoroutes urbaines n'ont pas été remplacés par des véhicules électriques, pour ne pas imposer un trop grand nombre de chargements et déchargements. Cette réduction d'émissions est surtout limitée au regard de l'ensemble des émissions du fret (-11 et -12 %) ; elle pourrait être environ deux fois plus importante si l'électrification du fret urbain était étendue à l'ensemble des unités urbaines, c'est-à-dire aux unités urbaines de moins de 100 000 habitants mais, il est vrai, au prix d'une perturbation nettement plus importante du fret interurbain.

Enfin il faut rappeler ici que les camions électriques présentent d'autres avantages que la réduction des GES, notamment la réduction des émissions de particules et autres polluants locaux ainsi que le bruit, qui sont généralement considérés comme le bénéfice principal des véhicules électriques en ville, les GES n'étant souvent considérés que comme un co-bénéfice.

4.4. Deux scénarii de réduction des émissions non spécifiquement urbaines I1 et I2

4.4.1. Scénario 'interurbain' I1 : développement du GNV

Présentation et intérêt du scénario

Le gaz naturel véhicules se compose essentiellement de méthane (CH₄) et d'hydrocarbures très légers. Ses atouts sur les plans énergétique et environnemental sont :

- la réduction de la dépendance au pétrole ;
- la réduction des émissions de polluants locaux : pas de particules, peu d'oxydes d'azote et absence de polluants non réglementés ;
- la réduction du bruit par rapport au Diesel ;

- son facteur d'émission WW de 2,13 kg de CO₂ par litre contre 3,07 pour le gazole (MEDDE, 2012).

Pour estimer une réduction potentielle des émissions, il faut tenir compte de l'efficacité énergétique comparée de ces deux carburants. Comme il existe encore très peu de poids lourds au GNV, on peut faire l'hypothèse que ces moteurs n'ont pas encore atteint le niveau d'optimisation de celui des moteurs diesel. Nous avons estimé ces gains potentiels à partir des données IVECO reprises par AFGNV (2012), cf. Tableau 42 & Tableau 43 ci-après.

- Du point de vue de la sécurité, le gaz naturel véhicules est plus léger que l'air (il se dilue donc rapidement dans l'atmosphère) et possède un point d'inflammation très élevé (540°C). Les réservoirs sont dimensionnés pour résister aux chocs, notamment lors d'accident, et les circuits d'alimentation en gaz sont munis de vannes de sécurité.

- En attendant la diffusion de pompes distribuant ce type de carburant, l'autonomie du véhicule, s'il ne trouve pas une pompe sur son chemin, est limitée à la capacité du réservoir. Actuellement le GNV est donc utilisé principalement par des services urbains dont les véhicules rentrent au dépôt tous les jours (bus, bennes à ordures ménagères, etc) ou sur des lignes régulières.

Contrairement aux véhicules électriques, l'autonomie du véhicule est limitée à la capacité du réservoir. La réalisation de ce scénario est conditionnée à la diffusion de pompes à essence distribuant ce type de carburant en France. Actuellement, leur nombre est réduit (cf. Figure 33).

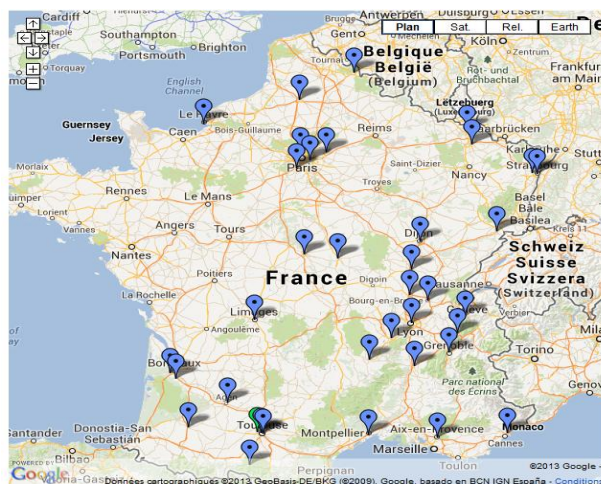


Figure 33 : Les stations GNV en France

Source : <http://www.automobile-propre.com/stations/carte-stations-gnv-france/> (le 4 juin 2013)

Pour estimer la réduction des émissions d'un trajet lorsque l'on passe du diesel au GNV, nous avons utilisé des données IVECO publiées par l'AFGNV et estimé une réduction d'émissions en valeur relative par type de véhicule (% de réduction des émissions lorsqu'on passe d'un véhicule diesel au même véhicule au GNV). Le Tableau 42 présente une comparaison entre les solutions GNV et diesel ; il indique des gains majeurs en termes de pollution locale mais moins importants en ce qui concerne les émissions de CO₂.

Tableau 42 : Comparaison GNV-Diesel des poids lourds en termes de polluants et d'émissions de CO₂

Type d'émissions (g/kWh)	Norme ou carburant	Coût externes* (cts €/g)	Limites des émissions imposées par les normes Euro					Exemples d'émissions de camion Iveco disponibles au 1-1-2012					
			Euro 3	Euro 4	Euro 5	EEV	Euro 6	Ecodyly 3,5 t à 7 t, moteur FIC		Eurocargo 12 t à 16 t, moteur Tector 6		Stralis 19 t à 44 t, moteur Cursor 8	
								GNV	Diesel	GNV	Diesel	GNV	Diesel
NO _x	0,44		5,80	3,50	2,00	2,00	0,40	0,28	1,90	0,47	1,76	0,15	1,53
CO (monoxyde de carbone)	0		5,45	4,00	4,00	3,00	4,00	1,51	0,32	1,40	0,59	2,78	0,69
HCNM (hydrocarbures non méthaniques)	0,1		0,780	0,550	0,550	0,400	0,160	0,019	0,070	0,006	0,020	0,080	0,080
Particules	8,7		0,160	0,030	0,030	0,020	0,010	0,005	0,004	0,002	0,014	0,002	0,017
CH ₄	0		1,000	1,100	1,100	0,650	0,500	0,193	-	0,012	-	0,180	-
CO ₂ (à titre indicatif)	0,003		Non applicable**					819	852	774	823	730	797
Coûts d'impact sur la santé publique d'un véhicule (cts €/ kWh)*								2,626	3,434	2,547	3,367	2,281	3,072

* Coûts externes relatifs aux impacts énergétiques, environnementaux et sanitaires liés à la gestion des véhicules durant toute leur durée de vie; coûts calculés à partir des données de la directive 2009/33/CE.
 ** Le CO₂ n'est pas un polluant direct, car respirer du CO₂ n'est pas toxique pour l'homme avant des doses très élevées.
 À ce jour, aucun véhicule Diesel n'est disponible avec l'homologation Euro 6.

Source : AFGNV, 2012

Mise en œuvre du calcul

Dans la base ECHO, le PTAC de chaque véhicule est indiqué et a été estimé en cas de valeur manquante (cf. 1.1.3). Nous appliquons un coefficient de réduction des émissions à chaque trajet routier en fonction du type de véhicule routier selon les valeurs récapitulées dans le Tableau 43.

Tableau 43 : Coefficients de réduction d'émissions de CO₂ en passant du diesel au GNV

PTAC du véhicule	Réduction estimée en %
Moins de 3,5 tonnes	-2,58 %*
3,5 à 7 tonnes	-3,87 %
7 à 12 tonnes (exclus)	- 5,27 %*
12 à 16 tonnes	-5,95%
16 à 19 (exclus) tonnes	-6,52 %*
19 à 44 tonnes	-8,40 %

Dans ce Tableau 43, les coefficients pour lesquels nous n'avons pas de valeur de référence dans le document de l'AFGNV sont indiqués par un astérisque. Nous les avons estimés à partir de la fonction suivante, élaborée à partir des données disponibles dans le Tableau 42 :

$$\text{Coeff_réduction} = 2,232 \ln (\text{PTAC_véhicule}) + 0,1316$$

Résultats à partir de la base de données ECHO

Nous avons décomposé les résultats en fonction du caractère urbain du point de départ ou d'arrivée du trajet (Tableau 44). Il faut noter que nous avons pu définir le caractère urbain uniquement pour les communes françaises, aussi les trajets non-urbains ou urbains sortant peuvent comporter une destination urbaine à l'étranger.

Les coefficients de réduction appliqués aux trajets routiers de la base ECHO montrent que le potentiel de réduction reste faible même en cas de conversion de l'ensemble du parc puisque la réduction estimée avec un scénario tout GNV est de 7,5 % pour l'ensemble des trajets.

Tableau 44 : Emissions de CO₂ du mode routier : situation observée et scénario GNV

Type de trajet (agglomérations françaises uniquement)	Nbre d'obs.	CO ₂ (WW) observé (en millions de t)*	CO ₂ (WW) scénario GNV (en millions de t)	% de réduction
Trajets non urbain	429	681 952	630 398	7,6%
Trajets intra-urbain	3 243	2 326 337	2 177 284	6,4%
Trajets urbain-sortant	1 402	3 513 172	3 256 106	7,3%
Trajets urbain-entrant	1 845	4 798 379	4 418 882	7,9%
Trajets interurbain	10 425	26 618 390	24 623 890	7,5%
Trajets étranger-étr.	1076	759 062	703 954	7,3%
TOTAL	18420	38 697 291	35 810 515	7,5%

* Trajets effectués par mode routier dont au moins une partie est effectuée en France

Par catégories de trajets (urbains non-urbain cf. Tableau 44) nous remarquons que cette réduction est peu sensible au caractère urbain du trajet et c'est pour les trajets intra-urbains, le champ d'action actuellement privilégié pour ce type de véhicule, que la diminution serait la plus faible (-6,4% au lieu de 7,5% en moyenne) ce qui correspond à une part plus importante de petit véhicules dans le trafic urbain.

Ce scénario reste fortement conditionné au développement de véhicules avec cette technologie, mais également à l'approvisionnement (nombres de stations distribuant du GNV).

4.4.2. Scénario 'interurbain' I2 : taxe carbone

Nous considérons ici l'augmentation du prix du carburant qui résulte de la taxe carbone ; son impact est analysé à travers l'élasticité du transport de fret au prix du carburant.

Le signal donné par le prix des carburants est un outil fondamental pour faire évoluer les comportements de l'ensemble des opérateurs du transport aussi bien pour les marchandises que pour les voyageurs. Si l'on suppose connue la demande de carburant en fonction du prix, un objectif de trafic routier peut être obtenu en fixant le prix du carburant, au moyen d'une taxe qui s'ajoute au coût de production. La question centrale est alors de connaître la forme de la fonction de demande de carburant selon son prix. Dans le cas d'une politique de régulation du CO₂ par le prix du carburant, cette question peut se traduire par : connaissant le niveau actuel de la demande de carburant (et donc des émissions de CO₂), quel est le prix du carburant qui permettra d'atteindre l'objectif retenu en terme de CO₂ ? Autrement dit, quelle est l'élasticité de la demande de carburant au prix de ce dernier ?

En pratique, la mesure utile de la sensibilité de la demande au prix est l'élasticité prix directe, qui est généralement définie comme une variation relative de la quantité demandée par rapport à une variation relative du prix.

Rappels sur les élasticités

Si la quantité demandée varie en réponse à une variation du prix, on parle d'une demande élastique ; dans le cas contraire, la demande est qualifiée d'inélastique. On définit également l'élasticité prix croisée, comme une mesure de la variation relative de la quantité demandée du bien 2 par rapport à une variation relative du prix du bien 1. Cette élasticité peut être positive (biens substituables), nulle (biens indépendants) ou négative (biens complémentaires). Dans le cas qui nous intéresse, les différents modes peuvent être considérés comme en partie substituables : une augmentation du prix du gazole routier entraîne une réduction de la demande de fret routier mais aussi une augmentation de la demande pour les autres modes, en particulier pour le chemin de fer.

La mesure de l'élasticité dépend essentiellement des caractéristiques de la fonction de demande, laquelle résulte de l'agrégation des demandes individuelles et de ce fait dépend de l'hétérogénéité des préférences individuelles. Si l'on fait l'hypothèse simple que la demande Q est une fonction linéaire du prix de la forme $Q = \alpha P + \beta$ alors l'élasticité prix est donnée par la formule $\varepsilon = \alpha P/Q$; L'estimation d'un modèle sous forme logarithmique permet d'obtenir une élasticité constante qui est le coefficient du logarithme de la variable explicative.

La spécification choisie pour cette fonction de demande dépend beaucoup des données disponibles et sera déterminante pour la mesure de l'élasticité. Les élasticités varient selon la méthodologie. Parmi les autres types de spécification, les modèles de choix discret de type logit permettent de calculer des élasticités variables par l'intermédiaire des parts de marché. Les élasticités estimées de la demande varient selon la forme du modèle retenu : modèle linéaire, log-linéaire, logit ou translog.

Il est aussi important de souligner que les estimations des élasticités de la demande fluctuent en fonction des données utilisées soit en coupe instantanée, soit en série temporelle.

Elasticités de court et de long terme

Lorsque le prix change, la réponse de la demande n'est pas immédiate vu les délais d'ajustement. Le court terme correspond à une période de temps au cours de laquelle certains effets ne se produisent pas. A long terme cependant, la quasi-totalité des ajustements ont lieu. L'intérêt des modèles dynamiques est de capturer les réponses à long terme et séparer le court du long terme. Le modèle dynamique fait intervenir le temps ; il peut s'écrire :

$$G_t = \alpha + \beta P_t + \gamma I_t + \delta G_{t-1} \quad (3)$$

β et γ donnent les effets à court terme et $\beta / (1-\delta)$ et $\gamma / (1-\delta)$ les effets à long terme.

L'économétrie des séries temporelles a connu un développement remarquable depuis les années 1960 et 1970. En cas de non stationnarité des séries et d'intégration d'ordre un, de nouvelles procédures d'estimation faisant intervenir les notions de co-intégration ou de modèle à correction d'erreur sont utilisées. Ainsi un modèle à correction d'erreur est le suivant :

$$G_t = \alpha + \beta P_t + \gamma I_t + \delta G_{t-1} + \varepsilon_t \quad (4)$$

$$\Delta G_t = G_t - G_{t-1} \quad (5)$$

$$\Delta G_t = c + d \varepsilon_{t-1} + \sum_i e_i \Delta P_{t-i} + \sum_j f_j \Delta I_{t-j} + u_t \quad (6)$$

β et γ donnent les effets de long terme et d est le coefficient d'ajustement, il mesure la vitesse à laquelle les variables s'ajustent pour revenir à l'équilibre de long terme.

Les effets à long terme sont sensiblement plus importants que les effets à court terme, tant pour les prix que pour les revenus, et pour toute mesure de la demande.

Elasticités de la demande de transport de fret

L'élasticité de la demande de fret a été étudiée plus tardivement et avec moins de raffinements que celle de la demande de voyageurs. On distingue les élasticités de la demande de transport de fret, généralement exprimée en tkm, de l'élasticité du trafic, exprimé en veh.km et les élasticités qui portent sur un ensemble de modes en concurrence, par exemple le transport terrestre, de celles qui portent sur un seul mode, les premières étant généralement basées sur un modèle de choix modal. L'élasticité varie aussi selon les marchandises transportées. Ici nous ne considérons que le transport routier de fret et non l'impact d'un changement du prix du carburant ou d'un changement du prix du transport routier sur le transfert entre la route et les autres modes et nous considérons l'ensemble des marchandises transportées par la route. En résumé nous nous proposons ici d'estimer la relation entre la demande de transport routier de marchandises et le prix du carburant en France, en utilisant des séries temporelles et un modèle à correction d'erreur.

Les différents effets d'une augmentation du prix du carburant qui sont pris en considération ici sont : réduction de la demande de fret routier, report d'une partie du trafic du compte propre sur le compte d'autrui, et meilleur taux de remplissage des camions. Pour quantifier l'impact d'une variation du prix du gazole sur le transport routier de marchandises, nous avons analysé l'évolution de la demande de transport de fret exprimée en tonnes kilomètres (tkm) d'une part et en véhicules kilomètres (veh.km) d'autre part, en fonction de l'évolution du prix du gazole. Nous utilisons les séries trimestrielles de l'enquête TRM pour la demande de fret et les données du CNR (Comité National Routier) pour le prix du gazole.

Les données utilisées

Pour la demande de transport, nous utilisons les résultats de l'enquête TRM, (sondage parmi les immatriculations françaises de poids lourds âgés de moins de 15 ans), publiés par trimestre, notamment sur les tkm et les vkm réalisés. Pour le prix du gazole, nous retenons le prix mensuel hors taxe du gazole à la cuve, issu d'une enquête bimensuelle réalisée par le Conseil National des Transports ; nous recourons à la moyenne arithmétique pour le rendre trimestriel. Nous utilisons aussi l'indicateur de PIB de l'INSEE. Notre période d'analyse s'étale du premier trimestre 1998 au quatrième trimestre 2010, soit 52 observations. La Figure 34 ci-dessous retrace l'évolution de ces données trimestrielles en indice (1998 = 100).

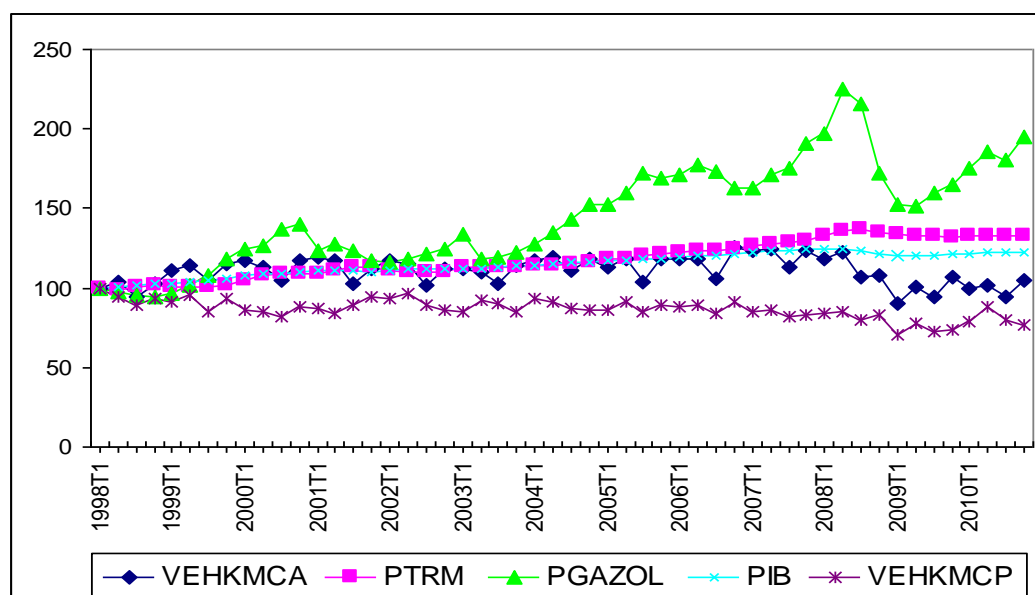


Figure 34 : Évolution des principales données trimestrielles en indice (1998 = 100)

Source : Données Enquêtes TRM (SOES), CNR, INSEE

Après avoir vérifié la non stationnarité de ces séries et tester la cointégration entre les séries nous sommes en mesure d'analyser les relations de long terme entre les variables. Nous ne présenterons ici que les résultats des modèles log-log qui correspondent à l'hypothèse d'une élasticité constante dans le temps¹⁹.

Le Tableau 45 ci-après présente les relations de long terme pour nos modèles 'à élasticité constantes' (dont les séries sont exprimées en logarithme). Les constantes de nos équations (ordonnées à l'origine) n'étant pas significativement différentes de 0, nous retenons les modèles sans constantes.

Tableau 45 : Résultats des régressions log-log entre VEHKM ou TKM et PIB, PGAZOL

	Variables	Coefficients	Std error	t-ratio	Qualité de l'ajustement
LOGVEHKM	LOGPIB	1.22	0.11	10.21	R ² =0.80
	LOGPGAZOL	-0.33	0.10	-3.24	
LOGTKM	LOGPIB	1.27	0.13	9.19	R ² =0.74
	LOGPGAZOL	-0.31	0.13	-2.30	

Pour l'ensemble du transport routier de fret, une croissance de 10 % des prix du gazole entraîne une diminution de 3,3% du trafic exprimé en veh.km et de 3,1% de la demande de transport exprimée en tkm ; compte tenu des écarts types, ces élasticités sont significativement différentes de zéro mais leur précision est faible. La différence entre élasticité du trafic (véhicules km) et l'élasticité de la

¹⁹ Les résultats détaillés de ces calculs d'élasticité et notamment la variation des élasticités dans le temps sont publiés dans les *Cahiers scientifiques du transport*, n°64, pp. 119-142

demande (tkm) s'explique par le fait que, quand le prix du carburant augmente, les camions sont de mieux en mieux remplis.

En France, le compte propre représente, en 2007, 15 % des tkm et 25 % des veh.km sur la partie nationale des trajets (données TRM) et nous avons vu (figure 1) qu'il ne se comporte pas comme le compte d'autrui. Le tableau suivant indique les élasticités à long terme au prix du carburant du transport pour compte propre d'une part et du compte d'autrui d'autre part.

Tableau 46 : Résultats des régressions log-log entre VEHKMCA ou TKMCA et PIB, PGAZOL (équations 9 et 11 en log log)

	Variables	Coefficients	Std error	t-ratio	Qualité d'ajustement
LOGVEHKMCA	LOGPIB	1,26	0,13	9,35	$R^2=0,82$
	LOGPGAZOL	-0,30	0,13	-2,3	
LOGTKMCA	LOGPIB	1,23	0,08	14,40	$R^2=0,67$
	LOGPGAZOL	-0,25	0,08	-3,08	
LOGVEHKMCP	LOGPIB	1,38	0,60	2,28	$R^2=0,47$
	LOGPGAZOL	-0,44	0,16	-2,71	
LOGTKMCP	LOGPIB	1,42	0,07	19,78	$R^2=0,48$
	LOGPGAZOL	-0,43	0,07	-6,21	

En compte d'autrui, la demande de transport routier de fret exprimée en tkm (-0,25) semble un peu moins sensible au prix du gazole que le trafic (-0,30), ce qui correspondrait à une augmentation du chargement moyen lorsque le prix du gazole augmente. Il faut toutefois noter que, compte tenu des écarts-types, les intervalles de confiance à 95% se recouvrent : il n'est pas certain que l'élasticité des tkm soit supérieure à celle des veh.km.

Les élasticités du compte propre sont légèrement supérieures en valeur absolue à celles du compte d'autrui (0,44 contre 0,30 pour les veh.km et 0,43 contre 0,25 pour les tkm) mais, là encore, compte-tenu de la précision des estimateurs ces différences ne sont pas significatives au seuil de 5%. Notons également qu'en compte propre, les élasticités des veh.km et tkm sont presque les mêmes (-0,4), ce qui pourrait s'expliquer par le fait qu'il y a moins de possibilité d'augmenter le poids du chargement que dans le compte d'autrui.

Ces élasticités du trafic peuvent alors se transformer en élasticité de la consommation d'énergie et donc des émissions au prix du carburant, moyennant les deux hypothèses suivantes :

- que la consommation unitaire est peu sensible aux variations de prix du carburant,
- que l'augmentation du prix du carburant routier ne se traduirait pas par une augmentation importante de la demande pour les autres modes et donc une augmentation correspondante de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂ de ces autres modes.

Une taxe (carbone ou autre) qui viendrait augmenter de 10 % le prix du carburant réduirait alors de 3 % les émissions de CO₂ du transport routier et, inversement, pour réduire de 20% les émissions il faudrait (*caeteris paribus*) augmenter le prix du gazole de 60 %.

4.5.Scénario de réduction maximum par combinaison des différentes mesures envisagées et conclusion

Il est important de réfléchir aussi à la manière dont ces différentes mesures peuvent être complémentaires car il est clair que leurs impacts ne peuvent simplement s'additionner. Des scénarii développés précédemment, nous avons choisi de combiner ceux qui présentent les réductions d'émissions de CO₂ les plus significatives. Notre scénario va donc combiner l'électrification du fret urbain et une taxe sur le carbone.

Nous partons du résultat du scénario électrique E2 (Charge utile de 6 t.) présenté au Tableau 41 qui, sur un total de 35 millions de tonnes de CO₂, permet une réduction de 4,2 millions de t. La consommation de diesel dans ce scénario est donc de 30,8/3,07 = 10 000 m³ de gazole.

Le prix actuel du gazole est de 1,30 € par litre à la pompe soit 1,09 € hors TVA. Une taxe de 100 € par tonne de carbone correspond à 27,2 € par tonne de CO₂, compte tenu d'un facteur de 3,67 t. de CO₂ par tonne de carbone soit une augmentation de 8 centimes par litre ou 8% du prix du litre de gazole hors TVA, compte tenu d'un facteur d'émission de 3,07 kgCO₂ WW. Avec une élasticité de -0.30 cette augmentation du prix du gazole se traduirait par une réduction de 2,3% des émissions de CO₂. Appliqué à 30,64 millions de t ceci donne une réduction de 0,7 millions de t CO₂. Si l'on y ajoute la réduction de 4,2 millions de t résultante de l'électrification on obtient une réduction globale de 14% des émissions du fret routier.

Le Tableau 47 ci-dessous montre comment évolue cette réduction globale des émissions du fret routier dans différentes hypothèses de taxe carbone.

Tableau 47 : Réduction du CO₂ du fret routier dans différentes hypothèse de taxe carbone

Montant de la taxe carbone en €			effet de la taxe carbone seule				Taxe carbone + véh. électrique
Par tonne de carbone	Par tonne de CO ₂	€/l gazole	% augmentation gazole	% réduction CO ₂	réduction CO ₂ millions t.	CO ₂ restant	% réduction globale du CO ₂ routier
10	2,72	0,01	0,01	0,002	0,1	30,7	12%
50	13,6	0,04	0,04	0,012	0,4	30,4	13%
100	27,2	0,08	0,08	0,023	0,7	30,1	14%
400	109	0,33	0,31	0,092	2,8	28,0	20%
1000	272	0,84	0,77	0,230	7,1	23,7	32%
1300	354	1,09	1,00	0,299	9,2	21,6	38%

La taxe carbone maximale envisagée est de 1300 € par tonne de carbone ; elle conduit à doubler le prix HTVA du gazole et à une réduction globale de 38% des émissions du fret routier (en tenant compte de la réduction liée à l'électrification du fret urbain, scénario E2).

Les résultats de ce scénario 'maximum' ne tiennent pas compte d'éventuels transferts modaux de la route et de l'air vers les modes moins carbonés, ni d'autres mesures possibles de réduction des émissions telles que l'éco-conduite dont les estimations sont très variables (Barkenbus, 2010). Les résultats ne prennent également pas en compte d'éventuelles améliorations techniques (pneumatiques, introduction de bio-carburants, etc.). On constate cependant que cette réduction, malgré le caractère très contraignant du scénario, est très inférieure à l'objectif de facteur 4.

Conclusion de la quatrième partie

Parmi les nombreuses politiques envisageables de réduction des émissions du CO₂ du fret, la base ECHO-CO₂, notamment quand elle est utilisée avec un outil puissant d'affectation du trafic tel que BDTOPO, se prête particulièrement à l'analyse détaillée des scénarios.

Les émissions urbaines de CO₂ estimées à partir de ces outils représentent la moitié de l'ensemble des émissions du fret et constituent donc un enjeu majeur pour une politique de réduction. Les deux scénarii d'électrification du fret urbain que nous avons testés se différencient principalement par la capacité des camions électriques. Dans le premier scénario, on a recours aux plus grosses camionnettes électriques actuellement disponibles sur le marché qui ont une capacité de 2 tonnes de charge utile. Ce scénario conduit d'une part à augmenter la congestion des villes pour écouler le même trafic et, d'autre part, pour ne pas trop augmenter cette congestion, à autoriser les plus gros chargements à continuer à rouler en diesel, ce qui limite aussi la réduction d'émissions.

Un autre scénario a été testé, qui fait l'hypothèse que l'on disposera à court terme de camions électriques avec une capacité de 6 tonnes de CU, ce qui permet, avec les hypothèses retenues sur le taux de chargement, d'éviter le problème de la congestion tout en améliorant le résultat sur les émissions de CO₂ (ainsi que les autres émissions polluantes qui n'ont pas été quantifiées ici).

L'autonomie actuelle des camionnettes électriques- de l'ordre de 100 km- permet d'écouler la très grande majorité des flux urbains ainsi esquissés : seuls 10% des trajets urbains font plus de 50km et nécessiteraient un rechargement de la batterie pour faire l'aller-retour.

Les scénarios 'interurbains' examinés, GNV et taxe sur le diesel, sont peu performants au regard de l'ampleur du problème et les données ECHO ont été moins précieuses pour leur analyse. L'élasticité du trafic routier au prix du gazole est estimée à 0,33 : pour réduire de 20% les émissions, il faudrait augmenter le prix du gazole de 60%, ce qui semble politiquement difficile à mettre en œuvre actuellement.

Notre dernier scénario, dit 'maximum', combine l'électrification du fret urbain (camions de 6t. de CU) et une taxe sur le gazole. Même avec une taxe de 354 €/tonne de CO₂ (1,09€/litre) qui conduirait à doubler le prix actuel HT, la réduction globale du CO₂, du fret routier ne serait que de 38%, bien loin de l'objectif de facteur 4.

Conclusion du rapport

La part des émissions de CO₂ du transport de fret est croissante mais le volume de ces émissions, comme la circulation, a été croissant jusqu'en 2007 et ce n'est que depuis 2008 qu'il est stable ou légèrement décroissant en raison de la baisse de l'activité économique. L'objectif de diviser par 4 les émissions de GES ne pourra être atteint en France sans que les émissions du transport décroissent significativement et en particulier celles du fret. Notre recherche avait pour objectifs de quantifier les émissions de CO₂ du transport de marchandises, à partir de la base ECHO, pour en permettre une analyse détaillée, puis de mener une analyse de l'intensité carbone par établissement et par envoi et enfin de quantifier un potentiel de réduction des émissions dans différents scénarii de mesures de réduction des émissions.

Calcul du CO₂ dans la base ECHO

A partir des données de l'enquête ECHO, la base trajets a été vérifiée, mise au propre et enrichie avec nos estimations des consommations d'énergie et émissions de CO₂. Deux types d'émissions ont été calculées : au "format Kyoto" pour être en mesure de comparer avec les estimations nationales des Comptes Transports de la Nation et "du puit à la roue" pour permettre en particulier des comparaisons intermodales. Les émissions estimées à partir des 'envois par trajets' comparées à celles estimées dans les Comptes Transports de la Nation montre que, malgré des approches très différentes, les écarts s'expliquent en grande partie par la différence de champs couverts entre les sources utilisées. Le champ couvert par l'enquête ECHO ne recouvre qu'une partie de celui de l'enquête TRM sur l'utilisation des poids lourds qui est utilisée par les CTN. Une fois tenu compte de cette différence entre les champs couverts, nos estimations qui partent des envois pour estimer le volume d'émissions, sont cohérentes avec les valeurs estimées par les Comptes Transport de la Nation, ce qui confirme la qualité de la base trajets et de son enrichissement en énergie et CO₂. En raison des qualités propres de l'enquête ECHO d'une part et des enrichissements apportés à l'occasion de cette recherche d'autre part, cette base constitue à présent un outil puissant pour analyser dans le détail ces émissions et les possibilités de les réduire. Cette base vient enrichir le dossier de l'enquête ECHO, accessible aux chercheurs sous réserve d'autorisation des financeurs de l'enquête.

Intensité carbone par établissement chargeur

Une fois calculées les émissions par envoi-trajet, il a été facile de 'remonter' cette information au niveau de l'envoi en sommant sur les différents trajets. En revanche, pour estimer les émissions de CO₂ au niveau de l'établissement chargeur, une méthode plus élaborée a été nécessaire car l'enquête ECHO ne fournit, en règle très générale, que trois envois par établissement, ce qui compte tenu de la dispersion de l'intensité carbone des envois, ne permet absolument pas d'estimer une valeur par établissement. Or, nous voulions connaître le CO₂ du transport de fret par établissement chargeur, afin de rapprocher les émissions de l'activité et de l'emploi. Deux approches ont été développées en parallèle pour estimer ce volume d'émissions des expéditions d'un établissement chargeur : d'une part, nous établissons une typologie des établissements ayant des caractéristiques

d'expéditions proches, ce qui permet en regroupant un très grands nombre d'envois, d'estimer un volume d'émissions par type et donc par établissement ; d'autre part, nous modélisons le CO₂ d'une tonne expédiée en utilisant, comme variables explicatives, les caractéristiques de l'établissement chargeur. Pour chaque établissement chargeur, nous multiplions ensuite la valeur du CO₂/tonne ainsi estimée par le tonnage émis par ce chargeur, ce qui nous donne une estimation des émissions de l'ensemble de ses envois. Les deux approches, typologie et modèle, donnent des résultats raisonnablement concordants compte tenu d'une précision relativement faible.

Le CO₂ émis par un chargeur de la base ECHO en 2004 est en moyenne d'un peu plus de 600 t par an et les établissements du type 2, les plus gros émetteurs, avec 4700 t / an émettent 60 fois plus que ceux de la classe 1 avec 78 t par an. Par salarié, le niveau moyen d'émission est de 16,5 tonnes de CO₂ sur l'ensemble des établissements et les salariés des établissements du type 10 sont ceux qui émettent le moins avec 4,3 t alors que les plus gros contributeurs sont ceux du type 9 avec 27,2 t par employé et par an : une 'fiscalité verte' visant à réduire le coût de la main-d'œuvre en diminuant les charges salariales et en les compensant par les recettes d'une taxe sur le carburant, favoriserait donc les établissements de façon très différenciée. Les établissements du type 10, avec 4,3 t/salarié seraient les grands bénéficiaires d'une telle fiscalité alors que les établissements du type 9, avec 27,2 t/employé en seraient les grands perdants.

Intensité carbone par envoi

A partir des résultats de la première phase, nous pouvons analyser, à un niveau très désagrégré, l'intensité carbone des envois ainsi que les caractéristiques qui peuvent l'influencer. La distribution des envois selon leur intensité carbone fait ressortir deux points importants:

- Les envois ayant une 'bonne' efficacité carbone (moins de 100 g de CO₂/tkm) représentent un cinquième des émissions de CO₂ de la base ECHO ;
- Les envois qui ont une efficacité carbone 'faible ou très faible' (plus de 600 g de CO₂/tkm) représentent plus de la moitié de ces émissions (57%).

Nous cherchons à mettre en évidence l'impact des comportements, c'est-à-dire des choix logistiques que font les opérateurs, chargeurs et transporteurs, sur ces émissions de CO₂, pour apprécier dans quelle mesure il serait possible de réduire les émissions en dehors des réductions apportées par les changements technologiques sur les véhicules ou l'énergie. Pour cela, nous avons cherché à expliquer le niveau de l'intensité carbone (CO₂/tkm) de l'envoi à l'aide d'un modèle comportant deux types de variables explicatives: les variables de choix logistiques et les variables caractéristiques 'intrinsèques' de la demande, c'est-à-dire celles que les choix logistiques ne peuvent guère modifier. Le poids du chargement est ainsi décomposé en deux variables : le tonnage annuel commandé par le client destinataire et le nombre d'expéditions qui seront envoyées à ce client pour satisfaire sa demande annuelle : le tonnage annuel est une variable intrinsèque, indépendante des choix logistiques alors que le nombre annuel d'envois ou la fréquence des livraisons résulte de l'organisation logistique décidée entre le chargeur et son client. L'autre variable de choix logistiques que nous considérons ici est le choix du mode de transport principal de l'envoi et l'autre variable intrinsèque est la distance de transport à vol d'oiseau. Une fois le modèle calibré, nous évaluons l'impact de ces variables de choix logistiques sur l'intensité carbone. Ces variations de CO₂/tkm

induites par un changement de choix logistiques apparaissent très importantes : toutes choses égales par ailleurs, une augmentation du nombre annuel d'envois vers un même destinataire pour une demande annuelle donnée, du 25^{ème} au 75^{ème} centile, provoque une augmentation de 91 % des émissions de CO₂. Et un changement de mode principal de l'air au rail diminue les émissions de carbone de 94 %. Ceci suggère que la réduction des émissions de CO₂ du fret est à rechercher autant dans les solutions logistiques que dans l'amélioration technologique.

Réduction des émissions

Pour estimer le potentiel de réduction des émissions de CO₂ du fret, nous considérons des scénarii correspondant à différentes politiques. Nous distinguons d'une part les mesures qui visent la réduction des émissions du fret en zone urbaine, de type *Low Emission Zone*, où la priorité porte souvent sur la congestion et la pollution locale et où la réduction du CO₂ n'est qu'un co-bénéfice et, d'autre part, les mesures visant l'ensemble du fret urbain et interurbain (prix du carburant normes sur les véhicules) où la réduction de CO₂ peut être l'objectif principal. La part de l'urbain est très importante dans l'ensemble de nos émissions : près de la moitié des émissions de la route (48,8%) sont produites dans les communes françaises appartenant à une unité urbaine au sens de l'INSEE et plus du quart (25,3%) de ces émissions sont produites dans les unités urbaines de plus de 100 000 habitants. C'est ce résultat qui a conduit à développer des scénarii centrés sur la réduction des émissions urbaines de CO₂ du fret.

Nous considérons deux scénarii d'électrification du fret urbain : le premier avec des camionnettes de 2 t de charge utile, déjà disponible sur le marché et le second avec des camions d'une capacité de 6 t. A l'entrée des agglomérations, nous faisons l'hypothèse que se trouvent des plates-formes sur les principaux axes routiers de pénétration : le fret à destination de l'agglomération y est déchargé et réparti sur ces camions électrique ; de même, le fret partant de cette ville doit en sortir sur un camion électrique, au moins jusqu'à une plate-forme. Comme l'ensemble du fret entrant et sortant passe par ces plates-formes, les camions électriques ont un excellent taux de remplissage (au moins 80%) et un taux de retour à vide de 50% des kilomètres en charge. Les envois de plus de la capacité des camions électriques correspondant au scénario sont scindés, sur leur partie urbaine, en plusieurs camions. Le fret en transit et, dans le premier scénario urbain les envois de plus de 20 tonnes, ont une dérogation pour circuler dans la ville en diesel.

Dans le scénario E1, avec des camions électriques de 2 t de CU, la réduction de CO₂ est de 4 millions de tonnes mais ces petits camions augmentent la circulation en ville car ils se substituent en partie à des camions plus gros ; ceci augmenterait la congestion dans les villes. Dans le scénario E2 (camions électriques de 6 t de CU), le gain de CO₂ est légèrement plus important (4,2 millions de t. soit 12 % des émissions du fret) et le trafic urbain de camions diminue très sensiblement dans les grandes villes, y compris par rapport à la situation initiale (-31 %). En revanche, la situation du trafic de camions reste inchangée par rapport au scénario E1 dans les unités urbaines de moins de 100 000 habitants et donc légèrement dégradée par rapport à la situation initiale. La réduction des émissions de CO₂, dans les scénarii électriques, est importante par rapport aux émissions des grandes unités urbaines concernées (-57 % et -60 %) mais limitée au regard de l'ensemble des émissions du fret (-11 et -12 %) ; elle pourrait être environ deux fois plus importante si l'électrification du fret urbain était

étendue à l'ensemble des unités urbaines, c'est-à-dire aux unités urbaines de moins de 100 000 habitants mais, il est vrai, au prix d'une perturbation nettement plus importante du fret interurbain.

Enfin il faut rappeler ici que les camions électriques présentent d'autres avantages que la réduction des GES, notamment la réduction des émissions de polluants locaux ainsi que du bruit, qui sont généralement considérés comme le bénéfice principal des véhicules électriques en ville, les GES n'étant souvent considérés que comme un co-bénéfice. Nous n'avons pas pris en considérations non plus la fourniture d'électricité et le coût de la mise en place des infrastructures.

Deux scénarii 'interurbains' sont également considérés : un scénario 'taxe carbone' et un scénario 'mise au GNV du parc fret'. Nous estimons les gains potentiels en CO₂ de la mise au GNV du parc fret, à partir de données de l'AFGNV qui nous permettent d'estimer un gain qui varie de 2,6 à 8,4 % selon le type de véhicules. Le gain en CO₂ obtenu en changeant la totalité du parc serait de 7,5 % pour l'ensemble du fret ECHO et de seulement 6,4 % pour les trajets interurbains. L'impact d'une taxe carbone est analysé par le biais d'une élasticité de la demande de transport de fret au prix du carburant. Cette élasticité, estimée à partir des données TRM pour le trafic et du CNR pour le prix du carburant est supposée constante et d'une valeur de -0,33 : une taxe qui viendrait augmenter de 10 % le prix du carburant réduirait alors de 3 % les émissions de CO₂ du transport routier et, inversement, pour réduire de 20% les émissions il faudrait, toutes choses égales par ailleurs, augmenter le prix du gazole de 60 %.

Avec un scénario maximum combinant l'électrification du fret urbain avec des camions de 6 t de CU et une taxe 1,09 € par litre (354€/tonne de CO₂), qui conduit à doubler le prix HTVA du gazole, la réduction globale serait de 38% des émissions du fret routier, tenant compte de la réduction liée à l'électrification du fret urbain, et de la réduction du trafic. Un tel scénario serait très contraignant pour l'économie, même en se plaçant dans l'hypothèse d'une contrainte progressive et annoncée (par exemple à l'horizon de 20 ans, pour avoir le temps d'installer les infrastructures de recharges et d'utiliser les camions existants). Pourtant il ne réduirait qu'assez peu les émissions et resterait très en deçà du facteur 4.

Une piste qui semble alors se dégager de cette recherche, pour réduire les émissions, est celle de la réduction de la fréquence des envois : un nombre non négligeable d'envois (8,3% des envois de la base ECHO) ont une fréquence très élevée de plus de 300 envois par an, soit plus d'un envoi au même destinataire par jour ouvrable. En termes d'intensité carbone, ces envois très fréquents ne sont pas homogènes. Une faible proportion (7 % d'entre eux) a une intensité carbone faible, inférieure à la moyenne des envois ECHO. Le gain potentiel de CO₂ sur ces envois est très limité ; ils ont une fréquence élevée en raison de quantités annuelles très importantes, qui permettent un très bon remplissage des véhicules.

Mais la majorité (54%) des envois très fréquents ont une intensité carbone très supérieure à la moyenne et pourraient être à l'origine de substantielles réductions d'émissions. Ce sont des envois :

- qui ont une intensité carbone très élevée (7123 gCO₂/tkm), notamment de médicaments et de vente par correspondance, en très faibles quantités (quelques kilos par envoi), sur de très courtes distances et le plus souvent en compte propre dans le cadre de tournées. Le gain

potentiel par tkm est probablement très important pour ce type d'envoi mais le gain potentiel total est relativement faible car ce groupe représente une faible masse de CO₂ (moins de 3 % de la masse de CO₂ estimée par ECHO) ;

- ou des envois dont l'efficacité carbone est faible (de 1000 à 2000 gCO₂/tkm) mais moins que celle du groupe précédent et dont le volume d'émissions (9,5 % du CO₂ estimé par ECHO) reste aussi limité. Ce groupe comprend des produits médicaux, machines et pièces, expédiés eux aussi en très faible quantité (5 kg par envoi), sur de courtes distances, par les industries des biens de consommation, en compte d'autrui.

En termes d'implication pour la recherche, beaucoup reste à faire pour préciser par segments de marché l'importance des gains d'émissions qui pourraient être faits ainsi que les moyens de les obtenir, notamment sur cette question de la fréquence : comment inciter les établissements qui émettent ces envois à en réduire la fréquence quand celle-ci a pour conséquence une forte intensité carbone ?

Une piste à explorer serait le redéveloppement du stockage en milieu urbain par les entreprises qui permettrait d'optimiser les chargements des plus grands véhicules notamment. Il reste à définir une politique suffisamment incitative pour que les entreprises y participent.

Par ailleurs, cette question de la réduction des émissions de CO₂ ne doit pas être uniquement le fait des transporteurs, il faut engager une discussion collaborative entre les différents acteurs de la chaîne logistique : chargeurs, destinataires et transporteurs. Les chargeurs et destinataires regroupent des entreprises d'horizons et de taille très diverses, il faut bien évidemment concentrer les efforts sur des acteurs tels que la grande distribution qui génèrent un nombre d'expéditions et de réceptions très importants.

Références bibliographiques

Abdelwahab W.M. (1998) "Elasticities of mode choice probabilities and market elasticities of demand: evidence from a simultaneous mode choice/shipment-size freight transport model". *Transportation Research part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 34, n° 4, pp. 257-266.

AbdelWahab W.M., Sargious M. (1992) "Modeling the demand for freight transportation". *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 26, n°1, pp. 49-70.

ADEME (2009) « Fiscalité comparée de l'énergie et du CO₂ en Europe et en France », *Stratégie & études*, n° 20, 8 juillet

ADEME (2010) « Chapitre 2 – Facteurs associés à la consommation directe d'énergie » in Guide des facteurs d'émissions de la méthode Bilan Carbone. Version 6.1. Calcul des facteurs d'émissions et sources bibliographiques utilisées, ADEME, 69 p. Disponible sur : <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=15729&m=3&catid=22543>

ADEME (2010) « Chapitre 4 – Prise en compte des transports » in Guide des facteurs d'émissions de la méthode Bilan Carbone. Version 6.1. Calcul des facteurs d'émissions et sources bibliographiques utilisées, ADEME, 97 p. Disponible sur : <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=15729&m=3&catid=22543>

ADEME (2011) *Charte d'engagements volontaires de réduction des émissions de CO₂ des transporteurs routiers de marchandises*, ADEME & MEDDE

AFGNV (2012) *Perspectives du GNV en France*, Association Française du Gaz Naturel pour les Véhicules, Mars. Disponible sur http://www.afgnv.info/Les-perspectives-du-Gaz-Naturel-Vehicule-en-France-selon-l-AFGNV_a162.html (3 juin 2013)

Barkenbus, J. (2010) "Eco-driving: An overlooked climate change initiative" *Energy Policy*, Vol.38, pp. 762-729.

Beauvais, J.M. (2006) *Repérage des produits les plus concernés par la maîtrise de la demande de transport routier*, Prédit ADEME, 67 p.

Beuthe M., Jourquin B., Geerts J.F., Coul C., Ndjang H. (2001) "Freight transportation demand elasticities: a geographic multimodal transportation network analysis." *Transportation Research part E*, Vol. 37, pp. 253-266.

Boer E. Aarnink S., Kleiner F., Pagengkopf J. (2013) *Zero emissions trucks – An overview of state of the art technologies and their potential*. CE Delft & DLR pour ICCT 151 p.

Bouguerra H., Rizet C. (2013) « Evolution des élasticités du transport routier de fret au prix du gazole », *Les Cahiers scientifiques du transport* n° 64, pp. 119-142.

CEMT (2007) *Cutting transport CO₂ emissions*, Conférence européenne des ministres des Transports.

Chapman L. (2007) "Transport and climate change: a review", *Journal of Transport Geography*, Volume 15, Issue 5, September 2007, Pages 354–367

Citepa (2011) *Organisation et Méthodes des Inventaires Nationaux des Emissions Atmosphériques en France* (OMINEA) 8^{ème} édition, 1150 p. (page 112)
<http://www.citepa.org/publications/Inventaires.htm#inv6>

Comité Européen de Normalisation (2011) *Méthodologie pour le calcul et la déclaration de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre (GES) des prestations de transport - passagers et marchandises*. Projet de norme européenne CEN/TC 320, 96 p.

Cornélis E., Rizet C. (eds.) (2007) Abatement Measures for the Freight Transport Sector. *Proceedings of the WG1 meeting Madrid 9 may 2007*, Cost Action 355, Presses Universitaires de Namur.

De Ceuster G., Breemers T., Van Herbruggen B., Verweij K., Davydenko I., Klingender M., Jacob B., Arki H., Bereni M. (2009) *Effects of adapting the rules on weights and dimensions of heavy commercial vehicles as established within Directive 96/53/EC*

EMEP/EEA (2010) *Emission inventory guidebook 2009*, updated June 2010

European Commission, TREN/G3/318/2007, 315 p.

Gao, O. (2011) Transportation Energy Consumption, Emissions and Public Health —Are We Doing the Right Thing, and Doing it Right? Présentation SELEST-IFSTTAR, 24 juin

Guilbault, M. (1994) *Quels besoins pour les chargeurs ? Variété de la demande de transport*, Arcueil, INRETS, Rapport INRETS n° 178, 71 p.

Guilbault, M. (coord.) (2008) *Enquête ECHO "Envois - Chargeurs - Opérateurs de Transport". Résultats de référence*, Paris, Lavoisier, Coll. de l'INRETS, Synthèse n° 56, 205 p.

IEA (2006) *Key world Energy statistics 2006*, Paris, 75 p.

IFEU, Oko Institute, IVE, RMCON (2011) *EcoTransIT World-Methodology and Data* – Update July 2011
http://www.ecotransit.org/download/ecotransit_background_report.pdf 106 p.

Jambu, M. (1989) *Exploration informatique et statistique des données*, Paris, Dunod, 505 p.

Kamakate, F., Schipper, L. (2009) "Trends in truck freight energy use and carbon emissions in selected OECD countries from 1973 to 2005". *Energy Policy*, Vol. 37, n°10, pp. 3743-3751

Kaya Y. (1993) *Environment, Energy, and Economy: strategies for sustainability*, Tokyo Conference on Global Environment.

Langer T. (2004) *Energy savings through increased fuel Economy for Heavy duty trucks*. Prepared for the national commission on energy policy.

Léonardi J., Baumgartner, M. (2004) “CO₂ efficiency in road freight transportation: Status quo, measures and potential”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 9, n° 6, November 2004, pp. 451-464

McCollum D., Yang C. (2009) “Achieving deep reductions in US transport greenhouse gas emissions: Scenario analysis and policy implications”, *Energy Policy*, Vol. 37, n° 12, pp. 5580–5596

McKinnon A. (2008) The potential of economics incentives to reduce CO₂ Emissions from goods Transport. 1st international transport forum on ‘Transport and Energy - The challenge of climate change’, Leipzig.

MEDDE. 2012. *Information CO2 des prestations de transport. Application de l'article L. 1431-3 du code des transports. Guide méthodologique*. Paris, 231 p.

MEDDTL – CCTN (2006) *Les comptes des transports en 2005 (tome 1)* 43e rapport de la Commission des Comptes des Transports de la Nation

MEDDTL – DGITM – SAGS (2011) Avant projet de décret du 24 janvier 2011 relatif à l'information sur la quantité de dioxyde de carbone émise par le ou les modes de transport utilisés pour réaliser une prestation de transport, 7 p.

Ministère de l'Environnement de Finlande (2012) *Environmentally related energy taxation in Finland*, <http://www.environment.fi/default.asp?contentid=405927&lan=EN>

Mirabel F. (2010) *Taxe carbone et localisation des entreprises*, 20 p. <http://francois.mirabel.perso.sfr.fr/topic/mirabel2010taxecarbone.pdf>

OECD (2006) *The Political Economy of Environmentally Related Taxes*.

Onoda T. (2008) *Review of international policies for vehicle fuel efficiency*. International Energy Agency, 54 p. http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Vehicle_Fuel.pdf

Oum T. (1989) Alternative demand models and their elasticity estimates. *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 23, pp. 163–187.

Rème-Harnay, P. (2012) « La fiscalité carbone en France : un échec face à la Suède ? Le cas des transports routiers de marchandises ». *Les cahiers scientifiques du transport*, n° 61, pp. 35-62

Rizet, C., Mbacké, M. (2008) *Modélisation de l'énergie consommée en transport de fret - Base trajets ECHO*, Rapport pour l'ADEME, 113 p.

Scapecci P. (2012) Opportunités et coûts potentiels d'une fiscalité environnementale. Document de travail n° 34, COE-REXECODE, 26 p. <http://www.coe->

rexecode.fr/public/content/download/33114/331930/version/3/file/Fiscalite-environnementale-opportunites-et-couts-Document-de-travail-34-2012.pdf

Schipper L., Marie-Lilliu C., Gorham R. (2000) *Flexing the Link between Transport and Greenhouse Gas Emissions: A Path for the World Bank*, Washington, DC: World Bank
www.iea.org/textbase/nppdf/free/2000/flex2000.pdf

Schipper L., Scholl L., Price L. (1997) Energy use and carbon emissions from freight in 10 industrialized countries: An analysis of trends from 1973 to 1992. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 2, Issue 1, March 1997, Pages 57–76

Schubert K. (2009) *Pour la taxe carbone - La politique économique face à la menace climatique*. Éditions Rue d'Ulm/Presses de l'École normale supérieure, 90 p.
<http://www.cepremap.ens.fr/depot/opus/OPUS18.pdf>

Skinner I., van Essen H., Smokers R., Hill N. (2010) *EU Transport GHG: Routes to 2050 – Towards the decarbonisation of the EU's transport sector by 2050*

T&L et associés (2008) *Etude de l'efficacité énergétique et des émissions de CO2 du transport ferroviaire de marchandises*, Ademe.

Victoria Transport Policy Institute (2011) Transportation elasticities: How prices and other factors affect travel behaviour. *TDM Encyclopedia*. <http://www.vtpi.org/tdm/tdm11.htm>

Table des figures

Figure 1 : Détermination de la partie Française des trajets routiers à partir du logiciel ArcInfo	7
Figure 2 : Poids du chargement selon le poids de l'envoi à la fin des estimations	9
Figure 3 : Charge utile selon le poids de l'envoi à la fin des estimations	10
Figure 4 : Consommation unitaire du véhicule en charge (l/100 km) selon le poids du chargement	12
Figure 5 : Consommation unitaire de l'envoi (gép/tkm) selon le poids de l'envoi	13
Figure 6 : Relation entre la consommation unitaire et le poids de marchandises dans un EVP	16
Figure 7 : Consommation unitaire selon la capacité du navire en EVP	17
Figure 8 : Consommation par tkm en fonction du poids de l'envoi pour les envois maritimes	18
Figure 9 : Consommation d'énergie transport et quantités de transport par type de marchandises aux Etats-Unis en 2002 (d'après Gao, 2011)	32
Figure 10 : Résultats de l'ACM	36
Figure 11 : Distribution des estimateurs du CO ₂ par établissements du type 1, en kg de CO ₂ / établissement	43
Figure 12 : Distribution des estimateurs du CO ₂ par établissements du type 1, avant correction	43
Figure 13 : Précision des estimateurs de CO ₂ par type d'établissements résultant du bootstrap (en t.)	45
Figure 14 : Intervalle de confiance du CO ₂ par tonne de chaque établissement	50
Figure 15 : Intervalle de confiance du CO ₂ par tonne de chaque établissement (zoom de la Figure 14)	51
Figure 16 : Intervalle de prévision du CO ₂ par tonne de chaque établissement	52
Figure 17 : Intervalle de prévision du CO ₂ par tonne de chaque établissement (échelles log log)	52
Figure 18 : Emissions de CO ₂ en tonnes par établissement et intervalles de confiance	53
Figure 19 : Comparaison des émissions moyennes par type (t de CO ₂ / établ.) selon les 2 approches	55
Figure 20 : CO ₂ cumulé émis des établissements classés par ordre croissant d'émissions	58
Figure 21 : Intensité carbone des envois en fonction de leurs poids	64
Figure 22 : Intensité carbone des envois de CO ₂ /tkm > 500 g selon leur poids	65
Figure 23 : Intensité carbone des envois selon leur distance à vol d'oiseau	66
Figure 24 : Intensité carbone des envois > 500 g CO ₂ /tkm selon leur distance à vol d'oiseau	67
Figure 25 : Intensité carbone des envois selon le tonnage annuel expédié à ce destinataire	68
Figure 26 : Efficacité carbone et tonnage annuels vers le même destinataire en fonction des deux modalités routières (CP et CA)	69
Figure 27 : Intensité carbone selon le nombre annuel d'envois au même destinataire	70
Figure 28 : Unité Urbaine de Paris (dessinée avec BDTOPO 2011© IGN)	90
Figure 29 : Unité Urbaine de Bordeaux (dessinée avec BDTOPO 2011© IGN)	91
Figure 30 : Unité Urbaine de Bordeaux (dessinée avec BDTOPO 2011© IGN)	92
Figure 31 : Distribution des trajets et du CO ₂ selon la distance des trajets	93
Figure 32 : Carte des trajets routiers ECHO affectés sur le réseau dans la situation initiale (2004)	94
Figure 33 : Les stations GNV en France	98
Figure 34 : Évolution des principales données trimestrielles en indice (1998 = 100)	103

Table des tableaux

Tableau 1 : Répartition des trajets entre intérieurs (France métropolitaine) et internationaux : nombre de trajets observés selon le mode	6
Tableau 2 : Répartition des trajets routiers (dont tournées) entre France et étranger	8
Tableau 3 : Trafic et consommation d'énergie finale des trains de fret en France	14
Tableau 4 : Trafic et consommation d'énergie primaire des trains de fret en France	14
Tableau 5 : Energie finale de traction des trains de fret électriques en Europe	15
Tableau 6 : Consommations unitaires par type de navire	17
Tableau 7 : Consommation d'énergie du transport de marchandises en France	19
Tableau 8 : Facteurs d'émissions utilisés pour les carburants pétroliers en 2004	20
Tableau 9 : Facteurs d'émission des différentes sources d'énergie retenus dans l'arrêté du 10 avril 2012 (en kgCO ₂ par unité de mesure)	21
Tableau 10 : Facteurs d'émissions utilisés pour les trajets ferroviaires en France	22
Tableau 11 : Facteurs d'émission de l'électricité (gCO ₂ /kWh) et par tkm (gCO ₂ /kWh) pour le fret ferroviaire en Europe	23
Tableau 12 : Résultats de l'estimation pondérée des émissions de CO ₂ Kyoto par envoi.trajet	24
Tableau 13 : Résultats de l'estimation pondérée des émissions de CO ₂ WW par envoi.trajet	24
Tableau 14 : Comparaison des tonnages estimé par ECHO et par Sitram en millions de tonnes 2004	25
Tableau 15 : Comparaison du trafic estimé par ECHO et Sitram en milliards de tkm en 2004	26
Tableau 16 : Consommations d'énergie de traction en milliers de tep 2004, estimées à partir des CTN et ECHO	27
Tableau 17 : Emissions de CO ₂ , en millions de tonnes, estimées à partir d'ECHO et comparaison CTN	29
Tableau 18 : Tonnes, tkm, énergie et CO ₂ , au format Kyoto dans ECHO et comparaison CTN	29
Tableau 19 : Décomposition de l'inertie et du Khi-2	35
Tableau 20 : Caractéristiques de la typologie par ACM plus classification non hiérarchique en 10 types	39
Tableau 21 : Synthèse des caractéristiques de la typologie retenue	40
Tableau 22 : Emissions de CO ₂ par type d'établissements	42
Tableau 23 : Comparaison de l'ancien type 1 et de ses deux parties (11 qui constitue le nouveau type 1 et 12 qui a été regroupé avec le type 7)	44
Tableau 24 : Résultats du bootstrap sur la précision des estimateurs de CO ₂ par établissement selon le type	44
Tableau 25 : Comparaison des niveaux de CO ₂ par établissement par les deux approches	54
Tableau 26 : Comparaison des niveaux de CO ₂ par établissement par les deux approches	55
Tableau 27 : Niveau d'émissions global et unitaire selon le type d'établissement	56
Tableau 28 : Tonnes, tkm, énergie et CO ₂ , au format Kyoto dans ECHO et comparaison CTN	61
Tableau 29 : Répartition par mode des émissions de CO ₂ dans ECHO selon le format	62
Tableau 30 : Consommation et émission des poids lourds selon le taux de chargement	63
Tableau 31 : Répartition des émissions de CO ₂ WW routier dans ECHO selon l'efficacité carbone de l'envoi	63
Tableau 32 : Distribution des principales variables utilisées	71
Tableau 33 : Caractéristiques moyennes des chaînes de transport selon le mode principal	72
Tableau 34 : Résultats de l'estimation des paramètres du modèle 1 (variables non logistiques)	73
Tableau 35 : Résultats de l'estimation du modèle avec variables de choix logistiques	74
Tableau 36 : Impact d'une variation des caractéristiques (logistiques ou non) sur l'intensité carbone	75
Tableau 37 : Objectifs de consommation de carburant pour les poids lourds au Japon	85
Tableau 38 : Répartition des émissions de CO ₂ à partir de la base ECHO entre les différents types de trajets	86
Tableau 39 : Répartition des trajets en fonction de la typologie urbaine	86
Tableau 40 : Importance de l'urbain dans les émissions de CO ₂ de la route	87
Tableau 41 : Evolution des émissions de CO ₂ ww et des Veh.km dans les scénarii, en tonnes	96
Tableau 42 : Comparaison GNV-Diesel des poids lourds en termes de polluants et d'émissions de CO ₂	99

Tableau 43 : Coefficients de réduction d'émissions de CO ₂ en passant du diesel au GNV	99
Tableau 44 : Emissions de CO ₂ du mode routier : situation observée et scénario GNV	100
Tableau 45 : Résultats des régressions log-log entre VEHKM ou TKM et PIB, PGAZOL	103
Tableau 46 : Résultats des régressions log-log entre VEHKMCA ou TKMCA et PIB, PGAZOL (équations 9 et 11 en log log)	104
Tableau 47 : Réduction du CO ₂ du fret routier dans différentes hypothèse de taxe carbone	105
Tableau 48 : Variables traitées en cas d'ajout de trajets	128
Tableau 49 : Nombre de trajets dont la distance a été modifiée selon le mode	129
Tableau 50 : Nombre d'envois en fonction de la variable messagerie (ancienne et nouvelle)	130
Tableau 51 : Energie moyenne et médiane par envoi, en kgep	177
Tableau 52 : Emissions moyennes et médianes par envoi, en kgCO ₂	177
Tableau 53 : Résultats de la typologie obtenue en ACM + classification hiérarchique	178
Tableau 54 : Résultats de la typologie obtenue en ACM + classification non hiérarchique	179
Tableau 55 : Typologie obtenue par ACP + classification hiérarchique	179
Tableau 56 : typologie obtenue par ACP + classification non hiérarchique	180

Table des matières

Introduction générale : contexte et objectifs de la recherche.....	1
Objectifs et présentation du rapport.....	2
Méthodologie.....	2
Plan du rapport	3
1. Calcul des émissions de CO ₂ par envoi à partir de la base ECHO	4
1.1. Mise au point de la base trajets : distance et estimation des variables manquantes pour la route	5
1.1.1. Calcul des distances par mode de transport	5
1.1.2. Répartition des distances routières entre intérieur et international	6
1.1.3. Estimation des variables manquantes pour la route.....	8
1.2. Calcul de la consommation d'énergie.....	11
1.2.1. Consommation d'énergie du fret ferroviaire	13
1.2.2. Energie des trajets ferroviaires internationaux.....	14
1.2.3. Consommation d'énergie du fret maritime.....	16
1.3. Calcul des émissions de CO ₂ par envoi et trajet	18
1.3.1. Deux objectifs pour le calcul des émissions	18
1.3.2. Le format Kyoto	20
1.3.3. Facteurs d'émission de CO ₂ des carburants	20
1.3.4. Emissions de CO ₂ pour le fret ferroviaire en France.....	22
1.3.5. Emissions de CO ₂ des trajets ferroviaires à l'étranger.....	22
1.3.6. Résultats du calcul des émissions de CO ₂ par trajet selon le mode	23
1.4. Comparaison des valeurs estimées à partir d'ECHO avec les résultats des CTN.....	25
1.4.1. En tonnage.....	25
1.4.2. En tonnage kilométrique	26
1.4.3. En consommation d'énergie.....	27

1.4.4.	En émissions de CO ₂	28
1.4.5.	Récapitulation de la comparaison ECHO/CTN au format Kyoto.....	29
Conclusion de la première partie		30
2.	Emissions de CO ₂ du transport de fret par établissement chargeur	31
2.1.	Objectifs et méthodes.....	31
2.2.	Approche par typologie des établissements	33
2.2.1.	Une typologie des établissements.....	33
2.2.2.	Prise en compte des envois incomplets dans la pondération	40
2.2.3.	Calcul du niveau moyen d'émissions d'un établissement par type.....	41
2.2.4.	Précision de l'estimateur du CO ₂ par établissement ainsi obtenu	42
2.2.5.	Caractéristiques des différents types : ce qui explique le niveau d'émissions d'un établissement dans cette approche par typologie	45
2.3.	Approche par modélisation des émissions	46
2.3.1.	Variable à expliquer : le CO ₂ par tonne de l'envoi.....	46
2.3.2.	Estimation des paramètres du modèle sur les données envois	47
2.3.3.	Précision de l'estimateur	49
2.4.	Comparaison des résultats de ces deux approches.....	53
2.5.	Niveaux d'émissions et efficacité carbone	56
2.6.	Sensibilité des établissements chargeurs à la mise en place d'une fiscalité verte.....	58
Conclusion de la deuxième partie		60
3.	Analyse de l'intensité carbone des envois.....	61
3.1.	Volume d'émissions et potentiel de réduction.....	61
3.1.1.	Volumes d'émissions selon le niveau d'efficacité carbone	62
3.1.2.	Intensité carbone et poids de l'envoi	63
3.1.3.	Intensité carbone et distance	65
3.1.4.	Intensité carbone et tonnage annuel expédié au même destinataire	67
3.1.5.	Intensité carbone et fréquence des envois au même destinataire.....	69

3.2.	Amélioration de l'efficacité carbone par les choix logistiques	71
3.2.1.	Intensité carbone et autres caractéristiques des chaînes de transport.....	71
3.3.	Modélisation de l'intensité carbone des envois	73
3.3.1.	Intensité carbone selon les caractéristiques intrinsèques de l'envoi.....	73
3.3.2.	Introduction de variables logistiques dans le modèle	74
3.3.3.	Réduction de l'intensité carbone selon les choix logistiques	74
3.3.4.	Fréquence des envois et émissions de CO ₂	75
3.3.5.	Quels sont les établissements qui émettent ces envois très fréquents ?	76
	Conclusion de la troisième partie.....	78
4.	Scénarii de réduction des émissions urbaines.....	79
4.1.	Une revue des politiques de réduction des émissions de GES du transport de fret	79
4.1.1.	Décomposition des émissions de CO ₂ du fret (d'après Kaya).....	79
4.1.2.	Politiques économiques, réglementaires, d'amélioration de la connaissance et décisions d'infrastructure	81
4.1.3.	Taxes sur le carburant et taxes carbone	82
4.1.4.	Système de quotas ou permis d'émission de CO ₂	82
4.2.	La répartition des émissions entre urbain et non urbain	85
4.3.	Scénarii d'électrification du fret urbain	87
4.3.1.	Les 2 types de camions électriques (2 et 6 t. de CU), leurs émissions et le taux de remplissage.....	87
4.3.2.	Zones urbaines, plates-formes de transbordement et distance électrique	88
4.3.3.	Distances des trajets urbains et autonomie des camions électriques	92
4.3.4.	Affectation du trafic sur le réseau routier et calcul du CO ₂ urbain	93
4.3.5.	Résultats des scénarii électriques.....	96
4.4.	Deux scénarii de réduction des émissions non spécifiquement urbaines I1 et I2.....	97
4.4.1.	Scénario 'interurbain' I1 : développement du GNV	97
	Présentation et intérêt du scénario.....	97

Mise en œuvre du calcul.....	99
Résultats à partir de la base de données ECHO.....	99
4.4.2. Scénario ‘interurbain’ I2 : taxe carbone	100
Rappels sur les élasticités	101
Elasticités de court et de long terme	101
Elasticités de la demande de transport de fret	102
Les données utilisées	102
4.5. Scénario de réduction maximum par combinaison des différentes mesures envisagées et conclusion	105
Conclusion de la quatrième partie	106
Conclusion du rapport.....	107
Intensité carbone par établissement chargeur.....	107
Intensité carbone par envoi	108
Réduction des émissions	109
Références bibliographiques.....	113
Table des figures.....	117
Table des tableaux.....	118
Table des matières.....	120
Annexes.....	125
Annexe 1 : La mise en cohérence de la base trajets.....	126
1. Préparation de la base trajets.....	126
2. Distances des trajets dont l’origine ou la destination ont été modifiées.....	129
3. Etapes du calcul à l’aide d’un SIG (Système d’information Géographique) pour le calcul des distances routières France et étranger	129
4. Construction d’une variable « Messagerie »	130
5. Route : poids de chargement, nombre de véhicules et consommation d’énergie	131
6. Calcul de la consommation d’énergie du mode maritime.....	167

7.	Calcul de la consommation d'énergie du mode aérien	175
8.	Calcul de l'énergie et des émissions par envoi	176
Annexe 2 : Emissions de CO ₂ par établissement.....		178
1.	Résultats des 4 premières typologies d'établissements non retenues	178
2.	Macro SAS du bootstrap	181
3.	Distribution des sous échantillons par type résultants du bootstrap.....	185
4.	Correspondance entre Activité principale de l'établissement (APET sur 2 positions) et groupes d'activité définis dans ECHO.....	195
5.	Estimation des paramètres du modèle de CO2 par tonne par établissement	197
6.	Programme pour calculer les valeurs prédites du modèle, les intervalles de confiance et de prévision	200
Annexe 3 : Intensité carbone des envois		210

Annexes

Annexe 1 : La mise en cohérence de la base trajets

1. Préparation de la base trajets

Le travail de préparation de la base trajets, avant les calculs de CO₂, a porté sur la vérification et la mise en cohérence d'un certain nombre de variables principales du trajet : cohérence entre les différents trajets d'un envoi, cohérence entre commune et pays (origine et destination), cohérence entre la commune et ses coordonnées et cohérence du mode. Cette vérification et mise au point de la base trajets a nécessité un long travail, avec bien souvent une lecture trajet par trajet ; elle a commencé par la création d'un identifiant du trajet permettant de faire le pont entre les différentes tables. Ce nouvel identifiant de trajet se nomme [Cleqit]²⁰ ; Il est décrit en **annexe 1**.

Mise en cohérence des trajets d'un même envoi

Nous avons vérifié que les trajets d'un même envoi suivent les principes suivants :

- l'origine du premier trajet est le point de départ de l'envoi,
- la destination du dernier trajet est la destination de l'envoi,
- et la destination du trajet n est l'origine du trajet n+1.

Outre l'ajustement de l'ordre des trajets (variable [ntchrono]) il a fallu, pour certains envois, rajouter des trajets et en supprimer d'autres.

Les variables de contrôles permettant d'identifier les trajets modifiés en 2011 se nomment pour le lieu de départ [COR_CCT2] (182 trajets) et pour le lieu d'arrivée [COR_CCT5] (214 trajets). 83 nouveaux trajets ont été ajoutés, repérés à l'aide de la variable [ajout_trajet].

Cohérence nom de lieu (ville ou commune)-pays

Pour vérifier que, à l'origine comme à la destination de chaque trajet, la commune est bien cohérente avec le pays, les couples commune-pays ont été listés. Pour chaque pays d'origine on liste l'ensemble des villes d'origine, puis on vérifie à la main pour tous les lieux hors France (en utilisant Google Maps) que les communes listées sont bien dans ce pays. Ensuite, la même opération est effectuée pour chaque pays de destination. En cas de problème, on regarde la succession des trajets pour juger si c'est la commune ou la ville qui est erronée. 46 erreurs ont été répertoriées pour le départ et 66 pour l'arrivée. La majeure partie des corrections ont concerné les pays, seules trois erreurs concernant la commune ont été repérées. Enfin, il a fallu corriger les variables numéro de département [T2_Dep99_Code] et [T2_Dep99_Code] et numéro de commune [T2_INSEE] et [T5_INSEE] qui sont importantes pour faire des filtres sur la France ou des régions. Les variables de contrôles permettant d'identifier les trajets modifiés en 2011 sont [COR_CCT2] pour le lieu de départ et [COR_CCT5] pour le lieu d'arrivée, mentionnées ci-dessus.

²⁰ Les noms des variables sont indiqués entre crochets.

Cohérence des longitudes et latitudes des noms de lieu d'origine et destination

L'ensemble des longitudes et latitudes, issues d'un travail de Philippe Marchal, ont été récupérées dans une table SAS et fusionnées avec la table existante à partir du nom de la commune. Pour les communes où la correspondance n'a pas été trouvée, un travail manuel a été effectué pour ajouter ces variables. Ainsi, la longitude et la latitude ont été ajoutées manuellement pour 1373 lieux de départ et 2017 pour les lieux d'arrivée.

Cohérence des modes

Pour une origine et une destination données, tous les modes ne sont pas possibles : si un océan sépare cette origine et cette destination, seuls les modes maritimes et aériens sont possibles et, à l'intérieur de l'Europe, en règle générale, seuls les modes terrestres (route, fer et voie navigable) ainsi que l'aérien pour les grandes distances sont possibles. Pour tester cette cohérence, les pays ont été regroupés en continents ([T2_Continent] et [T5_Continent]). Entre ces continents, les modes non maritimes ou aériens ont été regardés à la main. Pour effectuer la distinction entre les modes maritime et aérien, nous avons pris en considération les noms de lieux de départ et d'arrivée (ports ou aéroports), le poids de l'envoi et la nature de la marchandise. Le cas des îles a été traité séparément à la main. Pour 4 trajets où le mode n'était pas renseigné, nous l'avons ajouté en tenant compte de la succession des trajets, du poids de l'envoi et de la géographie (origine et destination).

Traitement des variables lors de l'ajout de nouveaux trajets

Lorsqu'un nouveau trajet est introduit dans la base, par exemple parce qu'il manquait un tronçon pour assurer la continuité du déplacement, la grande majorité des variables trajet ne peuvent être dupliquées du trajet précédent car elles sont, par nature différentes d'un trajet à l'autre (origine destination, mode, véhicule, ...). Seules les variables utiles au calcul de consommation d'énergie ont été dupliquées (colonne de gauche dans le tableau ci-dessous).

Tableau 48 : Variables traitées en cas d'ajout de trajets

Variables conservées en l'état pour l'ajout de trajets	Variables utilisées et renseignées lors de l'ajout de nouveaux trajets
<ul style="list-style-type: none"> - Identifiant établissement [ne] - Numéro de l'envoi [nq] - Identifiant envoi [cleq] (créé à partir du [ne] et du [nq]) - Coefficient de redressement national en envois [CoefNat_PONDENVmil] - Coefficient de redressement national en tonnes [CoefNat_PONDTONmil] - Poids de l'envoi [Q13r_modif] - Produit transporté [q11a] - Enquête par intégrateur ou trajet classique [CC_type_data] - Volume en m3 [q14] 	<ul style="list-style-type: none"> - Clé trajet-intervenant table CC de mars 2011 [CC_cleqit] (créée à partir de [cleq], [ni], [nt] qui est le numéro d'intervenant) - Identifiant du trajet [index] (créé à partir du [cleq] et du [Ntchrono]) - Numéro chronologique des trajets [Ntchrono] - Nom du pays au départ du trajet [T2_nom_pays] - Code du pays au départ du trajet [T2_code_pays] - Continent au départ du trajet [T2_continent] - Nom de commune française ou de ville étrangère au départ du trajet [T2_Nom_Ville] - Code du département de la ville au départ du trajet [T2_Dep99_Code] - Latitude de la ville au départ du trajet (degrés décimaux)- codée 11 positions [T2_LATITUDE] - Longitude de la ville au départ du trajet (degrés décimaux)- codée 11 positions [T2_LONGITUDE] - Latitude de la ville au départ du trajet en degrés décimaux avec virgule [T2_LATITUDE_dec] - Longitude ville au départ du trajet en degrés décimaux avec virgule [T2_LONGITUDE_dec] - Distance à vol d'oiseau [vol_doiseau_OK_CC] - Nom du pays à l'arrivée du trajet [T5_nom_pays] - Code du pays à l'arrivée du trajet [T5_code_pays] - Continent à l'arrivée du trajet [T5_continent] - Nom de commune française ou de ville étrangère à l'arrivée du trajet [T5_Nom_Ville] - Code du département de la ville à l'arrivée du trajet [T5_Dep99_Code] - Latitude de la ville à l'arrivée du trajet (degrés décimaux)- codée 11 positions [T5_LATITUDE] - Longitude de la ville à l'arrivée du trajet (degrés décimaux)- codée 11 positions [T5_LONGITUDE] - Latitude de la ville à l'arrivée du trajet en degrés décimaux avec virgule [T5_LATITUDE_dec] - Longitude de la ville à l'arrivée du trajet en degrés décimaux avec virgule [T5_LONGITUDE_dec] - Correction introduite sur le nom de ville départ depuis la table CC de mars 2011 [COR_CCT2] - Correction introduite sur le nom de ville arrivée depuis la table CC de mars 2011 [COR_CCT5] - Correction introduite sur le nom de ville départ depuis la table LV d'octobre 2010 [COR_LVT2] - Correction introduite sur le nom de ville arrivée depuis la table LV d'octobre 2010 [COR_LVT5] - Mode de transport (16 modalités) [CC_T7_globnew] - Code mode de transport (16 modalités) [CC_T7globnew] - Prestation au départ groupage [T20a2] - Prestation au départ dégroupage [T20a3] - Prestation à l'arrivée groupage [T20b2] - Prestation à l'arrivée dégroupage [T20b3] - Ajout d'un nouveau trajet [ajout_trajet=1]

Le travail de correction s'effectue sur un nombre restreint de variables (colonne de droite dans le Tableau 48).

2. Distances des trajets dont l'origine ou la destination ont été modifiées

La première mise au point sur les distances a consisté à recalculer les distances pour les trajets où les coordonnées de l'origine ou de la destination ont été modifiées ainsi que pour les trajets ajoutés (Tableau 49). Rappelons que la base trajets comporte une distance à vol d'oiseau et une distance réseau, tenant compte des infrastructures disponibles ; c'est à partir de cette dernière que sont calculées la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ de l'envoi sur ce trajet. Les méthodes de calcul de ces distances sont rappelées ci-dessous. Elles ont déjà été développées dans le rapport 'énergie' (Rizet et *al.*, 2008).

Tableau 49 : Nombre de trajets dont la distance a été modifiée selon le mode

Mode de transport	Nombre de trajets avec une modification de la distance	Nombre de trajets ajoutés en juillet 2012
Maritime	11	1
Aérien	114	
Fluvial	0	
Ferroviaire	4	17
Route	85	73
Tunnel sous la Manche	18	
Total	232	91

3. Etapes du calcul à l'aide d'un SIG (Système d'information Géographique) pour le calcul des distances routières France et étranger

Les étapes du calcul sont alors les suivantes :

- Extraction sous SAS des trajets ayant pour origine la France et pour destination l'étranger. Pour chaque trajet, on connaît les coordonnées géographiques de la commune d'origine et celles de la commune de destination.
- Importation dans le SIG ArcInfo des points d'origine et des points de destination des trajets à partir de leurs coordonnées géographiques, après traitement des données dans Excel.
- Reconstitution dans le SIG, via le logiciel ET Geo Wizard, des trajets, sous forme d'une couche polygones. A l'issue de cette étape, nous disposons de la carte ci-après, dans laquelle la partie en rouge représente le tronçon effectué en France.
- Dans le SIG, sélection de la partie française de ces trajets par géotraitement. ArcInfo calcule automatiquement la longueur de chacun des tronçons.
- Exportation des deux tables trajets (trajet total et trajet France) dans Excel.

- f. Calcul de la proportion, pour chaque trajet, de la partie française.

4. Construction d'une variable « Messagerie »

Nous avons travaillé sur l'identification de la messagerie dans la base à partir de plusieurs variables : présence ou non d'intégrateur [type_data], poids de l'envoi [q13r_modif], nombre de trajets [Nb_trajets_envoi], Présence d'un intervenant 'transporteur de messagerie ou fret express' [itr4a].

Après avoir examiné les distributions des valeurs des différentes variables, nous avons retenu comme définition de la messagerie les envois pour lesquels :

- le nombre de trajets est supérieur ou égal à 3 : un trajet correspondant à la tournée de ramassage, un second correspondant à la traction secondaire entre deux plates-formes et le troisième correspondant à une tournée de distribution. Ce nombre constitue donc un minimum;
- et le poids de l'envoi n'excède pas une tonne.

Tableau 50 : Nombre d'envois en fonction de la variable messagerie (ancienne et nouvelle)

	Ancienne variable messagerie complète [Type_data5]	Nouvelle variable messagerie [Type_trajet]
Messagerie	1132 envois	2788 envois
Trajet classique	8610 envois	6954 envois

Création d'un identifiant trajet pour faciliter le passage d'une table à une autre

Un identifiant est indispensable, notamment pour faire le lien entre les différentes tables et récupérer des variables dans des tables antérieures. Le nouvel identifiant de trajet créé se nomme [Cleqit]²¹. Il correspond à l'identifiant précédent [indx] avant les trajets rajoutés. Il permettra de repérer les trajets rajoutés entre la table du 30 juin 2005 (17 077 trajets) qui ne comporte pas les envois de la messagerie, et la table du 2 mars 2011 (20 764 trajets), soit un peu moins de 3700 trajets, ajoutés en grande majorité pendant l'exercice précédent de préparation de la base pour le calcul de l'énergie. Une comparaison des destinations indiquées dans la table envoi et des destinations des derniers trajets de chaque envoi a nécessité l'ajout de nouveaux trajets : 91 trajets et la suppression de 11 trajets. Au 25 juillet 2012, la table trajets comporte 20 895 trajets.

L'identifiant précédent [indx] est composé de la mise bout à bout des variables [ne] : numéro de l'établissement, [nq] : numéro de l'envoi et [ntchrono] : numéro d'ordre chronologique du trajet.

²¹ Les noms des variables sont indiqués entre crochets.

Le nouvel identifiant [Cleqit], quand le trajet n'a pas été rajouté est composé de la mise bout à bout des variables numéro de l'établissement [ne], numéro de l'envoi [nq], numéro de l'intervenant général (destinataire, ferroviaire chargeur) [ni], et le numéro de l'intervenant pour le trajet [nt]. Quand le trajet a été rajouté, il n'y a pas d'intervenant connu ; [Cleqit] est alors composé des variables [ne] et [nq] suivi d'une lettre (a, b, c...) qui différencie les trajets.

5. Route : poids de chargement, nombre de véhicules et consommation d'énergie

Nom du fichier : Estimation des taux de chargements_nouvelle_version_29fev2012.sas

```
data trajet; set t.trajet_CC_8fev2012; run;

data traj_rout; set trajet;
    if CC_T7globnew not in (1 2) then delete;
run;

DATA traj_rout; set traj_rout;
    if type_data="messagerie" then delete;
run;

DATA traj_rout; set traj_rout;
    keep Index cleq ne clei nt CC_T7globnew CC_q13r t14 tr10 tr8
    type_data Type_trajet t20a2 t20a3
    t20b2 t20b3 ntchronon tr16 tr13a tr13b tr13bis tr13c tr13d tr13e
    tr17b tr17c tr19a tr19b
    fchphy_13g
    Nbre_total_trajets_par_envoi DIST_mix_km_rap_estim DIST_mix_km_rap_estim_Fr
    DIST_mix_km_rap_estim_Etr
    Tr17b_rempli_Fr Tr17b_rempli_Etr
    T2_France_Etr T5_France_Etr T2_nom_pays T5_nom_pays T2_Nom_Ville
    T5_Nom_Ville
    CoefNat_PONDENVmil;
run;

proc sort data=traj_rout nodupkey;
    by index;
run; /* 14041 observations */

/***** création des groupes de trajets *****/

/* variable synthétique de groupage par trajet */
data traj_rout; set traj_rout;
/* gd0 = résultat des opérations de groupage-dégroupage au départ de ce
trajet */
if t20a2 not in ('1','2') and t20a3 not in ('1','2') then do;
gd0="incertain";end;
if t20a2 not in ('1','2') and t20a3='2' then do;
gd0="incertain";end;
if t20a2 not in ('1','2') and t20a3='1' then do; gd0="dégroupé";end;
if t20a2='1' and t20a3='1' then do; gd0="groupé";end;
```

```

if t20a2='1' and t20a3='2' then do; gd0="groupé";end;
if t20a2='1' and t20a3 not in ('1','2') then do; gd0="groupé";end;
if t20a2='2' and t20a3='1' then do; gd0="dégroué";end;
if t20a2='2' and t20a3='2' then do; gd0="intact";end;
if t20a2='2' and t20a3 not in ('1','2') then do; gd0="incertain";end;
/* gf0 = résultat des opérations de groupage-dégrouage à l'arrivée de ce
trajet */
if t20b2 not in ('1','2') and t20b3 not in ('1','2') then do;
gf0="incertain";end;
if t20b2 not in ('1','2') and t20b3='2' then do; gf0="incertain";end;
if t20b2 not in ('1','2') and t20b3='1' then do; gf0="dégroué";end;
if t20b2='1' and t20b3='1' then do; gf0="groupé";end;
if t20b2='1' and t20b3='2' then do; gf0="groupé";end;
if t20b2='1' and t20b3 not in ('1','2') then do; gf0="groupé";end;
if t20b2='2' and t20b3='1' then do; gf0="dégroué";end;
if t20b2='2' and t20b3='2' then do; gf0="intact";end;
if t20b2='2' and t20b3 not in ('1','2') then do; gf0="incertain";end;
run;

/* gd0 : dégroupé--> 233
groupé --> 5258
incertain-->2627
intact --> 5923

gf0 :dégroué--> 3788
groupé --> 1137
incertain-->2580
intact --> 6536 */

data traj_rout; set traj_rout;
if ntchrono='1' then do;
/* gd = état de groupage au départ du trajet */
gd = gd0 ;
/* gf = état de groupage après les opérations logistiques à l'arrivée du
trajet */
if gd="incertain" and gf0="incertain" then do; gf="incertain";end;
if gd="incertain" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="incertain" and gf0="dégroué" then do; gf="incertain";end;
if gd="incertain" and gf0="intact" then do; gf="incertain";end;
if gd="groupé" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="groupé" and gf0="dégroué" then do; gf="dégroué";end;
if gd="groupé" and gf0="intact" then do; gf="groupé";end;
if gd="groupé" and gf0="incertain" then do; gf="groupé";end;
if gd="dégroué" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="dégroué" and gf0="dégroué" then do; gf="dégroué";end;
if gd="dégroué" and gf0="intact" then do; gf="dégroué";end;
if gd="dégroué" and gf0="incertain" then do; gf="incertain";end;
if gd="intact" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="intact" and gf0="dégroué" then do; gf="dégroué";end;
if gd="intact" and gf0="intact" then do; gf="intact";end;
if gd="intact" and gf0="incertain" then do; gf="incertain";end;end;
run;
proc sort data=traj_rout ;
by index; run;
data traj_rout; set traj_rout;
laggf=lag(gf); run ;
proc sort data=traj_rout ; by index; run;
data traj_rout; set traj_rout;
if ntchrono ne '2' then do ;

```

```

laggf='.';end;
run;

proc freq data=traj_rout;
    table gd gf laggf;
run;
data traj_rout; set traj_rout;
if ntchrono >'1' then do;
/* gd = état de groupage au départ du trajet */
if gd0="incertain" and laggf="incertain" then do; gd="incertain";end;
if gd0="incertain" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="incertain" and laggf="dégroulé" then do; gd="incertain";end;
if gd0="incertain" and laggf="intact" then do; gd="incertain";end;
if gd0="groupé" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="groupé" and laggf="dégroulé" then do; gd="dégroulé";end;
if gd0="groupé" and laggf="intact" then do; gd="groupé";end;
if gd0="groupé" and laggf="incertain" then do; gd="groupé";end;
if gd0="dégroulé" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="dégroulé" and laggf="dégroulé" then do; gd="dégroulé";end;
if gd0="dégroulé" and laggf="intact" then do; gd="dégroulé";end;
if gd0="dégroulé" and laggf="incertain" then do; gd="incertain";end;
if gd0="intact" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="intact" and laggf="dégroulé" then do; gd="dégroulé";end;
if gd0="intact" and laggf="intact" then do; gd="intact";end;
if gd0="intact" and laggf="incertain" then do; gd="incertain";end;
/* gf = état de groupage après les opérations logistiques à l'arrivée du
trajet */
if gd="incertain" and gf0="incertain" then do; gf="incertain";end;
if gd="incertain" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="incertain" and gf0="dégroulé" then do; gf="incertain";end;
if gd="incertain" and gf0="intact" then do; gf="incertain";end;
if gd="groupé" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="groupé" and gf0="dégroulé" then do; gf="dégroulé";end;
if gd="groupé" and gf0="intact" then do; gf="groupé";end;
if gd="groupé" and gf0="incertain" then do; gf="groupé";end;
if gd="dégroulé" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="dégroulé" and gf0="dégroulé" then do; gf="dégroulé";end;
if gd="dégroulé" and gf0="intact" then do; gf="dégroulé";end;
if gd="dégroulé" and gf0="incertain" then do; gf="incertain";end;
if gd="intact" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="intact" and gf0="dégroulé" then do; gf="dégroulé";end;
if gd="intact" and gf0="intact" then do; gf="intact";end;
if gd="intact" and gf0="incertain" then do; gf="incertain";end; end;
run;
data traj_rout; set traj_rout;
if ntchrono='2' and laggf=' ' then do; gf='incertain';gd='incertain';end;
run;
proc sort data=traj_rout ; by index; run;
data traj_rout; set traj_rout;
laggf2=lag(gf); run ;
proc sort data=traj_rout ; by index; run;
data traj_rout; set traj_rout;
if ntchrono>'1' then do;laggf=laggf2;end; run;
data traj_rout; set traj_rout;
if ntchrono >'2' then do;
/* gd = état de groupage au départ du trajet */
if gd0="incertain" and laggf="incertain" then do; gd="incertain";end;
if gd0="incertain" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="incertain" and laggf="dégroulé" then do; gd="incertain";end;

```

```

if gd0="incertain" and laggf="intact" then do; gd="incertain";end;
if gd0="groupé" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="groupé" and laggf="dégroupé" then do; gd="dégroupé";end;
if gd0="groupé" and laggf="intact" then do; gd="groupé";end;
if gd0="groupé" and laggf="incertain" then do; gd="groupé";end;
if gd0="dégroupé" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="dégroupé" and laggf="dégroupé" then do; gd="dégroupé";end;
if gd0="dégroupé" and laggf="intact" then do; gd="dégroupé";end;
if gd0="dégroupé" and laggf="incertain" then do; gd="incertain";end;
if gd0="intact" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="intact" and laggf="dégroupé" then do; gd="dégroupé";end;
if gd0="intact" and laggf="intact" then do; gd="intact";end;
if gd0="intact" and laggf="incertain" then do; gd="incertain";end;
/* gf = état de groupage après les opérations logistiques à l'arrivée du
trajet */
if gd="incertain" and gf0="incertain" then do; gf="incertain";end;
if gd="incertain" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="incertain" and gf0="dégroupé" then do; gf="incertain";end;
if gd="incertain" and gf0="intact" then do; gf="incertain";end;
if gd="groupé" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="groupé" and gf0="dégroupé" then do; gf="dégroupé";end;
if gd="groupé" and gf0="intact" then do; gf="groupé";end;
if gd="groupé" and gf0="incertain" then do; gf="groupé";end;
if gd="dégroupé" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="dégroupé" and gf0="dégroupé" then do; gf="dégroupé";end;
if gd="dégroupé" and gf0="intact" then do; gf="dégroupé";end;
if gd="dégroupé" and gf0="incertain" then do; gf="incertain";end;
if gd="intact" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="intact" and gf0="dégroupé" then do; gf="dégroupé";end;
if gd="intact" and gf0="intact" then do; gf="intact";end;
if gd="intact" and gf0="incertain" then do; gf="incertain";end;end;
run;
proc sort data=traj_rout ; by index; run;
data traj_rout; set traj_rout;
laggf3=lag(gf); run ;
proc sort data=traj_rout ; by index; run;
data traj_rout; set traj_rout;
if ntchrono>'2' then do; laggf=laggf3;end; run;
data traj_rout; set traj_rout;
if ntchrono >'3' then do;
/* gd = état de groupage au départ du trajet */
if gd0="incertain" and laggf="incertain" then do; gd="incertain";end;
if gd0="incertain" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="incertain" and laggf="dégroupé" then do; gd="incertain";end;
if gd0="incertain" and laggf="intact" then do; gd="incertain";end;
if gd0="groupé" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="groupé" and laggf="dégroupé" then do; gd="dégroupé";end;
if gd0="groupé" and laggf="intact" then do; gd="groupé";end;
if gd0="groupé" and laggf="incertain" then do; gd="groupé";end;
if gd0="dégroupé" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="dégroupé" and laggf="dégroupé" then do; gd="dégroupé";end;
if gd0="dégroupé" and laggf="intact" then do; gd="dégroupé";end;
if gd0="dégroupé" and laggf="incertain" then do; gd="incertain";end;
if gd0="intact" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="intact" and laggf="dégroupé" then do; gd="dégroupé";end;
if gd0="intact" and laggf="intact" then do; gd="intact";end;
if gd0="intact" and laggf="incertain" then do; gd="incertain";end;
/* gf = état de groupage après les opérations logistiques à l'arrivée du
trajet */

```



```

if gd="incertain" and gf0="incertain" then do; gf="incertain";end;
if gd="incertain" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="incertain" and gf0="dégroupé" then do; gf="incertain";end;
if gd="incertain" and gf0="intact" then do; gf="incertain";end;
if gd="groupé" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="groupé" and gf0="dégroupé" then do; gf="dégroupé";end;
if gd="groupé" and gf0="intact" then do; gf="groupé";end;
if gd="groupé" and gf0="incertain" then do; gf="groupé";end;
if gd="dégroupé" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="dégroupé" and gf0="dégroupé" then do; gf="dégroupé";end;
if gd="dégroupé" and gf0="intact" then do; gf="dégroupé";end;
if gd="dégroupé" and gf0="incertain" then do; gf="incertain";end;
if gd="intact" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="intact" and gf0="dégroupé" then do; gf="dégroupé";end;
if gd="intact" and gf0="intact" then do; gf="intact";end;
if gd="intact" and gf0="incertain" then do; gf="incertain";end;end;
run;
proc sort data=traj_rout ; by index; run;
data traj_rout; set traj_rout;
laggf4=lag(gf); run ;
proc sort data=traj_rout ; by index; run;
data traj_rout; set traj_rout;
if ntchrono>'3' then do; laggf=laggf4;end; run;
data traj_rout; set traj_rout;
if ntchrono >'4' then do;
/* gd = état de groupage au départ du trajet */
if gd0="incertain" and laggf="incertain" then do; gd="incertain";end;
if gd0="incertain" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="incertain" and laggf="dégroupé" then do; gd="incertain";end;
if gd0="incertain" and laggf="intact" then do; gd="incertain";end;
if gd0="groupé" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="groupé" and laggf="dégroupé" then do; gd="dégroupé";end;
if gd0="groupé" and laggf="intact" then do; gd="groupé";end;
if gd0="groupé" and laggf="incertain" then do; gd="groupé";end;
if gd0="dégroupé" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="dégroupé" and laggf="dégroupé" then do; gd="dégroupé";end;
if gd0="dégroupé" and laggf="intact" then do; gd="dégroupé";end;
if gd0="dégroupé" and laggf="incertain" then do; gd="incertain";end;
if gd0="intact" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="intact" and laggf="dégroupé" then do; gd="dégroupé";end;
if gd0="intact" and laggf="intact" then do; gd="intact";end;
if gd0="intact" and laggf="incertain" then do; gd="incertain";end;
/* gf = état de groupage après les opérations logistiques à l'arrivée du
trajet */
if gd="incertain" and gf0="incertain" then do; gf="incertain";end;
if gd="incertain" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="incertain" and gf0="dégroupé" then do; gf="incertain";end;
if gd="incertain" and gf0="intact" then do; gf="incertain";end;
if gd="groupé" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="groupé" and gf0="dégroupé" then do; gf="dégroupé";end;
if gd="groupé" and gf0="intact" then do; gf="groupé";end;
if gd="groupé" and gf0="incertain" then do; gf="groupé";end;
if gd="dégroupé" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="dégroupé" and gf0="dégroupé" then do; gf="dégroupé";end;
if gd="dégroupé" and gf0="intact" then do; gf="dégroupé";end;
if gd="dégroupé" and gf0="incertain" then do; gf="incertain";end;
if gd="intact" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="intact" and gf0="dégroupé" then do; gf="dégroupé";end;
if gd="intact" and gf0="intact" then do; gf="intact";end;

```

```

if gd="intact" and gf0="incertain" then do; gf="incertain";end; end;
run;
proc sort data=traj_rout ; by index; run;
data traj_rout; set traj_rout;
    laggf5=lag(gf);
run ;
proc sort data=traj_rout ; by index; run;
data traj_rout; set traj_rout;
if ntchrono>'4' then do;laggf=laggf5;end; run;
data traj_rout; set traj_rout;
if ntchrono >'4' then do;
/* gd = état de groupage au départ du trajet */
if gd0="incertain" and laggf="incertain" then do; gd="incertain";end;
if gd0="incertain" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="incertain" and laggf="dégroupé" then do; gd="incertain";end;
if gd0="incertain" and laggf="intact" then do; gd="incertain";end;
if gd0="groupé" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="groupé" and laggf="dégroupé" then do; gd="dégroupé";end;
if gd0="groupé" and laggf="intact" then do; gd="groupé";end;
if gd0="groupé" and laggf="incertain" then do; gd="groupé";end;
if gd0="dégroupé" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="dégroupé" and laggf="dégroupé" then do; gd="dégroupé";end;
if gd0="dégroupé" and laggf="intact" then do; gd="dégroupé";end;
if gd0="dégroupé" and laggf="incertain" then do; gd="incertain";end;
if gd0="intact" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="intact" and laggf="dégroupé" then do; gd="dégroupé";end;
if gd0="intact" and laggf="intact" then do; gd="intact";end;
if gd0="intact" and laggf="incertain" then do; gd="incertain";end;
/* gf = état de groupage après les opérations logistiques à l'arrivée du
trajet */
if gd="incertain" and gf0="incertain" then do; gf="incertain";end;
if gd="incertain" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="incertain" and gf0="dégroupé" then do; gf="incertain";end;
if gd="incertain" and gf0="intact" then do; gf="incertain";end;
if gd="groupé" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="groupé" and gf0="dégroupé" then do; gf="dégroupé";end;
if gd="groupé" and gf0="intact" then do; gf="groupé";end;
if gd="groupé" and gf0="incertain" then do; gf="groupé";end;
if gd="dégroupé" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="dégroupé" and gf0="dégroupé" then do; gf="dégroupé";end;
if gd="dégroupé" and gf0="intact" then do; gf="dégroupé";end;
if gd="dégroupé" and gf0="incertain" then do; gf="incertain";end;
if gd="intact" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="intact" and gf0="dégroupé" then do; gf="dégroupé";end;
if gd="intact" and gf0="intact" then do; gf="intact";end;
if gd="intact" and gf0="incertain" then do; gf="incertain";end; end;
run;

proc sort data=traj_rout ;
    by index;
run;
data traj_rout; set traj_rout;
    laggf6=lag(gf);
run ;
proc sort data=traj_rout ; by index; run;
data traj_rout; set traj_rout;
if ntchrono>'5' then do;laggf=laggf6;end; run;
data traj_rout; set traj_rout;
if ntchrono >'5' then do;

```

```

/* gd = état de groupage au départ du trajet */
if gd0="incertain" and laggf="incertain" then do; gd="incertain";end;
if gd0="incertain" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="incertain" and laggf="dégroulé" then do; gd="incertain";end;
if gd0="incertain" and laggf="intact" then do; gd="incertain";end;
if gd0="groupé" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="groupé" and laggf="dégroulé" then do; gd="dégroulé";end;
if gd0="groupé" and laggf="intact" then do; gd="groupé";end;
if gd0="groupé" and laggf="incertain" then do; gd="groupé";end;
if gd0="dégroulé" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="dégroulé" and laggf="dégroulé" then do; gd="dégroulé";end;
if gd0="dégroulé" and laggf="intact" then do; gd="dégroulé";end;
if gd0="dégroulé" and laggf="incertain" then do; gd="incertain";end;
if gd0="intact" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="intact" and laggf="dégroulé" then do; gd="dégroulé";end;
if gd0="intact" and laggf="intact" then do; gd="intact";end;
if gd0="intact" and laggf="incertain" then do; gd="incertain";end;
/* gf = état de groupage après les opérations logistiques à l'arrivée du
trajet */
if gd="incertain" and gf0="incertain" then do; gf="incertain";end;
if gd="incertain" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="incertain" and gf0="dégroulé" then do; gf="incertain";end;
if gd="incertain" and gf0="intact" then do; gf="incertain";end;
if gd="groupé" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="groupé" and gf0="dégroulé" then do; gf="dégroulé";end;
if gd="groupé" and gf0="intact" then do; gf="groupé";end;
if gd="groupé" and gf0="incertain" then do; gf="groupé";end;
if gd="dégroulé" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="dégroulé" and gf0="dégroulé" then do; gf="dégroulé";end;
if gd="dégroulé" and gf0="intact" then do; gf="dégroulé";end;
if gd="dégroulé" and gf0="incertain" then do; gf="incertain";end;
if gd="intact" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="intact" and gf0="dégroulé" then do; gf="dégroulé";end;
if gd="intact" and gf0="intact" then do; gf="intact";end;
if gd="intact" and gf0="incertain" then do; gf="incertain";end; end;
run;

proc sort data=traj_rout ;
    by index;
run;
data traj_rout; set traj_rout;
    laggf7=lag(gf);
run ;
proc sort data=traj_rout ;
    by index; run;
data traj_rout; set traj_rout;
if ntchrono>'6' then do;laggf=laggf7;end;run;
data traj_rout; set traj_rout;
if ntchrono >'6' then do;
/* gd = état de groupage au départ du trajet */
if gd0="incertain" and laggf="incertain" then do; gd="incertain";end;
if gd0="incertain" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="incertain" and laggf="dégroulé" then do; gd="incertain";end;
if gd0="incertain" and laggf="intact" then do; gd="incertain";end;
if gd0="groupé" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="groupé" and laggf="dégroulé" then do; gd="dégroulé";end;
if gd0="groupé" and laggf="intact" then do; gd="groupé";end;
if gd0="groupé" and laggf="incertain" then do; gd="groupé";end;
if gd0="dégroulé" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;

```

```

if gd0="dégroulé" and laggf="dégroulé" then do; gd="dégroulé";end;
if gd0="dégroulé" and laggf="intact" then do; gd="dégroulé";end;
if gd0="dégroulé" and laggf="incertain" then do; gd="incertain";end;
if gd0="intact" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="intact" and laggf="dégroulé" then do; gd="dégroulé";end;
if gd0="intact" and laggf="intact" then do; gd="intact";end;
if gd0="intact" and laggf="incertain" then do; gd="incertain";end;
/* gf = état de groupage après les opérations logistiques à l'arrivée du
trajet */
if gd="incertain" and gf0="incertain" then do; gf="incertain";end;
if gd="incertain" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="incertain" and gf0="dégroulé" then do; gf="incertain";end;
if gd="incertain" and gf0="intact" then do; gf="incertain";end;
if gd="groupé" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="groupé" and gf0="dégroulé" then do; gf="dégroulé";end;
if gd="groupé" and gf0="intact" then do; gf="groupé";end;
if gd="groupé" and gf0="incertain" then do; gf="groupé";end;
if gd="dégroulé" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="dégroulé" and gf0="dégroulé" then do; gf="dégroulé";end;
if gd="dégroulé" and gf0="intact" then do; gf="dégroulé";end;
if gd="dégroulé" and gf0="incertain" then do; gf="incertain";end;
if gd="intact" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="intact" and gf0="dégroulé" then do; gf="dégroulé";end;
if gd="intact" and gf0="intact" then do; gf="intact";end;
if gd="intact" and gf0="incertain" then do; gf="incertain";end;end;
run;

data traj_rout; set traj_rout;
if ntchrono='7' and laggf=' ' then do; gf='incertain';gd='incertain';end;
run;
proc sort data=traj_rout ; by index; run;
data traj_rout; set traj_rout;
laggf8=lag(gf); run ;
proc sort data=traj_rout ; by index; run;
data traj_rout; set traj_rout;
if ntchrono>'7' then do;laggf=laggf8;end; run;
data traj_rout; set traj_rout;
if ntchrono >'7' then do;
/* gd = état de groupage au départ du trajet */
if gd0="incertain" and laggf="incertain" then do; gd="incertain";end;
if gd0="incertain" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="incertain" and laggf="dégroulé" then do; gd="incertain";end;
if gd0="incertain" and laggf="intact" then do; gd="incertain";end;
if gd0="groupé" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="groupé" and laggf="dégroulé" then do; gd="dégroulé";end;
if gd0="groupé" and laggf="intact" then do; gd="groupé";end;
if gd0="groupé" and laggf="incertain" then do; gd="groupé";end;
if gd0="dégroulé" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="dégroulé" and laggf="dégroulé" then do; gd="dégroulé";end;
if gd0="dégroulé" and laggf="intact" then do; gd="dégroulé";end;
if gd0="dégroulé" and laggf="incertain" then do; gd="incertain";end;
if gd0="intact" and laggf="groupé" then do; gd="groupé";end;
if gd0="intact" and laggf="dégroulé" then do; gd="dégroulé";end;
if gd0="intact" and laggf="intact" then do; gd="intact";end;
if gd0="intact" and laggf="incertain" then do; gd="incertain";end;
/* gf = état de groupage après les opérations logistiques à l'arrivée du
trajet */

```

```

if gd="incertain" and gf0="incertain" then do; gf="incertain";end;
if gd="incertain" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="incertain" and gf0="dégroué" then do; gf="incertain";end;
if gd="incertain" and gf0="intact" then do; gf="incertain";end;
if gd="groupé" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="groupé" and gf0="dégroué" then do; gf="dégroué";end;
if gd="groupé" and gf0="intact" then do; gf="groupé";end;
if gd="groupé" and gf0="incertain" then do; gf="groupé";end;
if gd="dégroué" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="dégroué" and gf0="dégroué" then do; gf="dégroué";end;
if gd="dégroué" and gf0="intact" then do; gf="dégroué";end;
if gd="dégroué" and gf0="incertain" then do; gf="incertain";end;
if gd="intact" and gf0="groupé" then do; gf="groupé";end;
if gd="intact" and gf0="dégroué" then do; gf="dégroué";end;
if gd="intact" and gf0="intact" then do; gf="intact";end;
if gd="intact" and gf0="incertain" then do; gf="incertain";end; end;
run;

data traj_rout; set traj_rout;
if gd=' ' then gd='incertain';
run;

/* PROC FREQ data=traj_rout;
   table gd ;
run;

--> gd : dégroupé 2643;groupé 3832; incertain 2616; intact 4950*/

data traj_rout; set traj_rout;
if tr16='1' then do;gd='groupé'; end;run;
proc freq data=traj_rout; table gd; run;

data t14; set traj_rout; where t14 ne .; run; /* 10954*/
data t141; set t14; where tr10 ne .; run; /* 9554 */
data t142; set t14; where tr10=.; run; /* 1400 */
data t143; set traj_rout; where t14=.; run; /* 3087 */
data t144; set t143; where tr10 ne .; run; /* 1233 */
data t145; set t143; where tr10=.; run; /* 1854*/

/*****
/***** estimation des variables manquantes de t14 et tr10 *****/
/*****/
proc freq data=traj_rout; table t14; run; /* 3087 mqts avec uniquement
traj classiques (7393 manquants) */

DATA envoi_q17; set bases.envoi_21avril2009_ok;
keep cleq q17;
run;

PROC SORT data=envoi_q17;
by cleq;
run;

```

```

/* réinsérer dans table trajet*/
DATA traj_rout2;
    merge traj_rout envoi_q17;
    by cleq;
run;
DATA traj_rout2; set traj_rout2;
    if index="" then delete;
run;

data q17; set traj_rout2;
    keep index ntchrono gd tr16 q17 type_data;
    where gd='groupé' ; run;
proc freq data=q17;
    table q17;
    where gd='groupé' ;
run; /* il manque 498 q17 sur 7312 groupé et non messagerie */
/*data traj_rout2; set traj_rout2; drop t14z1; run;
data traj_rout2; set traj_rout2; format t14z1 9.3; run;*/
data traj_rout2; set traj_rout2;
if t14 > 0 then do; t14z1=t14; control_t14_1=1; end;
run;

Title "control_t14_1=1";
proc gplot data=traj_rout2;
    plot t14z1*CC_q13r/HAXIS=axis1 VAXIS=axis2 ;
    where control_t14_1=1;
run;quit;

proc freq data=traj_rout2; table t14z1/missing; run; /* 3125 manquantes */

data traj_rout2; set traj_rout2;
control_t14_2=.; run;
data traj_rout2bis; set traj_rout2;
    if CC_q13r*0.950 < t14z1 and t14z1 < 1.050*CC_q13r /* si t14z1 est
proche de q13r */
        and t14z1 > 25 then do;t14z1=CC_q13r; control_t14_2=1;
control_t14_1=.; end;
run;

data traj_rout2bis; set traj_rout2bis;
if tr10 > 0 then tr10z1=tr10;
    if ntchrono='1' then do; place_trajet='premier-dernier';end;
    if ntchrono= Nbre_total_trajets_par_envoi then do;
place_trajet='premier-dernier';end;
    if ntchrono ne '1' and ntchrono^= Nbre_total_trajets_par_envoi then
do; place_trajet='autres';end;
run;

DATA traj_rout_test_messag; set traj_rout2bis;
    if type_trajet="messagerie" and place_trajet="premier-dernier" then
do;
        if t14<=0.4 and CC_q13r<=0.4 then do; t14z1=0.4; tr10z1=0.8;
end;
        if t14<=0.4 and CC_q13r>0.4 then do; t14z1=CC_q13r; tr10z1=1;
end;
        if t14>0.4 and t14<=0.9 and CC_q13r<=t14 then do; t14z1=t14;
tr10z1=0.9; end;

```

```

        if t14>0.4 and t14<=0.9 and CC_q13r>t14 then do; t14z1=CC_q13r;
tr10z1=0.9; end;
        if t14>0.9 and t14<=26 then do; t14z1=1; tr10z1=t14z1/0.6; end;
        if t14>26 then do; t14z1=1; tr10z1=1.14; end; end;
    if type_trajet="messagerie" and place_trajet NE "premier-dernier"
then do;
        if t14<=16 then do; t14z1=16; tr10z1=20;end;
        if t14>16 and t14<=26 then do; t14z1=t14; tr10z1=26;end;
        if t14>26 then do; t14z1=16; tr10z1=20;end; end;
run;

/*PROC FREQ data=traj_rout_test_messag;
    table t14z1;
    where type_trajet="messagerie" ;
run;*/

/*****
*****/
/*****
*/

proc freq data=traj_rout_test_messag;
    table t14z1;
run; /* 1393 manquantes */

proc sort data=traj_rout_test_messag nodupkey; by index; run;

/* Si on est dans <= cadre d'une tournée et compte propre et si t14z1 n'est
pas
remplie, on égalise t14z1 à q17 (poids total tournée) */
data traj_rout_test_messag; set traj_rout_test_messag;
if type_trajet NE "messagerie" and t14z1 not > 0 and q17 > 0 and tr16='1'
then do; t14z1=q17; control_t14_4=1;
control_t14_1=.; control_t14_2=.;
end;
run;

DATA traj_rout_test_messag; set traj_rout_test_messag;
    if type_trajet NE "messagerie" and control_t14_4=1 and q17 > 0 and
tr16='1' and t14z1 not > CC_q13r then do;
        t14z1=.; control_t14_4bis=1; control_t14_1=.; control_t14_2=.;
control_t14_4=.; end;
run;

proc freq data=traj_rout_test_messag;
    table t14z1;
run; /* 1266 manquants */
/*
title "control_t14_4=1";
proc gplot data=traj_rout2bis;
    plot t14z1*CC_q13r/HAXIS=axis1 VAXIS=axis2 ;
    where control_t14_4=1;

```

```

run;quit;*/

data traj_rout_test_messag; set traj_rout_test_messag;
if t14z1 not > 0 and ntchrono='1' and gd in ('intact','dégroulé') then do;
t14z1=CC_q13r;control_t14_5=1;
control_t14_1=.; control_t14_2=.; control_t14_4=.; end; run;
proc freq data=traj_rout_test_messag; ;
table t14z1;
run; /* 1084 manquants */

proc sort data=traj_rout_test_messag; by index; run;

/* identifier les trajets pour lesquels il est possible de récupérer la
valeur précédente
est-ce le même envoi?
est-ce le trajet précédent ou y-a-t-il un trajet d'un autre mode
intercalé?*/
DATA traj_rout3;set traj_rout_test_messag;
lag_envoi=lag(cleq);
if cleq=lag_envoi then meme_envoi="oui"; else meme_envoi="non";
lag_ntchrono=lag (ntchrono);
if ntchrono=1 then lag_ntchrono=.;
run;

DATA traj_rout3;set traj_rout3;
if meme_envoi="non" then lag_ntchrono=.;
run;

DATA traj_rout3;set traj_rout3;
diff_ntchrono=.;
if lag_ntchrono NE . then diff_ntchrono=ntchrono-lag_ntchrono;
run;

/* Pour reprendre des valeurs, utiliser 2 filtres : meme_envoi="oui" et
diff_ntchrono=1*/

data traj_rout4; set traj_rout3;
if meme_envoi="oui" and diff_ntchrono=1 then lagt14=lag(t14z1); run;

data traj_rout4; set traj_rout4;
if t14z1 not > 0 and meme_envoi="oui" and diff_ntchrono=1 and gd='intact'
then do; t14z1=lagt14;control_t14_5=1;
control_t14_1=.; control_t14_2=.; control_t14_4=.; end;
if t14z1 not > 0 and meme_envoi="oui" and diff_ntchrono=1 and gd='dégroulé'
then do; t14z1=CC_q13r; control_t14_5=1;
control_t14_1=.; control_t14_2=.; control_t14_4=.; end;
run;

/*PROC FREQ data=traj_rout4;
table control_t14_5;
run;*/

/*title "control_t14_5=1";
proc gplot data=traj_rout_test_messag;
plot t14z1*CC_q13r;
where control_t14_5=1;

```



```

run;quit;*/

proc freq data=traj_rout4; table t14z1; run; /*1020 manquants */

/* à mettre de côté car trop rapide
data traj_rout4; set traj_rout4;
if t14z1 > 0 and t14z1 < CC_q13r then t14z1=CC_q13r;
run;*/

data traj_rout5; set traj_rout4;
drop lagt14 laggf7 laggf6 laggf5 laggf4 laggf3 laggf2 /*laggf1*/ laggf;
run;

/* modifications t14 et tr10 */
/* 2, Résolution du problème Q13r>T14. */
DATA traj_rout5; set traj_rout5;
t14z2=t14z1;
run;
data traj_rout6; set traj_rout5;
if t14z2 > 0 and t14z2<CC_q13r then do;t14z2=CC_q13r; control_t14_6=1;
control_t14_1=.; control_t14_2=.; control_t14_4=.; end;
run;

proc freq data=traj_rout6; table control_t14_6; run; /* 524 */

/* title "control_t14_6=1";
proc gplot data=traj_rout6;
    plot t14z2*CC_q13r;
    where control_t14_6=1;
run;quit;*/

/* 3, charge utile */
proc freq data=traj_rout6; table tr10; run; /* 3254 manquants */

proc freq data=traj_rout6; table tr10z1; run; /* 1653 mqts*/
data traj_rout7; set traj_rout6;
tr10z2=tr10z1;run;
proc freq data=traj_rout7; table tr10z2; run; /*1653 manquants*/

data traj_rout8; set traj_rout7;
tr10z3=tr10z2;
if tr10z2 >0 and tr10z2 <=0.8 then tr10z3=0.8;
if tr10z2>27 and tr10z2 <=43 then tr10z3=26;
if tr10z2=44 then tr10z3=28;
if tr10z2 >44 then tr10z3=.;
run;

proc freq data=traj_rout8; table tr10z3; run; /*1723 manquants*/

DATA traj_rout9; set traj_rout8;
    if CC_q13r>50 then do; t14z2=CC_q13r; if tr10z3 Not in (24 26) then
do; tr10z3=25; control_t14_7=1;
    control_t14_1=.; control_t14_2=.; control_t14_4=.; control_t14_5=.;
control_t14_6=.;end; end;
    if t14z2<CC_q13r*1100 and t14z2>CC_q13r*900 then t14z2=CC_q13r;

```

```

run;

/*title "control_t14_7=1";
proc gplot data=traj_rout9;
    plot t14z2*CC_q13r;
    where control_t14_7=1;
run;quit;
*/

/*PROC PRINT data=traj_rout9;
    var index CC_q13r T14 t14z2 Tr10 tr10z3;
    where tr10z3>26;
run;*/
/*247 à 28 tonnes*/

/* 4, Calcul du nombre de véhicule */
/*data traj_rout2; set traj_rout2; drop nb_veh nb_veh2 tr10z3 t14z3 t14z4
q13r2; run;
data traj_rout2; set traj_rout2;format nveh 3.; format nveh2 3.; format
t14z3
9.3;format q13r2 9.3;run;*/
data traj_rout10; set traj_rout9;
nveh=ceil(t14z2/tr10z3);run;

data traj_rout11; set traj_rout10;
if /*nveh=. and */ t14z2 NE . and t14z2 <= 29 then nveh=1;
if nveh=. and t14z2 > 27 then nveh=ceil(t14z2/26);
if nveh=. and CC_q13r <= 27 then nveh=1;
if nveh=. and t14z2 <= 0 and CC_q13r > 27 then nveh=ceil(CC_q13r/25);run;

/* Variable pour indiquer si surcharge */
/*DATA traj_rout6; set traj_rout5;
    surcharg=0;
    if tr10z3*1.20<=t14z2 and tr10z3<t14z2 and tr10z3 NE . then
surcharg=1;
run;

DATA traj_rout6; set traj_rout6;
    Diff_tr8_nveh=Tr8-nveh;
run;*/

/* PROC PRINT data=traj_rout6 noobs;
    var index Diff_tr8_nveh tr8 nveh CC_q13r t14 t14z2 tr10 tr10z3;
    where Diff_tr8_nveh<0 and Tr8 not in (. 0);
run; */

/*65 cas où nveh > 10 */
/*ODS HTML BODY="C:\Users\Cruz\Desktop\nombre_veh_eleve2.xls";*/
PROC PRINT data=traj_rout11 noobs;
    var index tr8 nveh CC_q13r t14 t14z2 tr10 tr10z3;
    where nveh> 10 /*tr10<t14z2 and tr10 NE .*/ ;
run;
/*ODS HTML CLOSE;*/

```

```

/**/
data traj_rout11; set traj_rout11;
if index ="2055314334" then do ; nveh=2 ; tr10z3=25 ; t14z2=CC_q13r/2 ;
end ;
run;

data traj_rout12; set traj_rout11;
q13r2=CC_q13r/nveh; run;
proc freq data=traj_rout12;
    table q13r2; run;
data traj_rout13; set traj_rout12;
if t14z2 > 0 and nveh > 0 then t14z3=t14z2/nveh; run;
proc freq data=traj_rout13; table nveh; run;

PROC FREQ data=traj_rout13;
    tables t14z3;
run; /*951 mqtts*/

/*****
/**** estimation pour les cas groupé et incertain ****
/****
proc sql;
create table pdenv3
    as select
cleq,q15r,q15rq13r,q13rq14r,q12a1,q12a2,q12a3,q12a4,q12a5,q12a6,q12a7,q12a8
,q18bis, q14r
    from bases.Env17octobre07 where cleq in (select cleq from
traj_rout13);quit;

proc sort data=traj_rout13; by cleq; run;
proc sort data=pdenv3; by cleq; run;
data traj_rout14; merge traj_rout13 pdenv3; by cleq; run;
proc sort data=traj_rout14 nodupkey; by index; run;
proc sql;
create table ch
    as select cleq,fchcalmar_cor,fchmode_cor,fchphy10g_cor
    from bases.env17octobre07 where cleq in (select cleq from
traj_rout14);
quit;
proc sort data=traj_rout14; by cleq; run;
proc sort data=ch; by cleq; run;
data traj_rout15; merge traj_rout14 ch; by cleq; run;
proc sort data=traj_rout15 nodupkey; by index; run;
/*proc freq data=traj_rout15; tables fchcalmar_cor fchmode_cor
fchphy10g_cor;run;*/

data etab; set bases.echoetabcomplet_23mars2010; run;
/*proc contents data=etab; run;*/
proc sql;
    create table etab1

```

```

        as select ne,plr,p2r,plrp2r,/*TEFEN,*/e23,e3/*,e3tr */
        from bases.echoetabcomplet_23mars2010 where ne in (select
ne from traj_rout15);
quit;
/*proc freq data=etab1; tables e3; run;*/

proc sort data=traj_rout15; by ne; run;
proc sort data=etab1 nodupkey; by ne; run;
data traj_rout16; merge traj_rout15 etab1; by ne; run;

DATA traj_rout16; set traj_rout16;
        if cleq=. then delete;
run;

proc sort data=traj_rout16 nodupkey; by index; run;

data interv; set bases.Intervenent6juillet09; run;
proc sql;
        create table int1
        as select clei,itr4a,itr4b,itr4d,itr14,itr6b
        from interv where clei in (select clei from traj_rout9);
quit;
proc freq data=int1; tables itr4a itr4b itr4d itr14 itr6b ; run;

proc sort data=traj_rout16; by clei; run;
proc sort data=int1; by clei; run;
data traj_rout17; merge traj_rout16 int1; by clei; run;

proc sort data=traj_rout17 nodupkey; by index; run;
proc freq data=traj_rout17; tables itr4a itr4b itr4d itr14 itr6b ; run;

data g_et_i; set traj_rout17; where gd in ('groupé','incertain'); run;

/* Coté t14 de l'arbre */
data mod_1; set g_et_i; if t14z3 not > 0; run; /* mod_1 contient 933 obs.
*/
data mod_c_1; set g_et_i; if t14z3 > 0; run; /* mod_c_1 contient 8503 obs.
*/

/* Transformations linéaires */
data mod_c_1; set mod_c_1;
dist=DIST_mix_km_rap_estim;
tkm=q13r2*DIST_mix_km_rap_estim;
if tr10z3 > 0 then do itr10=1;end;
if tr10z3 > 0 then do ltr10z3=log(tr10z3);end;
if t14z3 > 0 then do lt14z3=log(t14z3);end;
if DIST_mix_km_rap_estim > 0 then do ldist=log(DIST_mix_km_rap_estim);end;
if q13r2 > 0 then do lq13r2=log(q13r2);end;
if q14r > 0 then do lq14r=log(q14r);end;
if q15r > 0 then do lq15r=log(q15r);end;
if tkm > 0 then do ltkm=log(tkm);end;
if q15rq13r > 0 then do lq1513=log(q15rq13r);end;

```

```

if q13rq14r > 0 then do lq1314=log(q13rq14r);end;
if e3 > 0 then do le3=log(e3);end;
if p1r > 0 then do lp1r=log(p1r);end;
if p2r > 0 then do lp2r=log(p2r);end;
if p1rp2r > 0 then do lp1p2=log(p1rp2r);end;run;

/* Création de t14zest */
/* La table contient t14z3 > 0 (t14z3 est remplie) */
data estimt14_1; set mod_c_1; run;

/* data estimt14_1;set estimt14_1;
    if ntchrono='1' then do; place_trajet='premier-dernier';end;
    if ntchrono= Nbre_total_trajets_par_envoi then do;
place_trajet='premier-dernier';end;
    if ntchrono ne '1' and ntchrono^= Nbre_total_trajets_par_envoi then
do; place_trajet='autres';end;
run;*/

/** création de variables indicatrices **/
data estimt14_1;set estimt14_1;
/* générer les var. ind. puis les créer */
indg=0;
indi=0;
indca=0;
indcp=0;
indt=0;
indnt=0;
indtr=0;
indtrd=0;
iq121=0; iq122=0; iq123=0; iq124=0; iq125=0; iq126=0; iq127=0; iq128=0;
iq181=0; iq182=0; iq183=0; iq184=0;
i110=0; i120=0; i130=0; i300=0; i245=0;
i4a=0; i4b=0; i4d=0; i14=0; i6b=0;
/* remplir */
if gd='groupé' then indg=1;
if gd='incertain' then indi=1;
if CC_T7globnew=2 then indca=1;
if CC_T7globnew=1 then indcp=1;
if tr16='1' then indt=1;
if tr16 ne '1' then indnt=1;
if place_trajet='premier-dernier' then indtr=1;
if place_trajet='autres' then indtrd=1;
if q12a1='1' then iq121=1;
if q12a2='1' then iq122=1;
if q12a3='1' then iq123=1;
if q12a4='1' then iq124=1;
if q12a5='1' then iq125=1;
if q12a6='1' then iq126=1;
if q12a7='1' then iq127=1;
if q12a8='1' then iq128=1;
if q18bis='1' then iq181=1;
if q18bis='2' then iq182=1;
if q18bis='3' then iq183=1;
if q18bis='4' then iq184=1;
if fchphy_13g='110' then i110=1;
if fchphy_13g='120' then i120=1;
if fchphy_13g='130' then i130=1;
if fchphy_13g='300' then i300=1;

```

```

if fchphy_13g in ('200','400','500') then i245=1;
if itr4a='1' then i4a=1;
if itr4b='1' then i4b=1;
if itr4d='1' then i4d=1;
if itr14="1" then i14=1;
if itr6b="2" then i6b=1;
if itr6b="3" then i6b=1;run;
data estimt14_1;set estimt14_1;
if indg=1 and indt=1 and indtr=1 then do; synt=7; end;
if indg=1 and indt=1 and indtr=0 then do; synt=6; end;
if indg=1 and indt=0 and indtr=1 then do; synt=5; end;
if indg=1 and indt=0 and indtr=0 then do; synt=4; end;
if indg=0 and indt=1 and indtr=1 then do; synt=3; end;
if indg=0 and indt=1 and indtr=0 then do; synt=2; end;
if indg=0 and indt=0 and indtr=1 then do; synt=1; end;
if indg=0 and indt=0 and indtr=0 then do; synt=0; end;
run;
/* la table contient log(t14z3) > 0 */
data estimt14_1; set estimt14_1; if lt14z3 > 0; run; /* 4548 obs. */
/* Coté tr10 de l'arbre */
data modb_1; set g_et_i; if tr10z3 not > 0; run; /* modb_1 contient 1111
obs. */
data mod_cb_1; set g_et_i; if tr10z3 > 0; run; /* mod_cb_1 contient 8326
obs. */
/* Transformations linéaires */
data mod_cb_1; set mod_cb_1;
tkm=CC_q13r*DIST_mix_km_rap_estim;
if t14z3 > 0 then do it14=1;end;
if tr10z3 > 0 then do ltr10z3=log(tr10z3);end;
if t14z3 > 0 then do lt14z3=log(t14z3);end;
if DIST_mix_km_rap_estim > 0 then do ldist=log(DIST_mix_km_rap_estim);end;
if q13r2 > 0 then do lq13r2=log(q13r2);end;
if q14r > 0 then do lq14r=log(q14r);end;
if q15r > 0 then do lq15r=log(q15r);end;
if tkm > 0 then do ltkm=log(tkm);end;
if q15rq13r > 0 then do lq1513=log(q15rq13r);end;
if q13rq14r > 0 then do lq1314=log(q13rq14r);end;
if e3 > 0 then do le3=log(e3);end;
if p1r > 0 then do lp1r=log(p1r);end;
if p2r > 0 then do lp2r=log(p2r);end;
if p1rp2r > 0 then do lp1p2=log(p1rp2r);end;run;

/*data estimtr10_1;set mod_cb_1;
    if ntchrono='1' then do; place_trajet='premier-dernier';end;
    if ntchrono= Nbre_total_trajets_par_envoi then do;
place_trajet='premier-dernier';end;
    if ntchrono ne '1' and ntchrono^= Nbre_total_trajets_par_envoi then
do; place_trajet='autres';end;
run;*/
/** création de variables indicatrices **/
data mod_cb_1;set mod_cb_1;
indg=0;
indi=0;
indca=0;
indcp=0;
indt=0;
indnt=0;
indtr=0;

```

```

indtrd=0;
iq121=0; iq122=0; iq123=0; iq124=0; iq125=0; iq126=0; iq127=0; iq128=0;
iq181=0; iq182=0; iq183=0; iq184=0;
i110=0; i120=0; i130=0; i300=0; i245=0;
i4a=0; i4b=0; i4d=0; i14=0; i6b=0;
/* remplir */
if gd='groupé' then indg=1;
if gd='incertain' then indi=1;
if CC_T7globnew=2 then indca=1;
if CC_T7globnew=1 then indcp=1;
if trl6='1' then indt=1;
if trl6 ne '1' then indnt=1;
if place_trajet='premier-dernier' then indtr=1;
if place_trajet='autres' then indtrd=1;
if q12a1='1' then iq121=1;
if q12a2='1' then iq122=1;
if q12a3='1' then iq123=1;
if q12a4='1' then iq124=1;
if q12a5='1' then iq125=1;
if q12a6='1' then iq126=1;
if q12a7='1' then iq127=1;
if q12a8='1' then iq128=1;
if q18bis='1' then iq181=1;
if q18bis='2' then iq182=1;
if q18bis='3' then iq183=1;
if q18bis='4' then iq184=1;
if fchphy_13g='110' then i110=1;
if fchphy_13g='120' then i120=1;
if fchphy_13g='130' then i130=1;
if fchphy_13g='300' then i300=1;
if fchphy_13g in ('200','400','500') then i245=1;
if itr4a='1' then i4a=1;
if itr4b='1' then i4b=1;
if itr4d='1' then i4d=1;
if itr14="1" then i14=1;
if itr6b="2" then i6b=1;
if itr6b="3" then i6b=1; run;
data mod_cb_1; set mod_cb_1;
if indg=1 and indt=1 and indtr=1 then do; synt=7; end;
if indg=1 and indt=1 and indtr=0 then do; synt=6; end;
if indg=1 and indt=0 and indtr=1 then do; synt=5; end;
if indg=1 and indt=0 and indtr=0 then do; synt=4; end;
if indg=0 and indt=1 and indtr=1 then do; synt=3; end;
if indg=0 and indt=1 and indtr=0 then do; synt=2; end;
if indg=0 and indt=0 and indtr=1 then do; synt=1; end;
if indg=0 and indt=0 and indtr=0 then do; synt=0; end; run;

/* La table contient log(tr10z3) <0 */
data mod_cb_1; set mod_cb_1; if ltr10z3 > 0; run; /*6674 obs*/
proc sort data=estimtl4_1 nodupkey; by index; run;
proc sort data=mod_cb_1 nodupkey; by index; run;

proc sort data=traj_routl7 nodupkey; by index; run;
DATA traj_routl7; set traj_routl7;
    drop itr4b;
run;

proc sql;

```

```

        create table int1
            as select clei,itr4a,itr4b,itr4d,itr14,itr6b
                from interv where clei in (select clei from traj_rout9);
quit;

PROC SORT data=int1; by clei; run;
PROC SORT data=traj_rout17; by clei; run;

DATA traj_rout17bis;
    merge traj_rout17 int1;
    by clei;
run;

DATA traj_rout18; set traj_rout17bis;
indg=0;
indi=0;
indca=0;
indcp=0;
indt=0;
indnt=0;
indtr=0;
indtrd=0;
iq121=0; iq122=0; iq123=0; iq124=0; iq125=0; iq126=0; iq127=0; iq128=0;
iq181=0; iq182=0; iq183=0; iq184=0;
i110=0; i120=0; i130=0; i300=0; i245=0;
i4a=0; i4b=0; i4d=0; i14=0; i6b=0;
/* remplir */
if gd='groupé' then indg=1;
if gd='incertain' then indi=1;
if CC_T7globnew=2 then indca=1;
if CC_T7globnew=1 then indcp=1;
if tr16='1' then indt=1;
if tr16 ne '1' then indnt=1;
if place_trajet='premier-dernier' then indtr=1;
if place_trajet='autres' then indtrd=1;
if q12a1='1' then iq121=1;
if q12a2='1' then iq122=1;
if q12a3='1' then iq123=1;
if q12a4='1' then iq124=1;
if q12a5='1' then iq125=1;
if q12a6='1' then iq126=1;
if q12a7='1' then iq127=1;
if q12a8='1' then iq128=1;
if q18bis='1' then iq181=1;
if q18bis='2' then iq182=1;
if q18bis='3' then iq183=1;
if q18bis='4' then iq184=1;
if fchphy_13g='110' then i110=1;
if fchphy_13g='120' then i120=1;
if fchphy_13g='130' then i130=1;
if fchphy_13g='300' then i300=1;
if fchphy_13g in ('200','400','500') then i245=1;
if itr4a='1' then i4a=1;
if itr4b='1' then i4b=1;
if itr4d='1' then i4d=1;
if itr14="1" then i14=1;
if itr6b="2" then i6b=1;
if itr6b="3" then i6b=1;

```



```

if indg=1 and indt=1 and indtr=1 then do; synt=7; end;
if indg=1 and indt=1 and indtr=0 then do; synt=6; end;
if indg=1 and indt=0 and indtr=1 then do; synt=5; end;
if indg=1 and indt=0 and indtr=0 then do; synt=4; end;
if indg=0 and indt=1 and indtr=1 then do; synt=3; end;
if indg=0 and indt=1 and indtr=0 then do; synt=2; end;
if indg=0 and indt=0 and indtr=1 then do; synt=1; end;
if indg=0 and indt=0 and indtr=0 then do; synt=0; end;
run;

/*PROC FREQ data=traj_rout18;
    table indg indi indca indcp indt indnt indtr indtrd iq121 iq122 iq123
iq124 iq125 iq126 iq127 iq128
iq181 iq182 iq183 iq184
i110 i120 i130 i300 i245
i4a i4b i4d i14 i6b;
run;*/

/*data traj_rout18; merge traj_rout17 estimt14_1 ;by index;run;
data traj_rout18bis; merge traj_rout18 mod_cb_1;by index;run;

proc sort data=traj_rout18 nodupkey; by index; run;
proc freq data=traj_rout18; table q14r; run;
proc means data=traj_rout18; var q14r; run;*/
data traj_rout19; set traj_rout18;
if q14r > 0 then q14r1=q14r;
if q14r=. or q14r=0 then q14r1=12.2;run;
proc freq data=traj_rout19; table q14r1; run;

PROC FREQ data=traj_rout19;
    tables t14z3;
run; /*951 mqts*/

DATA traj_rout19; set traj_rout19;
    q15rq13r1=log(q15rq13r);
    CC_q13r1=log(CC_q13r);
run;
DATA traj_rout19; set traj_rout19;
    if q15rq13r=. then q15rq13r_est=exp(-0.5234*CC_q13r1+8.104);
    if q15rq13r>0 then q15rq13r_est=q15rq13r;
run;

DATA traj_rout20; set traj_rout19;
    tkm=CC_q13r*DIST_mix_km_rap_estim;
run;

/*PROC FREQ data=traj_rout20;
    table tkm;
run;*/

/* CREATION DE T14ZEST */
/*data traj_rout2; set traj_rout2; drop t14zest tr10zest; run;
data traj_rout2; set traj_rout2; format t14zest 9.3; format tr10zest
9.3;run;*/

```

```

/* on lance la création de t14zest à l'aide des estimations obtenues avec
les
transformations Box-Cox */
/* si t14z3 est remplie, t14zest prend la valeur de t14z3, sinon, elle est
estimée
**/* Régression 1 */
data traj_rout21; set traj_rout20;
if t14z3=. and tr10z3 > 0 and q14r1 > 0 then do;
dist1=((DIST_mix_km_rap_estim**0.0649745)-1)/0.0649745;
tr101=((tr10z2**0.273441)-1)/0.273441;
q14r11=((q14r1**(-0.434904))-1)/(-0.434904);end; run;

/* VALEURS MANQUANTES)*/
data traj_rout21; set traj_rout21;
if t14z3=. and tr10z3 > 0 and q14r1 > 0 then do;
A1=(-0.839815) + 0.0273872*dist1 + 0.566803*tr101 + 0.437184*q14r11
+ 0.719331*indg - 0.211333*indt - 0.255516*indtr - 0.56733*indca;end;run;

data traj_rout21; set traj_rout21;
if t14z3=. and tr10z3 > 0 and q14r1 > 0 then do;
mul=1/0.303443;
y1=(A1*0.303443 + 1)**mul;end; run;

/* Régression 2 */
data traj_rout22; set traj_rout21;
if t14z3=. and tr10z3=. and q13r2 > 0 and tkm > 0 and q15rq13r_est > 0 then
do;
dist2=((DIST_mix_km_rap_estim**0.418698)-1)/0.418698;
q13r22=((q13r2**0.341208)-1)/0.341208;
tkm2=((tkm**0.512639)-1)/0.512639;
q15132=((q15rq13r_est**0.146792)-1)/0.146792;end; run;

data traj_rout22; set traj_rout22;
if t14z3=. and tr10z3=. and q13r2 > 0 and tkm > 0 and q15rq13r_est > 0 then
do;
A2= 2.32589 + 0.0293453*dist2 + 0.728902*q13r22 - 0.0055624*tkm2 -
0.0347524*q15132
+ 0.962124*indg - 1.11328*indtr + 0.330255*i4b;end; run;

data traj_rout22; set traj_rout22;
if t14z3=. and tr10z3=. and q13r2 > 0 and tkm > 0 and q15rq13r > 0 then do;
y2=(A2*0.31505 + 1)**(1/0.31505);end; run;

/*PROC FREQ data= traj_rout22;
    table y2;
    where t14z3=. and tr10z3=. and q13r2 > 0 and tkm > 0 and q15rq13r_est
> 0;
run;*/

/** t14zest **/
data traj_rout23; set traj_rout22;
control_t14_8=.; control_t14_9=.;
if t14z3 > 0 then t14zest=t14z3;
if t14z3=. and gd in ('groupe' 'incertain') then do;
if tr10z2 > 0 and y1>0/*q14r1 > 0*/ then do; t14zest=y1; control_t14_8=1;
control_t14_1=.; control_t14_2=.; control_t14_4=.; control_t14_5=.;
control_t14_6=.; control_t14_7=.;end;

```

```

if tr10z2=. and y2>0 /*q13r2 > 0 and tkm > 0 and q15rq13r > 0*/ then do;
    t14zest=y2; control_t14_9=1;
    control_t14_1=.; control_t14_2=.; control_t14_4=.; control_t14_5=.;
control_t14_6=.; control_t14_7=.; control_t14_8=.; end;
end; run;

/*PROC PRINT data=traj_rout23;
    var index CC_q13r t14 t14zest tr10 tr10z3 nveh tr8;
    where control_t14_9=1 and CC_q13r>20 and t14zest NE CC_q13r and
nveh<2;
run;*/

DATA traj_rout23bis; set traj_rout23;
    if control_t14_8=1 and CC_q13r>t14zest then t14zest=tr10z3;
    if index="2080491723" then tr10z3=25;
    if control_t14_9=1 and CC_q13r>t14zest*nveh then t14zest=CC_q13r;
    if control_t14_9=1 and CC_q13r in (28 29) then do; t14zest=CC_q13r;
tr10z3=25; nveh=1;end;
    if control_t14_9=1 and CC_q13r>29 then do; t14zest=CC_q13r/nveh;
tr10z3=25; end;
    if control_t14_9=1 and CC_q13r>=25 and t14zest>28 and nveh=1 then
do; t14zest=CC_q13r; tr10z3=25; end;
    if control_t14_9=1 and CC_q13r>20 and t14zest NE CC_q13r and nveh<2
then do; t14zest=CC_q13r; tr10z3=25; end;
run;

DATA traj_rout23bis2; set traj_rout23bis;
    if control_t14_8=1 and CC_q13r>20 and t14zest NE CC_q13r then
t14zest=CC_q13r;
    if control_t14_8=1 and CC_q13r>t14zest*nveh then t14zest=CC_q13r;
run;

/*PROC PRINT data=traj_rout23bis;
    var index CC_q13r t14 t14zest tr10 tr10z3 nveh tr8;
    where control_t14_8=1 and CC_q13r>20 and t14zest NE CC_q13r;
run;*/

/*title "control_t14_9";
proc gplot data=traj_rout23;
plot t14zest*CC_q13r ;
    where control_t14_9=1 and type_trajet="messagerie" and ntchrono="1";
run;quit;*/

/*****

/* CREATION DE TR10ZEST */
/* création de tr10zest à l'aide des estimations obtenues avec les
transformations
Box-Cox */
/* si tr10z2 est remplie, on garde cette valeur pour tr10zest, sinon
tr10zest est
estimée */
/* Régression 3 */
data traj_rout24; set traj_rout23bis2;
if tr10z3=. and t14zest > 0 and q14r1 > 0 then do;

```

```

dist3=((DIST_mix_km_rap_estim**0.263767)-1)/0.263767;
t143=((t14z3**0.580696)-1)/0.580696;
q14r3=((q14r1**(-0.672943))-1)/(-0.672943);end; run;
data traj_rout24; set traj_rout24;
if tr10z3=. and t14zest > 0 and q14r1 > 0 then do;
A3= 3.871540 + 0.062229*dist3 + 0.408853*t143 + 0.518958*q14r3
- 1.00603*indg + 0.947857*indt - 1.726500*indtr - 0.157928*indca
+ 0.435090*i4a + 0.682743*i4b + 0.353396*i4d + 0.306212*i6b;end; run;
data traj_rout24; set traj_rout24;
if tr10z3=. and t14zest > 0 and q14r1 > 0 then do;
y3=(A3*0.360597 + 1)**(1/0.360597);end; run;

/*DATA traj_rout25; set traj_rout24;
    if i6b=. and itr6b in (" A", " E", "") then i6b=0;
    if i4b=. and itr4b="1" then i4b=1;
    if i4b=. and itr4b="A" then i4b=0;
    if i4b=. and itr4b="2" then i4b=0;
    if i4b=. and itr4b="" then i4b=1;
    if iq122=. and q12a2="1" then iq122=1;
    if iq122=. and q12a2="2" then iq122=0;
    if indca=. and CC_T7globnew=2 then indca=1;
    if indca=. and CC_T7globnew NE 2 then indca=0;
    if indtr=. and place_trajet="premier-dernier" then indtr=1;
    if indtr=. and place_trajet="autres" then indtr=0;
    if indt=. and tr16="1" then indt=1;
    if indt=. and tr16 NE "1" then indt=0;
run;*/

/* Régression 4 */
data traj_rout25; set traj_rout24;
if tr10z3=. and t14zest=. and q13r2 > 0 and q14r1 > 0 and q15r > 0 then do;
dist4=((DIST_mix_km_rap_estim**0.310858)-1)/0.310858;
q13r24=((q13r2**0.062798)-1)/0.062798;
q14r4=((q14r1**0.190757)-1)/0.190757;
q15r4=((q15r**0.151794)-1)/0.151794;end; run;

data traj_rout25; set traj_rout25;
if tr10z3=. and t14zest=. and q13r2 > 0 and q14r1 > 0 and q15r > 0 then do;
A4= 5.499160 + 0.099060*dist4 + 0.615165*q13r24 + 0.096938*q14r4 -
0.041301*q15r4 +
1.314870*indg - 1.078530*indt - 0.984914*indtr + 0.846529*indca +
0.594758*iq122 +
0.452863*i4b + 0.430502*i6b;end; run;

data traj_rout25; set traj_rout25;
if tr10z3=. and t14zest=. and q13r2 > 0 and q14r1 > 0 and q15r > 0 then do;
mu4=1/0.546143;y4=(A4*0.546143 + 1)**mu4;end; run;

/** tr10zest */
data traj_rout25bis; set traj_rout25;
    control_t14_10=.; control_t14_11=.;
if tr10z3 > 0 then tr10zest=tr10z3;
if gd in ('groupé' 'incertain') and tr10z3=. and t14zest > 0 and q14r1 > 0
and y3>0 then do; tr10zest=y3;
    control_t14_10=1; control_t14_1=.; control_t14_2=.;
control_t14_4=.; control_t14_5=.;
    control_t14_6=.; control_t14_7=.; end;

```

```

if gd in ('groupé' 'incertain') and tr10z3=. and t14zest=. and q13r2 > 0
and q14r1 > 0 and q15r > 0 and y4>0 then do;
tr10zest=y4;
    control_t14_11=1;          control_t14_1=.; control_t14_2=.;
control_t14_4=.; control_t14_5=.;
    control_t14_6=.; control_t14_7=.; end;
run;

DATA traj_rout25bis2; set traj_rout25bis;
    if control_t14_10=1 and tr10zest<t14zest then tr10zest=t14zest*1.2;
    if control_t14_10=1 and tr10zest>25 then tr10zest=25;
    if index in ("2138388131" "3202880711") then nveh=1;
run;

/* proc PRINT data=traj_rout25bis2;
var index CC_q13r t14 t14zest tr10 tr10zest tr8 nveh ;
where control_t14_10=1 and tr10zest<t14zest ;
run; */

proc freq data=traj_rout25bis2; tables t14zest tr10zest; run; /* 244 1093
manquants */

DATA traj_rout25bis3; set traj_rout25bis2;
    if t14zest=. and CC_q13r>=10 and CC_q13r<20 then do; t14zest=20;
tr10zest=25; end;
    if t14zest=. and CC_q13r>=20 and CC_q13r<29 then do; t14zest=CC_q13r;
tr10zest=25; end;
    if t14zest=. and CC_q13r>=29 then do; t14zest=CC_q13r/nveh;
tr10zest=25;end;
run;

/* Estimation des derniers t14zest manquants (144) par une méthode
d'experts */
DATA traj_rout25bis4; set traj_rout25bis3;
if t14zest=. and CC_q13r<10 then do;
t14zest=1.5*CC_q13r*(0.0005*DIST_mix_km_rap_estim+1.0856);
control_t14_exp=1;end;
run;

/*title "Poids du chargement selon le poids de l'envoi (hors messagerie
'type_data')";
axis1 logbase=10 logstyle=expand;
axis2 logbase=10 logstyle=expand;
proc gplot data=traj_rout25bis4;
plot t14zest*CC_q13r ;
run;quit;*/

/* correction des t14zest*nveh < CC_q13r*/
DATA traj_rout25bis5; set traj_rout25bis4;
    if index="2214642132" then do; nveh=2; t14zest=CC_q13r/2;end; /*
autoriser une surcharge de 800 kg*/
run;

```

```

/* Completer les tr10zest pour les envois de plus de 15 tonnes*/
DATA traj_rout25bis6; set traj_rout25bis5;
if CC_q13r>=15 and nveh=1 and tr10zest=. then tr10zest=25;
run;

/* correction d'erreurs sur le nombre de vehicules et le poids du
chargement et ajout du tr10zest */
DATA traj_rout25bis6; set traj_rout25bis6;
if CC_q13r>15 and CC_q13r<30 and tr10zest=. then do;
t14zest=CC_q13r; nveh=1; tr10zest=25; end;
if CC_q13r>=30 and tr10zest=. and nveh=2 then tr10zest=25;
run;
/*
PROC FREQ data=traj_rout25bis6;
table tr10zest;
run;*/ /* 775 manquants*/

/* PROC PRINT data=traj_rout25bis6 noobs;
var index CC_q13r nveh t14zest tr10zest t14 tr10 tr8 gd ;
where CC_q13r>=30 and tr10zest=.;
run;*/

DATA traj_rout26; set traj_rout25bis6 ;
control_t10_10=.;
if tr10zest=. and t14zest>=20 then do;
tr10zest=25; control_t10_10=1; end;
if tr10zest=. and t14zest<20 then do; tr10zest= 0.9167*t14zest +
2.0833; control_t10_10=1; end;
run;

PROC FREQ data=traj_rout26;
table tr10zest;
run; /* 0 manquants tr10zest*/

/*PROC PRINT data=traj_rout26 noobs;
var index CC_q13r nveh t14zest tr10zest t14 gd ;
where control_t10_10=1 ;
run;*/

/*title "Charge utile selon le poids de l'envoi (hors messagerie
'type_data')";
axis1 logbase=10 logstyle=expand;
axis2 logbase=10 logstyle=expand;
proc gplot data=traj_rout26;
plot tr10zest*CC_q13r /HAXIS=axis1 VAXIS=axis2 ;
run;quit;
*/

/* Vérification du nombre de véhicules et correction*/
DATA traj_rout27; set traj_rout26;
if nveh>1 and CC_q13r<29 and CC_q13r<=tr10zest*1.2 then nveh=1;
if index="2148877512" then do; t14zest=10; tr10zest=13; nveh=2; end;
run;

```

```

/***** Correction du chargement quand il est inférieur au poids
de l'envoi* nb véh *****/
DATA traj_rout28; set traj_rout27;
    if t14zest*nveh<CC_q13r and nveh=1 then t14zest=CC_q13r;
    if t14zest*nveh<CC_q13r and nveh=2 then do; t14zest=CC_q13r/nveh;
tr10zest=25;end;
run;

/***** Correction quand tr10zest*nveh*1.2<t14zest*****/
DATA traj_rout29; set traj_rout28;
    if tr10zest*1.2<t14zest and t14zest>=20 then do; tr10zest=25;
control_t10_l1=1; end;
    if tr10zest*1.2<t14zest and t14zest<20 then do; tr10zest=
0.9167*t14zest + 2.0833; control_t10_l1=1;end;
run;
/*PROC PRINT data=traj_rout27;
    var index CC_q13r nveh t14zest tr10zest t14 tr10 tr8;
    where t14zest*nveh<CC_q13r;
run;*/

/*****
*****/
/***** Type_data
MESSEAGERIE*****/
data trajet; set t.trajet_CC_8fev2012; run;

data traj_messag; set trajet;
    where CC_T7globnew in (1,2);
run;

DATA traj_messag; set traj_messag;
    if type_data NE "messagerie" then delete;
    /*keep index cleq cleqit CoefNat_PONDENVmil CC_q13r mess1 mess4;*/

run; /* 4315 obs*/

proc sort data=traj_messag nodupkey;
    by index;
run;

DATA traj_messag2; set traj_messag;
if mess4 NE . then t14zest=mess1*mess4; else t14zest=mess4;
run;

DATA traj_messag2; set traj_messag2;
    tr10zest=mess1;
run;

PROC FREQ data=traj_messag2;
    table tr10zest;
run;

/* Correction lorsque le poids de l'envoi est supérieur au poids du
chargement donné par l'intégrateur*/

```

```

DATA traj_messag3; set traj_messag2;
    if CC_q13r>t14zest then do; t14zest=CC_q13r; control_t10_12=1; end;
run;
/* Correction lorsque le poids du chargement est supérieur à la charge
utile
    ---> pas de surcharge autorisée pour messagerie*/
DATA traj_messag4; set traj_messag3;
    if t14zest>tr10zest and t14zest>=20 then do; tr10zest=25;
control_t10_13=1; end;
    if t14zest>tr10zest and t14zest<20 then do; tr10zest=0.9167*t14zest +
2.0833; control_t10_13=1; end;
run;

/*
PROC PRINT data=traj_messag4;
    var index CC_q13r t14zest tr10zest MESSA_NOMila;
    where control_t10_13=1;;
run;*/

PROC FREQ data=traj_messag4;
    table CC_q13r;
    where tr10zest=30;
run;

/* mettre charge utile à 25 t pour les véhicules où la charge utile était à
30 t (sernam)*/
DATA traj_messag5; set traj_messag4;
    if tr10zest=30 then tr10zest=25;
    /* créer variable nombre de veh=1 pour messagerie*/
    nveh=1;
run;

/*****
/*****
/* CONCATENER les 2 tables */
DATA traj_rout_tout; set traj_rout29 traj_messag5;
run;

/*****MISE EN COHERENCE DES TRAJETS AVANT ET APRES
TUNNEL SOUS LA MANCHE*****/

/* repérer les trajets avant et après le tunnel sous la Manche*/
DATA trajet_complet; set t.trajet_CC_8fev2012;
    keep index cleq ntchrono CC_T7globnew;
run;
PROC SORT data=trajet_complet;
    by index;
run;

DATA trajet_complet;set trajet_complet;
    Mode_lag_avant=lag(CC_T7globnew);
run;

DATA trajet_ap_tunnel; set trajet_complet;
    if Mode_lag_avant NE 6 then delete;
run;

```



```

/*PROC PRINT data=trajet_complet noobs;
    var index;
where CC_T7globnew=6;
run;*/

/*ODS HTML BODY="C:\Users\Cruz\Desktop\tunnel_avant2.xls";
PROC PRINT data=traj_rout_tout;
    var index cleq ntchrono t14zest tr10zest nveh;
    where index in ("2006233731" "2011744911" "2011744921" "2011744931"
"2015143731" "2030317733"
"2036071121" "2038479111" "2039858922" "2045860531" "2063062923"
"2063271911" "2063271921" "2067640511"
"2068777911" "2071971511" "2077759531" "2082823923" "2114115511"
"2114115521" "2114115531" "2127403514"
"2136959933" "2149449522" "2149449532" "2175840513" "2177079134"
"2182633134" "2190743331" "2194598331"
"2203680511" "2206821932" "2219078521" "2236369934" "2274997322"
"2276178933" "2281998921" "2281998932"
"3043524713" "3056879131" "3117579324" "3117579334" "3161824323"
"3194398732" "3233461513" "3239639331"
"3265431521" "3276901511");
run;
ODS HTML CLOSE;*/

data traj_rout_tout2; set traj_rout_tout;
if index="2006233733 " then do; t14zest=8.0854; tr10zest=9.4951; nveh=1;
end;
if index="2011744913 " then do; t14zest=1.4400; tr10zest=3.4033; nveh=1;
end;
if index="2011744923 " then do; t14zest=1.1700; tr10zest=3.1558; nveh=1;
end;
if index="2011744933 " then do; t14zest=1.7370; tr10zest=3.6756; nveh=1;
end;
if index="2015143733 " then do; t14zest=24.0000; tr10zest=26.0000; nveh=1;
end;
if index="2030317735 " then do; t14zest=7.0000; tr10zest=25.0000; nveh=1;
end;
if index="2036071123 " then do; t14zest=1.0000; tr10zest=1.6667; nveh=1;
end;
if index="2038479113 " then do; t14zest=7.0000; tr10zest=28.0000; nveh=1;
end;
if index="2039858924 " then do; t14zest=25.0000; tr10zest=25.0000; nveh=1;
end;
if index="2045860533 " then do; t14zest=8.8428; tr10zest=10.1895; nveh=1;
end;
if index="2063062925 " then do; t14zest=4.4000; tr10zest=20.0000; nveh=1;
end;
if index="2063271913 " then do; t14zest=8.0000; tr10zest=9.4169; nveh=1;
end;
if index="2063271923 " then do; t14zest=8.0000; tr10zest=9.4169; nveh=1;
end;
if index="2067640513 " then do; t14zest=20.0000; tr10zest=25.0000; nveh=1;
end;
if index="2068777913 " then do; t14zest=1.0000; tr10zest=1.6667; nveh=1;
end;
if index="2071971513 " then do; t14zest=6.5918; tr10zest=25.0000; nveh=1;
end;

```

```
if index="2077759533 " then do; t14zest=1.0000; tr10zest=1.6667; nveh=1;
end;
if index="2082823925 " then do; t14zest=1.2000; tr10zest=3.1833; nveh=1;
end;
if index="2114115513 " then do; t14zest=1.0000; tr10zest=1.6667; nveh=1;
end;
if index="2114115523 " then do; t14zest=9.0000; tr10zest=26.0000; nveh=1;
end;
if index="2114115533 " then do; t14zest=9.0000; tr10zest=26.0000; nveh=1;
end;
if index="2127403516 " then do; t14zest=16.0000; tr10zest=20.0000; nveh=1;
end;
if index="2136959935 " then do; t14zest=7.0000; tr10zest=25.0000; nveh=1;
end;
if index="2149449524 " then do; t14zest=20.0000; tr10zest=24.0000; nveh=1;
end;
if index="2149449534 " then do; t14zest=16.0000; tr10zest=20.0000; nveh=1;
end;
if index="2175840515 " then do; t14zest=24.0000; tr10zest=26.0000; nveh=1;
end;
if index="2177079136 " then do; t14zest=7.0000; tr10zest=25.0000; nveh=1;
end;
if index="2182633136 " then do; t14zest=3.4280; tr10zest=14.0000; nveh=1;
end;
if index="2190743333 " then do; t14zest=21.0000; tr10zest=21.0000; nveh=1;
end;
if index="2194598333 " then do; t14zest=24.0000; tr10zest=24.0000; nveh=1;
end;
if index="2203680513 " then do; t14zest=25.0000; tr10zest=26.0000; nveh=1;
end;
if index="2206821934 " then do; t14zest=12.0000; tr10zest=13.0837; nveh=1;
end;
if index="2219078523 " then do; t14zest=13.0000; tr10zest=24.0000; nveh=1;
end;
if index="2236369936 " then do; t14zest=0.4300; tr10zest=1.0000; nveh=1;
end;
if index="2274997324 " then do; t14zest=20.0000; tr10zest=26.0000; nveh=1;
end;
if index="2276178935 " then do; t14zest=8.4000; tr10zest=20.0000; nveh=1;
end;
if index="2281998923 " then do; t14zest=0.4000; tr10zest=0.8000; nveh=1;
end;
if index="2281998934 " then do; t14zest=16.0000; tr10zest=20.0000; nveh=1;
end;
if index="3043524715 " then do; t14zest=16.0000; tr10zest=20.0000; nveh=1;
end;
if index="3056879133 " then do; t14zest=9.2100; tr10zest=10.5261; nveh=1;
end;
if index="3117579326 " then do; t14zest=25.9000; tr10zest=25.0000; nveh=1;
end;
if index="3117579336 " then do; t14zest=25.9000; tr10zest=25.0000; nveh=1;
end;
if index="3161824325 " then do; t14zest=21.8201; tr10zest=25.0000; nveh=1;
end;
if index="3194398734 " then do; t14zest=10.0000; tr10zest=24.0000; nveh=1;
end;
if index="3233461515 " then do; t14zest=4.4000; tr10zest=20.0000; nveh=1;
end;
```

```

if index="3239639333 " then do; t14zest=2.3000; tr10zest=20.0000; nveh=1;
end;
if index="3265431523 " then do; t14zest=25.0000; tr10zest=25.0000; nveh=1;
end;
if index="3276901513 " then do; t14zest=7.0000; tr10zest=25.0000; nveh=1;
end;
run;

/***** CORRECTIONS SUR POIDS ENVOI *****/
/* Correction 2 envois
   1 envoi qui ne fait pas 40 t mais 40 kg (clous)
   1 envoi qui ne fait pas 320 t mais 0.720 t (smart) */

DATA traj_rout_tout3; set traj_rout_tout2;
   if cleq="205531433" then do; CC_q13r=0.040; t14zest=t14;
nveh=1;tr10zest=tr10; end;
   if cleq="215404313" then do; CC_q13r=0.720; t14zest=t14;
nveh=1;tr10zest=tr10; end;
   if index="2055314332" then tr10zest=10;
   if index="2055314333" then tr10zest=10;
run;

DATA traj_rout_tout4; set traj_rout_tout3;
   if CC_q13r>10 and t14zest=CC_q13r and tr16="1" then do; Tr16=.;
Tr17b_rempli_Fr=.; Tr17b_rempli_Etr=.; end;
run;

DATA traj_rout_tout4; set traj_rout_tout4;
   q13r2=CC_q13r/nveh;
run;

DATA traj_rout_tout4; set traj_rout_tout4;
   DIST_mix_km_rap_estim=DIST_mix_km_rap_estim_Fr+DIST_mix_km_rap_estim_
Etr;
run;

/** Estimation poids à vide **/
/* fichier excel importé --> r.nestor */
/*data r.nestor; set r.nestor;cu=Charge_Utile_;pav=Poids___vide;run;
data r.nestor; set r.nestor;lcu=log(cu);lpav=log(pav);run;
proc reg data=r.nestor;model lpav=lcu / noint;run;quit;*/
data traj_rout_tout5; set traj_rout_tout4;
/*estimation poids a vide*/
if t14zest>0 and tr10zest>1 then do;
   if exp(0.5175*log(tr10zest)+1.0649)< 16 then do;
p_vd_est=exp(0.5175*log(tr10zest)+1.0649);end; else p_vd_est=16; end;
if tr10zest<=1 and tr10zest > 0 and t14zest > 0 then p_vd_est=1.2;
run;

proc freq data=traj_rout_tout5; table p_vd_est; run; /* 0 */

```

```

/*proc gplot data=traj_rout_tout5;
    plot tr10zest* p_vd_est;
run;quit;*/

/*****/
data traj_rout_tout6; set traj_rout_tout5;
/*estimation poids total**/*ok*/
P_ttl_est = p_vd_est + t14zest;
/*estimation PTAC**/*ok*/
ptac_est = 2.5*p_vd_est;
/*Tonnes km*/
tkm_Fr=DIST_mix_km_rap_estim_Fr*CC_q13r;
tkm_Etr=DIST_mix_km_rap_estim_Etr*CC_q13r;
run;

proc freq data=traj_rout_tout6; table P_ttl_est ptac_est; run; /* 0*/

DATA traj_rout_tout6; set traj_rout_tout6;
    drop tr16;
run;

DATA tournee; set t.Trajet_cc_5dec2011;
    keep index tr16;
    if CC_T7globnew not in (1 2) then delete;
run;

PROC SORT data=tournee;
    by index;
run;

PROC SORT data=traj_rout_tout6;
    by index;
run;

DATA traj_rout_tout7;
    merge traj_rout_tout6 tournee;
    by index;
run;

/* Impossible de faire une tournée avec 3 véhicules*/
DATA traj_rout_tout7; set traj_rout_tout7;
    Tr16_modif=Tr16;
    if index="2074704311" then do; Tr16_modif=.; Tr17b_rempli_Fr=.;end;
    if index in ("2013572321" "2060092931" "2069749111" "2076940321"
"2082452911" "2118013331"
"2119958521" "2125043111" "2197178511"
"2241643331" "2270615111" "2284759931"
"3200853711") then do; Tr16_modif=.;
Tr17b_rempli_Fr=.;end;
run;

DATA traj_rout_tout8; set traj_rout_tout7;
conso_tr_vd_Fr=0;
conso_tr_vd_Etr=0;

/* Tournée moins de 50 km */

```

```

if tr16_modif='1' and
(DIST_mix_km_rap_estim_Fr+DIST_mix_km_rap_estim_Etr)<=50 then do; /*(1)
distance de la tournée*/
/*estimation conso 1/100km sur tournée (on ne prend pas en compte partie
urbaine
et hors urbaine)*/
conso_est_chrg = 3.5 * ((p_vd_est+(t14zest/2))+4)**0.65;
/*estimation conso tournée */
conso_tr_chrg_Fr = conso_est_chrg * (tr17b_rempli_FR /* distance de la
tournée*/ /100);
conso_tr_chrg_Etr= conso_est_chrg * (tr17b_rempli_Etr/* distance de la
tournée*//100);end;

/*Tournée plus de 50 km : ne pas appliquer un doublement de la distance
mais les coefficients de
retour à vide des enquêtes TRM*/
if tr16_modif='1' and
(DIST_mix_km_rap_estim_Fr+DIST_mix_km_rap_estim_Etr)>50 and CC_T7globnew=1
then do;
if DIST_mix_km_rap_estim_fr > 0 and ptac_est<=3.5 then
dist_vide_FR=0.43*DIST_mix_km_rap_estim_FR;
if DIST_mix_km_rap_estim_fr > 0 and ptac_est<=6.6 and ptac_est>3.5 then
dist_vide_FR=0.41*DIST_mix_km_rap_estim_FR;
if DIST_mix_km_rap_estim_fr > 0 and ptac_est>6.6 then
dist_vide_Fr=0.56*DIST_mix_km_rap_estim_FR;
if DIST_mix_km_rap_estim_Etr and ptac_est<=3.5 then
dist_vide_Etr=0.43*DIST_mix_km_rap_estim_Etr;
if DIST_mix_km_rap_estim_Etr and ptac_est<=6.6 and ptac_est>3.5 then
dist_vide_Etr=0.41*DIST_mix_km_rap_estim_Etr;
if DIST_mix_km_rap_estim_Etr > 0 and ptac_est>6.6 then
dist_vide_Etr=0.56*DIST_mix_km_rap_estim_Etr;end;

if tr16_modif='1' and
(DIST_mix_km_rap_estim_Fr+DIST_mix_km_rap_estim_Etr)>50 and CC_T7globnew=2
then do;
if DIST_mix_km_rap_estim_fr > 0 and ptac_est<=3.5 then
dist_vide_Fr=0.2*DIST_mix_km_rap_estim_FR;
if DIST_mix_km_rap_estim_fr > 0 and ptac_est<=6.6 and ptac_est>3.5 then
dist_vide_Fr=0.2*DIST_mix_km_rap_estim_FR;
if DIST_mix_km_rap_estim_fr > 0 and ptac_est>6.6 then
dist_vide_Fr=0.28*DIST_mix_km_rap_estim_FR;
if DIST_mix_km_rap_estim_Etr > 0 and ptac_est<=3.5 then
dist_vide_Etr=0.2*DIST_mix_km_rap_estim_Etr;
if DIST_mix_km_rap_estim_Etr > 0 and ptac_est<=6.6 and ptac_est>3.5 then
dist_vide_Etr=0.2*DIST_mix_km_rap_estim_Etr;
if DIST_mix_km_rap_estim_Etr > 0 and ptac_est>6.6 then
dist_vide_Etr=0.28*DIST_mix_km_rap_estim_Etr; end;

if tr16_modif='1' and
(DIST_mix_km_rap_estim_Fr+DIST_mix_km_rap_estim_Etr)>50 then do;
/*estimation conso 1/100km en charge*/
conso_est_chrg = 3.5 * (P_ttl_est+4) ** 0.65;
/*estimation conso trajet en charge (pas de surconsommation en zone
urbaine)*/
conso_tr_chrg_Fr = conso_est_chrg * DIST_mix_km_rap_estim_Fr/100;
conso_tr_chrg_Etr = conso_est_chrg * DIST_mix_km_rap_estim_Etr/100;
/*estimation conso 1/100 trajet à vide*/
conso_est_vd= 3.5 * (p_vd_est+4) ** 0.65;

```

```

/*estimation conso trajet à vide*/
conso_tr_vd_Fr = conso_est_vd *dist_vide_Fr/100;
conso_tr_vd_Etr = conso_est_vd *dist_vide_Etr/100;end;

/* CP */
if trl6_modif NE '1' then do;
    if CC_T7globnew= 1 then do;
        if DIST_mix_km_rap_estim_fr > 0 and ptac_est<=3.5 then
            dist_vide_FR=0.43*DIST_mix_km_rap_estim_FR;
        if DIST_mix_km_rap_estim_fr > 0 and ptac_est<=6.6 and ptac_est>=3.5 then
            dist_vide_FR=0.41*DIST_mix_km_rap_estim_FR;
        if DIST_mix_km_rap_estim_fr > 0 and ptac_est>6.6 then
            dist_vide_FR=0.56*DIST_mix_km_rap_estim_FR;
        if DIST_mix_km_rap_estim_Etr and ptac_est<=3.5 then
            dist_vide_Etr=0.43*DIST_mix_km_rap_estim_Etr;
        if DIST_mix_km_rap_estim_Etr and ptac_est<=6.6 and ptac_est>=3.5 then
            dist_vide_Etr=0.41*DIST_mix_km_rap_estim_Etr;
        if DIST_mix_km_rap_estim_Etr > 0 and ptac_est>6.6 then
            dist_vide_Etr=0.56*DIST_mix_km_rap_estim_Etr;end; end;

/* CA*/
    if trl6_modif NE '1' then do;
        if CC_T7globnew= 2 then do;
            if DIST_mix_km_rap_estim_fr >= 0 and ptac_est<=3.5 then
                dist_vide_Fr=0.2*DIST_mix_km_rap_estim_Fr;
            if DIST_mix_km_rap_estim_fr >= 0 and ptac_est<=6.6 and ptac_est>=3.5 then
                dist_vide_Fr=0.2*DIST_mix_km_rap_estim_Fr;
            if DIST_mix_km_rap_estim_fr >= 0 and ptac_est>6.6 then
                dist_vide_Fr=0.28*DIST_mix_km_rap_estim_Fr;
            if DIST_mix_km_rap_estim_Etr >= 0 and ptac_est<=3.5 then
                dist_vide_Etr=0.2*DIST_mix_km_rap_estim_Etr;
            if DIST_mix_km_rap_estim_Etr >= 0 and ptac_est<=6.6 and ptac_est>=3.5 then
                dist_vide_Etr=0.2*DIST_mix_km_rap_estim_Etr;
            if DIST_mix_km_rap_estim_Etr >= 0 and ptac_est>6.6 then
                dist_vide_Etr=0.28*DIST_mix_km_rap_estim_Etr; end; end;

if trl6_modif NE '1' then do; /*(1)*/
/*estimation conso l/100km en charge*/
conso_est_chrg = 3.5* (P_ttl_est+4) ** 0.65;
/*estimation conso trajet en charge (pas de surconsommation en zone
urbaine) pour 1 veh*/
conso_tr_chrg_Fr = conso_est_chrg * DIST_mix_km_rap_estim_Fr/100;
conso_tr_chrg_Etr = conso_est_chrg * DIST_mix_km_rap_estim_Etr/100;
/*estimation conso l/100 trajet à vide*/
conso_est_vd= 3.5 * (p_vd_est+4) ** 0.65;
/*estimation conso trajet à videpour 1 veh*/
conso_tr_vd_Fr = conso_est_vd *dist_vide_Fr/100;
conso_tr_vd_Etr = conso_est_vd *dist_vide_Etr/100;end;
run;

DATA traj_rout_tout9; set traj_rout_tout8;
/*estimation conso d'un vehicule sur <= trajet*/
conso_tr_tot1_FR = conso_tr_chrg_Fr +conso_tr_vd_Fr;
conso_tr_tot1_Etr = conso_tr_chrg_Etr + conso_tr_vd_Etr ;
/*conso_tr_tot2_FR = (conso_tr_chrg_Fr+conso_tr_vd_Fr) *nveh;
conso_tr_tot2_Etr = (conso_tr_chrg_Etr+conso_tr_vd_Etr) *nveh;*/

```

```

/*conso de l'envois sur <= trajet (retour a vide compris)*/
conso_l_envoitrajet_Fr=conso_tr_tot1_FR*(q13r2/t14zest)*nveh;
conso_l_envoitrajet_Etr=conso_tr_tot1_Etr*(q13r2/t14zest)*nveh;
/*conso en litres par tkm*/
conso_l_tkm_FR=(conso_l_envoitrajet_Fr/tkm_FR) ;
conso_l_tkm_Etr=(conso_l_envoitrajet_Etr/tkm_Etr) ; run;

/*PROC FREQ data=traj_rout_tout8;
    tables conso_tr_tot2_FR;
run;*/

DATA traj_rout_tout10; set traj_rout_tout9;
/*conso tot en gep par envois sur <= trajet*/
conso_gep_envoitrajet_Fr=conso_l_envoitrajet_Fr*830;
conso_gep_envoitrajet_Etr=conso_l_envoitrajet_Etr*830;

/*conso tot en gep par tkm*/
conso_gep_tkm_FR=conso_l_tkm_FR*830;
conso_gep_tkm_Etr=conso_l_tkm_Etr*830; run;

/*****
*****/
/* 8 mars 2012 : somme de conso_gep_envoitrajet_FR (redressé) 10801492501
--> OK pour calage avec CTN*/

/* CONSO OK!!!! */

/*
DATA t.traj_routier_8mars2012; set traj_rout_tout10; run; */

DATA traj_rout_tout10bis; set traj_rout_tout10;
    Q13r_modif=CC_q13r;
run;

DATA routier_ajout; set traj_rout_tout10bis;
    keep index Q13r_modif t14zest tr10zest
    conso_est_chrg conso_tr_chrg_Fr conso_tr_chrg_Etr conso_est_vd
    conso_tr_vd_Fr conso_tr_vd_Etr
    conso_tr_tot1_Fr conso_tr_tot1_Etr
    tkm_Fr tkm_Etr
    conso_l_envoitrajet_Fr conso_l_envoitrajet_Etr
    conso_l_tkm_FR conso_l_tkm_Etr conso_gep_envoitrajet_FR
conso_gep_envoitrajet_Etr
    conso_gep_tkm_FR conso_gep_tkm_Etr
    tkm_Fr tkm_Etr
    P_ttl_est p_vd_est nveh place_trajet
tr16_modif;
run;

DATA routier_ajout2; set routier_ajout;
rename nveh=ROUTE_nveh conso_est_chrg=ROUTE_conso_est_chrg
conso_tr_chrg_Fr=ROUTE_conso_tr_chrg_Fr
            conso_tr_chrg_Etr=ROUTE_conso_tr_chrg_Etr
conso_est_vd=ROUTE_conso_est_vd

```

```

conso_tr_vd_Fr=ROUTE_conso_tr_vd_Fr
conso_tr_vd_Etr=ROUTE_conso_tr_vd_Etr
conso_tr_totl_Fr=ROUTE_conso_tr_totl_Fr
conso_tr_totl_Etr=ROUTE_conso_tr_totl_Etr
conso_l_envoitrajet_Fr=ROUTE_conso_l_envoitrajet_Fr
conso_l_envoitrajet_Etr=ROUTE_conso_l_envoitrajet_Etr
tkm_Fr=ROUTE_tkm_Fr tkm_Etr=ROUTE_tkm_Etr
conso_l_tkm_Fr=ROUTE_conso_l_tkm_Fr
conso_l_tkm_Etr=ROUTE_conso_l_tkm_Etr
conso_gep_envoitrajet_Fr=ROUTE_conso_gep_envoitrajet_Fr
conso_gep_envoitrajet_Etr=ROUTE_conso_gep_envoitrajet_Etr
conso_gep_tkm_Fr=ROUTE_conso_gep_tkm_Fr
conso_gep_tkm_Etr=ROUTE_conso_gep_tkm_Etr
place_trajet=ROUTE_place_trajet;

```

```
run;
```

```
/*DATA t.routier_conso_ok_14mars2012; set routier_ajout2; run;*/
```

```

/* Ajout des distances pour les DOM-TOM sur les distances FR*/
/*DATA traj_rout_tout5; set traj_rout_tout5;
  if index="2027251534" then do; DIST_mix_km_rap_estim_Fr=5;
DIST_mix_km_rap_estim_Etr=0; end;
  if index="2083552126" then do; DIST_mix_km_rap_estim_Fr=9.5;
DIST_mix_km_rap_estim_Etr=0; end;
  if index="2096369934" then do; DIST_mix_km_rap_estim_Fr=35;
DIST_mix_km_rap_estim_Etr=0; end;
  if index="2130345315" then do; DIST_mix_km_rap_estim_Fr=14;
DIST_mix_km_rap_estim_Etr=0; end;
  if index="2157440516" then do; DIST_mix_km_rap_estim_Fr=7;
DIST_mix_km_rap_estim_Etr=0; end;
  if index="2163704534" then do; DIST_mix_km_rap_estim_Fr=5;
DIST_mix_km_rap_estim_Etr=0; end;
  if index="2243832335" then do; DIST_mix_km_rap_estim_Fr=9.5;
DIST_mix_km_rap_estim_Etr=0; end;
  if index="2246060335" then do; DIST_mix_km_rap_estim_Fr=8.5;
DIST_mix_km_rap_estim_Etr=0; end;
  if index="3027404114" then do; DIST_mix_km_rap_estim_Fr=5;
DIST_mix_km_rap_estim_Etr=0; end;
  if index="3055314324" then do; DIST_mix_km_rap_estim_Fr=29;
DIST_mix_km_rap_estim_Etr=0; end;
  if index="3081073124" then do; DIST_mix_km_rap_estim_Fr=7.5;
DIST_mix_km_rap_estim_Etr=0; end;
  if index="3081073135" then do; DIST_mix_km_rap_estim_Fr=5;
DIST_mix_km_rap_estim_Etr=0; end;
  if index="3083461725" then do; DIST_mix_km_rap_estim_Fr=15;
DIST_mix_km_rap_estim_Etr=0; end;
  if index="3221091925" then do; DIST_mix_km_rap_estim_Fr=10.3;
DIST_mix_km_rap_estim_Etr=0; end;
run;*/

```


6. Calcul de la consommation d'énergie du mode maritime

Nom du fichier : conso_maritime_janv2012.sas

```
/* --> PROG CONSO MARITIME*/

DATA trajet; set t.trajet_CC14dec2011;
run;

DATA maritime; set trajet;
    if CC_T7globnew not in (42, 44, 43, 46, 47, 45, 41,70) then delete;
run;

DATA maritime2; set maritime;
    rename TM8corr=TM8corr_ancien
           TM8_corr=TM8_corr_ancien;
run;

/*PROC FREQ data=maritime;
    tables T2_Nom_pays*T5_Nom_pays/nopercent norow nocol;
run;*/

/* récupération de la variable Tm8corr*/
DATA trajet28dec06_mar; set bases.trajet28dec06;
    keep indx tm8 TM8corr TM8_corr;
    /*if Tm8=TM8corr then delete; */
    if mode_t6 NE "Maritime" then delete;
run;

DATA trajet28dec06_mar; set trajet28dec06_mar;
    index=put(indx,$10.);
    drop indx;
run;
PROC SORT data=trajet28dec06_mar;
    by index;
run;

PROC SORT data=maritime2;
    by index;
run;
DATA maritime3;
    merge maritime2 trajet28dec06_mar;
    by index;
run;
/* enlever des index erronés*/
DATA maritime3; set maritime3;
    if CC_q13r=. then delete;
run;

/* PROC FREQ data=maritime3;
```

```

        table TM8corr_ancien*TM8corr/ nopercnt norow nocol;
run;
pas de contradiction entre la variable dans la table du 28 dec. et celle de
la table actuelle :
        donc suppression de la variable table actuelle car moins complète*/
DATA maritime3; set maritime3;
        drop TM8corr_ancien TM8_corr_ancien;
run;

/* Il y a 14 valeurs manquantes --> correction à partir du CC_T7_globnew*/
PROC PRINT data=maritime3 noobs;
        var index CC_T7_globnew;
        where TM8_corr="";
run;

DATA maritime3; set maritime3;
        if index="2037432113" then do; Tm8CORR=4; Tm8_corr="contenaires";end;
        if index="2039849512" then do; Tm8CORR=4; Tm8_corr="contenaires";end;
        if index="2039849513" then do; Tm8CORR=4; Tm8_corr="contenaires";end;
        if index="2097487932" then do; Tm8CORR=4; Tm8_corr="contenaires";end;
        if index="2097487933" then do; Tm8CORR=4; Tm8_corr="contenaires";end;
        if index="2225189912" then do; Tm8CORR=4; Tm8_corr="contenaires";end;
        if index="2225189922" then do; Tm8CORR=4; Tm8_corr="contenaires";end;
        if index="2263931722" then do; Tm8CORR=4; Tm8_corr="contenaires";end;
        if index="2057051322" then do; Tm8CORR=7; Tm8_corr="ferry";end;
        if index="2080491722" then do; Tm8CORR=7; Tm8_corr="ferry";end;
        if index="2190743334" then do; Tm8CORR=7; Tm8_corr="ferry";end;
        if index="2072581133" then do; Tm8CORR=5; Tm8_corr="routiers
lolo";end;
        if index="2260890113" then do; Tm8CORR=5; Tm8_corr="routiers
lolo";end;
        if index="2225413523" then do; Tm8CORR=6; Tm8_corr="autres";end;
run; /* Ok plus de valeurs manquantes sur Tm8CORR*/
/* manque des poids d'envois

/*PROC FREQ data=maritime3;
tables Tm8_corr * Tm8corr/nopercnt nocol norow;
run;*/

/*****
*/
/***** CONTENEUR*****/
/*****/
/* travail preliminaire: creation variable Origine Destination pour les
portes conteneurs */

data conteneurs; set maritime3; if tm8corr=4; run;

data o; set conteneurs; keep t2_Nom_pays; run;
data d; set conteneurs; keep t5_Nom_pays;run;
data d; set d; rename t5_Nom_pays=t2_Nom_pays;run;
data od; set o d; run;
proc sort data=od nodupkey; by t2_Nom_pays;run;

```

```

/* traitement à la main de la table sous excel (definition des zones)
   resultats sas sous table zone_dest (donnée par Mariame le 29 nov 2011 */
DATA zone_dest; set Echo_co2.zone_dest;run;

proc sql;
create table o as
select * from zone_dest where pays in (select t2_Nom_pays from conteneurs);
create table d as
select * from zone_dest where pays in (select t5_Nom_pays from conteneurs);
quit;

data o; set o; rename pays=t2_Nom_pays; rename zone_pays=zone_dep; run;
proc sort data=o; by t2_Nom_pays; run;

data conteneurs; set conteneurs; format t2_Nom_pays $19.;run;
proc sort data=conteneurs; by t2_Nom_pays; run;

data conteneurs; merge conteneurs o; by t2_Nom_pays; run;
data d; set d; rename pays=t5_Nom_pays; rename zone_pays=zone_arr; run;
proc sort data=d; by t5_Nom_pays; run;
proc sort data=conteneurs; by t5_Nom_pays; run;

data conteneurs; merge conteneurs d; by t5_Nom_pays; run;
data conteneur; set conteneurs; ligne_od=zone_dep||zone_arr; run;

/* -----
-----
----- Travail sur les Porte Conteneurs -----
----- */

/* premiere etape :
   toutes les capacités sont exprimées en evp dans la variable capa_evp */

data conteneur; set conteneur;
ligne_od2=compress(ligne_od);
if tml1c > 10000 then do capa_est=(0.06932)*(tml1c); end;
if tml1d > 700 then do capa_est=tml1d; end;
if tml1c =< 10000 and tml1d =< 700 then do statut="modélisation OD";
end;run;

data cont_capa_od; set conteneur;
if statut^="modélisation OD" then delete;
run;

data b;
set conteneur;
if statut="modélisation OD" then delete;
run;

/*ods rtf body='C:\Users\Cruz\Desktop\capa_est.doc';*/
data model; set b; if ligne_od2="51";proc means;var capa_est;run;
data model; set b; if ligne_od2="52";proc means;var capa_est;run;
data model; set b; if ligne_od2="53";proc means;var capa_est;run;
data model; set b; if ligne_od2="54";proc means;var capa_est;run;
data model; set b; if ligne_od2="55";proc means;var capa_est;run;
/*ods rtf close;*/

```

```

/* On utilise ces capacités moyennes par ligne comme estimation de la
capacité du navire.
Ces capacités sont codées dans la variable capa_evp */

data conteneur; set conteneur;
ligne_od2=compress(ligne_od);
if statut="modélisation OD" then do;
    if ligne_od2="51" then do capa_est2=2838 ;end;
    if ligne_od2="52" then do capa_est2=3167 ;end;
    if ligne_od2="53" then do capa_est2=2216 ;end;
    if ligne_od2="54" then do capa_est2=4412 ;end;
    if ligne_od2="55" then do capa_est2=3078 ;end;
    if ligne_od2 not in ("51","52","53","54","55") then do capa_est2=717
;end;
end;
if statut^="modélisation OD" then do capa_est2=capa_est;end;
run;

/* Correction des capacités inférieures au nombre d'EVP chargés (Tm19d)*/
DATA conteneur; set conteneur;
    if capa_est2<tm19d and tm19d>0 then capa_est2=tm19d;
run;

/* deuxieme etape :
tous les poids de chargements sont exprimés en evp */
/*data conteneur; set conteneur;
    if capa_est2>tm19d and tm19d>0 then do ;
if tm19d gt 0 then do pd_ma=tm19d;end;
if tm19d not gt 0 then do;
    if tm19c gt 0 then pd_ma=0.06932*tm19c;end;
end;
run;

PROC PRINT data=conteneur;
    var capa_est2 tm19d;
    where capa_est2<tm19d and tm19d>0;
run;

data c; set conteneur; if pd_ma gt 0; run;

proc sort data=c; by ligne_od2; run;

proc means data= c; var pd_ma; by ligne_od2; run;*/

/*data conteneur; set conteneur; drop pd_ma2;run;
data conteneur; set conteneur;
if statut^="modélisation OD" then do pd_ma2=capa_est2;end;
if statut="modélisation OD" then do;
    if ligne_od2="52" then do pd_ma2=1606 ;end;
    if ligne_od2="51" then do pd_ma2=1019 ;end;
    if ligne_od2="53" then do pd_ma2=1067 ;end;
    if ligne_od2="54" then do pd_ma2=1495 ;end;
    if ligne_od2="55" then do pd_ma2=984 ;end;
    if ligne_od2 not in ("51","52","53","54","55") then do pd_ma2=984
;end;
end;
run;

```

```

proc sort data=conteneur; by ligne_od2; run;
proc means data= conteneur; var pd_ma2; by ligne_od2; run;*/

/* Codage de la conso une fois la cap_evp codée */

data conteneurs2; set conteneur;
format lili 12.2;
lili=capa_est2;
drop capa_est2;
rename lili=capa_est2;
run;

PROC FREQ data=conteneurs2;
    table capa_est2;
run;

data conteneurs2; set conteneurs2;
capa_est3=capa_est2;
run;
data conteneurs2; set conteneurs2;
format capa_est3 12.2;
run;

data conteneurs2; set conteneurs2;
if Dist_mar_km_OK gt 0 and CC_q13r gt 0 and capa_est3 gt 0 then do;
/* Conso en kg de BFO par EVP et par jour */
mer_cont2 = 81.585*capa_est3**(-0.1258);
mer_cont3 = 0.65;
/*vitesse maximale en miles nautiques/heure*/
mer_cont4 = max(4.1115*capa_est3**0.2105,13);
/* Distance parcourue par jour */
mer_cont5 = mer_cont4*24*1.852;
mer_cont6 = 952; /* gep par kg de BFO */
nbr_cont = ceil(CC_q13r/15);
/* nb de tonnes par EVP */
mer_cont7 = max(CC_q13r/nbr_cont,9);
/* Consommation en gep/EVP.km*/
mer_cont8 = 424.6*capa_est3**(-0.3363);
conso_gep_tkm = (mer_cont8/mer_cont7)/0.65;
conso_gep_envoitrajet = CC_q13r*Dist_mar_km_OK*conso_gep_tkm;end;
run;

/*Title "gep/tkm et capacité en EVP";*/
/*axis1 logbase=10 logstyle=expand;
axis2 logbase=10 logstyle=expand;*/
/*proc gplot data=conteneurs2;
    plot conso_gep_tkm*capa_est3 ;
run;quit;*/

/* les formules sont reprises du fichier excel
mer_cont2 = "conso kg BFO/EVP"
mer_cont3 = "taux d'occupation (% EVP)"
mer_cont4 = "Vitesse (nœuds)"
mer_cont5 = "Km/j"
mer_cont6 = "gep/kg de BFO"

```

```

mer_cont7 = "Tonnes /EVP"
mer_cont8 = "Conso gep/EVP.km"
conso_gep_tkm = "Conso gep/tkm"
nbr_cont = "nbr conteneurs 20'"
conso_gep_envoitrajet = consommation gep envoi trajet" */

proc freq data=conteneurs2; table nbr_cont; run;
proc freq data=conteneurs2; table mer_cont4; run;
proc freq data=conteneurs2; table conso_gep_envoitrajet; run;
/* 1 valeur manquante pour le trajet Anvers-Anvers*/

/***** pour faire le tableau 'nb d'obs et caract des lignes de portes-
conteneurs ds ECHO' *****/
data mcl;
set mc;
format mpdma 5.2;
run;
data mcl;
set mcl;
    if ligne_od2="51" then do mpdma=1019.52;end;
    if ligne_od2="52" then do mpdma=1606.68;end;
    if ligne_od2="53" then do mpdma=968.41;end;
    if ligne_od2="54" then do mpdma=1625.30;end;
    if ligne_od2="55" then do mpdma=984.04;end;
run;

data mcl;
set mcl;
format mcapa 5.2;
run;
data mcl;
set mcl;
    if ligne_od2="51" then do mcapa=1808.14;end;
    if ligne_od2="52" then do mcapa=2536.89;end;
    if ligne_od2="53" then do mcapa=1425.85;end;
    if ligne_od2="54" then do mcapa=3615.97;end;
    if ligne_od2="55" then do mcapa=1717.47;end;
run;

data mcl;
set mcl;
format tx_rempl 5.2;
run;

PROC FREQ data=mcl;
    tables mpdma mcapa;
run;

data mcl;
set mcl;
tx_rempl=mpdma/mcapa;
run;

proc sort data=mcl;by ligne_od2;run;

```

```

proc means data=mc1; var tx_rempl; by ligne_od2; run;

ods rtf body='F:\mAiRa\TaF INRETS\Thèse\table SAS\ods\trymc2.doc';
proc tabulate data=mc1;
title "Nombre d'observations et caractéristiques des 'lignes' de porte-
conteneurs dans ECHO";
/*weight pondenvmil;*/
class ligne ;
var capa_est3 pd_ma tx_rempl;
tables ligne all, n*F=15. ptn capa_est3*(n*F=15. /*ptn --> % frequence*/
/*sum*/mean*F=15.2 std) pd_ma* (/*sum*/ /*ptsum-->% somme*/mean*F=15.2 std)
tx_rempl*(mean*F=3.2) /*tkm_mod*(sum*F=15.2)*/;
/*where gep_envtraj ne .;*/
run;
ods rtf close;

axis1 logbase=10 logstyle=expand;
axis2 logbase=10 logstyle=expand label= (rotate=90 angle=-90 'conso énergie
en gep/tkm') ;
proc gplot data=mc1;
plot conso_gep_tkm*CC_q13r / HAXIS=axis1 VAXIS=axis2;
title "Consommation d'énergie en gep/tkm selon le poids de l'envoi";
run;quit;

data ma.mc1;
set mc1;
run;

/*****
*****/
/***** FIN DES PROG NON REFAITS
TOURNES*****/
/*****
*****/

/* -----
-----
----- Travail sur les NON portes conteneurs -----
-----
----- */

data non_conteneurs; set maritime3 /* table créée pour les porte-
conteneurs plus haut dans le programme*/;
if tm8corr='4' then delete ;
run;

data ext; set non_conteneurs;
keep index cleq CC_T7globnew tm8_corr tm8corr CC_q13r tm19c tm10 tm11c
T2_nom_ville T5_nom_ville CC_T7_globnew;
run;

proc sort data=ext; by tm8_corr; run;

/* on utilise les estimation conso unitaire
source H. O. Holmegaard Kristensen (2000): Energy consumption and exhaust
emissions
Mise à jour par Christophe --> Source : OEET */

```

```

data non_conteneurs2; set non_conteneurs;
    if tm8corr='1' then do;
conso_gep_tkm=1.7;
conso_gep_envoitrajet=CC_q13r*Dist_mar_km_OK*conso_gep_tkm ; end;
    if tm8corr='2' then do;
conso_gep_tkm=2.16;
conso_gep_envoitrajet=CC_q13r*Dist_mar_km_OK*conso_gep_tkm ;end;
    if tm8corr='3' then do;
conso_gep_tkm=3.4;
conso_gep_envoitrajet=CC_q13r*Dist_mar_km_OK*conso_gep_tkm ;end;
    if tm8corr = '5' then do;
conso_gep_tkm=27.1 /* Holmegaard Kristensen :44.63*/;
conso_gep_envoitrajet=CC_q13r*Dist_mar_km_OK*conso_gep_tkm ;end;
    if tm8corr='6' then do;
conso_gep_tkm=3 /* Holmegaard Kristensen :6.00*/ ;
conso_gep_envoitrajet=CC_q13r*Dist_mar_km_OK*conso_gep_tkm ;end;
    if tm8corr='7' then do;
conso_gep_tkm=20.3 /* Holmegaard Kristensen : 44.63*/;
conso_gep_envoitrajet=CC_q13r*Dist_mar_km_OK*conso_gep_tkm ;end;
run;

/*
labels :
conso_gep_tkm      = "conso gep/tkm"
conso_gep_envoitrajet = "consommation envois tkm (équivalent conso gep envoi
trajet dans le cas du conteneurs)"
*/

/*DATA t.non_conteneurs2_janv2012; set non_conteneurs2;run;*/

/* Renommer les différentes variables pour mettre dans la table générale*/
DATA non_conteneurs3; set non_conteneurs2;
    mar_conso_gep_tkm=conso_gep_tkm;
    mar_conso_gep_envoitrajet=conso_gep_envoitrajet;
    keep index mar_conso_gep_tkm mar_conso_gep_envoitrajet Dist_mar_km_OK
CC_q13r tm8corr tm8_corr;
run;

DATA conteneurs3; set conteneurs2;
    mar_conso_gep_tkm=conso_gep_tkm;
    mar_conso_gep_envoitrajet=conso_gep_envoitrajet;
    keep index mar_conso_gep_tkm mar_conso_gep_envoitrajet Dist_mar_km_OK
TM8corr tm8corr tm8_corr CC_q13r;
run;

DATA conso_maritime;
    set conteneurs3 non_conteneurs3;
run;
/*DATA t.conso_maritime_mars2012; set conso_maritime; run;*/

PROC SORT data=conso_maritime;
    by index;
run;

Title "gep/tkm et poids de l'envoi";

```



```

proc gplot data=conso_maritime;
    plot mar_conso_gep_tkm*CC_q13r;
    /*where tm8corr='5';*/
run;quit;

PROC FREQ data=conso_maritime;
    table tm8_corr*tm8corr / nocol norow nopercnt;
    /*where mar_conso_gep_tkm>10;*/
run;

/* ---> mis dans table t.trajet_CC_5dec2011_bis*/
ODS HTML BODY="C:\Users\Cruz\Desktop\dist_maritime_dec2011bis.xls";
PROC PRINT data=conteneurs2;
    var index T2_nom_pays T2_nom_ville T5_nom_pays T5_nom_ville Tm18
Dist_mar_km_OK;
run;
ODS HTML CLOSE;

/***** CONSO TOUT MARITIME *****/
data mcl; set ma.mcl; run;
data mnc; set ma.mnc; run;

proc sort data=mcl; by indx; run;
proc sort data=mnc; by indx; run;
data maritimel; merge mcl mnc; by indx; run;
proc sort data=maritimel nodupkey; by indx; run;

proc freq data=maritimel; table conso_gep_tkm; run;
proc freq data=maritimel; table conso_gep_envoitrajet; run;

data ma.maritime; set maritimel; run;

/*
VARIABLES A RAPATRIER DANS LA TABLE GENERALE :
TM8corr conso_gep_tkm conso_gep_envoitrajet

```

7. Calcul de la consommation d'énergie du mode aérien

Nom du fichier : aerien_dec2011.sas

```

/* --> PROG aerien_dec2011*/

DATA aerien; set t.trajet_CC_5dec2011;
    if CC_T7globnew NE 5 then delete;
run; /* 1243 observations*/

data aerien; set aerien;
keep cleq ne nq ni nt tr19a tr15 t21a t21b index ntchronon t2_Nom_pays
t5_Nom_pays t2_Nom_ville t5_Nom_ville
type_data messagerie distance_aerien CC_t7globnew CC_t7_globnew
Nbre_total_trajets_par_envoi mess9 mess5 Ta14a
CC_q13r;
run;

```

```

proc sort data=aerien; by index; run;

/***** conso *****/

data aerien;set aerien;
format conso_gep_tkm 12.6;
label conso_gep_tkm="consommation en gep par tkm";
conso_gep_tkm=(- 44*log(distance_aerien) + 655);
run;

/*PROC PRINT data=aerien;
    var index T2_nom_ville T5_nom_ville distance_aerien;
    where conso_gep_tkm=.;
run;*/

data aerien; set aerien;
tkm=CC_q13r*distance_aerien;
label tkm="tonnage kilométrique";
run;
/*
PROC PRINT data=aerien;
    var index T2_nom_ville T5_nom_ville distance_aerien CC_q13r;
    where tkm=.;
run;*/ /* 0 */

data aerien; set aerien;
consoenvtraj=conso_gep_tkm*tkm;
label consoenvtraj="consommation par envoi-trajet";
run;
proc freq data=aerien; table consoenvtraj; run; /* 0 */

/* Renommer les différentes variables pour mettre dans la table générale*/
DATA aerien2; set aerien;
    aer_consoenvtraj=consoenvtraj;
    aer_conso_gep_tkm=conso_gep_tkm;
    aer_tkm=tkm;
    keep index aer_consoenvtraj aer_conso_gep_tkm aer_tkm;
run;

PROC SORT data= aerien2;
    by index;
run;

/* ---> mis dans table t.trajet_CC_5dec2011_bis*/

```

8. Calcul de l'énergie et des émissions par envoi

L'énergie et les émissions par envoi ont été calculées comme la somme de l'énergie ou des émissions de chaque trajet de l'envoi.

Extrait du programme :

```

PROC SQL;
  create table Co2_par_envoi
  as select cleq , sum(KgCO2_Kyoto_env_traj) as tot_CO2_envoi_Kyoto ,
            sum(KgCO2_WW_env_traj) as tot_CO2_envoi_WW
            from trajet145
            group by cleq;
quit;

```

Voici un premier aperçu sur les quantités moyennes et médianes d'énergie dépensées en transport par envoi, en Kgep, pour les deux formes d'énergie que nous avons distinguées :

- énergie finale par envoi, sur l'ensemble des trajets de l'envoi (variable energie_envoi_Tot)
- et énergie primaire par envoi, sur l'ensemble des trajets de l'envoi (variable energie_prim_envoi_Tot)

Ces valeurs sont non redressées (calculées sans coefficient de pondération).

Tableau 51 : Energie moyenne et médiane par envoi, en kgep

Variable	Moyenne	Médiane	Ecart-type	Minimum	Maximum
energie_envoi_Tot	204	14.9	1 528	0.0017	74 041
energie_prim_envoi_Tot	314	19.4	2 078	0.0022	93 726

Et voici le résultat, en kgCO₂, aux deux formats utilisés : Kyoto (variable tot_CO2_envoi_Kyoto) et WW (variable tot_CO2_envoi_WW).

Tableau 52 : Emissions moyennes et médianes par envoi, en kgCO₂

Variable	Moyenne	Médiane	Ecart-type	Minimum	Maximum
tot_CO2_envoi_Kyoto	188	30.8	934	0	41 589
tot_CO2_envoi_WW	606	46.3	4712	0.00542	239 786

Les valeurs moyennes sont de respectivement 188 et 606 kg de CO₂ ; les valeurs médianes bien en-dessous (31 et 46). La valeur minimum pour le format Kyoto correspond à un envoi ferroviaire électrique (pas d'émission de CO₂ TW) ; au format WW ce minimum est très faible (5 grammes de CO₂). Les maximums en revanche sont très importants : 42 tonnes au format Kyoto et 240 tonnes au format WW.

Annexe 2 : Emissions de CO₂ par établissement

1. Résultats des 4 premières typologies d'établissements non retenues

Quatre typologies ont été faites dans un premier temps : deux typologie réalisées à partir d'une analyse en composantes principales (ACP), ne prenant en compte que les variables quantitatives) et deux à partir d'une analyse des correspondances multiples (ACM) permettant de traiter également les variables qualitatives. Les typologies sont ensuite réalisées par deux méthodes de classification appliquées aux coordonnées des établissements sur chacun des axes retenus. Nous avons utilisé deux méthodes différentes : classification selon la méthode des nuées dynamiques (Tableau 54) et classification hiérarchique (méthode de Ward, Tableau 55). Les résultats de ces typologies (non retenues) sont indiqués ci-dessous.

ACM+ classif hiérarch.	nombre établissements concernés	émission de co ₂ totale en kg	émission de l'établissement moyen en kg de co ₂
1	412	140 106 309	7 737
2	120	71 820 989	41 763
3	182	352 471 466	179 666
4	106	102 467 785	129 676
5	241	269 334 418	102 871
6	81	29 591 702	13 725
7	142	78 994 533	20 055
8	61	67 786 442	134 087
9	231	77 337 165	8 707
10	158	943 163 681	372 036
11	155	1 339 570 465	1 232 900
12	112	159 315 918	38 583
13	173	693 175 383	515 133
14	74	75 560 504	48 024
15	92	17 180 996	2 449
Total	2340	4 417 877 757	

Tableau 53 : Résultats de la typologie obtenue en ACM + classification hiérarchique

ACM + classif non hiérarch.	nombre concernés	établissements	émission de co2 totale en kg	émission de l'établissement moyen en kg de co2
1	185		679 215 796	503 780
2	258		152 862 126	30 858
3	127		1 172 750 889	1 162 238
4	198		62 592 064	7 199
5	201		309 067 223	84 892
6	139		127 400 379	64 921
7	150		85 852 197	23 016
8	109		38 809 120	7 058
9	152		13 794 740	1 331
10	187		187 435 920	101 632
11	106		356 595 667	317 222
12	109		60 662 075	8 638
13	82		55 159 097	38 554
14	201		185 948 324	50 085
15	136		929 732 140	457 288
total	2340		4 417 877 757	

Tableau 54 : Résultats de la typologie obtenue en ACM + classification non hiérarchique

ACP + classif hiérarch.	nombre concernés	établissements	émission de co2 totale en kg	émission de l'établissement moyen en kg de co2
1	324		350 487 153	24 946
2	504		634 234 269	64 397
3	429		247 257 934	24 763
4	441		360 667 922	24 392
5	101		345 138 426	289 257
6	58		235 690 172	318 618
7	80		55 691 021	24 474
8	66		242 845 537	292 556
9	221		593 095 312	178 786
10	36		124 955 443	296 518
11	14		858 393 531	12 055 773
12	46		358 503 541	725 145
13	5		192 678	2 709
total	2325		4 407 152 940	

Tableau 55 : Typologie obtenue par ACP + classification hiérarchique

ACP + classif non hiérarch.	nombre établissements concernés	émission de co2 totale en kg	émission de l'établissement moyen en kg de co2
1	328	904 267 904	173 458
2	1	103 673 443	21 401 891
3	1	35 151 745	16 048 913
4	811	680 114 653	22 770
5	5	192 678	2 709
6	70	295 877 986	356 788
7	72	267 707 791	236 473
8	915	810 287 685	40 836
9	28	796 463 614	5 716 945
10	1	4 312 084	702 007
11	2	25 912	316
12	70	291 130 140	378 300
13	21	217 947 306	1 776 847
total	2325	4 407 152 940	

Tableau 56 : typologie obtenue par ACP + classification non hiérarchique

2. Macro SAS du bootstrap

```
LIBNAME janv "E:\";

%LET CLASS=2; /*Contrôle du cluster, de 0 (établissements non assignés) à 10*/

%LET NOMVARCLASS=cln10; /*Nom de la variable*/

%LET SAMPLERATE=50; /*Taux d'échantillonnage des établissements dans le cluster*/

%LET NOMVARCO2=KgCO2_WW_env; /*Nom de la variable qui définit la quantité de CO2 émis par envoi*/

%LET NOMVARETAB=restne; /*Identifiant de l'établissement*/

%LET WETAB=re_pondetab; /*Poids de l'établissement*/

%LET WENVOI=re_pond_env; /*Poids de l'envoi, POND_env, RE_POND_ENV*/

%LET NOMBREBOOT=5000; /*Nombre d'échantillonnages*/

%LET SORTIE=RESULTS&CLASS&SAMPLERATE&NOMBREBOOT; /*Nom de la table de sortie de calcul du CO2 par établissement*/

/*Selection de la base de calcul:

on utilise les envois ou le CO2 est calculé et on utilise les
repondérations des envois, re_pond_env

et des établissements re_pondetab */

DATA bootstrap;set janv.fic_envois9316;

IF flag_envoi_complet in ('ok','Ok_manque_trajet terminal');

IF &NOMVARCLASS='.' THEN &NOMVARCLASS=0;

co2pond=&NOMVARCO2*&WENVOI/1000;

if cln10=&CLASS;

keep cleq kgco2_ww_env ne restne &WETAB &WENVOI cln10 co2pond;

RUN;
```

```
/*Association de la macrovariable NOMTABLE à la table à partir de laquelle  
est réalisé l'exercice de bootstrap*/
```

```
%LET NOMTABLE=bootstrap;
```

```
/*Rééchantillonnages par la méthode du bootstrap*/
```

```
/*Le tirage d'un établissement est fait au hasard dans un cluster est fit  
au hasard*/
```

```
%MACRO
```

```
boucleboot(CLASS,NOMVARCLASS,SAMPLERATE,NOMVARCO2,NOMVARETAB,WETAB,WENVOI,N  
OMBREBOOT, SORTIE);
```

```
/*Table temporaire pour création de la table finale des résultats*/
```

```
data janv.tousratio;set janv.tousratio;if _n_<1;run;
```

```
/*Sélection du cluster indiqué par la macrovariable CLASS*/
```

```
DATA IDESTAB;SET &NOMTABLE;
```

```
CLN=%EVAL(&CLASS)+0;
```

```
IF &NOMVARCLASS=CLN;
```

```
RUN;
```

```
/*Création de la table des identifiants unique des établissement et leurs  
poids respectifs*/
```

```
PROC SQL;
```

```
CREATE TABLE IDESTAB2 AS SELECT DISTINCT(&NOMVARETAB),&WETAB FROM IDESTAB;
```

```
QUIT;
```

```
%DO I=1 %TO &NOMBREBOOT;
```

```
PROC SURVEYSELECT DATA=IDESTAB2 OUT=IDESTABSAMPLED METHOD=SRS  
SAMPRATE=&SAMPLERATE NOPRINT;
```

```
RUN;
```

```
QUIT;
```



```
DATA IDESTABSAMPLED;SET IDESTABSAMPLED;

CLE=1;

numech=&i;

RUN;


proc sort data=&NOMTABLE;BY &NOMVARETAB;run;


DATA POURCALCUL;MERGE &NOMTABLE IDESTABSAMPLED;

BY &NOMVARETAB;

IF CLE=1;

DROP CLE;

RUN;


/* cumul des envois par établissement */

proc summary data=pourcalcul nway;

class numech cln10 &WETAB restne;

var co2pond;

output out=cumulenv sum=tco2pond;

run;


/* cumul des établissements */

proc summary data=cumulenv nway;

class numech cln10;

var &WETAB tco2pond;

output out=cumuletab sum=tpondetab totco2pond;

run;


/* calcul de l'estimateur */
```

```

data ratio;set cumuletab;ratio=totco2pond/tpondetab;drop _type_ _freq_;run;

data janv.tousratio;set janv.tousratio ratio;run;


DM LOG 'CLEAR';

%END;


DATA &SORTIE;SET janv.tousratio;

RENAME ratio=BOOTCO2;

LABEL ratio='BOOTCO2';

RUN;


PROC UNIVARIATE DATA=&SORTIE NOPRINT;

VAR BOOTCO2;

HISTOGRAM BOOTCO2 / KERNEL(K=NORMAL COLOR=BLACK W=3.5) NENDPOINTS=50
CBARLINE=TAN CFILL=CREAM NOFRAME;

TITLE1 "Histogramme et lissage par noyau gaussien";

TITLE2 "Type &CLASS, Tonnes de CO2 par établissement";

INSET  n='Nombre de réplifications'  min='Minimum'  p5='5ème centile'
mean='Moyenne' median='Médiane'

p95='95ème centile'  max='Maximum'  std='Ecart-type' /  header="Taux
d'échantillonnage à &SAMPLERATE %" position=ne;

RUN;

QUIT;


%MEND boucleboot;

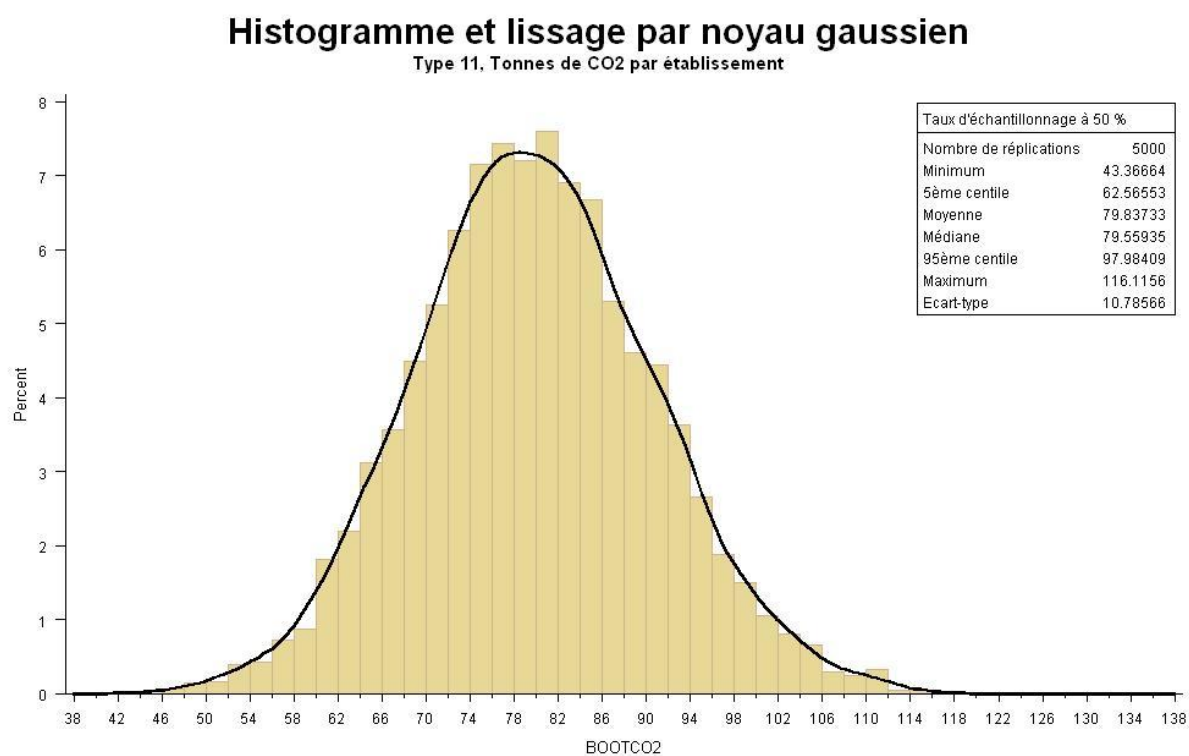

/*Appel de la macro*/

%boucleboot(&CLASS,&NOMVARCLASS,&SAMPLERATE,&NOMVARCO2,&NOMVARETAB,&WETAB,&
WENVOI,&NOMBREBOOT,&SORTIE);

RUN;

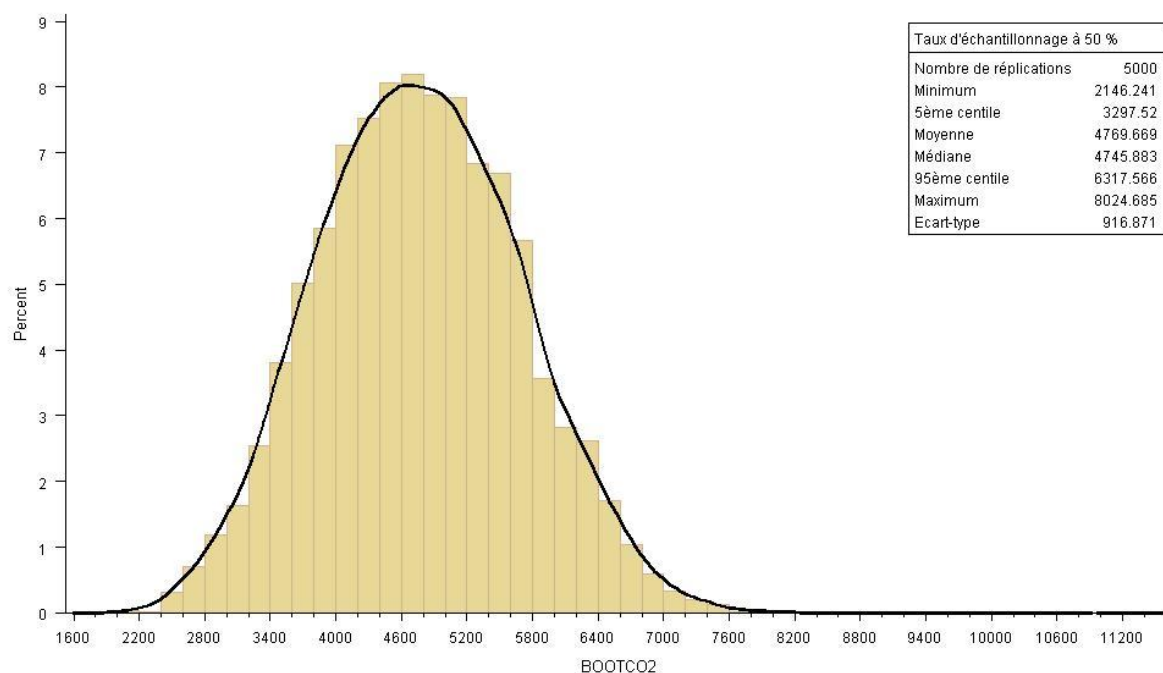
```

3. Distribution des sous échantillons par type résultants du bootstrap



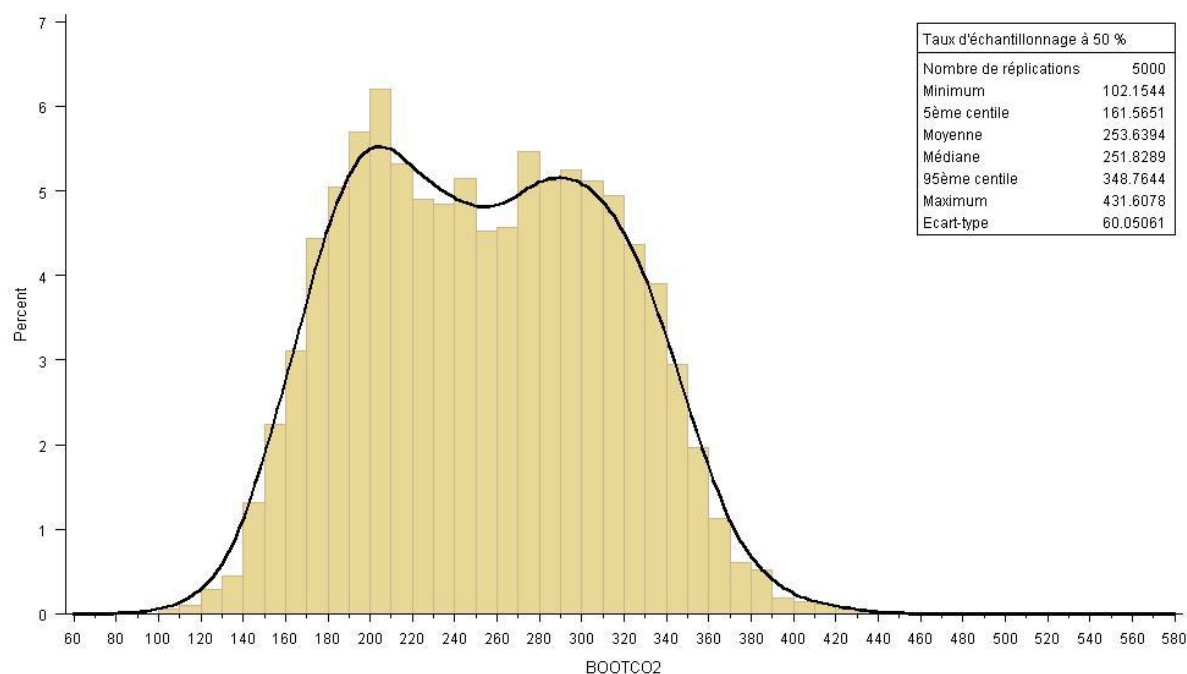
Histogramme et lissage par noyau gaussien

Type 2, Tonnes de CO2 par établissement



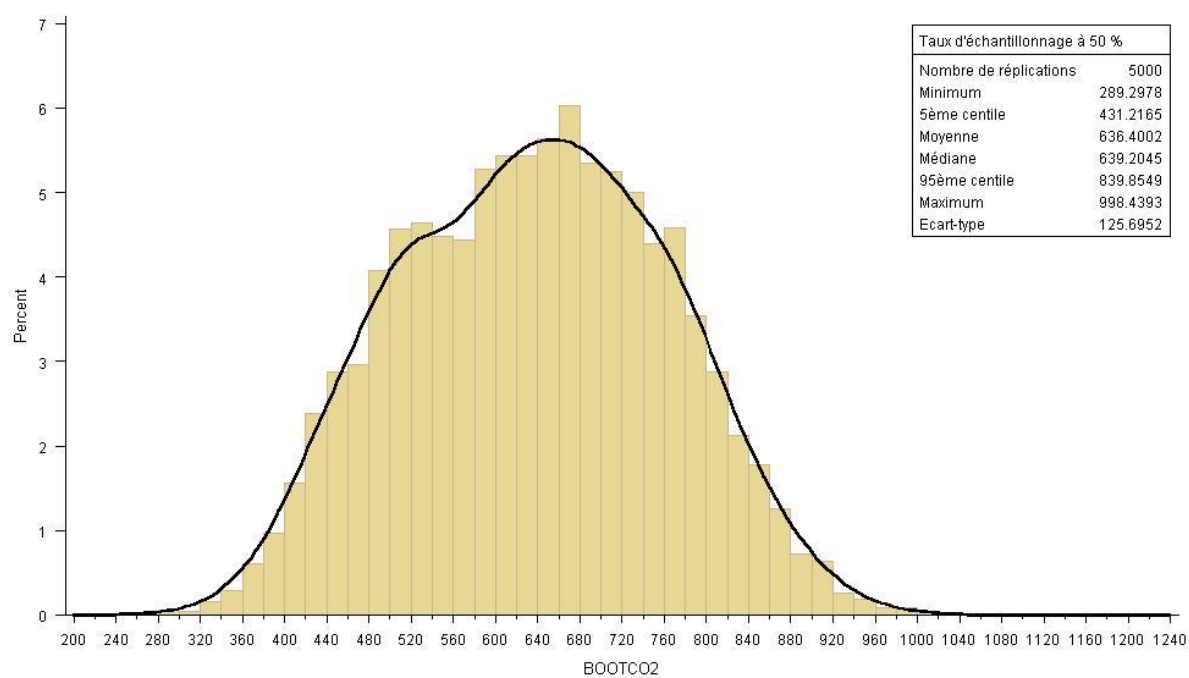
Histogramme et lissage par noyau gaussien

Type 3, Tonnes de CO2 par établissement



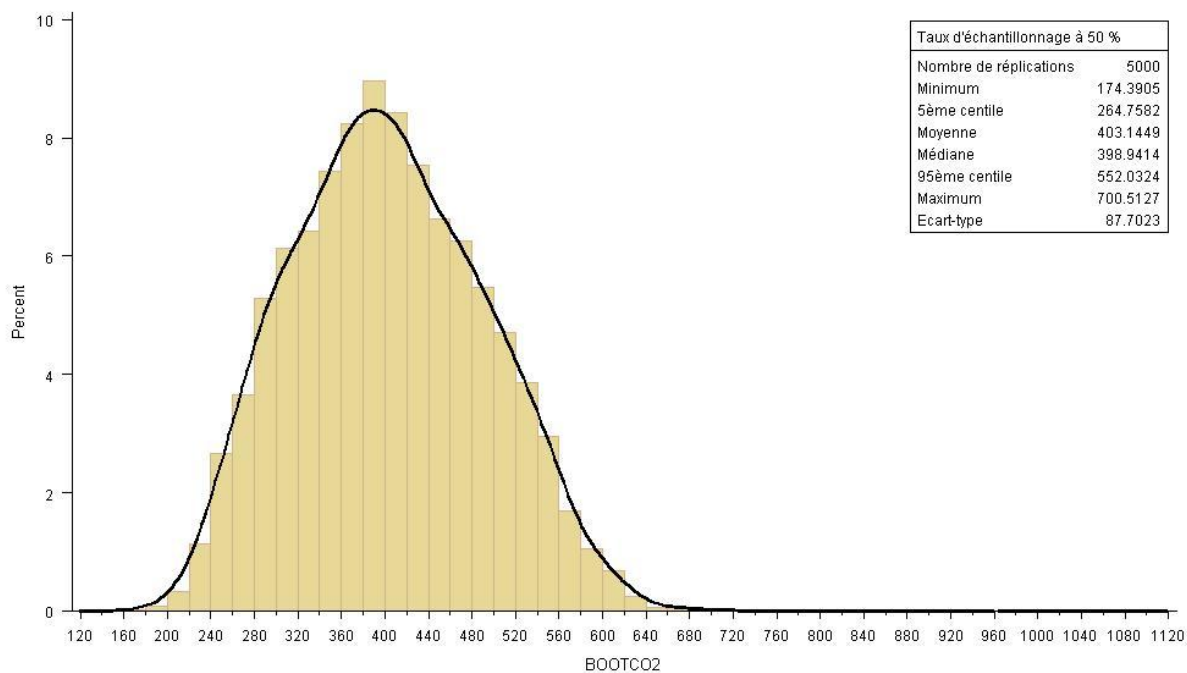
Histogramme et lissage par noyau gaussien

Type 4. Tonnes de CO2 par établissement



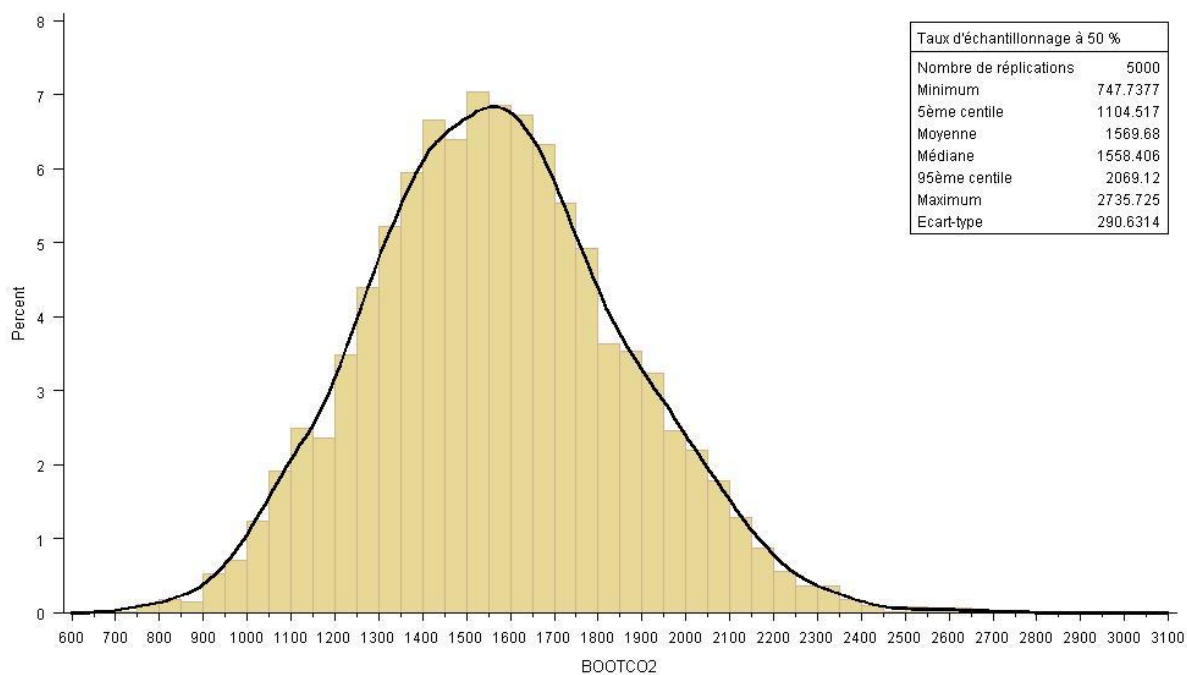
Histogramme et lissage par noyau gaussien

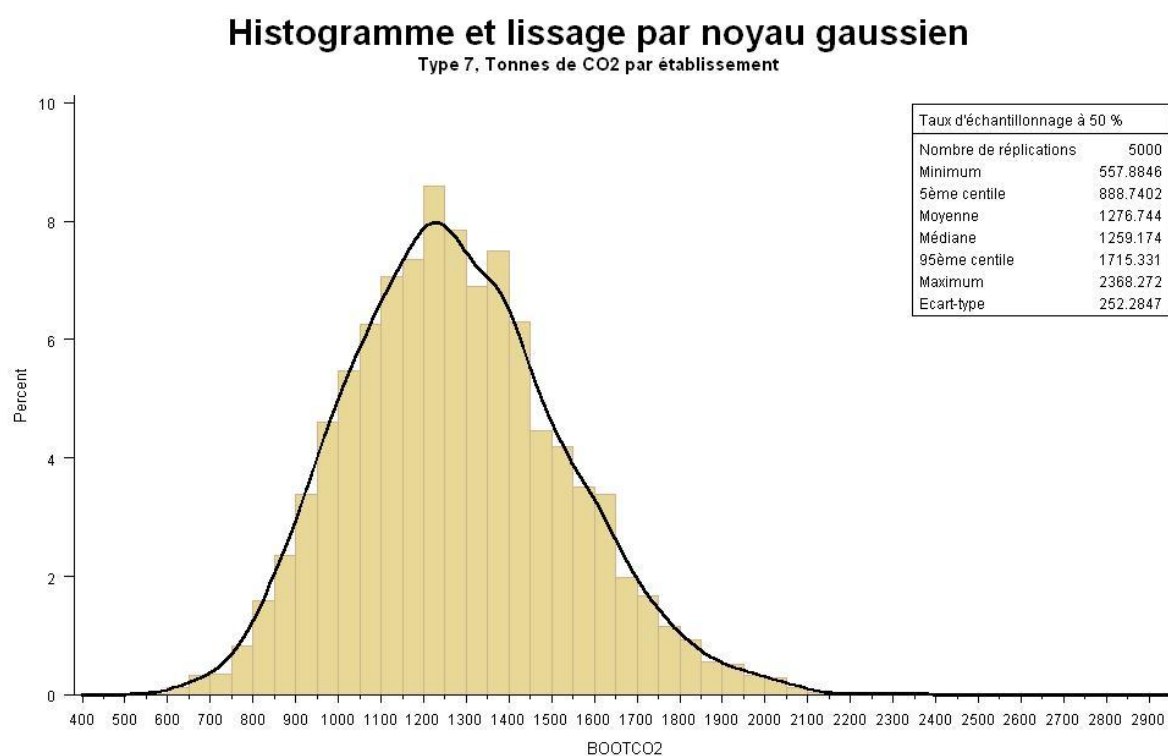
Type 5, Tonnes de CO2 par établissement



Histogramme et lissage par noyau gaussien

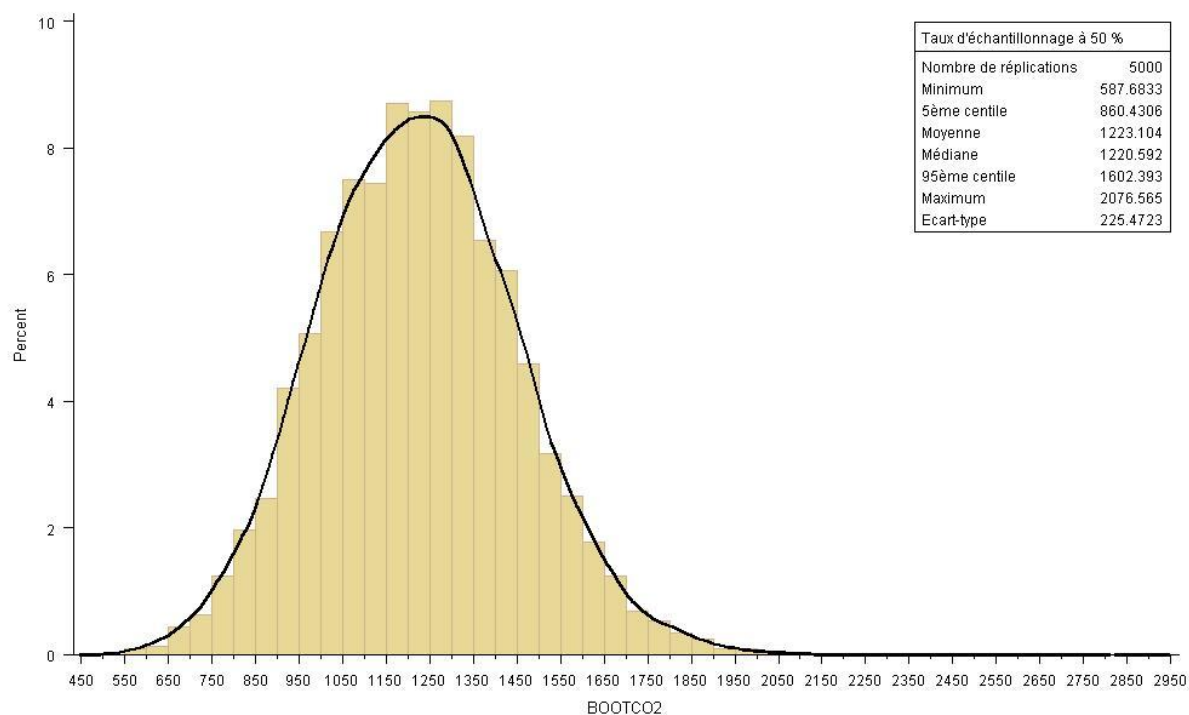
Type 6, Tonnes de CO2 par établissement





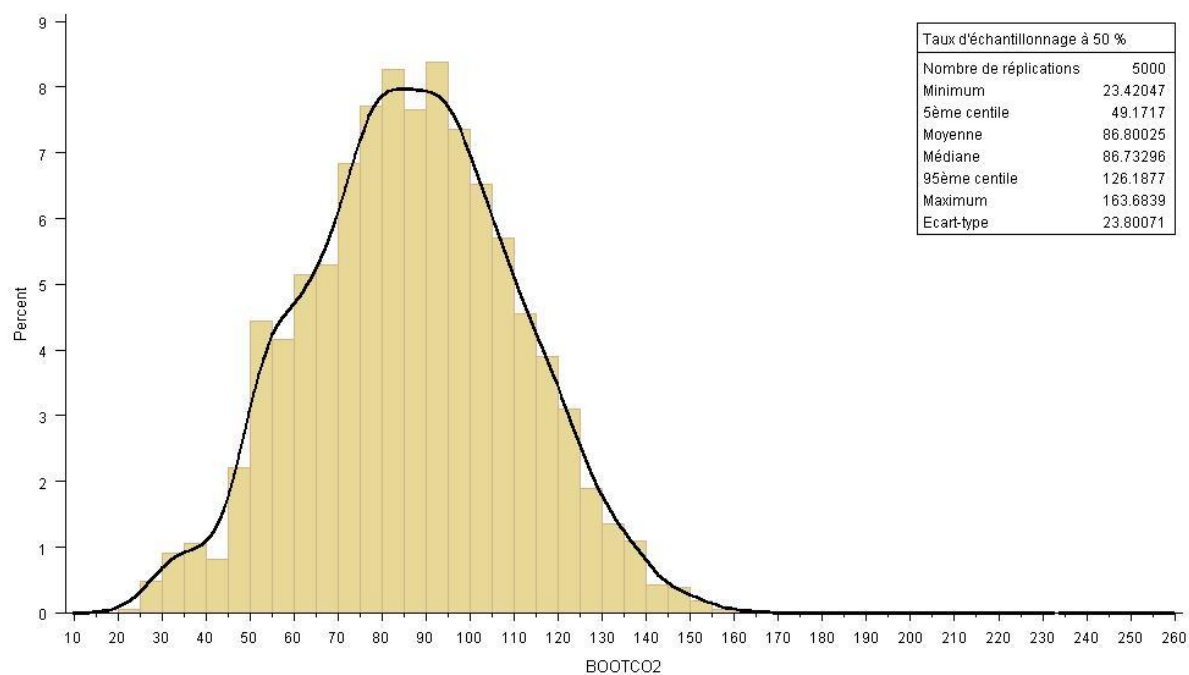
Histogramme et lissage par noyau gaussien

Type 71, Tonnes de CO2 par établissement



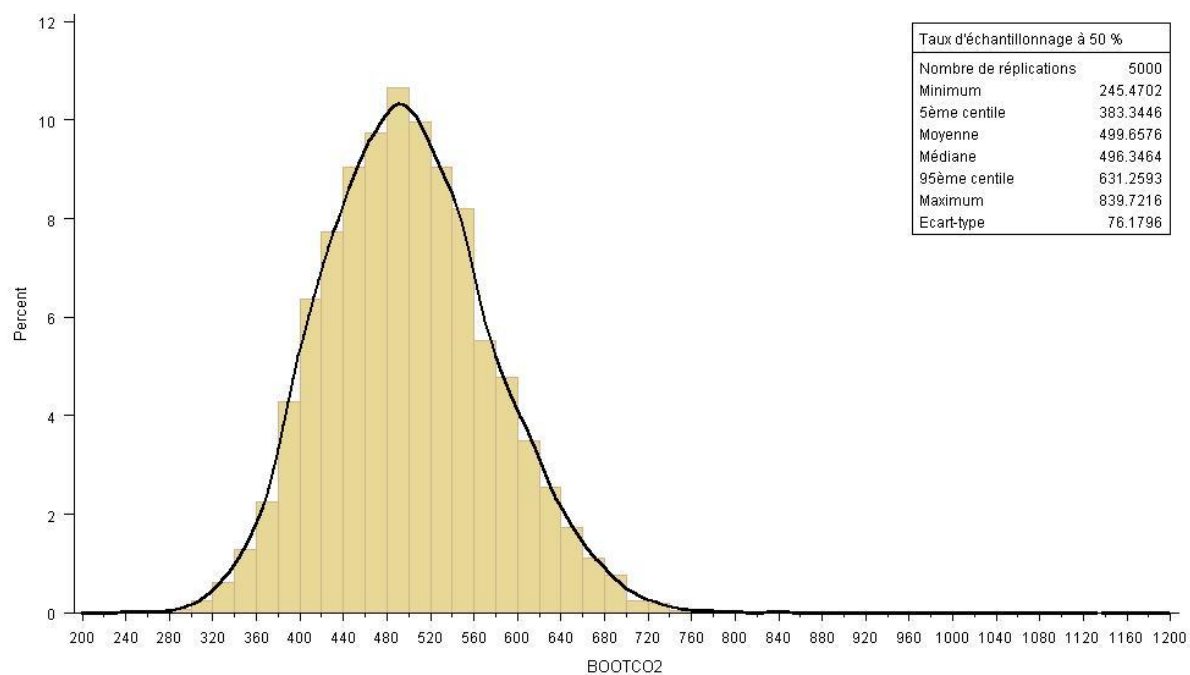
Histogramme et lissage par noyau gaussien

Type 8, Tonnes de CO2 par établissement



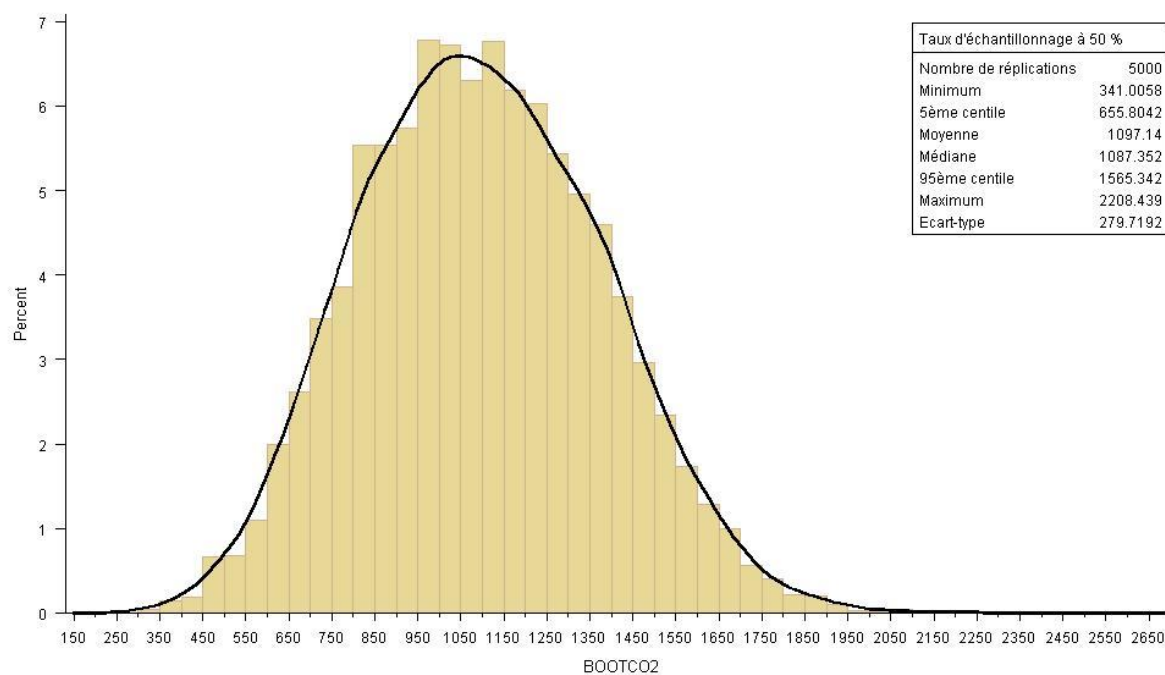
Histogramme et lissage par noyau gaussien

Type 9, Tonnes de CO2 par établissement



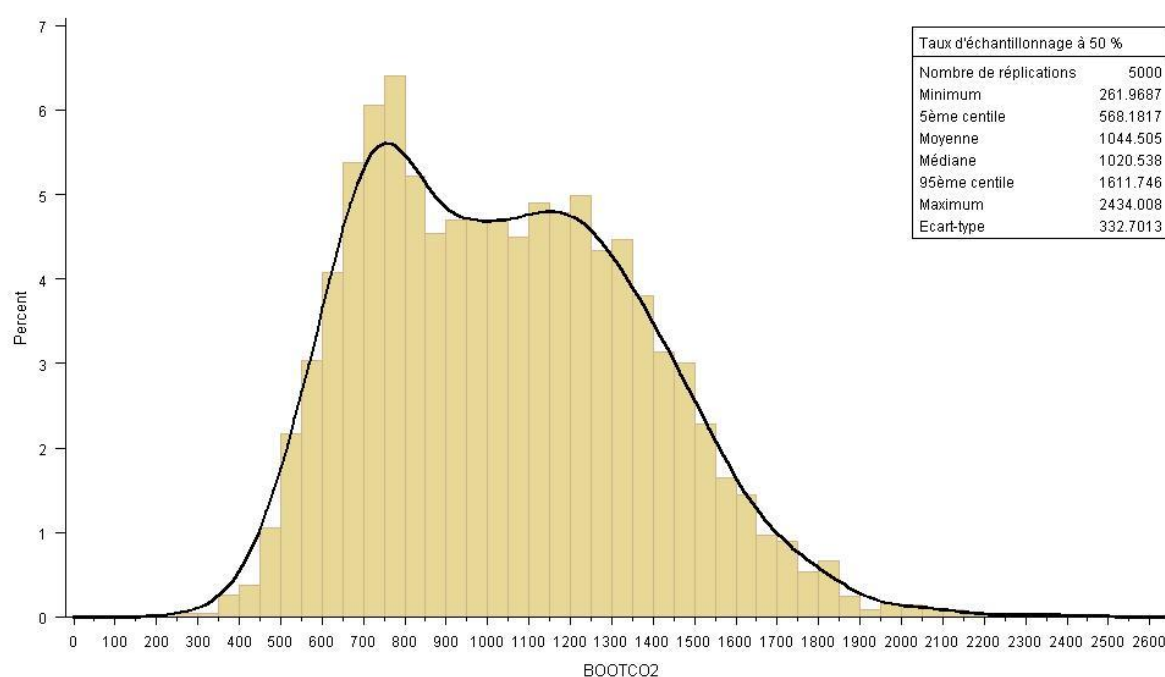
Histogramme et lissage par noyau gaussien

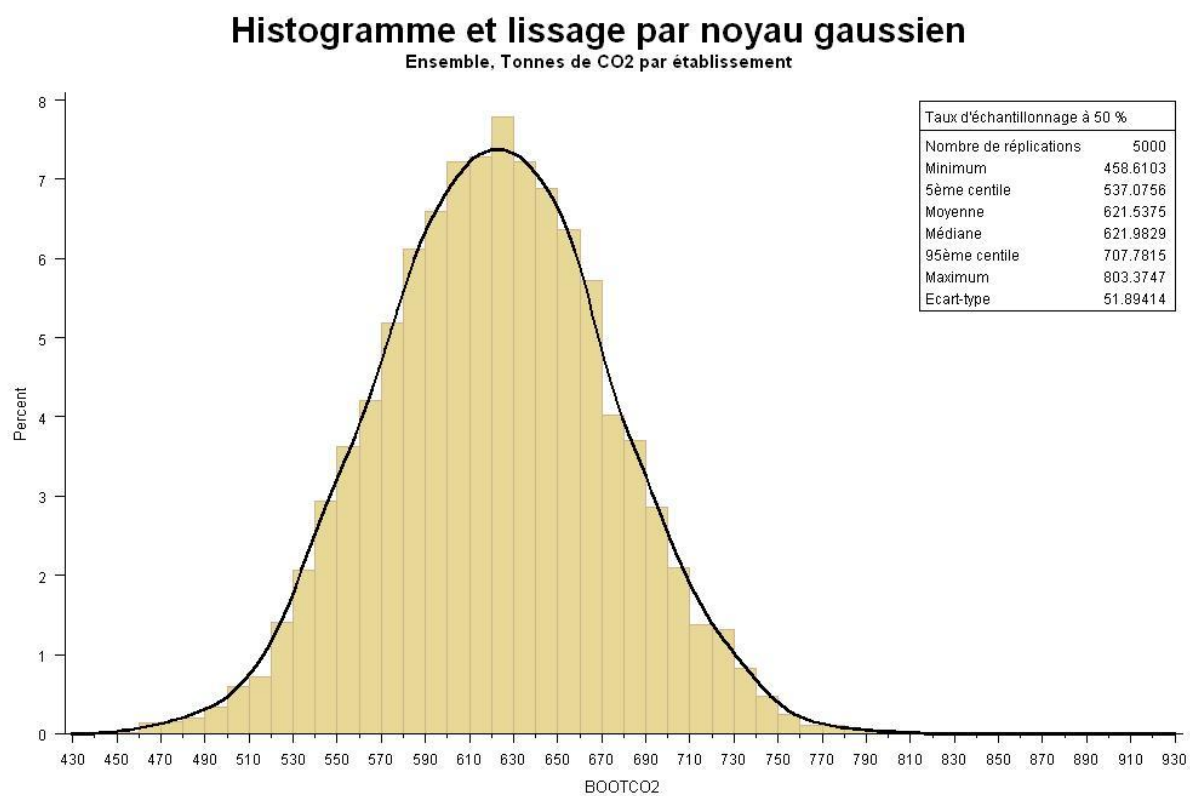
Type 10, Tonnes de CO2 par établissement



Histogramme et lissage par noyau gaussien

Type 0, Tonnes de CO2 par établissement





4. Correspondance entre Activité principale de l'établissement (APET sur 2 positions) et groupes d'activité définis dans ECHO

Etablissement, activité principale exercée [e1_apet2]	Gecho9r (Groupe d'activité)				
	Industries biens interméd.	CG biens interméd. et Récup.	Industries biens de prod.	CG biens de prod.	Industries agro aliment.
01 SYLVICULTURE, EXPL.FORESTIERE, SERV.	0	3	0	0	0
15 IND. ALIMENTAIRES	0	0	0	0	312
16 IND. TABAC	0	0	0	0	1
17 IND. TEXTILE	59	0	0	0	0
18 IND. HABILLEMENT ET FOURRURES	0	0	0	0	0
19 IND. CUIR ET CHAUSSURE	6	0	0	0	0
20 TRAVAIL BOIS ET FAB. ARTICLES EN BOIS	39	0	17	0	0
21 IND. PAPIER ET CARTON	66	0	0	0	0
22 EDITION, IMPRIMERIE, REPRODUCTION	0	0	0	0	0
23 COKEFACTION, RAFFINAGE, IND. NUCLEAIRES	17	0	0	0	0
24 IND. CHIMIQUE	151	0	0	0	34
25 IND. CAOUTCHOUC ET PLASTIQUES	43	0	59	0	0
26 FAB. AUTRES PRODUITS MINERAUX NON METAL	82	0	5	0	0
27 METALLURGIE	106	0	0	0	0
28 TRAVAIL METAUX	82	0	116	0	0
29 FAB. MACHINES ET EQPT.	0	0	83	0	0
30 FAB. MACHINES BUREAU ET MATERIEL	0	0	0	0	0
31 FAB. MACHINES ET APPAREILS ELECTRIQUES	0	0	64	0	0
32 FAB. EQPT. RADIO, TELEVISION	0	0	35	0	0
33 FAB INSTR. MEDICAUX, PRECISION, OPTIQUE	0	0	61	0	0
34 IND. AUTOMOBILE	0	0	0	0	0
35 FAB. AUTRES MATERIELS TRANSPORT	0	0	0	0	0
36 FAB. MEUBLES ; IND. DIVERSES	0	0	0	0	0
37 RECUPERATION	0	42	0	0	0
50 COMMERCE ET REPARATION AUTOMOBILE	0	0	0	0	0
51 COMMERCE GROS ET INTERMED. COMMERCE	0	320	0	100	0
52 COMMERCE DETAIL, REPARATION ARTICLES DOME	0	0	0	0	0
63 SERV. AUXILIAIRES TRANSPORTS	0	0	0	1	0
90 ASSAINISSEMENT, VOIRIE ET GESTION DECHETS	0	7	0	0	0
Total	651	372	440	101	347

Etablissement, activité principale exercée [e1_apet2]	Groupe d'activité [Gecho9r]				
	CG biens agro-alim.	Industries biens de consom.	VPC et CG biens de consom.	Entre pôts	Total
01 SYLVICULTURE, EXPL.FORESTIERE, SERV.	0	0	0	0	3
15 IND. ALIMENTAIRES	0	0	0	0	312
16 IND. TABAC	0	0	0	0	1
17 IND. TEXTILE	0	46	0	0	105
18 IND. HABILLEMENT ET FOURRURES	0	22	0	0	22
19 IND. CUIR ET CHAUSSURE	0	22	0	0	28
20 TRAVAIL BOIS ET FAB. ARTICLES EN BOIS	0	3	0	0	59
21 IND. PAPIER ET CARTON	0	15	0	0	81
22 EDITION, IMPRIMERIE, REPRODUCTION	0	86	0	0	86
23 COKEFACTION, RAFFINAGE, IND. NUCLEAIRES	0	0	0	0	17
24 IND. CHIMIQUE	0	71	0	0	256
25 IND. CAOUTCHOUC ET PLASTIQUES	0	11	0	0	113
26 FAB. AUTRES PRODUITS MINERAUX NON METAL	0	10	0	0	97
27 METALLURGIE	0	2	0	0	108
28 TRAVAIL METAUX	0	12	0	0	210
29 FAB. MACHINES ET EQPT.	0	23	0	0	106
30 FAB. MACHINES BUREAU ET MATERIEL	0	15	0	0	15
31 FAB. MACHINES ET APPAREILS ELECTRIQUES	0	10	0	0	74
32 FAB. EQPT. RADIO, TELEVISION	0	41	0	0	76
33 FAB INSTR. MEDICAUX, PRECISION, OPTIQUE	0	4	0	0	65
34 IND. AUTOMOBILE	0	92	0	0	92
35 FAB. AUTRES MATERIELS TRANSPORT	0	11	0	0	11
36 FAB. MEUBLES ; IND. DIVERSES	0	80	0	0	80
37 RECUPERATION	0	0	0	0	42
50 COMMERCE ET REPARATION AUTOMOBILE	0	17	0	0	17
51 COMMERCE GROS ET INTERMED. COMMERCE	203	0	108	0	731
52 COMMERCE DETAIL, REPARATION ARTICLES DOME	0	0	19	0	19
63 SERV. AUXILIAIRES TRANSPORTS	0	0	0	101	102
90 ASSAINISSEMENT, VOIRIE ET GESTION DECHETS	0	0	0	0	7
Total	203	593	127	101	2935

5. Estimation des paramètres du modèle de CO2 par tonne par établissement

Modèle sans pondération des envois

```
PROC REG data=NRJ_CO2_par_envoi_26oct_etab alpha=0.05 outest=test_1;

    model KgCO2_WW_ton_log= p3a /*p3b p3c*/ p3b_log p3c_log

/*p4a p4b*/ p4c p4d /*tonroute*/ p5a2cor_reg /*p5a3cor_reg*/
p5a6cor_reg gecho01 gecho02 gecho03 gecho04 gecho05 gecho06 gecho07
gecho08 /*gecho09*/ /mse ;

    where FLAG_envoi_complet in ("ok" "Ok_manque_trajet terminal");

    output out=previsions_test p=pred lcl=borninfprev ucl=bornsupprev
lclm=borninfconf uclm=bornsupconf;

run;quit;
```

Nombre d'observations lues	9316
Nombre d'observations utilisées	7573
Nombre d'observations avec valeurs manquantes	1743

Analyse de variance					
Source	DDL	Somme Des carrés	Moyenne quadratique	Valeur F	Pr > F
Modèle	15	14110	940.7	335.80	<.0001
Erreur	7557	21169	2.80		
Total sommes corrigées	7572	35280			

Root MSE	1.67371	R carré	0.4000
Moyenne dépendante	4.24110	R car. ajust.	0.3988
Coeff Var	39.46408		

Valeurs estimées des paramètres						
Variable	Libellé	DDL	Valeur estimée des paramètres	Erreur type	Valeur du test t	Pr > t
Intercept	Intercept	1	2.17978	0.11341	19.22	<.0001
p3a	Pct envois expédiés <30kg	1	0.02226	0.00074877	29.73	<.0001
p3b_log	ln (Pct envois 30 <300kg)	1	0.26974	0.01278	21.10	<.0001
p3c_log	ln (Pct envois 0,3<3t.)	1	0.13270	0.01389	9.55	<.0001
p4c	Pct tonnes exp. reste Europe	1	0.01179	0.00105	11.28	<.0001
p4d	Pct tonnes exp. Reste Monde	1	0.02421	0.00169	14.36	<.0001
p5a2cor_reg	Recours mode fer	1	-0.41572	0.06851	-6.07	<.0001
p5a6cor_reg	Recours mode aérien	1	0.64085	0.05363	11.95	<.0001
gecho01	Industries biens intermédiaires	1	0.28603	0.11797	2.42	0.0154
gecho02	CG biens interm. et Récup.	1	-0.26265	0.12196	-2.15	0.0313
gecho03	Industries biens de production	1	0.64278	0.12204	5.27	<.0001
gecho04	CG biens de production	1	0.39093	0.15088	2.59	0.0096
gecho05	Industries agro alimentaires	1	0.16005	0.12310	1.30	0.1936
gecho06	CG biens agro-alimentaires	1	-0.28646	0.13289	-2.16	0.0312
gecho07	Industries biens de consom.	1	0.70701	0.11903	5.94	<.0001
gecho08	VPC et CG biens de consom.	1	0.61534	0.14700	4.19	<.0001

6. Programme pour calculer les valeurs prédites du modèle, les intervalles de confiance et de prévision

```

/***** MODELE RETENU *****/

PROC REG data=NRJ_CO2_par_envoi_26oct_etab alpha=0.05 outest=test_1;

    model KgCO2_WW_ton_log= /*p1rp2r_reg*/ /*p1r*/ /*p2r*/ p3a /*p3b
p3c*/ p3b_log p3c_log

/*p4a p4b*/ p4c p4d /*tonroute*/ p5a2cor_reg /*p5a3cor_reg*/ p5a6cor_reg

gecho01 gecho02 gecho03 gecho04 gecho05 gecho06 gecho07 gecho08
/*gecho09*/ / mse /*--> option pr Mathieu pr proc IML*/ ;

    where FLAG_envoi_complet in ("ok" "Ok_manque_trajet terminal")

/*and fchphy_mode_simplifie in ("110" "150")*/ /*and q8="2" and
Nbre_total_trajets_par_envoi>1*/;

    output out=previsions_test p=pred lcl=borninfprev ucl=bornsupprev
lclm=borninfconf uclm=bornsupconf;

run;quit;

/* créer une table sans valeurs manquantes sur les var explicatives */

DATA CO2_envoi_var_non_manq; set NRJ_CO2_par_envoi_26oct_etab;

    if p3a=. then delete;

    if p3b_log=. then delete;

    if p3c_log=. then delete;

    if p4c=. then delete;

    if p4d=. then delete;

    if p5a2cor_reg=. then delete;

    if p5a6cor_reg=. then delete;

    if gecho01=. then delete;

    if gecho02=. then delete;

    if gecho03=. then delete;

    if gecho04=. then delete;

```

```

        if gecho05=. then delete;

        if gecho06=. then delete;

        if gecho07=. then delete;

        if gecho08=. then delete;

        ID=cleq+0;

run;

%LET table1=test_1; /*Table des coefficients*/

%LET nomvar_table1=Intercept /*p1rp2r_reg*/ /*p1r*/ /*p2r*/ p3a /*p3b p3c*/
p3b_log p3c_log

/*p4a p4b*/ p4c p4d /*tonroute*/ p5a2cor_reg /*p5a3cor_reg*/ p5a6cor_reg
gecho01 gecho02 gecho03 gecho04 gecho05 gecho06 gecho07 gecho08
/*gecho09*/; /*Noms des coefficients*/

%LET table2=CO2_envoi_var_non_manq; /*Tables des observations sans valeurs
mqtes sur var explicatives*/

%LET nomvar_table2=/*p1rp2r_reg*/ /*p1r*/ /*p2r*/ p3a /*p3b p3c*/ p3b_log
p3c_log

/*p4a p4b*/ p4c p4d /*tonroute*/ p5a2cor_reg /*p5a3cor_reg*/ p5a6cor_reg
gecho01 gecho02 gecho03 gecho04 gecho05 gecho06 gecho07 gecho08
/*gecho09*/; /*Noms des variables*/

%LET IDENTIFIANT=ID;

PROC IML;

START LECTURE;

    USE &table1;

        READ ALL VAR{_MSE_} INTO S2;

        READ ALL VAR{&nomvar_table1} INTO BETA;

    CLOSE &table1;

    USE &table2;

        READ ALL VAR{&nomvar_table2} INTO XX;

        READ ALL VAR{&IDENTIFIANT} INTO ID;

```

```

        CLOSE &table2;

FINISH LECTURE;

RUN LECTURE;

BETA=T (BETA) ;

INT=J (NROW (XX) , 1, 1) ;

X=INT || XX;

YCHAP=X*BETA;

XPX=INV (T (X) *X) ;

H=J (NROW (X) , 1, 0) ;

LI1=J (NROW (X) , 1, 0) ;

UI1=J (NROW (X) , 1, 0) ;

LI2=J (NROW (X) , 1, 0) ;

UI2=J (NROW (X) , 1, 0) ;

STDEYCHAP1=J (NROW (X) , 1, 0) ;

STDEYCHAP2=J (NROW (X) , 1, 0) ;

DO i=1 TO NROW (X) ;

H[i,1]=X[i,]*XPX*T (X[i,]) ;

STDEYCHAP1[i,1]=SQRT (S2* (H[i,1])) ;

STDEYCHAP2[i,1]=SQRT (S2* (1+H[i,1])) ;

LI1[i,1]=YCHAP[i,1]-(PROBIT (0.975)*STDEYCHAP1[i,1]); /*1.64 si alpha=10%*/

UI1[i,1]=YCHAP[i,1]+(PROBIT (0.975)*STDEYCHAP1[i,1]);

LI2[i,1]=YCHAP[i,1]-(PROBIT (0.975)*STDEYCHAP2[i,1]); /*1.64 si alpha=10%*/

UI2[i,1]=YCHAP[i,1]+(PROBIT (0.975)*STDEYCHAP2[i,1]);

END;

MATFINALE=ID || YCHAP || STDEYCHAP1 || STDEYCHAP2 || LI1 || UI1 || LI2 || UI2;

CREATE IMPUT FROM MATFINALE;APPEND FROM MATFINALE;

```

QUIT;

```
/* **** */

/*          DATA          echo_CO2.NRJ_CO2_par_envoi_26oct_etab;          set
NRJ_CO2_par_envoi_26oct_etab; run; */

data previsions_test;set previsions_test;

KgCO2_WW_ton_pred_exp=exp(pred);

/* intervalles de confiance */

KgCO2_WW_ton_born_inf_conf_exp=exp(borninfconf);
KgCO2_WW_ton_born_sup_conf_exp=exp(bornsupconf);

/*intervalles de prévision */

KgCO2_WW_ton_borninf_prev_exp=exp(borninfprev);
KgCO2_WW_ton_bornsup_prev_exp=exp(bornsupprev);

run;

DATA previsions_test2;set previsions_test;

    keep    ne    KgCO2_WW_ton_pred_exp    KgCO2_WW_ton_born_inf_conf_exp
KgCO2_WW_ton_born_sup_conf_exp

    KgCO2_WW_ton_borninf_prev_exp KgCO2_WW_ton_bornsup_prev_exp;

    if KgCO2_WW_ton_pred_exp=. then delete;

run;

PROC SORT data=previsions_test2 nodupkey;

    by ne;

run;

/* DATA Echo_Co2.prev_mod_ton23nov2012; set previsions_test2; run; */

title "Prévisions de CO2 par tonne";

proc univariate data=previsions_test2;
```

```
var KgCO2_WW_ton_pred_exp ;

histogram KgCO2_WW_ton_pred_exp /midpoints = 1 to 1200 by 10;

where KgCO2_WW_ton_pred_exp<1200;

run;quit;

/* Distribution des Bornes inférieures */

title "Bornes inférieures des prévisions CO2 par tonne";

proc univariate data=previsions_test2;

var KgCO2_WW_ton_borninf_exp ;

histogram KgCO2_WW_ton_borninf_exp /midpoints = 1 to 1200 by 10;

where KgCO2_WW_ton_pred_exp<1200;

run;quit;

/* Distribution des bornes supérieures */

title "Bornes supérieures des prévisions CO2 par tonne";

proc univariate data=previsions_test2;

var KgCO2_WW_ton_bornsup_exp ;

histogram KgCO2_WW_ton_bornsup_exp /midpoints = 1 to 1200 by 10;

where KgCO2_WW_ton_pred_exp<1200;

run;quit;

title "CO2 par tonne avec intervalles de confiance (-1000 kg)";

PROC Gplot data=previsions_test2;

    plot KgCO2_WW_ton_borninf_exp*KgCO2_WW_ton_pred_exp
          KgCO2_WW_ton_bornsup_exp*KgCO2_WW_ton_pred_exp
          KgCO2_WW_ton_pred_exp*KgCO2_WW_ton_pred_exp/ overlay;

    where KgCO2_WW_ton_pred_exp<1000;

run;

DATA plr_ne; set bases.Echoetab_juin09;
```

```
        keep ne plr p2r;

run;

PROC SORT data=plr_ne;;

    by ne;

run;

DATA previsions_test2_bis;

    merge previsions_test2 plr_ne;

    by ne;

run;

DATA previsions_test2_bis; set previsions_test2_bis;

    CO2_kg_est_etab=KgCO2_WW_ton_pred_exp*plr;

    CO2_kg_est_etab_b_inf=KgCO2_WW_ton_borninf_exp*plr;

    CO2_kg_est_etab_b_sup=KgCO2_WW_ton_bornsup_exp*plr;

run;

title "CO2 par etab avec intervalles de confiance (<57 000 000 kg)";

/*axis1 logbase=10 logstyle=expand;

axis2 logbase=10 logstyle=expand;*/

PROC Gplot data=previsions_test2_bis;

    plot CO2_kg_est_etab_b_inf*CO2_kg_est_etab

         CO2_kg_est_etab_b_sup*CO2_kg_est_etab

         CO2_kg_est_etab*CO2_kg_est_etab/      overlay      /*haxis=axis2
vaxis=axis1*/;

    where CO2_kg_est_etab<57000000;

run;

quit;
```

```
/* CO2 total de l'étab et tonnage annuel */  
title "CO2 par etablissement et tonnage annuel ";  
axis1 logbase=10 logstyle=expand;  
axis2 logbase=10 logstyle=expand;  
PROC GPGLOT data=previsions_test2_bis;  
    plot  
        plr*CO2_kg_est_etab/ haxis=axis2 vaxis=axis1;  
  
run;  
quit;  
  
/* CO2 total de l'étab et nbre annuel d'envois*/  
title "CO2 par établissement et nombre annuel d'envois ";  
axis1 logbase=10 logstyle=expand;  
axis2 logbase=10 logstyle=expand;  
PROC GPGLOT data=previsions_test2_bis;  
    plot  
        p2r*CO2_kg_est_etab/ haxis=axis2 vaxis=axis1;  
  
run;  
quit;  
  
DATA ECho_CO2.etab_co2_19nov2012;  
    merge etab previsions_test2_bis;  
    by ne;  
run;  
  
DATA previsions_indiv; set previsions_test;
```



```
borninfprev_exp =exp(borninfprev);

bornsupprev_exp=exp(bornsupprev);

run;

DATA etab_nrj_31oct2012; set echo_co2.etal_nrj_31oct2012;

KgCO2_WW_ton_log= log (KgCO2_WW_ton_etal/plr);

/* Bornes inférieure et supérieure de l'estimation de CO2 pour le tonnage
annuel de l'établissement */

KgCO2_WW_ton_etal_borne_inf=KgCO2_WW_ton_borninf_exp*plr;

KgCO2_WW_ton_etal_borne_sup=KgCO2_WW_ton_bornsup_exp*plr;

run;

/*DATA previsions_test3;set previsions_test;

    keep cleq ne pred_exp borninf_exp bornsup_exp KgCO2_WW_ton_log
FLAG_envoi_complet;

    if KgCO2_WW_ton_log=. then delete;

    if KgCO2_WW_ton_log NE . and FLAG_envoi_complet not in ("ok"
"Ok_manque_trajet terminal") then delete;

run;*/

PROC SORT data=previsions_test2 nodupkey;

    by ne;

run; /* 2783 établissements avec une prévision */

/* Remonter l'information au niveau établissement */

/* DATA etab; set bases.Echoetal_juin09; run; */

PROC SORT data=etal ;

    by ne;

run;
```

```
DATA etab_nrj_31oct2012;  
  
    merge etab previsions_test2;  
  
    by ne;  
  
run;
```


Annexe 3 : Intensité carbone des envois

pondération
utilisée=POND_envmil
variables utilisées :
kgCO2_ww_env et
tkm_tot_env

attention : certains envois n'ont pas de valeur de co₂ et de tkm

Classe	effectif de la classe	milliers de kg de co2	milliers de tonnes/km	nbre de valeurs non manquantes	gCO2/tkm	rang	indice	kgCO2/envoi	
1	40	94552	13273	40		7123	14	84,8	2364
2	109	191068	2403798	101		79	8	0,9	1892
3	47	232259	4323888	45		54	3	0,6	5161
4	86	232494	3411600	82		68	6	0,8	2835
5	106	336808	5206978	99		65	4	0,8	3402
6	44	90039	1211438	44		74	7	0,9	2046
7	53	265497	2388961	44		111	9	1,3	6034
8	71	223767	920869	70		243	11	2,9	3197
9	57	741105	4269863	55		174	10	2,1	13475
10	43	306685	8308068	42		37	1	0,4	7302
11	17	32406	489197	17		66	5	0,8	1906
12	76	304554	177809	75		1713	13	20,4	4061
15	13	5538	5461	13		1014	12	12,1	426
16	49	213654	5618527	41		38	2	0,5	5211
TOTAL	811	3270425	38749730	768		84		1,0	4258

			q13t		q14		q6		q7		p1r		p2r		istot_voldoi				
classe	nbenv obs	1000 Env	poids envoi (en tonnes)		volume envoi		nb annuel envois		tonnage annuel même		tonnage annuel		nb annuel d'envois		distance totale à		tco2	milliers tkm	gCO2/tkm
			moyenne	médiane	moyenne	médiane	moyenne	médiane	moyenne	médiane	moyenne	médiane	moyenne	médiane	moyenne	médiane			
1	40	17212	0,0	0,0	0,6	0,5	2878	900	26	16	1823	2000	401714	200000	11	4	94552	13273	7123
2	109	1100	8,7	6,5	45,4	32,0	1599	1000	12770	7000	122496	45330	21359	12000	173	64	191068	2403798	79
3	47	1039	23,7	25,0	28,8	17,0	2068	700	21181	17500	1584762	180000	44568	8870	153	112	232259	4323888	54
4	86	1592	10,7	15,0	37,2	33,0	1708	1500	17695	12500	74230	42000	28560	8424	129	41	232494	3411600	68
5	106	1300	12,5	13,0	37,8	33,0	1113	500	12298	7750	153433	100000	20308	17680	269	218	336808	5206978	65
6	44	1216	11,4	14,0	30,2	35,0	1046	800	8229	12000	256615	420000	20307	30000	102	65	90039	1211438	74
7	53	4013	2,8	0,0	6,6	0,5	1274	1614	3031	5	37738	888	162002	42000	172	38	265497	2388961	111
8	71	9779	0,8	0,3	3,2	1,0	371	320	820	15	18639	12214	82708	59400	32	16	223767	920869	243
9	57	6689	1,8	1,0	12,2	6,0	847	350	1184	350	87342	64615	452216	592800	242	260	741105	4269863	174
10	43	428	30,8	24,0	49,4	38,0	981	620	19113	14488	265402	196000	14760	8000	495	591	306685	8308068	37
11	17	376	17,3	16,2	56,2	60,0	671	720	9138	10800	77110	80464	8034	11600	56	16	32406	489197	66
12	76	15253	0,0	0,0	0,5	0,5	863	600	107	4	4758	840	177725	72916	171	91	304554	177809	1713
15	13	714	0,0	0,0	1,2	0,5	759	800	1	1	2172	2880	25328	18005	572	573	5538	5461	1014
16	49	196	5,2	4,5	14,0	0,5	2217	2000	4585	35	35090	9000	32207	18000	7661	6875	213654	5618527	38
ensemble																			
	811	60908	2,2	0,02	6,8	0,5	1446	620	2239	15	58579	3000	239882	85000	141	33	3 270 425	38 749 730	84,4
	7,8%	8,3%	1,6	0,80	69%	100%	545%	1192%	6	8	95%	120%	94%	143%	48%	30%	10%	16,4%	

