



HAL
open science

Analyse des consommations et émissions de véhicules Gaz et Diesel. PROJET Equilibre. Livrable final

Bernard Schnetzler, Fouad Baouche

► To cite this version:

Bernard Schnetzler, Fouad Baouche. Analyse des consommations et émissions de véhicules Gaz et Diesel. PROJET Equilibre. Livrable final. [Rapport de recherche] IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. 2019, 132p. hal-02139437

HAL Id: hal-02139437

<https://hal.science/hal-02139437v1>

Submitted on 24 May 2019

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

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

PROJET Equilibre

Analyse des consommations et émissions de véhicules Gaz et Diesel

Livrable final

Rédacteurs	Bernard Schnetzler Fouad Baouche
Relecteurs	Anne-Christine Demanny Nour Eddin El Faouzi Pascal Mégevand David Billandon

Versions

De la version 1.1 à la version 1.4a, les corrections ont porté sur la reformulation, l'ajout d'explications ou de compléments et l'élimination d'erreurs de détail. La version 1.5 contient une annexe additionnelle apportant de nouveaux résultats, laissant inchangées les conclusions.

Date	Version	Rédacteurs	Principales modifications
13/07/2018	1.1	B. Schnetzler F. Baouche	
01/09/2018	1.2a	B. Schnetzler	Corrections de style
12/11/2018	1.3a	B. Schnetzler	Intégration des corrections Mégevand
21/11/2018	1.3b	B. Schnetzler	English translation of the version 1.3a
26/11/2018	1.4a	B. Schnetzler	Intégration des corrections Billandon
26/11/2018	1.4b	B. Schnetzler	English translation of the version 1.4a
05/12/2018	1.5a	B. Schnetzler	Ajout de l'annexe E
07/12/2018	1.5b	B. Schnetzler	English translation of the version 1.5a
24/04/2019	1.6a	B. Schnetzler	Version diffusable hors IFSTTAR Annexes A, B, C, D absentes

Approbation de la version finale par Nour Eddin El Faouzi, directeur du LICIT, le 30/01/2019

PREAMBULE

Sauf indication contraire, les unités et les valeurs suivantes ont été utilisées dans ce rapport :

- consommation de gazole : exprimée en litres
- consommation de gaz : exprimée en kilogrammes
- émissions de CO₂ : exprimées en kilogrammes
- émissions de NO_x : exprimées en grammes
- valeur énergétique du gazole : 37.5 MJ/litre
- valeur énergétique du gaz : 47.3 MJ/kg
- densité du gazole : 0.844
- émissions de CO₂ par litre de gazole : 2.7 kg
- émissions de CO₂ par kilogramme de gaz : 2.75 kg
- les puissances mesurées (mesures embarquées) sont les puissances indiquées, lesquelles incluent les frottements

TABLE DES MATIERES

PREAMBULE.....	2
TABLE DES MATIERES.....	3
1. Introduction.....	6
1.1. Suivi de la composition du gaz	12
1.2. Contrôle de la consommation de gaz.....	12
1.3. Durée des pleins.....	13
1.4. Quantités achetées	16
2. Description et déroulement du projet.....	18
2.1. Journaux de bord	21
2.2. Catégorisation des routes.....	21
2.3. Déroulement du projet.....	22
2.3.1. Phase de mise en place.....	22
2.3.2. Consolidation des résultats et analyses détaillées	25
3. Description des routes et des trajets.....	26
3.1. Description des routes.....	27
3.1.1. Catégorisation des routes	27
3.1.2. Le profil altimétrique.....	30
3.2. Description des trajets.....	34
3.2.1. Caractérisation d'une journée.....	35
3.2.2. Caractérisation d'un trajet moyen.....	36
4. Etude de facteurs explicatifs.....	38
4.1. Le profil altimétrique	39
4.2. Les aménagements	41
4.2.1. Barrière de péage	41
4.2.2. Rond-point	42
4.3. Le trafic	44
4.3.1. Etude de l'usage du périphérique d'Annecy.....	45
4.3.2. Etude de l'usage du périphérique de Lyon	47
4.3.3. Comparaison des résultats sur les deux périphériques	48
4.4. Les manœuvres et les conditions de livraison.....	49
4.4.1. Résultats pour des véhicules 44 t.....	50
4.4.2. Résultats pour des véhicules 19 t.....	54
4.5. Le vent.....	55
4.5.1. Description des conditions éoliennes à Montélimar	57

4.5.2. Estimation de l'effet du vent.....	58
4.6. Effet de la température du moteur.....	60
4.7. Conclusion.....	62
5. Etude des anomalies et dysfonctionnements.....	64
5.1. Déficit de puissance.....	64
5.2. Emissions de NO _x sur un véhicule diesel.....	67
5.3. Emissions de NO _x sur des véhicules gaz.....	69
5.4. Consommation et émissions de NO _x sur un véhicule gaz – GNL.....	71
5.5. Conclusions.....	72
6. Résultats pour les tracteurs de 44 tonnes.....	73
6.1. Caractérisation des trajets.....	73
6.2. Consommation des véhicules.....	79
6.3. Emissions de CO ₂	83
6.4. Emissions de NO _x	86
7. Résultats pour les porteurs de 19 tonnes.....	93
7.1. Caractérisation des trajets.....	93
7.2. Consommation et émissions de CO ₂ des véhicules.....	95
7.3. Emissions de NO _x	98
8. Modélisation de la consommation et des émissions.....	101
8.1. Modèle de prédiction de la consommation.....	102
8.2. Calibrage et validation du modèle.....	103
8.3. Procédure d'estimation des émissions de NO _x	107
8.4. Génération des cycles de vitesse.....	109
8.4.1. Génération d'un cycle urbain simplifié.....	109
8.4.2. Génération d'un cycle complet.....	111
8.5. Conclusions de la modélisation.....	113
9. Conclusions.....	115
9.1. Variabilité de la consommation et des émissions.....	115
9.2. Comparatif entre les motorisations.....	116
9.3. Concentration des émissions de NO _x en zone urbaine.....	117
Annexe E. Résultats complémentaires.....	118
E.1. Émissions avant réalisation de correctifs par IVECO.....	118
E.2. Émissions après réalisation de correctifs par IVECO.....	120
E.3. Comparaison avant-après.....	121
E.4. Comparaison DX347RQ – EN052KT.....	123

E.5. Usage d'un nouvel indicateur des conditions de trafic	124
E.6. Nouvelle comparaison avant-après	126
E.7. Nouvelles comparaisons sur la base de la consommation	127
E.8. Nouvelles comparaisons sur la base des émissions par kWh	130
E.9. Conclusions	131

1. Introduction

Le projet Equilibre a été lancé à l'initiative de transporteurs pour évaluer comparativement les performances économiques et environnementales des véhicules diesel et des véhicules gaz. L'objectif était l'étude de véhicules en situation réelle d'exploitation en caractérisant l'usage du véhicule depuis le démarrage du moteur en début de journée jusqu'à son arrêt en fin de journée. Une telle étude devait permettre d'adopter le point de vue de l'exploitant sur un véhicule et ainsi de ne pas se limiter aux chiffres annoncés par un constructeur.

Il est essentiel de noter la différence de point de vue entre un motoriste et un transporteur. D'un côté, du point de vue des motoristes, un véhicule dépense de l'énergie pour accélérer, élever une charge et vaincre des forces de frottement. Les variables explicatives sont l'accélération, la vitesse instantanée, la masse, etc. D'un autre côté, du point de vue des transporteurs, cette étude examine les facteurs explicatifs qu'ils peuvent observer directement ou mieux encore maîtriser. Les variables explicatives sont alors la route, le trafic, la météorologie, etc.

L'étude approfondie de situations réelles d'exploitation sur une petite flotte distingue ce projet de projets similaires, réalisés soit avec des véhicules embarquant un grand nombre de capteurs mais hors des conditions d'exploitation réelles¹ soit avec des flottes importantes mais avec un faible recueil d'informations². Autant pour des raisons techniques que pour des raisons de coût, une situation réelle d'exploitation limite les capacités de mesures embarquées et de recueil d'information.

En résumé, cette étude se positionne donc dans une situation intermédiaire et cela sur tous les plans : on ne s'intéresse ni au moteur du véhicule ni aux statistiques macro-économiques, mais à la vision qu'un transporteur a d'un trajet.

Une journée réelle est constituée de multiples opérations de chargement et de déchargement, de trajets ponctués d'incidents, de trajets à vide, d'arrêts, de ravitaillements en carburant, etc. Tous ces points seront abordés, mais l'étude se focalisera néanmoins sur la route empruntée, le trafic, les charges transportées et les manœuvres chez les clients. L'objectif n'est pas de vérifier une évidence – telle qu'une moindre émission moyenne de CO₂ et de NO_x pour des véhicules fonctionnant au gaz³ – mais d'acquérir une connaissance des événements ponctuant une journée et de leurs effets. Les objectifs des transporteurs sont multiples : sélectionner le type de véhicule le plus adapté à un usage et quantifier les gains ; prédire la consommation moyenne d'un nouveau « trajet » au moment d'un appel d'offre pour anticiper son coût (on définit un trajet par l'identité du véhicule, une route et une charge transportée) ; estimer les émissions de NO_x. La récurrence d'un même trajet sur de longues périodes justifie le fait que l'on s'intéresse en premier lieu à une consommation moyenne sur un trajet

¹ D. C. Quiros et al., "Real-World Emissions from Modern Heavy-Duty Diesel, Natural Gas, and Hybrid Diesel Trucks Operating Along Major California Freight Corridors," *Emiss. Control Sci. Technol.*, vol. 2, no. 3, pp. 156–172, Jul. 2016.

² J. Dominguez, F. Mariani, M. Maedge, X. Ribas, and E. Van Gysel, "LNG Blue Corridors position paper," 2015

³ Les taux d'émission de CO₂ sont de 2.7 kg de CO₂ par litre de gazole et de 2.75 kg de CO₂ par kilogramme de gaz. Rapportés aux kWh fournis, les taux d'émissions sont respectivement 0.259 et 0.209 kg/kWh quand on prend les valeurs énergétiques suivantes : 47.25 MJ pour 1 kg de gaz et 37.5 MJ pour un litre de gazole. Le jour où l'efficacité énergétique des moteurs gaz aura rejoint celle des moteurs diesel, le gain en termes d'émission de CO₂ sera donc de l'ordre de 20 %.

récurent, indépendante de conditions de trafic variables, de l'identité du conducteur ou de considérations météorologiques saisonnières.

Le présent rapport, basé sur les données du projet, n'est pas pour autant focalisé sur la comparaison des différents types de motorisation et va au-delà des seuls objectifs des transporteurs. Ainsi, pour l'aménagement du territoire, il est nécessaire de savoir où se concentrent les émissions et quels sont les impacts du trafic et des infrastructures ou aménagements⁴.

Dans ce rapport, en sus des résultats bruts, on va chercher à mettre en évidence quatre points essentiels :

- Le premier est la correction d'un cliché considérant un transport routier dominé par de longues distances parcourues sur autoroute. Comme on va le voir tout de suite ci-dessous, cette correction est de grande importance pour les estimations des émissions de polluants.
- Le second point est l'identification de facteurs explicatifs de la consommation et des émissions, qui ne sont pas toujours ceux auxquels pensent les transporteurs ou les concepteurs et gestionnaires d'infrastructures.
- Le troisième point est l'importance des conditions réelles d'exploitation et de la complexité de la description de l'usage d'un véhicule.
- Le quatrième et dernier point est la grande variabilité des conditions d'exploitation, liée à la multiplicité des facteurs explicatifs, qui rend illusoire la croyance en l'existence de profils type d'exploitation.

S'il fallait ne retenir qu'un seul point ce serait que chaque trajet est particulier.

- Un certain nombre de clichés sont associés au transport routier. L'un d'entre eux est une vision réductrice qui considère surtout le transport sur de longues distances. Il est nécessaire de corriger cette image : « 78% des volumes sont transportés sur moins de 150 km »⁵. Le long-courrier est alors minoritaire par rapport à la distribution ; la figure 1.1 illustre la différence d'usage du réseau routier observée au cours du projet Equilibre suivant le type de mission. A cause des longs trajets, les distances parcourues sur autoroute restent majoritaires, mais la part importante de la distribution fait que celles parcourues en zone urbaine deviennent importantes : au cours du projet Equilibre, les 9 tracteurs de 44 tonnes ont parcouru huit cent mille kilomètres dont 61 % sur autoroute et 26 % en zone urbaine ou péri-urbaine. Ce point est essentiel quand on s'intéresse aux émissions de polluants et en particulier aux émissions de NO_x dont l'impact d'ordre sanitaire est plus problématique en ville qu'à la campagne ; de plus, en zone urbaine les taux d'émission sont beaucoup plus élevés que sur autoroute. Le suivi de six semi-remorques de 44 tonnes, avec des motorisations diesel ou gaz, réalisant soit de la distribution soit du long-courrier, révèle ainsi des émissions de NO_x concentrées en zone urbaine avec des pourcentages variant entre 36 et 80 %. Ainsi, on constate que le sixième véhicule (voir figure 1.2), bien que

⁴ Les infrastructures désignent la route proprement dite avec ses caractéristiques générales, telles que l'existence de bretelles d'accès. Les aménagements sont des caractéristiques plus localisées et non normatives : rond-point, ralentisseur, barrière de péage, feu de signalisation, etc. Ce rapport s'intéresse à l'impact des caractéristiques particulières d'une route sur la consommation et les émissions, qu'il s'agisse des propriétés générales des infrastructures ou des aménagements particuliers. Les émissions de NO_x peuvent être exprimées en g/kWh ou en g/km ; Les études sur les véhicules privilégient la première formulation ; ce rapport, focalisé sur la route, privilégie la seconde formulation.

⁵ <http://www.fntr.fr/espace-documentaire/chiffres-cles/les-chiffres-blancs-du-trm-francais>

réalisant des missions de long-courrier avec un trajet majoritairement autoroutier, émet quand même 51% de ses NO_x en zone urbaine.

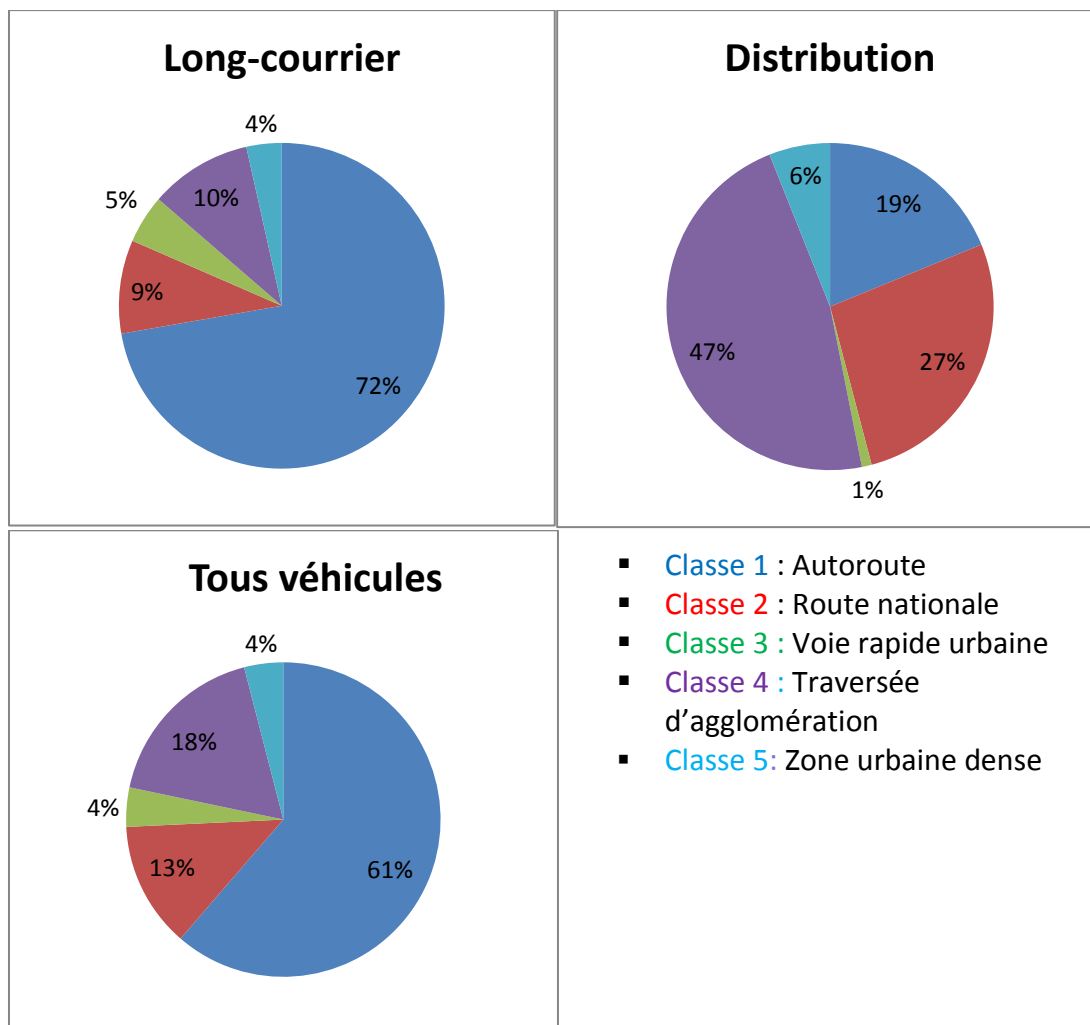


Figure 1.1 : Répartitions des kilométrages des 44 t - vingt-et-un mois de données

- La consommation d'un poids-lourd dépend d'un grand nombre de facteurs : la vitesse de croisière (une vitesse stable sur autoroute), la nature de la route (par exemple, autoroute ou route de campagne), la densité de certains aménagements particuliers (par exemple, rond-point et feu de signalisation), le profil altimétrique, la charge transportée, l'intensité du trafic, les facteurs météorologiques (par exemple, vent et précipitations), la fréquence des arrêts, la fréquence des démarrages à froid, la qualité du carburant, etc. Ces facteurs sont soit du premier ordre soit du second ordre et le classement n'est pas toujours celui auquel pensent les transporteurs. Ainsi la charge transportée n'est pas en soi un facteur du premier ordre ; on verra que ce facteur n'explique la consommation que couplé à d'autres facteurs, tels que le profil altimétrique.

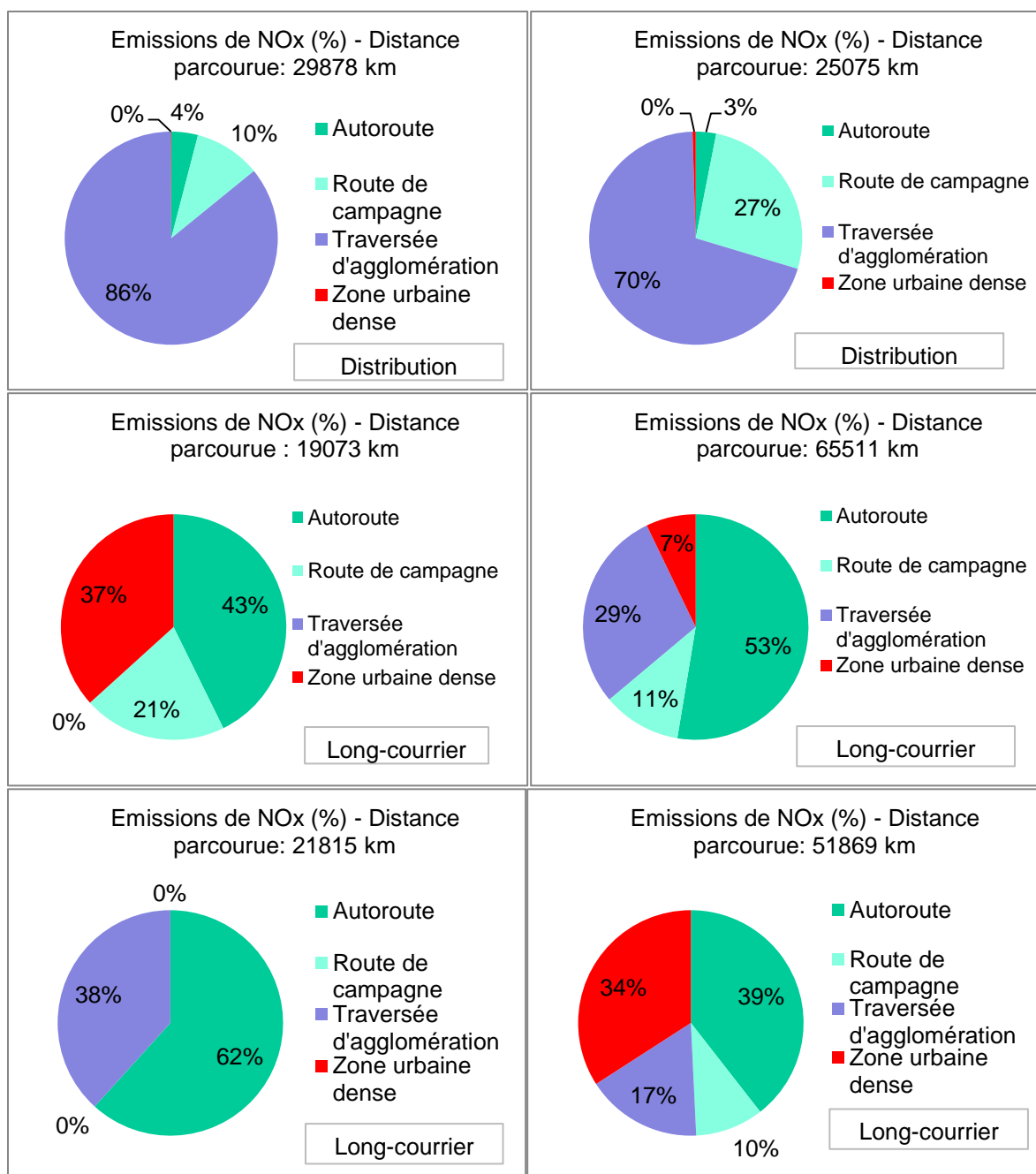


Figure 1.2 : Répartitions des émissions de NO_x - six mois de données

Cette figure a été réalisée au début de projet (six mois de données) sur la flotte alors disponible pour avoir un aperçu de l'usage des véhicules.

On expliquera dans ce rapport que la définition retenue pour les traversées d'agglomérations étend le caractère urbain au-delà du périmètre fixé par les limitations de vitesse.

- Le troisième point est l'étude de véhicules en situation réelle d'exploitation. A la différence des études en laboratoire, l'étude en situation réelle ne permet jamais de faire varier un seul facteur explicatif, en maintenant tous les autres facteurs constants. De plus, ces facteurs sont rarement indépendants. Ainsi les infrastructures routières et les aménagements sont nettement corrélés à l'intensité du trafic, puisque c'est celle-ci qui a justifié leur construction. Du fait

de cette complexité, il est extrêmement difficile de quantifier les effets des facteurs du second ordre et par conséquent ils ont rarement été étudiés de manière approfondie.

- Le quatrième et dernier point est relatif à la variabilité des conditions d'exploitation. Un transporteur qui effectue une mission pour un client réalise un trajet récurrent. Par exemple, une fois par semaine pendant un an, il parcourt le même trajet de 200 kilomètres avec la même charge dans les mêmes conditions de trafic. D'un côté, il peut faire ce trajet en zone rurale peu urbanisée, en plaine, avec une charge de 2 tonnes et avec un trafic fluide. D'un autre côté, un second transporteur peut faire une mission similaire en zone rurale urbanisée (traversées de nombreuses communes), en terrain accidenté, avec une charge de 20 tonnes et avec un trafic dense. Entre ces deux cas extrêmes de trajets, tous les deux décrits comme de la distribution en zone qualifiée de rurale, la consommation varie de plus du simple au double. Une définition trop générale d'une catégorie de mission (par exemple, distribution en zone rurale) est donc insuffisante et il importe de caractériser un trajet plus précisément.

L'autre point remarquable est qu'un parcours annuel de 10.400 kilomètres (52 répétitions de 200 kilomètres), malgré un kilométrage élevé, n'est pas statistiquement significatif de l'ensemble des missions de distribution réalisées en zone qualifiée de rurale.

Pour terminer, les résultats obtenus sur une demi-douzaine de véhicules ne prétendent pas fournir des moyennes représentatives des résultats qui seraient obtenus sur le milliard de kilomètres qui seraient parcourus annuellement par dix-mille véhicules sur l'ensemble du territoire français. Bien plus, au bout des deux années du projet Equilibre, plutôt que de chercher à établir des moyennes, la conclusion est qu'il faut s'intéresser aux variances : le premier objectif de ce rapport est donc de montrer la dispersion des résultats, malgré des kilométrages de plusieurs dizaines de milliers de kilomètres pour chaque véhicule du projet. Le second objectif est une étude fine des trajets. Dans un premier temps, on cherche à expliquer la consommation d'un véhicule sur un trajet de l'ordre de quelques centaines de kilomètres et dont la caractérisation complète n'est connue qu'*a posteriori*. Dans un second temps, bien qu'on ne puisse certes prédire *a priori* la consommation d'un unique trajet, laquelle dépend de facteurs inconnus du transporteur, comme le trafic, la météorologie ou les caractéristiques particulières de la route empruntée, en revanche, connaissant un descriptif général de la route, son profil altimétrique et le poids total en charge, on verra que l'on peut **prédire la consommation moyenne pour une famille de trajets similaires** (les effets du trafic, de la météorologie et les caractéristiques spécifiques de la route sont alors moyennés). Le développement d'un tel modèle de prédiction de la consommation fera l'objet du dernier chapitre du rapport.

Le plan du rapport ne suit pas le déroulement chronologique du projet. Par ailleurs, le rapport n'étant pas destiné à des chercheurs ou des ingénieurs, les détails très techniques, généralement exposés dans des notes intermédiaires au cours du projet, ont été omis. Pour justifier la démarche et les conclusions, on a néanmoins choisi de conserver les grandes lignes de l'argumentation.

Le rapport est divisé en quatre grandes parties :

- la première partie comprend deux chapitres. Le premier chapitre décrit le déroulement du projet. Le second expose la caractérisation des trajets ainsi que les principes qui ont guidé cette caractérisation.
- la seconde partie comprend deux chapitres. Le premier chapitre présente des résultats mettant en évidence les effets de différents facteurs explicatifs de la consommation et des émissions. Le second expose les difficultés rencontrées avec les véhicules au cours de l'expérimentation.
- la troisième partie comprend deux chapitres. Le premier chapitre expose les résultats pour les semi-remorques de 44 tonnes. Le second expose les résultats pour les véhicules porteurs de 19 tonnes.
- la quatrième et dernière partie expose un modèle de prévision de la consommation et des émissions de CO₂ sur un trajet. On explique aussi pourquoi on ne peut obtenir la même précision dans la prévision des émissions de NO_x sur un trajet.

*

**

Du fait de la nouveauté de la technologie du Gaz Naturel Compressé, la mise en œuvre par les transporteurs d'un côté et l'étude scientifique d'un autre côté soulèvent des problématiques particulières. On a donc jugé nécessaire de répondre à certaines interrogations dès l'introduction. Les raisons de ces interrogations sont multiples :

- la composition du gaz n'est pas normalisée (au niveau international) et les moteurs présenteraient une grande sensibilité à cette composition
- il n'existe ni débitmètre, ni jauge fiable de carburant sur les véhicules
 - il est nécessaire de calculer la consommation et de valider ces procédures de calcul
 - en l'absence de jauge fiable, l'estimation au jugé de la consommation conduit à la peur de la panne sèche chez les conducteurs
- la durée d'un plein de gaz est perçue *a priori* comme importante par rapport à un plein de gazole

Pour des véhicules fonctionnant au gaz naturel, la composition du carburant est une donnée essentielle à toute étude : « Ethane et propane ont tendance à diminuer les délais d'inflammation, et augmenter les vitesses de combustion par rapport au méthane, les indices d'octanes sont également plus défavorables que pour le méthane. Ces trois phénomènes conjugués augmentent les risques de cliquetis (inflammation non contrôlée du mélange sous l'effet de la pression cylindre), qui est destructeur pour les pièces du moteur. Le contrôle moteur réagit en enlevant de l'avance à l'allumage (ce qui réduit le rendement), mais au-delà d'une certaine teneur (12 à 15%), ce n'est plus trop gérable. »⁶.

⁶ Communication personnelle de Bernard Guiot (CRMT).

Cette connaissance de la composition du gaz, dépendante du gisement d'origine, est d'autant plus essentielle que sa variabilité est importante. Ainsi, quatre études sur des véhicules gaz annoncent des taux de méthane respectifs de 77, 87, 87 et 92 %. Le problème est que la synthèse de ces études⁷ n'indique pas s'il s'agit de composition molaire ou massique et ne précise ni le taux d'éthane ni le taux de gaz inertes.

1.1. Suivi de la composition du gaz

Dans le cadre du projet Equilibre, la composition a été suivie sur trois des stations alimentées par le réseau GRDF, pendant une durée de deux ans. Cette composition est issue des analyses chromatographiques réalisées journalièrement. Ces analyses indiquent la composition par hydrocarbure, depuis le méthane CH₄ jusqu'aux hydrocarbures les plus lourds C₆₊H_n.

On ne reporte ici que les informations jugées indispensables : le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) ainsi que les taux de méthane, d'éthane et de gaz inertes. Sur deux ans, le PCI moyen est de 47.3 MJ/kg ; l'écart-type de 0.4 MJ/kg reflète une composition très stable. La composition du gaz est donnée dans le tableau 1.1. Elle montre une faible teneur en éthane et en autres hydrocarbures lourds.

	Composition en % molaire Valeur moyenne (écart-type)	Composition en % massique Valeur moyenne (écart-type)
Méthane	92.9 (0.9)	84.5 (1.7)
Ethane	4.4 (0.5)	7.5 (0.7)
Inertes	2.3 (0.4)	4.6 (0.7)
Autres	0.4	3.4

Tableau 1.1 : Composition du gaz sur trois stations - vingt-quatre mois

Au vu de la variabilité de la composition du gaz, selon les fournisseurs, selon les jours, le contrôle de sa composition devrait être une obligation (au moins pour une activité de recherche).

1.2. Contrôle de la consommation de gaz

Les véhicules fonctionnant au gaz naturel comprimé ne disposent ni de jauge de carburant fiable ni de débitmètre. Cette consommation a donc été calculée par le CRMT à partir des mesures à l'échappement et de la cartographie moteur. Durant une première phase du projet, cette consommation calculée a été contrôlée à partir de la facturation des achats de gaz. Ce travail de contrôle s'est révélé complexe du fait de lacunes dans les données, autant pour les véhicules que pour les stations. Pour plus de détails, consulter

⁷ Barouch Giechaskiel, 2018, "Solid Particle Number Emission Factors of Euro VI Heavy-Duty Vehicles on the Road and in the Laboratory", *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 15, 304

un précédent rapport⁸. Il a néanmoins pu être établi que l'erreur sur les estimations de la consommation devait être comprise entre 1 et 3 %. Cette faible erreur n'a pas d'impact pour les conclusions de ce papier.

1.3. Durée des pleins

La réalisation des pleins de carburant et plus particulièrement le temps passé pour réaliser l'opération sont des sujets d'inquiétude pour les transporteurs. La procédure est complexe. Le temps de remplissage est long. La station peut être en panne - appareils défectueux. En l'état actuel, à cause du faible nombre de stations, il faudrait encore ajouter le temps d'attente sur certaines stations ainsi que le temps de déroutement pour rejoindre une station.

Du fait de leur inquiétude, l'estimation par les transporteurs des temps passés a été jugée peu objective. On a donc entrepris une mesure de ces temps passés dans les stations. Comme il est très difficile de savoir où commence et où se termine une opération qui peut comprendre un grand nombre d'arrêts et de micro-déplacements, nous avons imposé notre définition du temps passé. Ce temps est celui écoulé entre le moment où le véhicule arrive sur le site et celui où il le quitte. Ces instants sont déterminés à partir d'un seuil sur la vitesse : considérant un quelconque instant de l'arrêt sur la station, les instants d'arrivée et de départ sont ceux où la vitesse repasse au-dessus du seuil de 40 km/h. Un tel seuil permet d'éliminer les micro-déplacements. Il conduit par contre à inclure d'autres activités réalisées sur le site. C'est fréquemment le cas quand la station est située chez un transporteur ou chez un client. On observe alors des durées qui peuvent être très longues.

Les figures 1.3 et 1.4 illustrent la manière dont est décrite une situation de ravitaillement en gaz à la station de Couzon-au-Mont-d'Or.

⁸ "PROJET Equilibre, Analyse des consommations et émissions des véhicules GNV et Diesel", Livrable 1, 20 février 2017



Figure 1.3 : Activité de ravitaillement en gaz – localisation

La partie en rouge localise le véhicule durant l'arrivée sur la station, le ravitaillement et le départ.

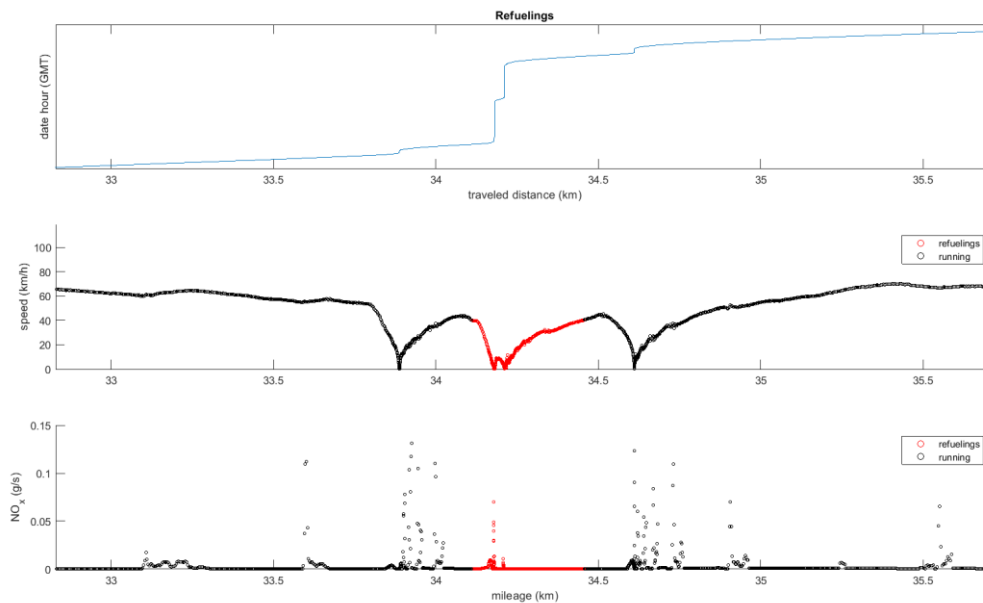


Figure 1.4 : Activité de ravitaillement en gaz – profils de temps, vitesse et émissions

La partie en rouge décrit le profil de vitesse et les émissions de NO_x, durant l'arrivée sur la station, le ravitaillement et le départ.

Les tableaux 1.2 et 1.3 reportent les durées moyennes des opérations de ravitaillement en gaz pour les principales stations utilisées. Ces tableaux sont respectivement associés à des tracteurs de 44 tonnes et des porteurs de 19 tonnes. La durée normale d'un ravitaillement semble être d'une vingtaine de minutes ; on observe des durées de trente minutes sur la station provisoire de Saint-Priest où il n'est pas rare qu'un véhicule doive attendre son tour⁹. Les durées plus élevées témoignent de l'existence d'une autre activité. Ces chiffres infirment donc les craintes des transporteurs relatives à la durée des pleins, vraisemblablement fondées sur des références à des cas exceptionnels¹⁰. En résumé :

Le temps de passage normal en station est de 20 minutes. (Il s'élèverait à 30 minutes en cas d'attente, mais un tel chiffre est lié aux conditions exceptionnelles de l'expérimentation.)

Véhicule	Station	Nombre de jours	Nombre de passages	Durée moyenne
DY491CV	Couzon-au-Mont-d'Or	405	106	21 mn
	Villefranche Sur Saône	-	10	106 mn (+)
	Villefranche Sur Saône – Sotradel (*)	-	343	46 mn
	Bourg En Bresse	-	2	26 mn
	Saint-Priest - Provisoire	-	68	33 mn
EN052KT	Couzon-au-Mont-d'Or	63	2	17 mn
	Villefranche Sur Saône – Sotradel (*)	-	2	21 mn
	Saint-Priest - Provisoire	-	37	34 mn
DX347RQ	Saint-Pierre-en-Faucigny	334	225	21 mn
	Saint-Pierre-en-Faucigny – Prabel	-	51	40 mn
	Cran-Gevrier	-	49	20 mn
EL375RS	Nîmes (**)	202	213	98 mn
	Cran-Gevrier	-	2	34 mn
	Saint-Priest - Provisoire	-	27	32 mn
	Port-Saint-Louis	-	10	93 mn (+)

Tableau 1.2 : Passages en station pour des tracteurs de 44 tonnes

Un ravitaillement est fréquemment concomittant d'autres opérations. En particulier, quand une station est située chez le transporteur ou un client on a un cumul avec des opérations de chargement ou d'attelage.

(*) Stations situées chez le transporteur propriétaire du véhicule.

(**) Station située chez le client.

(+) Événements exceptionnels identifiés (sans intérêt pour le présent rapport).

⁹ Pour le DY491CV, qui utilise les stations de Couzon-au-Mont-d'Or et de Saint-Priest, les « stop & go » par ravitaillement sont respectivement au nombre de 5 et de 12 pour les deux stations. En théorie, au-delà de un, un « stop & go » additionnel s'interprète comme l'avance du véhicule après le plein d'un véhicule qui le précède. En pratique, d'autres faits doivent être pris en compte, comme l'arrêt éventuel du véhicule en sortie de station avant de s'insérer dans le trafic (voir figures 1.3 et 1.4). Surtout, les trajets à très faible vitesse sur des parkings soulèvent des problèmes de mesure liés entre autres raisons aux dérives du GPS ; ce type de mesure particulièrement complexe a donc été considéré comme sortant du cadre de ce projet.

¹⁰ Les problèmes observés relèvent plutôt de la jeunesse de la technologie : faible nombre de stations, impliquant détournements et attentes, mise en œuvre « difficile » des appareils par des conducteurs qui doivent être formés à ces opérations, et enfin appareils défectueux.

Véhicule	Station	Nombre de jours	Nombre de passages	Durée moyenne
EB539DE	Couzon-au-Mont-d'Or	400	31	14 mn
	Villefranche Sur Saône	-	85	23 mn
	Villefranche Sur Saône – Sotradel (*)	-	237	23 mn
	Bourg En Bresse	-	1	20 mn
	Saint-Priest - Provisoire	-	135	23 mn
EA033ST	Saint-Pierre-en-Faucigny	101	113	47 mn
	Saint-Pierre-en-Faucigny – Prabel	-	2	210 mn
DY850ZB	Saint-Pierre-en-Faucigny	148	65	19 mn
	Saint-Pierre-en-Faucigny – Prabel (*)	-	378	45 mn

Tableau 1.3 : Passages en station pour des porteurs de 19 tonnes

(*) Ces stations sont situées chez le transporteur propriétaire du véhicule.

1.4. Quantités achetées

Du fait de l'absence de jauge fiable et de débitmètre, les conducteurs vivent avec la peur de la panne sèche. Cela les conduit à multiplier les passages en station pour faire des pleins partiels. Le tableau 1.4 reporte donc les valeurs moyennes des quantités achetées à chaque passage et reporte le rapport entre ces quantités et la capacité du réservoir du véhicule. Les passages dans une station en panne ont été exclus des statistiques¹¹. On note que l'écart-type est très élevé et qu'il n'est pas corrélé à la quantité moyenne.

Véhicule	Quantité moyenne de gaz et écart-type	Capacité du réservoir	Pourcentage par rapport à la capacité du réservoir
DY491CV	55 kg - σ = 23 kg	137.5 kg	40 %
DX347RQ	82 kg - σ = 27 kg	137.5 kg	60 %
EB539DE	64 kg - σ = 22 kg	137.5 kg	46 %
DY850ZB	84 kg - σ = 20 kg	158.1 kg	53 %

Tableau 1.4 : Quantités achetées en station

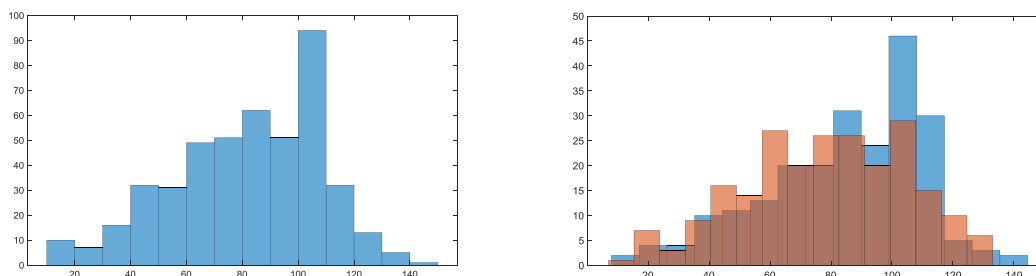


Figure 1.5 : Histogrammes des ravitaillements en carburant - Véhicule DX347RQ

La figure de gauche est la répartition des quantités achetées sur toute la durée du projet.

¹¹ Ces pannes sont généralement indiquées dans les journaux : elles donnent lieu des quantités achetées nulles ou très faibles. On a donc exclu des statistiques les quantités achetées inférieures à 10 kilogrammes.

La figure de droite donne les répartitions sur la première moitié du projet (en bleu) et la seconde moitié du projet (en rouge)

La grande variance des quantités de gaz achetées est visible sur la distribution observée pour un des véhicules de l'expérimentation (voir figure 1.5). Au vu des faibles quantités achetées au cours de certaines opérations (moins du tiers du réservoir), il semble que certains passages en station devraient pouvoir être évités. La question est donc de savoir si une meilleure estimation de la consommation de la part des conducteurs et une plus grande confiance en eux n'a pas conduit à une disparition de ces opérations au cours du projet. On a donc étudié l'évolution des quantités achetées au cours du temps. Pour un des véhicules, l'échantillon a été divisé en deux parties égales. On observe alors que les distributions des achats de carburant sont pratiquement inchangées et que les quantités moyennes achetées vont même en diminuant : on passe de 85 kg à 78 kg. Ces résultats infirment l'hypothèse d'un changement de comportement de la part des conducteurs. Par ailleurs, la disparition des achats de gros volumes pourrait être expliquée par des profils d'exploitation du véhicule différents et des changements de station de ravitaillement.

2. Description et déroulement du projet

Au cours du projet Equilibre un peu plus d'une douzaine de véhicules, tracteurs de 44 tonnes et porteurs de 19 tonnes, ont été équipés. Tous ces véhicules sont à la norme EURO VI. Du fait des aléas de l'expérimentation, les résultats ne sont présentés que pour douze véhicules : neuf tracteurs et trois porteurs. Tous les porteurs ont une motorisation au gaz, quatre tracteurs sont des véhicules diesel, deux sont des véhicules GNC (Gaz Naturel Compressé), un est un véhicule GNL (Gaz Naturel Liquéfié) et deux sont des véhicules gaz avec deux réservoirs (GNC+GNL) . Les véhicules sont décrits dans les tableaux 2.1 et 2.2. Ces véhicules ont intégré l'expérimentation à des dates différentes ; du fait de dysfonctionnements, les séries de données peuvent être incomplètes pour certains véhicules ; à la suite d'interventions des constructeurs, certaines séries ne sont pas homogènes.

	Cylindrée	Puissance	Carburant	Immat.	Exploitant	Exploitat.	Intervent.
SCANIA	9L	340 hp	GNC	DX-347-RQ	Mégevand	03-2016 12-2017	07/2017
IVECO	8L	330 hp	GNL	EA-190-HL	Perrenot	03-2016 12-2017	10/2017
IVECO	9L	400 hp	GNL+GNC	EL-375-RS	Mégevand	05-2017 02-2018	02/2018
SCANIA	9L	340 hp	GNC	DY-491-CV	Sotradel	03-2016 11-2017	
VOLVO	12L	500 hp	Gazole	DE-477-VE	Mégevand	03-2016 12-2017	
IVECO	11L	460 hp	Gazole	DL-928-LJ	Perrenot	03-2016 12-2017	05/2017
DAF	13L	460 hp	Gazole	DS-282-LC	Transalliance	03-2016 12-2016	
SCANIA	13L	450 hp	Gazole	EM-644-EF	Mégevand	05-2017 12-2017	
IVECO	9L	400 hp	GNL+GNC	EN-052-KT	Sotradel	07-2017 11-2017	03/2018

Tableau 2.1 : Description des tracteurs 44t

On rappelle que l'objectif du projet est à la fois une étude en conditions d'exploitation réelle et une comparaison de deux types de motorisation. Il ne s'agit pas de comparer les véhicules des divers constructeurs qui diffèrent sur de nombreux points et en particulier par la puissance du moteur, laquelle varie de 330 hp à 500 hp. Enfin, comme on va le voir dans le rapport, les conditions d'usage de ces véhicules diffèrent. On insiste donc sur le fait qu'en règle générale les différences de caractéristiques des véhicules,

l'imprécision des résultats (< 5 %) et une variabilité non observable des conditions d'usage n'autorisent que des conclusions générales.

La partie expérimentale du projet devait initialement durer 12 mois. Compte tenu des problèmes rencontrés et des questions soulevées au cours du projet, l'expérimentation a été prolongée de 9 mois supplémentaires.

	Cylindrée	Puissance	Carburant	Immat.	Exploitant	Période d'exploitation
IVECO	8L	330 hp	GNC	DY-850-ZB	Prabel	03-2016 : 11-2017
RENAULT	8L	330 hp	GNC	EB-539-DE	Sotradel	04-2016 : 09-2017
SCANIA	9L	333 hp	GNC	EA-033-ST	G7 Savoie	10-2017 : 02-2018

Tableau 1.2 : Description des porteurs 19t

Le projet a assuré le suivi d'une douzaine de véhicules équipés d'une sonde NO_x, d'un GPS et d'un enregistreur sur cartes SD. La sonde n'opère aucune distinction entre les différents oxydes d'azote. L'équipement a été réalisé par la société CRMT.

Les données issues de la sonde NO_x, du GPS et du bus CAN du véhicule sont enregistrées à une fréquence de 5 Hz. Les cartes SD sont récupérées mensuellement. On donne une liste non exhaustive des variables enregistrées :

- longitude et latitude
- date et heure
- étiquette temporelle
- régime moteur
- couple
- puissance
- activation du régulateur de vitesse
- enfoncement de la pédale de frein
- enfoncement de la pédale d'accélération
- température extérieure
- température de l'huile
- température de l'eau
- débit de carburant
- débit de NO_x
- débit d'air à l'échappement
- débit d'oxygène à l'échappement
- vitesse du véhicule (tachymètre)
- vitesse du véhicule à la roue
- indicateurs de défaut moteur

Ce recueil est complété par les journaux de bord, rapportant les opérations de chargement et déchargement, de couplage et découplage de remorque, de ravitaillement en carburant, ainsi que par les enregistrements des Transport Management System (TMS) et du chronotachygraphe qui identifient les conducteurs et leurs activités. Le point important est que le descriptif de la journée d'un véhicule est enrichi d'une variable décrivant à tout instant le poids total en charge du véhicule. Par d'autres

canaux, on récupère les informations météorologiques, les informations sur le trafic et enfin les analyses chromatographiques journalières du gaz pour certaines stations de ravitaillement.

Comme les véhicules gaz (GNC) ne disposent ni de jauge de carburant fiable ni de débitmètre, la consommation est calculée à partir de la composition des gaz d'échappement, de la composition du gaz et d'une cartographie moteur. Le CRMT qui a équipé les véhicules effectue une première estimation de la consommation à partir d'une composition moyenne hypothétique du gaz ; dès que les informations sur la composition du gaz dans la station de ravitaillement sont disponibles, un nouveau calcul est réalisé par l'IFSTTAR en fonction de la composition du dernier plein réalisé. Cette dernière méthode est très approximative. Cette estimation de la consommation a été comparée avec des mesures de plein à plein : comme on l'a déjà dit dans l'introduction, l'estimation sous-estimerait la consommation d'au plus 3 % par rapport aux mesures de plein à plein, qui sont elles-mêmes approximatives du fait de multiples défauts dans la collecte de l'information. Cette faible erreur n'ayant pas d'impact sur les conclusions, on ne reviendra pas sur ce point.

On rappelle aussi que, pour certaines stations, la composition du gaz est connue journalièrement par des analyses chromatographiques. Sur une durée d'un an et sur trois stations, on a ainsi pu calculer un pouvoir calorifique inférieur (Lower Heating Value) de 47.3 MJ/kg avec un écart-type de 0.36 MJ. La variabilité du pouvoir calorifique est donc très inférieure à l'incertitude sur la consommation.

Un prétraitement des données est réalisé par le CRMT : qualification partielle des enregistrements, calcul de la consommation de gaz à partir du régime et de la cartographie moteur, calcul des émissions de CO₂, calcul du couple indiqué et calcul de la puissance indiquée. Le fait que les émissions de CO₂ soient calculées et non mesurées explique que ce papier se focalise sur l'explication de la consommation de carburant et des émissions de NO_x.

L'IFSTTAR est ensuite en charge de la totalité des traitements et des analyses. On ne détaille pas les phases de qualification et de correction des données.

Une attention particulière a été apportée au contrôle des journaux remplis par les transporteurs et en particulier au contrôle des informations relatives à la charge transportée. Ces journaux ont été corrigés tout au long du projet au fur et à mesure des erreurs révélées par de nouvelles analyses.

Au cours du projet, sur divers véhicules, des défauts de fonctionnement ont été constatés, tels que des émissions de NO_x anormales, qui ont nécessité des interventions des constructeurs. Les résultats présentés dans ce papier excluent ces périodes de dysfonctionnement. Les détails techniques des interventions réalisées par les constructeurs ont rarement été disponibles, mais les défauts pourraient se ranger dans trois catégories : défauts de conception (corrigés en général après plus d'un an), pannes (rapidement corrigées par des changements d'équipement) et réglages inadéquats du calculateur. On rappelle entre autres faits qu'un calculateur peut être réglé par le constructeur de manière à diminuer soit la consommation soit les émissions.

2.1. Journaux de bord

Les journaux de bord contiennent trois grandes catégories d'information :

- les opérations de chargement et déchargement ainsi que les opérations de couplage et découplage des remorques
- les opérations de ravitaillement en carburant
- un identifiant du conducteur ; cette information n'a été utilisée que pour vérifier que certains fonctionnements anormaux n'étaient pas liés à un conducteur particulier

Les informations les plus importantes sont celles relatives aux chargements, déchargements, couplages et découplages de remorques. Suivant les véhicules, les journaux de bord sont disponibles sur une partie ou sur la totalité de la durée du projet. Les informations, qui sont saisies manuellement par les conducteurs et les services commerciaux des transporteurs, présentent de nombreuses erreurs, lesquelles ont généralement été corrigées au fur et à mesure du projet. Plusieurs critères permettent de suspecter une erreur de déclaration :

- poids total en charge excédant le poids total autorisé
- absence de retour à un poids à vide (véhicule+remorque) sur une longue période
- ordres de chargement non suivis d'un déchargement
- décalage entre la consommation observée et la consommation prédite par un modèle de consommation

Après détection, les erreurs sont signalées aux transporteurs qui corrigent les journaux. Dans certains cas, plusieurs itérations sont nécessaires. En particulier, certaines erreurs n'ont été détectées que plusieurs mois plus tard grâce à la mise en œuvre d'un modèle estimant la consommation du véhicule.

2.2. Catégorisation des routes

Il existe une catégorisation administrative des routes réparties par exemple en autoroute, voie express, route nationale et départementale. Cette catégorisation est établie sur le critère du responsable de la gestion des infrastructures. Or, il n'y a aucune raison *a priori* qu'une telle catégorisation rende compte de la consommation d'un véhicule ou de ses émissions de polluants. Il existe néanmoins une **corrélation** entre cette catégorisation et la consommation. Cette corrélation est liée à la nature des infrastructures : d'un côté, les infrastructures les plus importantes sont conçues pour écouler un fort trafic le plus économiquement possible (*assurer un débit important implique une vitesse stable du trafic laquelle conduit à une faible consommation*), et, d'un autre côté, du fait de leur importance économique ces grandes infrastructures sont gérées soit au niveau national soit par des organismes spécifiques. De ce fait, on a une corrélation entre la nature administrative de la route et la consommation.

L'exemple ci-dessus met en évidence un point fondamental pour cette étude : l'explication statistique de la consommation¹² passe par la **recherche de corrélations** entre la consommation et des facteurs observables. Par ailleurs, la prédiction de la consommation nécessite que ces facteurs soient connus d'avance.

La corrélation entre la catégorisation administrative des routes et la consommation reste malgré tout assez faible. Il est donc nécessaire d'établir une catégorisation plus adéquate des routes, basée sur le critère de **l'impact présumé** de la route sur cette consommation. Ce travail a été réalisé au tout début du projet. Il a été fondé sur deux idées :

- la catégorisation porte non pas sur une route entière mais sur des sections de route ; idéalement, la longueur d'une section varie entre quelques centaines de mètres et quelques kilomètres.
- l'urbanisation est un facteur explicatif majeur de la consommation. Il y a deux raisons à cela : le trafic croît avec le degré d'urbanisation ; l'urbanisation est à l'origine d'infrastructures et d'aménagements comme des feux de signalisation et ronds-points qui ont un fort impact sur la consommation. Le trafic et ces aménagements sont ensuite responsables de ralentissements puis d'accélération, lesquelles sont à l'origine d'une forte consommation.

Ce travail a conduit à la définition de cinq catégories de sections de route : autoroute et voie express, routes de campagne, voies rapides urbaines, traversées d'agglomération et voies en zone urbaine dense. Une description précise de ces catégories sera exposée dans le chapitre 3.

2.3. Déroulement du projet

Le projet s'est déroulé en deux phases principales. Une première phase de six mois a été une période de mise en place de la chaîne de traitement des données et de validation des hypothèses. Le déroulement de la seconde phase a été conditionné par les événements rencontrés au cours du projet. Une exploitation statistique des données et l'étude de certains facteurs, comme les conditions de trafic et les conditions météorologiques, était initialement prévue. La variabilité des résultats s'est cependant révélée plus importante que prévu et il a alors été nécessaire d'une part d'analyser les trajets plus en détail et d'autre part d'augmenter le kilométrage pour obtenir une plus grande diversité de conditions d'exploitation pour un même véhicule. Des observations ont ensuite révélé des dysfonctionnements ou des anomalies sur plusieurs véhicules. Il a finalement été nécessaire de prolonger de neuf mois la durée de l'expérimentation, le temps que des corrections soient apportées et que les données d'exploitation confirment ou infirment l'efficacité des correctifs

2.3.1. Phase de mise en place

La phase initiale a premièrement été une période de mise en place de la chaîne de traitement, deuxièmement une période de contrôle des valeurs de certaines variables –

¹² En règle générale, on utilise l'expression abrégée « l'explication de la consommation » plutôt que d'écrire systématiquement « l'explication de la consommation et des émissions de polluants ».

consommation de gaz et distance parcourue – et troisièmement une période de validation des hypothèses. On a étudié uniquement les semi-remorques de 44 tonnes durant cette phase.

L'exposé du fonctionnement de la chaîne de traitement des données ne présente pas d'intérêt particulier. On signale simplement la multiplicité des défauts et pannes à l'origine de la perte partielle de données : défauts de fonctionnement du GPS ou du bus du véhicule ; défauts de renseignement des journaux ; enregistreurs défectueux des stations de ravitaillement en gaz ; perte de cartes SD sur lesquelles les données étaient enregistrées ; trajets hors de la zone cartographiée ; pays étrangers et zones privées non cartographiés ; obsolescence de la cartographie¹³ sur certains secteurs ; exclusion de l'analyse des sections de route trop courtes. Certaines de ces pertes de données peuvent suffire à rendre inutilisable l'ensemble des données d'une journée. Le résultat est que sur un total d'un million de kilomètres parcourus durant tout le projet, l'exploitation statistique n'a porté que sur la moitié des distances parcourues. Les premières données ont néanmoins livré des résultats préliminaires pour six semi-remorques, confirmant la pertinence de la catégorisation des routes mais révélant aussi une variabilité intra-classe encore importante. Certains des résultats présentés dans le premier rapport, en février 2017, seront rappelés dans le chapitre suivant.

La qualification de certaines données a été réalisée durant ces six premiers mois. L'estimation de la consommation de gaz a été contrôlée à partir des informations commerciales fournies par les distributeurs de gaz. Le kilométrage parcouru a été contrôlé à partir de différentes méthodes de calcul : intégration des traces GPS (fréquence de 1 Hz), calcul des distances parcourues à partir des vitesses indiquées par le tachymètre¹⁴ (fréquence de 5 Hz) et calcul des distances à partir des données cartographiques, après projection des positions du véhicule sur une route connue. Sur des trajets de quelques dizaines de kilomètres, les écarts relatifs entre les distances calculées par ces trois méthodes sont inférieurs à 1 %. On a finalement retenu les valeurs issues du tachymètre. Enfin, la définition de la mesure des NO_x a été précisée. Cette mesure soulève deux problèmes :

- Les instruments embarqués ne retournent une mesure valide qu'un certain temps après la mise en route du moteur ; il existe ainsi une forte corrélation entre l'indicateur d'invalidité de la mesure et une vitesse nulle (voir figure 2.1). La conséquence majeure est une quantité indéfinie d'émissions qui n'est pas comptabilisée. D'un côté, ces émissions sont potentiellement importantes, puisque réalisées avec un moteur froid¹⁵ ; d'un autre côté, un moteur au ralenti émet très peu. La réponse à la question de l'estimation des quantités émises et non mesurées n'est pas du ressort de ce rapport ; la seule chose de sûre est que les chiffres donnés dans ce rapport doivent être majorés. Le tableau 2.3 indique néanmoins la proportion du temps pour lequel on dispose de mesures. Les chiffres confirment que cette absence de mesures valides concerne surtout les

¹³ La cartographie a été établie au tout début du projet, tandis que les véhicules ont parfois emprunté de nouvelles sections mises en service au cours des deux années de l'expérimentation.

¹⁴ Le calcul de la distance parcourue à partir de la vitesse à la roue dépend d'un calibrage réalisé en fonction d'un diamètre théorique des pneumatiques. Du fait de l'usure des pneumatiques, l'erreur peut atteindre 5 %.

¹⁵ Ces émissions peuvent être mesurées en laboratoire avec un PEMS (Portable Emissions Measurement System), mais cela sort du cadre de cette étude réalisée dans des conditions réelles d'exploitation.

phases de mise en route du véhicule au cours desquelles la vitesse est nulle ; les valeurs élevées pour les véhicules 19 tonnes s'expliquent par des missions de distribution en ville avec de nombreux arrêts. Cet impact des arrêts sera expliqué dans le chapitre suivant.

	Durées avec mesure		Durées sans mesure	
			Vitesse nulle	Vitesse non nulle
44 tonnes gaz	93 %		5 %	2 %
44 tonnes diesel	94 %		5 %	1 %
19 tonnes gaz	84 %		10 %	6 %

Tableau 2.3 : Temps de mesure des NO_x – vingt-et-un mois de données

- En règle générale, ce rapport, focalisé sur l'explication des causes de la consommation et des émissions, ignore les données non explicables parce qu'observées sur des « routes » non identifiées (e.g. parkings privés, cartographie obsolète, etc). Pour pallier ce manque, le tableau 2.4 indique les proportions des quantités de NO_x émises suivant que les routes sont connues ou non identifiées. Pour les semi-remorques, on notera le pourcentage relativement élevé d'émissions théoriquement non localisées, mais qu'en pratique on sait être généralement émises au cours des manœuvres sur les parkings privés des clients des transporteurs. Pour les porteurs, le tableau précédent indiquait une forte proportion d'émissions non comptabilisées, à cause des arrêts (moteur coupé) ; à l'opposé, ce tableau indique une très forte quantité d'émissions localisées, du fait que les livraisons des porteurs se font fréquemment en ville.

	Emissions localisées	Emissions non localisées
44 tonnes gaz	89 %	11 % (*)
44 tonnes diesel	85 %	15 % (*)
19 tonnes gaz	97 %	3 %

Tableau 2.4 : Quantité des émissions de NO_x – vingt-et-un mois de données

Le caractère « localisé » ne se rapporte pas à la position GPS, laquelle est toujours connue, mais à la caractérisation de la route ou de la zone où se trouve le véhicule.

(*) Les quantités ne sont pas très importantes, mais les taux d'émissions kilométriques sont très élevés - les kilométrages non localisés sont de l'ordre de 2 à 3 % du total.

Pour conclure, au vu des chiffres des tableaux 2.3 et 2.4, l'absence de mesure ou l'absence de prise en compte de certaines données ne sont pas de nature à mettre en cause les conclusions de l'étude relatives aux émissions de NO_x.

Cette première phase a enfin mis en évidence l'existence d'anomalies ou de dysfonctionnements sur certains véhicules : déficit de puissance du moteur dans certaines circonstances, émissions de polluants très supérieures aux chiffres attendus. Il a été nécessaire de caractériser précisément les phénomènes pour transmettre les observations aux constructeurs.

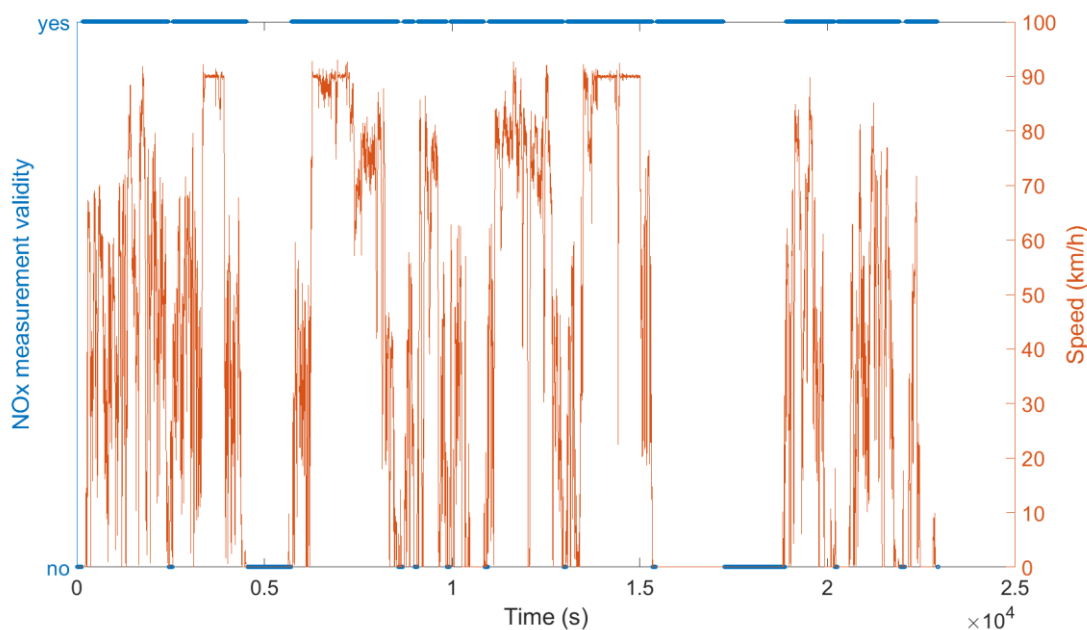


Figure 2.1. Validité de la mesure des NO_x – journée d'un véhicule

2.3.2. Consolidation des résultats et analyses détaillées

La seconde phase du projet a comporté trois principaux volets. Le premier volet a été la consolidation des résultats statistiques :

- trois nouveaux six semi-remorques et un porteur de 19 tonnes ont intégré la flotte de véhicules
- certains véhicules ont changé de mission pour obtenir une plus grande diversité d'usage pour un même véhicule

La première partie du projet avait confirmé la pertinence d'une explication de la consommation par les facteurs du premier ordre :

- une catégorisation spécifique des routes par l'IFSTTAR
- le profil altimétrique de la route
- le poids total en charge du véhicule.

Il demeurerait néanmoins une variabilité importante des résultats au sein de chaque catégorie de route. Le second volet a donc été une étude plus approfondie de divers facteurs explicatifs de cette variabilité résiduelle : aménagements, conditions de trafic, conditions météorologiques, trajets en zone urbaine, démarrage à froid, manœuvres des véhicules, etc.

Le troisième volet a été la reprise de campagnes de mesure après les interventions des constructeurs sur les véhicules présentant des anomalies de fonctionnement et la qualification des correctifs par le projet Equilibre.

Pour terminer, la tâche de développement d'un modèle prédictif de la consommation s'est étalée sur toute la durée du projet.

3. Description des routes et des trajets

L'usage d'un véhicule peut être décrit à différentes échelles : microscopique, macroscopique et mésoscopique. Au niveau microscopique, un ingénieur décrit le fonctionnement d'un moteur avec une échelle de temps de l'ordre de la dixième de seconde et une échelle spatiale de l'ordre du mètre. Les variables explicatives sont la vitesse, l'accélération, le couple, la puissance, etc. A l'autre extrémité, un économiste décrit l'usage d'une flotte de véhicules parcourant des centaines de milliers de kilomètres à l'échelle de l'année. Un transporteur est quant à lui intéressé par une échelle intermédiaire dictée par l'usage d'un véhicule sur une journée pour effectuer un certain nombre d'ordres de transport. La consommation sur une journée est alors exprimée comme la somme de la consommation sur l'ensemble des sections de route parcourues, où idéalement une section de route est un tronçon de quelques centaines de mètres. L'échelle de temps, déterminée par le temps de parcours, est alors de quelques dizaines de secondes. On est donc intéressé par des facteurs explicatifs observables dans ces échelles de temps et d'espace.

Le principe de départ est la cause physique : la consommation résulte des phases d'accélération ou plus précisément de l'enfoncement de la pédale d'accélération. L'instabilité de la vitesse sur une période de quelques minutes, qui signifie une succession de phases de ralentissements et d'accélération, devient ainsi une variable explicative¹⁶ d'une consommation élevée. Enfin, on établit une seconde corrélation entre une vitesse instable et une faible vitesse moyenne : pour un poids-lourd, qui tend à rouler à une vitesse stabilisée de 90 km/h, une vitesse moyenne de 45 km/h peut s'interpréter comme un véhicule qui soit accélère de 0 à 90 km/h soit décélère de 90 à 0 km/h. Cette **corrélation négative entre la vitesse moyenne et la consommation** se vérifie sur toute la plage des vitesses pour des poids-lourds. A l'opposé, cette corrélation négative n'existera pas dans le cas de véhicules particuliers pour lesquels deux facteurs, ayant des conséquences opposées sur la vitesse moyenne, expliquent une consommation élevée : une vitesse instable, dont la conséquence est une vitesse moyenne faible ; des vitesses de croisière élevées (e.g. 130 km/h), dont la conséquence est une vitesse moyenne élevée¹⁷. On insiste donc sur la distinction entre une vitesse moyenne, dont la mesure inclut *a priori* des phases d'instabilité, et une vitesse de croisière, stable par définition.

Pour un poids-lourd, la vitesse moyenne est négativement corrélée à la consommation.

¹⁶ En statistique, une variable « explicative » d'une observation n'est pas un facteur causal, mais une variable corrélée à l'observation.

¹⁷ Bien entendu, la consommation d'un poids-lourd est aussi plus faible avec une vitesse de croisière de 80 km/h qu'avec une vitesse de 90 km/h, mais la question de cette variabilité ne se pose pas au moment de l'analyse des données parce qu'au cours d'un trajet un véhicule n'adopte qu'une seule vitesse de croisière. Il n'en est pas de même pour un véhicule particulier dont la vitesse de croisière varie entre 90 et 130 km/h sur un même trajet.

Le principe exposé ci-dessus est un guide sûr pour une catégorisation *a priori* des sections de route : une section qui contient une portion où la vitesse maximale est réduite¹⁸ sera une section où la consommation sera élevée.

Dans le cadre du projet Equilibre, la catégorisation des routes a été focalisée sur le principal facteur limitant la vitesse : l'urbanisation.

3.1. Description des routes

La description des routes a été établie à partir des données de l'Institut Géographique National¹⁹. Les 31 départements concernés par le projet appartiennent aux régions suivantes : Rhône-Alpes, Bourgogne, Auvergne, Franche-Comté, Provence-Alpes-Côte-d'Azur et Languedoc-Roussillon. A partir de ces données, on a construit à l'IFSTTAR un graphe de 1.800.000 nœuds et 3.600.000 arcs décrivant un réseau de 400.224 km.

3.1.1. Catégorisation des routes

La catégorisation des sections de route établie à l'IFSTTAR a été fondée sur l'identification de variables observables corrélées au degré d'urbanisation. Cette approche a conduit à définir cinq catégories de sections de route, catégories pensées en fonction de l'usage par des poids-lourds :

- **Autoroutes** : les autoroutes et voies express sont des routes réservées au trafic automobile, normalement dépourvues d'intersection. Hors conditions exceptionnelles, le trafic s'écoule avec une vitesse stable.
- **Voies Rapides Urbaines (VRU)** : une voie rapide urbaine est une route réservée au trafic automobile, normalement dépourvue d'intersection mais avec de fréquentes bretelles d'accès. Notre définition de cette catégorie inclut les boulevards périphériques et les axes autoroutiers pénétrants à l'approche des grandes cités. En moyenne, l'intensité du trafic et les nombreuses bretelles rendent la vitesse plus instable que sur autoroute, ce qui impacte la consommation et surtout les émissions. Cette catégorisation laisse de côté le cas des conditions exceptionnelles, telles que les pics de congestion.
- **Zone urbaines denses** : les accès des centres-villes étant généralement interdits aux poids-lourds, une zone urbaine dense renvoie le plus souvent aux traversées de quelques petites villes et surtout aux banlieues des grandes villes où sont concentrés les centres commerciaux et les zones industrielles. On a retenu un

¹⁸ Une section où la vitesse maximale est réduite (e.g. 70 km/h, 50 km/h) est une section où les ralentissements et réaccélération sont fréquents (sinuosité de la route, signalisation, trafic, interactions avec les riverains de la route, etc.)

¹⁹ La base BD TOPO ® a fourni la description des routes. Elle décrit la totalité du réseau routier français avec une précision métrique, sachant qu'une route est décrite sous forme filaire par son axe médian. Dans l'ultime phase du projet, l'altimétrie a été recalculée à partir des bases RGE ALTI ® avec un pas de 5 mètres. Tous les résultats présentés dans le rapport dépendent cependant des données altimétriques de la base BD TOPO ®.

critère de densité pour définir de telles zones : 1000 habitants par km², ce qui représente 900 communes en France sur un total de 36.000.

- **Traversées d'agglomération** : par définition, une traversée d'agglomération (villages et très petites villes) pourrait être délimitée par les panneaux de limitation de vitesse. On a néanmoins étendu cette catégorisation au-delà des panneaux de limitation de vitesse, parce que ceux-ci ne délimitent pas la portion de route impactée par cette urbanisation. Cette extension est justifiée par les raisons pour lesquelles les approches d'une agglomération ont un impact sur l'instabilité de la vitesse : le trafic s'accroît ; la présence d'aménagements, tels que des ronds-points ; l'accélération d'un véhicule en sortie d'agglomération. Du fait de ces multiples causes, il n'existe pas de règle objective qui permette de dire jusqu'à quelle distance au-delà d'un panneau de vitesse il faut prolonger la catégorisation en traversée d'agglomération.

Dans le cadre du projet Equilibre, cette catégorisation a été effectuée en fonction des données disponibles. Ainsi, en France, les routes sont numérotées (e.g. N7), mais, dans les villes et villages, les rues portent un nom (e.g. rue Adolphe Thiers) ; surtout les grandes routes qui quittent une agglomération portent fréquemment le même nom que la rue qu'elles prolongent (e.g. route de Grenoble). Ce critère de dénomination des routes principales permet de prolonger la catégorisation en traversée d'agglomération au-delà du strict périmètre urbain, mais sur une longueur arbitraire.

Lorsque la population est concentrée le long d'axes routiers (e.g. vallées) et que les villages se suivent de manière rapprochée, cette extension du périmètre de la traversée d'agglomération explique l'observation de kilométrages importants ainsi catégorisés dans des zones rurales.

- **Routes de campagne** : cette catégorie est la valeur par défaut pour toutes les sections qui n'entrent pas dans les catégories précédentes et de ce fait elle présente une grande hétérogénéité. Par exemple, une route où la vitesse est limitée à 80 km/h mais située à la périphérie d'une grande ville peut présenter des caractéristiques proches d'une traversée d'agglomération : fort trafic et aménagements (e.g. rond-point, ralentisseur) responsables d'une forte consommation. Une telle route a en fait peu de points communs avec une départementale en pleine campagne.

On ne détaillera pas plus les règles de catégorisation qui n'ont pas un intérêt majeur et dépendent de caractéristiques de voiries et d'urbanisation propres à chaque pays. Seul le principe compte : une catégorisation basée sur l'impact moyen présumé sur la consommation et les émissions²⁰. On notera néanmoins qu'il serait possible d'améliorer le descriptif d'une route à partir d'une évaluation de la densité des aménagements et

²⁰ Du point de vue environnemental, la catégorisation des routes en fonction du paramètre d'urbanisation présente une seconde utilité : la localisation des émissions de polluants par type de zone. Dans le cadre du projet Equilibre, compte tenu du sujet d'intérêt des transporteurs, on a utilisé une seule catégorisation de la route. Il aurait néanmoins été préférable de définir deux variables descriptives d'une section de route : une variable décrivant la catégorie du point de vue de la consommation ; une variable binaire décrivant la catégorie urbaine ou rurale de la zone d'émission. On notera que la délimitation d'une zone d'émission est aussi problématique que celle d'une zone de consommation : un panneau de limitation de vitesse ne délimite pas le périmètre d'urbanisation ; les émissions se diffusent au-delà des panneaux.

autres caractéristiques : ronds-points, ralentisseurs, feux de signalisation, intersections, etc.

A partir des données de l'expérimentation, la définition des cinq catégories a été validée statistiquement au début du projet ; les résultats ne sont pas présentés pour les voies rapides urbaines car les données étaient alors trop peu nombreuses. Cette validation repose sur deux critères explicatifs de la consommation : la vitesse moyenne, laquelle est négativement corrélée à la consommation ; le nombre de « stop & go »²¹. On vérifiera dans les chapitres suivants que l'on obtient effectivement des consommations corrélées aux catégories établies. Les tableaux 3.1 et 3.2 reportent des statistiques établies pour six véhicules de 44 tonnes durant une première phase du projet. La séparabilité des classes est validée par des tests de Wilcoxon Mann-Whitney avec un niveau de significativité à 1 % aussi bien pour la vitesse moyenne que pour le nombre de « stop & go ». Bien que les tests de Wilcoxon Mann-Whitney confirment amplement la pertinence de la catégorisation, une variabilité importante du nombre de « stop & go » demeure au sein d'une classe.

Véhicule 44 t	Autoroute	Route de Campagne	Traversée Agglomération	Urbain Dense
DX347RQ	1	15	32	-
DY491CV	0	4	31	27
EA190HL	1	5	8	75
DE477VE	1	15	39	71
DL928LJ	1	2	33	-
DS282LC	1	7	24	80

Tableau 3.1: Nombre de « stop & go » aux cent kilomètres – six mois de données

Véhicule 44 t	Autoroute	Route de campagne	Traversée Agglomération	Urbain Dense
DX347RQ	80	54	47	-
DY491CV	82	61	41	32
EA190HL	79	53	42	28
DE477VE	85	53	44	34
DL928LJ	81	54	42	-
DS282LC	81	53	38	29

Tableau 3.2 : Vitesses moyennes (km/h) – six mois de données

La pertinence de la catégorisation des routes a été confirmée ultérieurement d'une part sur des échantillons de plus grande dimension et d'autre part sur des véhicules porteurs de 19 tonnes. Une fois la pertinence de cette catégorisation démontrée, on a jugé que le critère du nombre de « stop & go » était suffisamment représentatif d'une catégorie de route. On observe alors que, d'un côté, les résultats obtenus pour les véhicules de 19 tonnes confirment la pertinence de la catégorisation (voir tableau 3.3), et que, d'un autre côté, ils révèlent les différences d'exploitation entre des tracteurs de 44 tonnes et des porteurs de 19 tonnes (voir tableaux 3.1 et 3.3) : le nombre de « stop & go » est deux fois plus élevé en urbain pour des véhicules de 19 tonnes, lesquels effectuent de la distribution en centre-ville. On notera qu'à l'opposé, pour les 44 tonnes et les 19 tonnes,

²¹ Après un filtrage adapté des vitesses (élimination des hautes fréquences en particulier), un « stop & go » est défini par un « point » d'inflexion avec une vitesse nulle.

le nombre de « stop & go » est similaire sur autoroute et route de campagne, similarité témoignant cette fois-ci de conditions de circulation identiques.

Le plus grand nombre de « stop & go » pour des véhicules de 19 tonnes a deux explications. La première est que l'écoulement du trafic est plus haché en centre-ville que dans une zone industrielle ou commerciale de la banlieue d'une grande agglomération. La seconde est que typiquement le profil de distribution en centre-ville par un véhicule de 19 tonnes implique de nombreuses livraisons, et par conséquent de nombreux arrêts et redémarrages, tandis que le profil de distribution par un véhicule de 44 tonnes implique souvent une livraison unique.

Quand le nombre d'arrêts d'un véhicule est très élevé, la consommation totale est fortement déterminée par le nombre de redémarrages. A cause d'une trop grande variabilité intra-classe, la catégorie de la route (e.g. urbain dense) n'est alors plus suffisamment explicative de la consommation : avec 204 « stop & go » en urbain dense l'EA033ST présente des conditions d'exploitation plus sévères que le DY850ZB avec 141 « stop & go ».

Véhicule	Autoroute	Route de Campagne	Traversée Agglomération	Urbain Dense
DY850ZB	1	19	71	141
EB539DE	4	9	82	174
EA033ST	1	10	51	204

Tableau 3.3 : Nombre de « stop & go » aux cent kilomètres

Pour résumer on tire trois conclusions d'une catégorisation des sections de route en fonction de l'usage qui en est fait par des poids-lourds.

- 1. La catégorisation des routes est un facteur explicatif pertinent.**
- 2. L'urbanisation est un facteur explicatif majeur de l'instabilité de la vitesse et par conséquent de la consommation.**
- 3. Une variabilité importante demeure au sein d'une catégorie, en particulier en milieu urbain où le type de mission du véhicule est un facteur explicatif majeur.**

3.1.2. Le profil altimétrique

Le profil altimétrique détermine la consommation d'une manière extrêmement complexe. Pour rendre compte d'un effet moyen de ce profil, on a donc dû réaliser de nombreuses approximations, lesquelles ne seront complètement justifiées que par le résultat final. On insiste sur le fait que notre objectif n'est pas d'expliquer le comportement physique des véhicules, mais d'établir des constats statistiques.

Le dénivelé est un facteur explicatif majeur de la consommation : la dépense d'énergie pour élever une charge. La figure 3.1 n'est qu'un exemple illustratif de cette affirmation :

pour un véhicule qui a un poids total en charge de 30 tonnes et roule à 90 km/h, une pente de 1 % augmente la consommation moyenne de 45 %²².

Cette observation préliminaire permet de formuler un premier avertissement : bien qu'une pente de 1 % soit jugée comme faible et que par conséquent elle soit associée à des trajets en plaine, l'incidence sur la consommation est en fait très élevée. Sur un trajet dont le dénivelé total est nul, ce n'est que le phénomène de compensation quand la pente est négative qui limite le surcroît de consommation. Cependant cette phase de compensation n'est pas parfaite et elle se révèle très variable ; les premiers kilomètres du trajet de la figure 3.1 illustrent ce phénomène de compensation partielle.

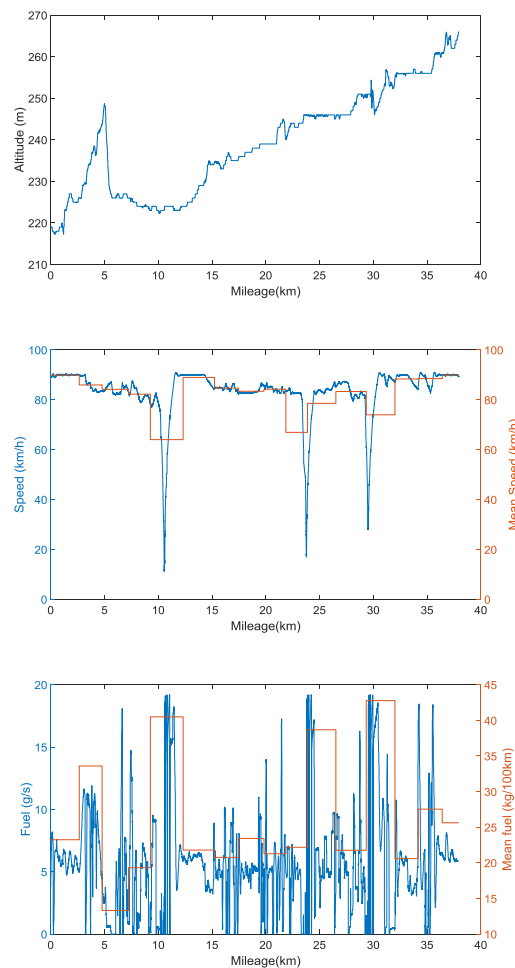


Figure 3.1 : Consommation en fonction du profil altimétrique et de la vitesse

Sur la troisième figure, le premier pic de consommation moyenne (en rouge) est associé au pic d'altitude sur la première figure, avec une pente ascendante de 1 %. Il est suivi d'un pic négatif de consommation dans la phase de descente ultérieure. Finalement, la consommation moyenne (kg/100 km) entre les kilomètres 2 et 6 est à peine supérieure à la consommation sur les deux premiers kilomètres.

²² Ce résultat ne s'extrapole pas à des pentes supérieures, car la surconsommation ne dépend pas que de l'élévation d'une charge à une certaine altitude. L'augmentation de la pente, qui entraîne une réduction de la vitesse, ainsi que le plafonnement de la puissance du moteur font que les conditions de roulage ne sont pas identiques.

Dans le cadre du projet Equilibre, pour l'explication de la consommation, on a retenu une approche simple compatible avec les données disponibles. *Chaque section de route, dont la pente est supposée de signe constant, est caractérisée par un dénivelé, qui est soit positif soit négatif.* Le descriptif d'une route est alors complété par deux variables : le cumul des dénivelés positifs sur l'ensemble des sections ; le cumul des dénivelés négatifs sur l'ensemble des sections²³. En pratique, comme la plupart des journées impliquent un retour au point de départ ($\Delta z_+ = \Delta z_-$), on se contente généralement du cumul des dénivelés positifs pour une caractérisation macroscopique d'un trajet²⁴.

Au cours du projet, on a été confronté à des approches très macroscopiques prétendant caractériser les routes par les pentes rencontrées : trajets en plaine, en terrain accidenté et en montagne. Cette caractérisation qui est réalisée uniquement en fonction des pentes maximales des routes se révèle beaucoup trop pauvre comparée à celle basée sur le cumul des dénivelés²⁵. Elle soulève cependant la question de l'effet de la pente.

Cette question de l'effet de la pente est illustrée par l'interprétation de la figure 3.2. produite à partir des trajets autoroutiers de tous les véhicules diesel. On a réparti les sections de tous les trajets réalisés en trois classes en fonction de l'intensité de la pente. La figure donne la consommation moyenne en fonction des pentes rencontrées, sachant que le dénivelé total est nul pour chaque classe. On observe ainsi une consommation très élevée sur les sections dont les pentes sont comprises entre 2 et 5 %. Ce résultat s'explique d'abord par le fait que, en valeur absolue, les pentes moyennes sont respectivement de 0.5, 1.5 et 3.5 % pour les trois classes et que les cumuls des dénivelés positifs sont dans le même rapport. Cependant, entre les deux premières classes de pentes, le différentiel de consommation est de 1.3 litres pour une différence de cumul des dénivelés positifs égale à 1 %, alors qu'entre les deux dernières classes de pentes, le différentiel de consommation est de 10.9 litres pour une différence de cumul des dénivelés positifs égale à 2 %. Ce très fort différentiel de consommation par unité de dénivelé signifie que la pente est en soi un facteur explicatif.

En résumé, le paragraphe précédent, basé sur les observations de la figure 3.2, démontre que le surcoût de consommation n'est pas le même suivant que l'on monte mille mètres avec une pente de 1 % ou de 5 %. Pour de fortes pentes (> 2 %), la consommation augmente très fortement. En théorie, le cumul des dénivelés positifs ne suffit donc pas à expliquer la surconsommation ; cependant, en pratique, on verra dans le chapitre 8 que l'on prédit la consommation moyenne avec une bonne précision en ne tenant compte que du cumul des dénivelés positifs²⁶. Ce constat montre simplement que, sur un trajet complet, l'impact de la pente est faible.

Différents cas de sections planes montrent par ailleurs que ni le dénivelé ni la pente ne suffisent à caractériser une section :

²³ La valeur du cumul dépend de l'échelle de description des arcs : le cumul sera plus faible pour une cartographie à plus petite échelle avec un plus fort lissage du profil altimétrique.

²⁴ Cet indicateur rend compte de l'impact des dénivelés sur l'augmentation de la consommation, avec une réduction un peu moindre de la consommation durant les descentes (en supposant un dénivelé total nul). Si un trajet ne comportait que des dénivelés positifs, la consommation kilométrique observée serait évidemment beaucoup plus élevée.

²⁵ On rappelle que le dénivelé est l'intégrale de la pente en fonction de la distance parcourue.

²⁶ Ces résultats s'obtiennent sur des trajets en Savoie (autoroute A41) et dans le Massif Central (autoroute A89) avec un important kilométrage (21 % du total) réalisé avec des pentes comprises entre 2 et 5%.

- une section plane, précédée et suivie de sections planes
- une section plane, précédée d'une descente, où le véhicule poursuit sur sa lancée
- une section plane, suivie d'une montée, où le véhicule accélère

Les consommations moyennes varient énormément pour ces trois cas de sections planes. Elles dépendent des pentes des sections amont et aval, mais aussi de la longueur des sections. Sans rentrer plus en avant dans les détails, il apparaît donc que le profil altimétrique conditionne la consommation d'une manière très complexe et que la pente de la section n'est qu'une variable explicative parmi d'autres. Pour cette raison, on a choisi de se limiter au facteur le plus explicatif (le dénivelé) et de produire ensuite une estimation de la consommation moyennant tous les autres facteurs explicatifs.

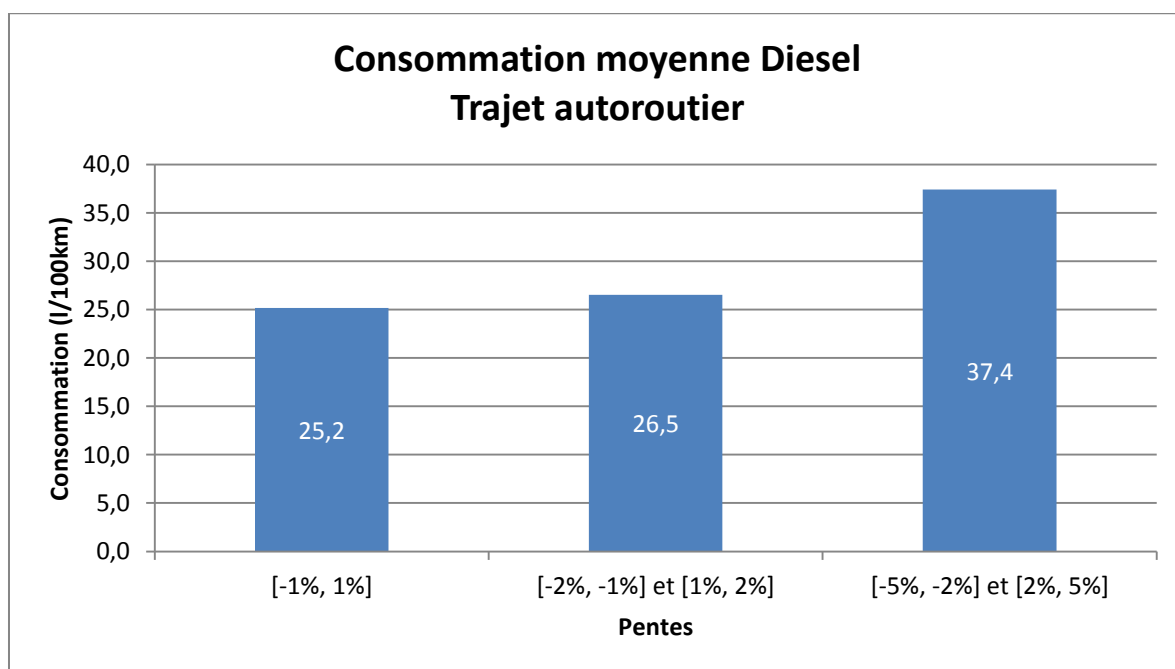


Figure 3.2 : Consommation kilométrique en fonction de la pente

Chaque barre est produite en agrégeant les résultats sur des sections d'autoroute dont la pente est comprise dans les intervalles spécifiés. Pour chacune des barres, le dénivelé total sur l'ensemble des kilomètres parcourus est nul.

Les distances parcourues sont respectivement : 51.000, 17.000 et 18.000 kilomètres.

On notera que sur autoroute, où les sections sont de grande longueur, les pentes moyennes sont précises. Ce n'est pas le cas en urbain où les sections sont très courtes.

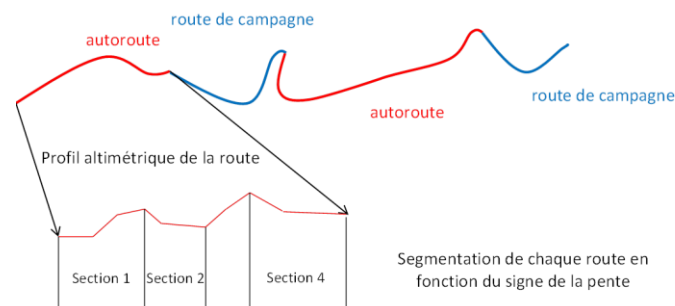
On insiste sur le fait que pour le dénivelé, comme pour tous les autres facteurs explicatifs étudiés au cours du projet Equilibre, on ne prétend pas expliquer la consommation sur une section de route particulière mais donner une valeur moyenne valide pour des distances parcourues de plusieurs centaines de kilomètres dans des situations très diverses.

A l'issue de cette étude préliminaire, il apparaît que le profil altimétrique de la route conditionne la consommation d'une manière très complexe. On peut néanmoins arriver à expliquer la consommation moyenne uniquement à partir de l'expression des dénivelés. Deux conclusions majeures s'imposent :

- 1. Le cumul des dénivelés positifs est un bon indicateur macroscopique d'un trajet.**
- 2. Une typologie des routes en fonction du type de terrain (plaine, terrain accidenté et montagne) est une description beaucoup trop pauvre.**

3.2. Description des trajets

La position d'un véhicule est connue à partir des coordonnées retournées par le GPS. Un véhicule est ensuite localisé sur un arc du réseau, lequel porte des informations sur la catégorie de la route et le dénivelé. A l'issue de cette localisation, le descriptif initial de la journée d'un véhicule est enrichi de deux variables indiquant l'identité de l'arc et la catégorie de la route. A partir de ce descriptif enrichi, ultérieurement, il sera possible de segmenter le trajet d'un véhicule en sections homogènes. Une section homogène est la concaténation d'arcs de même catégorie et de même signe du dénivelé – le poids total en charge du véhicule doit aussi être inchangé. Le dénivelé de la section est le cumul des dénivelés des arcs. Le trajet complet est une séquence de sections homogènes (voir figure 3.3).



Le taux de succès de la localisation sur une route du réseau est de l'ordre de 98 %, avec une distance moyenne de 3.5 mètres entre les coordonnées du véhicule et le point de projection sur le réseau. Les 2 % de points non projetables (jugés trop éloignés) correspondent généralement à la présence du véhicule sur des parties privées, en dehors du réseau cartographié. Il existe quelques autres causes d'échec à la localisation sur le réseau : l'obsolescence des données cartographiques ; un trajet situé au-delà des frontières de la zone cartographiée (Suisse et Italie) ; un usage anormal de la voirie (circulation à contresens dû à une déviation de la circulation) ; un défaut de fonctionnement du GPS.

De nombreux points non projetés sur le réseau correspondent à des livraisons sur des parties privées. Comme les déplacements associés à des livraisons se font à faible

vitesse, en pourcentage, le kilométrage parcouru sur une zone non cartographiée est proportionnellement plus faible que la durée écoulée²⁷. En revanche, la consommation et les émissions d'un tracteur de 44 tonnes durant de telles phases de manœuvre sont extrêmement élevées (voir figure 3.4). On ne peut donc ignorer ces 2 % de points non localisés sur le réseau.

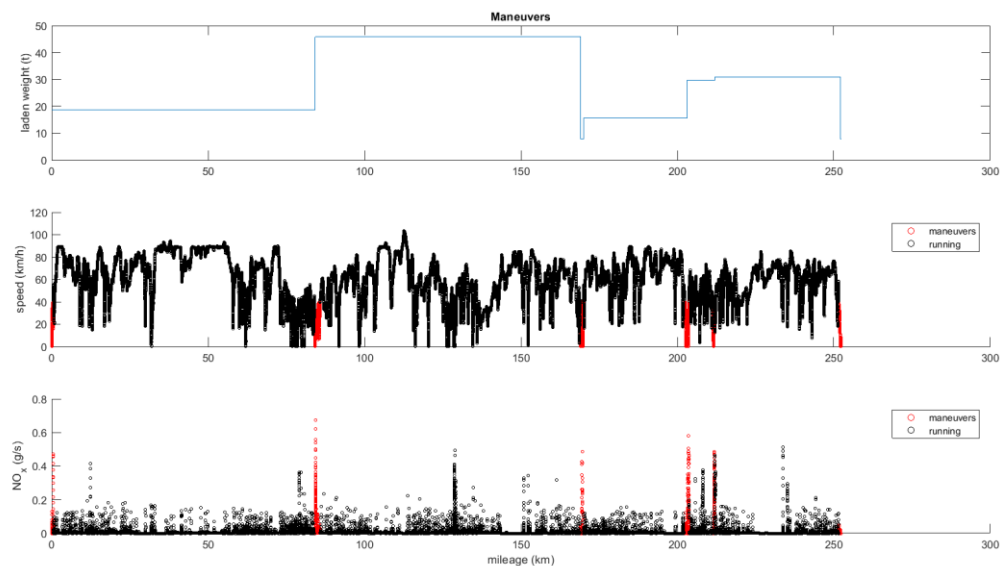


Figure 3.4 : Emissions de NO_x durant une journée – véhicule GAZ

Les manœuvres sont très localisées, dans l'espace, avec des taux d'émission très élevés.

3.2.1. Caractérisation d'une journée

Du point de vue de la consommation, la journée d'un véhicule peut être décomposée en deux grandes catégories d'activité : les phases de déplacement et les phases de manœuvre. Les manœuvres sont associées aux opérations de chargement et déchargement ainsi qu'aux opérations de couplage et découplage des remorques. Les arrêts liés aux phases de repos, les opérations de ravitaillement en carburant et les passages en douane sont des activités dont l'impact sur la consommation est marginal.

Bien que la plupart des points non localisés sur le réseau correspondent à des phases de manœuvre, il n'existe pas de bijection entre ces deux ensembles : certains des points non projetés ne correspondent pas à des manœuvres ; de nombreuses manœuvres sont localisées à tort ou à raison sur le réseau cartographié. On a deux cas de localisation de manœuvre sur le réseau : une manœuvre peut être effectivement réalisée sur la partie cartographiée du réseau ; compte tenu de la marge d'erreur tolérée²⁸ dans les

²⁷ Le nombre de points est proportionnel à la durée écoulée, moteur allumé. Dans ce type de situation (faible kilométrage sur un parking), il est fréquemment proposé de remplacer la consommation kilométrique par la consommation horaire. Cette proposition ne paraît pas judicieuse, car outre le fait qu'elle introduit un nouveau critère difficile à comparer au précédent, la définition et la mesure de la durée sont problématiques : le temps passé moteur allumé, le temps passé avec une vitesse non nulle, le temps passé sur le site ?

²⁸ D'un côté, la précision du GPS en campagne et la précision de la cartographie autorisent une faible marge d'erreur (≤ 10 mètres), mais d'un autre côté l'imprécision du GPS en ville impose une marge d'erreur élevée (≥ 15 mètres). C'est cette dernière valeur qui a été retenue.

opérations de projection, un véhicule situé sur une zone très proche du réseau cartographié peut être à tort localisé sur celui-ci.

Dans le cas du projet Equilibre, on a abordé la description d'une journée avec deux angles d'approche différents : la description des phases de déplacement ; la description des manœuvres. La phase de déplacement a été décrite à partir des 98 % des points projetés sur le réseau ; on a laissé de côté les 2 % restants. La localisation temporelle et spatiale des activités de manœuvre a été réalisée à partir de l'exploitation des journaux de bord, indiquant les opérations de chargement, déchargement, couplage et découplage ; une autre approche est possible car, une fois le descriptif de la journée produit, les ruptures de charge suffisent à localiser les phases de manœuvre. On notera que, du fait des projections à tort sur le réseau, les phases de déplacement peuvent inclure des activités de manœuvre (premier cas), tandis que les activités de manœuvre incluent une phase de déplacement correspondant à l'entrée et la sortie du site (second cas). Dans certaines situations exceptionnelles, parce que la consommation est extrêmement élevée durant des manœuvres, le premier cas est problématique ; le second cas ne pose aucun problème, car la contribution de l'entrée et de la sortie sur le site est généralement marginale.

A cause de taux de consommation et d'émissions très élevés, les activités de manœuvre, qui dépendent des missions du véhicule, peuvent contribuer de manière notable au résultat total, malgré un faible kilométrage. On verra que la différence est visible entre un véhicule qui effectue du transport long-courrier et réalise 1 manœuvre pour 150 kilomètres parcourus et un véhicule qui effectue de la distribution et réalise 1 manœuvre pour 30 ou 60 kilomètres parcourus. Enfin, quand la fréquence des manœuvres devient encore plus élevée et que les charges sont très lourdes, les manœuvres deviennent un facteur explicatif majeur.

Le problème du coût des manœuvres se retrouve avec des véhicules porteurs. D'un côté, les arrêts peuvent être trois à quatre fois plus fréquents que pour des tracteurs. D'un autre côté, les manœuvres d'un porteur sont plus simples que les mises à quai d'un semi-remorque et par conséquent elles sont moins coûteuses. Pour ces véhicules, dont les livraisons peuvent se faire avec des arrêts en bord de route, il est enfin difficile de dissocier les livraisons de la phase de déplacement.

3.2.2. Caractérisation d'un trajet moyen

Un trajet est décrit par une succession de franchissements de sections. Chaque élément de la séquence est décrit par la catégorie de la route, sa longueur, le dénivelé et le poids total en charge du véhicule. L'identité du véhicule est une variable commune à tous les éléments de la séquence. Une telle description ignore :

- l'identité du conducteur
- les conditions de trafic prévalant à la date où le trajet est effectué
- les conditions météorologiques prévalant à la date où le trajet est effectué
 - vent
 - température
 - précipitations
- les caractéristiques particulières, telles que les aménagements, des sections de route empruntées

Les variables retenues – catégorie de la route, profil altimétrique et poids total en charge – dans le cadre du projet Equilibre décrivent un trajet avant que celui-ci ne soit réalisé. Il est donc possible de fonder un modèle prédictif de la consommation sur la base de ces variables. C'est cette prédiction moyenne qui intéresse un transporteur dont un véhicule peut réaliser le même trajet une fois par semaine pendant un an.

La représentativité des moyennes, spatiales ou temporelles, est discutable dans certains cas. Qu'un trajet soit réalisé 1 ou 52 fois dans l'année ne change rien à la représentativité de l'échantillon des sections parcourues. Si certaines de ces sections présentent des caractéristiques très particulières, la moyenne spatiale ne sera pas représentative de l'ensemble des sections de la même catégorie. Si la consommation est conditionnée par des conditions de trafic récurrentes, et que le trajet est réalisé aux mêmes horaires tout au long de l'année, la moyenne temporelle ne sera pas représentative de l'ensemble des conditions de trafic. Or, cette reproduction des mêmes trajets aux mêmes horaires est la règle en situation réelle d'exploitation. Ce constat nous a conduit à demander aux transporteurs d'affecter leurs véhicules à des missions différentes durant la seconde partie du projet.

4. Etude de facteurs explicatifs

L'objectif de ce chapitre est de présenter les divers facteurs expliquant la consommation et les émissions en les reliant à la cause d'origine : la consommation et les émissions sont directement reliées à l'enfoncement de la pédale d'accélération ou encore à la puissance développée. Le cas de la consommation est trivial : la consommation est directement proportionnelle à la puissance développée. Le cas des émissions de NO_x est plus complexe car, d'une part, la production de NO_x est directement reliée à la consommation, c'est-à-dire à la puissance développée, et d'autre part, l'élimination des NO_x est liée à l'efficacité du système de dépollution. Or cette efficacité est réduite au cours des phases de fortes accélérations. La figure 4.1 montre deux régimes de fonctionnement. La première phase est une phase d'accélération, où les quatre pics de puissance sont associés aux changements de rapport de boîte. Les émissions sont alors élevées. Durant la seconde phase, la vitesse est stable. On observe alors un rapport beaucoup plus faible entre les émissions et la puissance développée.

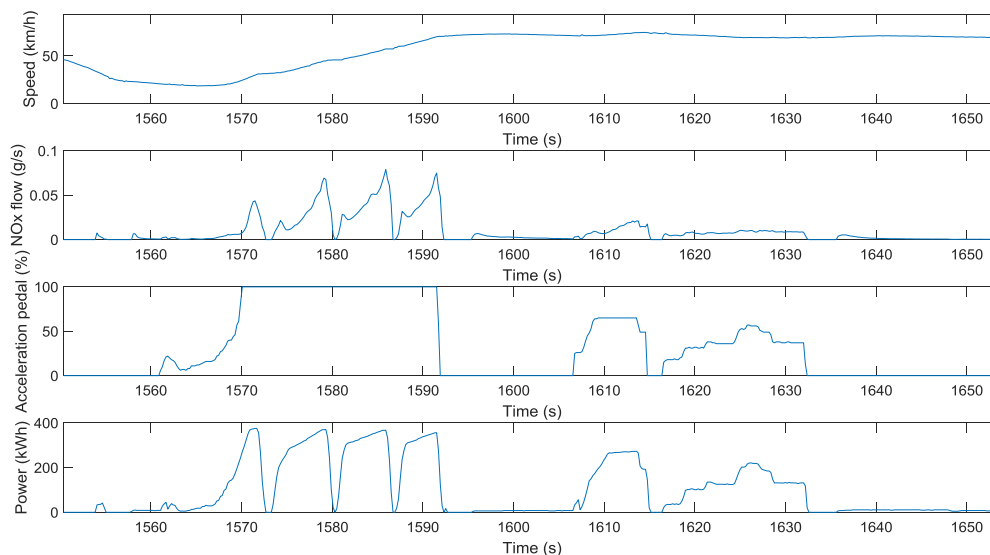


Figure 4.1 : Débit de NO_x en fonction de la puissance - DIESEL

Le constat précédent est fondamental pour trois raisons :

- sur le plan de la physique, la consommation et les émissions (émission = production – élimination) de NO_x par un véhicule diesel ne sont pas toujours explicables par les mêmes variables
- quand la consommation peut s'expliquer avec une propriété $f(x, t)$ de la route ou du trafic aisément observable, les émissions de NO_x dépendantes de régimes transitoires dépendront généralement de la dérivée temporelle $\partial f / \partial t$ ou de la dérivée spatiale $\partial f / \partial x$ qui sont plus difficilement observables. Une prédiction sûre et précise des émissions de NO_x est donc plus difficile
- les règles d'explication des émissions de NO_x vont dépendre, entre autres facteurs, du système de dépollution propre à chaque véhicule ; parce qu'il existe

plusieurs technologies de dépollution on n'a pas cherché à établir précisément les liens entre la puissance développée et les émissions

On a expliqué dans le chapitre précédent que l'instabilité de la vitesse peut être vue comme une variable explicative de la consommation et des émissions, mais ce n'est pas une variable que l'on peut observer sur une carte. L'objectif est donc de considérer uniquement des facteurs « géographiques » observables ou consultables qui expliquent la consommation. Cette étude est étendue à tous les facteurs explicatifs qui peuvent être connus à l'avance, ce qui explique l'hétérogénéité de la liste ci-dessous :

- le profil altimétrique
- les aménagements
- le trafic
- les manœuvres ou conditions de livraison
- le vent
- les démarrages à froid

On ne revient pas sur la catégorisation des routes qui a été longuement étudiée dans le chapitre précédent.

4.1. Le profil altimétrique

On a étudié l'effet du profil altimétrique sur la consommation dans le chapitre précédent. On s'intéresse ici aux effets sur les émissions de NO_x : la figure 4.2 reprend les données de la figure 3.1 (§ 3.1.2) pour un véhicule diesel. Sur les cinq premiers kilomètres, le pic de la consommation moyenne est associé au pic d'altitude, avec une pente de la route de 1 %. L'augmentation de la consommation est de 45 %. Ce pic de consommation est associé à un pic d'émissions de NO_x pour lequel l'augmentation est de 215%. Le second pic de consommation, avec une augmentation de 74 %, est lié à une réaccélération consécutive à une chute de la vitesse. Il lui est associé un pic des émissions de NO_x pour lequel l'augmentation est de 980 %. La relation entre le taux d'émission et la consommation est donc fortement non-linéaire et par conséquent la définition d'un taux d'émission fixe en fonction de la puissance (g/kWh) est dépourvue de sens. Concrètement, le résultat important est qu'une consommation modérée constante a peu d'effet sur les émissions de NO_x . Ce résultat sera confirmé sur des données plus agrégées quand on étudiera les effets d'un vent modéré régulier.

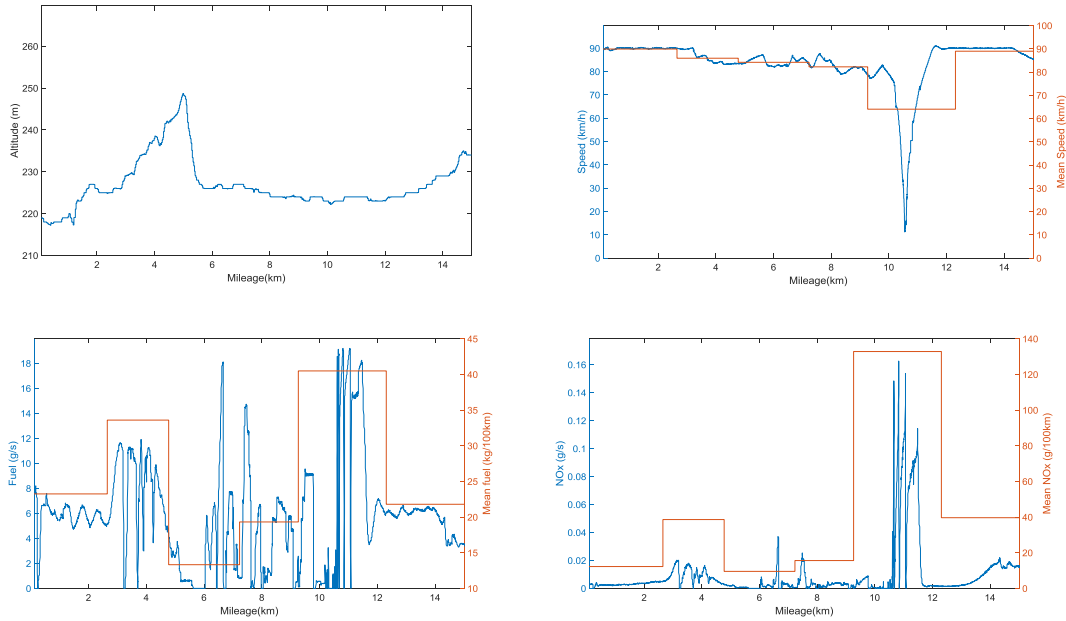


Figure 4.2 : Consommation et émissions de NO_x - DIESEL

Les conclusions précédentes s'appliquent aussi à un véhicule gaz empruntant le même trajet (voir figure 4.3). La relation entre le taux d'émission et la consommation est fortement non-linéaire.

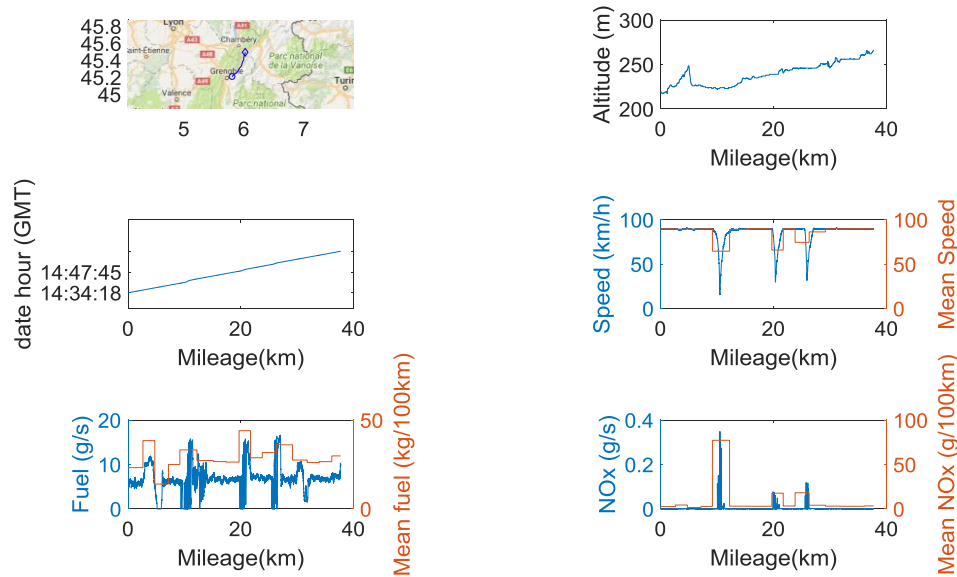


Figure 4.3 : Consommation et émissions de NO_x - GAZ

Les études sur les moteurs mesurent les émissions en g/kWh pour être indépendantes de certaines conditions d'exploitation, telles que le dénivelé et le poids total en charge. La pertinence de cette mesure est mise en cause par le fait que le volume des émissions

de NO_x dépende autant de la manière dont la puissance est sollicitée (puissance continue ou variations brusques de la puissance) que de la puissance moyenne développée.

1. Une faible accélération constante a peu d'effet sur les émissions de NO_x
2. Le rapport entre la puissance et les émissions de NO_x est fortement non-linéaire

4.2. Les aménagements

L'objectif de cette partie est l'étude des effets de deux aménagements : une barrière de télépéage et un rond-point. Cependant, en conditions réelles d'exploitation, il est difficile d'isoler complètement un facteur – le télépéage ou le rond-point – et de définir une situation de référence. On est ainsi conduit à tenir compte des autres facteurs présents sur le trajet : le profil altimétrique, les travaux sur la route et les arrêts imposés par la pause réglementaire d'un conducteur.

4.2.1. Barrière de péage

Les figures 4.2 et 4.3 sont respectivement associées à un véhicule diesel et un véhicule gaz qui empruntent le même trajet. La chute de vitesse jusqu'à la valeur 11 km/h observée au dixième kilomètre correspond au passage du télépéage de Crolles sur l'autoroute A41. Il lui est associé un fort pic d'émissions. Les deux autres chutes de vitesse observées sur la figure 4.3 sont associées aux changements de voie imposés par un usage à contre-sens de l'autoroute (voir figure 4.4). Le caractère répété de tels changements pendant plusieurs jours suggère que des travaux en sont à l'origine.



Figure 4.4 : Usage à contresens de l'autoroute A41

Au vu de ces résultats préliminaires, il apparaît qu'une barrière de péage ou des travaux, à l'origine de ralentissements, ont un impact majeur sur les émissions de NO_x. Une analyse quantitative a donc été entreprise sur la base de passages répétés sur le même trajet par deux véhicules diesel. Sur vingt-et-un mois, le premier a réalisé 30 passages et le second 10 passages. Non seulement on a observé des travaux durant certaines des journées considérées, mais certains conducteurs ont aussi réalisé leur pause réglementaire sur l'aire de Saint-Nazaire-les-Eymes, située un peu avant le péage. Une telle pause implique un redémarrage et présente donc un coût en termes d'émissions de NO_x. Dans les résultats, on a donc distingué les trajets en incluant ou non le péage, les travaux et les arrêts. Les résultats sont reportés dans les tableaux 4.1 et 4.2. En moyenne, comparé à un trajet idéal, l'impact du péage et des autres aléas sur la consommation est modéré : 4 %. En revanche, comparé à un trajet idéal, l'impact du péage et des autres aléas sur les émissions de NO_x est significatif : au moins 40 %. On notera que l'impact du péage diminue avec la longueur du trajet, tandis qu'il est indépendant de la longueur du trajet pour les autres aléas (travaux, arrêt réglementaire) dont les fréquences sont proportionnelles à la distance parcourue.

	Trajet sans péage	Trajet complet normal	Trajet complet avec travaux	Trajet complet avec arrêt	Moyenne sur tous les trajets complets
DE477VE	27	29	31	29	29
EM644EF	26	27	-	29	27

Tableau 4.1 : Consommation (l/100 km)

	Trajet Sans péage	Trajet complet normal	Trajet complet avec travaux	Trajet complet avec arrêt	Moyenne sur tous les trajets complets
DE477VE	15	18	38	29	21
EM644EF	15	19	-	63	23

Tableau 4.2 : Emissions de NO_x (g/100 km)

4.2.2. Rond-point

Ce paragraphe est purement illustratif. Il montre l'impact des aménagements sur la consommation et les émissions de polluants. Il confirme ce qui a été observé au niveau de la barrière de télépéage de Crolles sur l'autoroute A41.

Le fait qu'au cours d'un trajet tout ralentissement soit suivi d'une réaccélération, accompagnée de pics de consommation et d'émissions, est une évidence. Ce que montrent les résultats du projet Equilibre c'est que la consommation et les émissions moyennes sont déterminées par la fréquence de ces phases de réaccélération où la consommation est fréquemment le double de celle observée quand la vitesse est stabilisée.

Les figures 4.5 et 4.6 se rapportent à un trajet de 5 kilomètres avec une pente moyenne négative de 0.6%. Le trajet a été réalisé à Meyzieu, dans la banlieue lyonnaise. Il a été effectué aux alentours de 21 heures, par conséquent en l'absence de trafic. Le véhicule est un tracteur GNL avec un poids total en charge de 25 tonnes. Bien que la route, avec

une limitation de vitesse à 80 km/h (limitation spécifique aux poids-lourds), ne soit pas classée comme étant située en zone urbaine, ses aménagements la rendent similaire à une traversée d'agglomération : sur un trajet de 5 kilomètres, on trouve trois ronds-points à l'origine de ralentissements faisant chuter la vitesse aux alentours de 25 km/h. Les deux premières phases de réaccélération s'étendent sur une longueur d'environ 0.5 kilomètres ; à l'intérieur de chacune de ces phases, chaque pic correspond à un changement de rapport dans la boîte de vitesse.



Figure 4.5 : Route limitée à 80 km/h dans Meyzieu (banlieue lyonnaise)

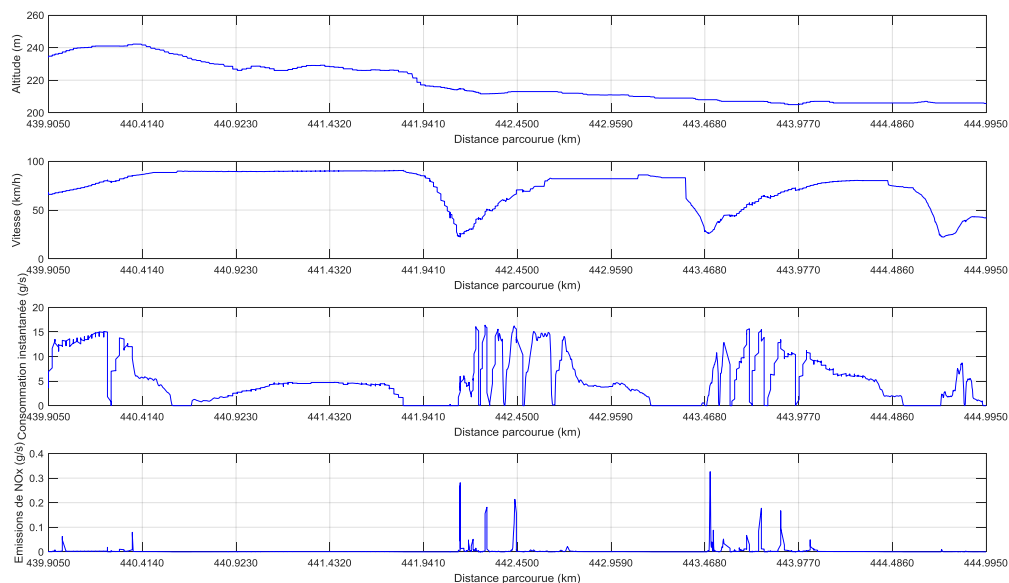


Figure 4.6 : Caractérisation du trajet réalisé à Meyzieu (banlieue lyonnaise)

L'examen des phases de réaccélération, qui s'étendent sur 500 mètres, met en évidence le fait qu'il existe peu de différence entre un arrêt complet et un ralentissement jusqu'à la vitesse de 10 ou 20 km/h ; dans les deux cas, il faudra réaccélérer jusqu'à 80 km/h.

La caractérisation d'une route peut s'effectuer soit *a priori* en fonction d'informations géographiques soit *a posteriori* à partir de données de déplacements. Dans le premier cas, en sus de sa catégorisation, la route pourrait être caractérisée par la densité des aménagements : ronds-points, ralentisseurs, intersections, feux de signalisation, etc. Dans le second cas, en sus de sa catégorisation, on a retenu la vitesse moyenne²⁹ et le nombre de « stop & go ». Cependant, comme on vient de le voir un fort ralentissement a à peu près le même effet qu'un arrêt complet. Dans l'idéal, la caractérisation devrait donc tenir compte de ces forts ralentissements ; ce travail qui implique une recherche approfondie n'a pu être entrepris au cours du projet, mais on livre néanmoins quelques réflexions. Pour calculer un tel indicateur et même pour estimer l'impact réel d'un « stop & go », il ne faut pas considérer l'arrêt ou le ralentissement, qui ne présentent aucun coût, mais les phases de réaccélération de longue durée. Ainsi, on pourrait comptabiliser les phases de réaccélération depuis une vitesse basse (e.g. 10 ou 20 km/h) jusqu'à une vitesse élevée (e.g. 60 ou 80 km/h). Un tel comptage présente cependant deux défauts : il dépend de seuils arbitraires ; il ignore des phases d'accélération fractionnées au cours desquelles le véhicule accélère, ralentit un peu, puis réaccélère. Finalement, un bon indicateur de l'instabilité de la vitesse serait le rapport du cumul des différentiels de vitesse positifs (Δv) sur la distance parcourue – solution analogue au cumul des dénivelés positifs.

4.3. Le trafic

L'impact d'un trafic moyen, mixant heures creuses et heures de pointe, est pris en compte dans la définition des catégories de route. Dans cette section, on cherche à aller au-delà de cette estimation des effets moyens ; concrètement, l'objectif est une estimation des effets d'un fort trafic sur la consommation et les émissions.

On a choisi d'étudier les effets du trafic sur des périphériques urbains où l'impact de la congestion est *a priori* important et où il est donc plus facilement mesurable. Cela étant dit, tous les boulevards périphériques ne sont pas des autoroutes à plusieurs voies avec des caractéristiques relativement homogènes, comme on peut l'observer à Lyon ou à Paris. A l'opposé, les contournements de villes plus modestes présentent des sections aux caractéristiques diverses. Plutôt que de chercher sur quel critère segmenter de tels boulevards périphériques en sections homogènes, tâche complexe, on a choisi de décomposer arbitrairement le trajet d'un véhicule en sections d'une longueur de l'ordre de 2 kilomètres ; la longueur minimale d'une section est de 1 km. Pour un véhicule donné, vingt-et-un mois d'exploitation fournissent alors plusieurs centaines d'observations. Deux sites ont été retenus : le boulevard périphérique Laurent Bonnefoy autour de Lyon ; la départementale D3508 autour d'Annecy. Sur chacun de ces sites, l'effet du trafic a été étudié pour un véhicule diesel et un véhicule gaz. Pour chaque véhicule, la consommation et les émissions de NO_x sont reportées en fonction de la vitesse du véhicule sur la section – le véhicule assurant le rôle d'un véhicule traceur (Floating Car), cette vitesse est censée être un indicateur de la congestion.

²⁹ On notera qu'un indicateur de variance de la vitesse n'est pas pertinent car il ignore la temporalité de la répartition : n'y a aucune différence de variance entre les séries 00001111 et 01010101.

4.3.1. Etude de l'usage du périphérique d'Annecy

Le périphérique d'Annecy est défini par la départementale D3508 qui contourne Annecy. Il est emprunté par les véhicules de l'entreprise Mégevand, dont le siège est situé à Sillingy dans la banlieue d'Annecy. L'étude ne vise pas à caractériser le périphérique, mais l'usage qui en est fait par certains véhicules.

Parce que la D3508 ne présente pas les caractéristiques d'une voie express, la catégorisation automatique ne range pas cette route dans la catégorie des voies rapides urbaines. Elle en possède néanmoins certaines caractéristiques, comme l'existence de séparateurs de chaussées, la présence d'échangeurs et de bretelles d'accès à la place d'intersections. Elle en diffère sur d'autres points : on a une voie unique dans chaque sens pour le contournement d'Annecy, au lieu d'un minimum de deux voies sur des voies express ; les limitations de vitesse varient entre 50 et 80 km/h au lieu de 70 à 80 km/h sur une voie express.



Figure 4.7 : Périphérique d'Annecy

Des informations statistiques sur les trajets sont reportées dans le tableau 4.3. La consommation et les émissions sont reportées sur la figure 4.8 pour un véhicule diesel et un véhicule gaz. Ces données résultent de vingt-et-un mois de mesures.

	Kilométrage (km)	Vitesse moyenne (km/h)	Consommation (.../100km)	Emissions de NOx (g/100 km)
DE477VE (diesel)	2521	52.9	31.2 l	160.3
DX347RQ (gaz)	5293	54.5	27.6 kg	33.2

Tableau 4.3 : Périphérique d'Annecy - valeurs moyennes

Sans rentrer dans les détails de l'interprétation de la figure 4.8, on distingue clairement un minimum de deux amas qui peuvent être associés à une phase fluide pour les vitesses moyennes supérieures à 60 km/h et une phase congestionnée pour les vitesses inférieures à 40 km/h. Pour le véhicule gaz, les corrélations négatives entre la vitesse moyenne d'un côté et la consommation et les émissions d'un autre côté sont clairement visibles.

Dans le cas présent, le véhicule diesel et le véhicule gaz ont emprunté les mêmes sections de la D3508 avec à peu près les mêmes fréquences, les mêmes états de trafic et les mêmes poids en charge – le véhicule GNV a remplacé le véhicule diesel en exploitation. On observe ainsi les mêmes vitesses moyennes pour les deux véhicules et des consommations similaires (voir tableau 4.3) ; la vitesse moyenne et la consommation étant des indicateurs de l'état moyen du trafic, on peut considérer que l'usage du périphérique d'Annecy s'effectue dans des conditions similaires pour le véhicule gaz et pour le véhicule diesel. Compte tenu de cette similitude des conditions d'exploitation, le résultat important est que taux d'émission de NO_x est cinq fois plus faible pour le véhicule gaz (voir tableau 4.3 et figure 4.9).

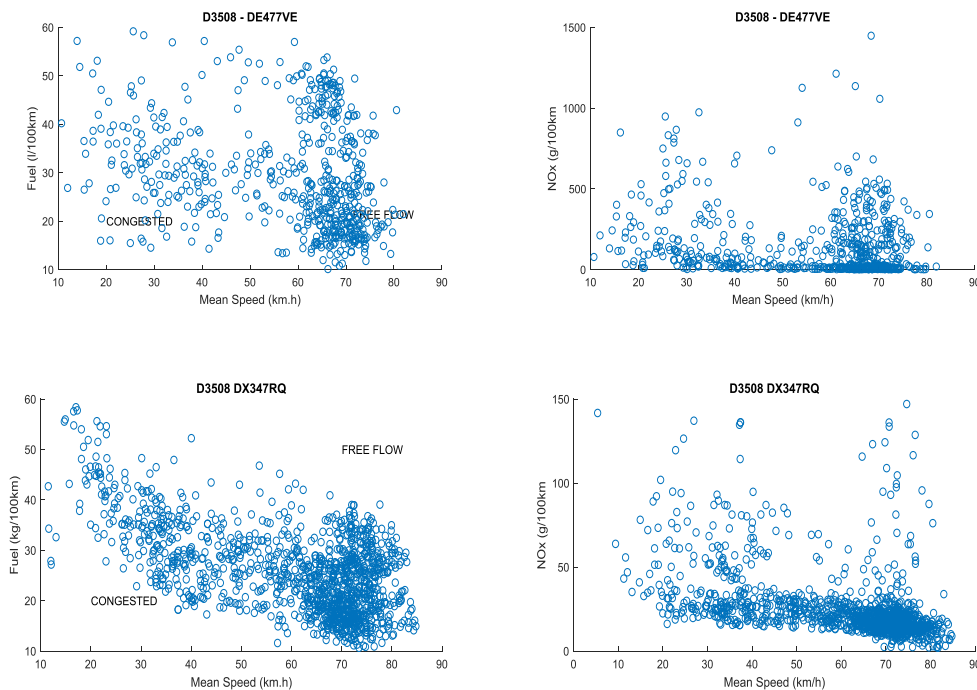


Figure 4.8 : Consommation et émissions - DIESEL (haut) et GAZ (bas)
 Pour les NO_x, on a une différence d'un facteur 10 sur les échelles.

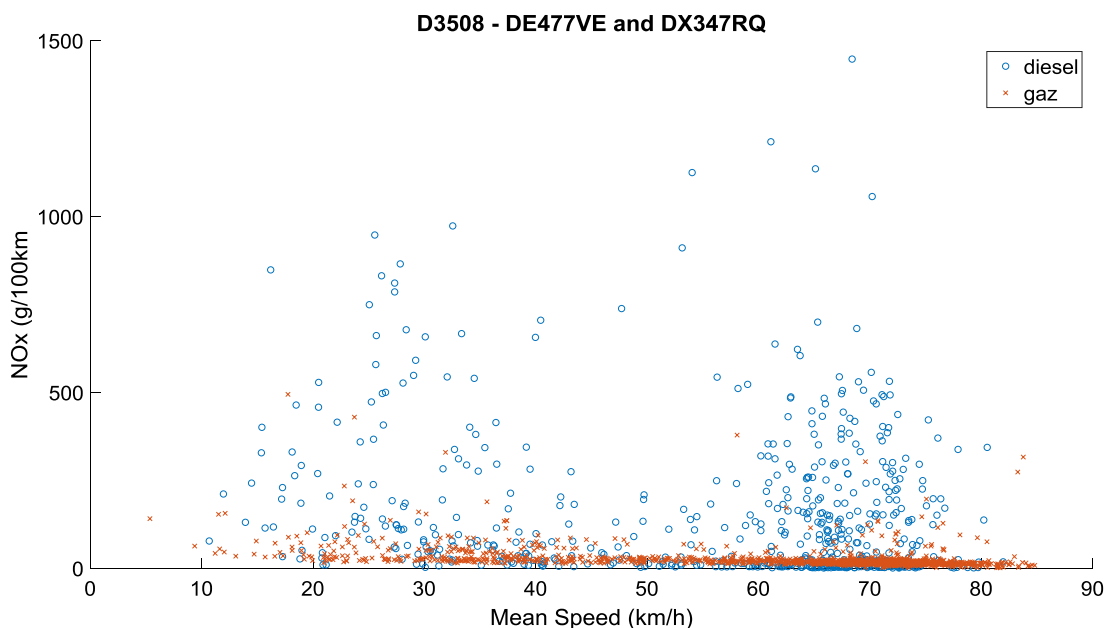


Figure 4.9 : Emissions comparées de NO_x – DIESEL et GAZ

4.3.2. Etude de l’usage du périphérique de Lyon

Le périphérique de Lyon, identifié à la départementale D383, est catégorisé comme une voie express. Il est emprunté par des véhicules de l’entreprise Perrenot qui effectuent des trajets entre l’Est lyonnais et Clermont-Ferrand. L’étude ne vise pas à caractériser le périphérique, mais l’usage qui en est fait par ces véhicules.

Des informations statistiques sur les trajets sont reportées dans le tableau 4.4. La consommation et les émissions sont reportées sur la figure 4.10 pour un véhicule diesel et un véhicule gaz. Ces données résultent de vingt-et-un mois de mesures.

	Kilométrage (km)	Vitesse moyenne (km/h)	Consommation (.../100km)	Emissions de NO _x (g/100 km)
DL928LJ (diesel)	490	71.0	27.4 l	20.0
EA190HL (gaz)	9496	71.7	25.4 kg	18.1

Tableau 4.4 : Périphérique de Lyon - valeurs moyennes

Sans rentrer dans les détails de l’interprétation de la figure 4.10, il apparaît clairement que les véhicules empruntent le périphérique quasi exclusivement en période de trafic fluide. Cette conclusion est confirmée par des vitesses moyennes élevées pour les deux véhicules, reportées dans le tableau 4.4.

La comparaison des résultats pour le véhicule diesel et le véhicule gaz doit être réalisée avec précaution car les deux véhicules n’empruntent pas les mêmes sections de la D383 avec les mêmes fréquences, les mêmes états de trafic et les mêmes poids en charge. Cependant, on observe les mêmes vitesses moyennes pour les deux véhicules et des consommations similaires (voir tableau 4.4) ; la vitesse moyenne et la consommation étant des indicateurs de l’état moyen du trafic, on peut considérer que l’usage du périphérique de Lyon s’effectue dans des conditions similaires pour le véhicule gaz et pour le véhicule diesel. Avec un trafic presque toujours fluide, on observe alors un taux d’émission de NO_x quasiment identique pour les deux véhicules

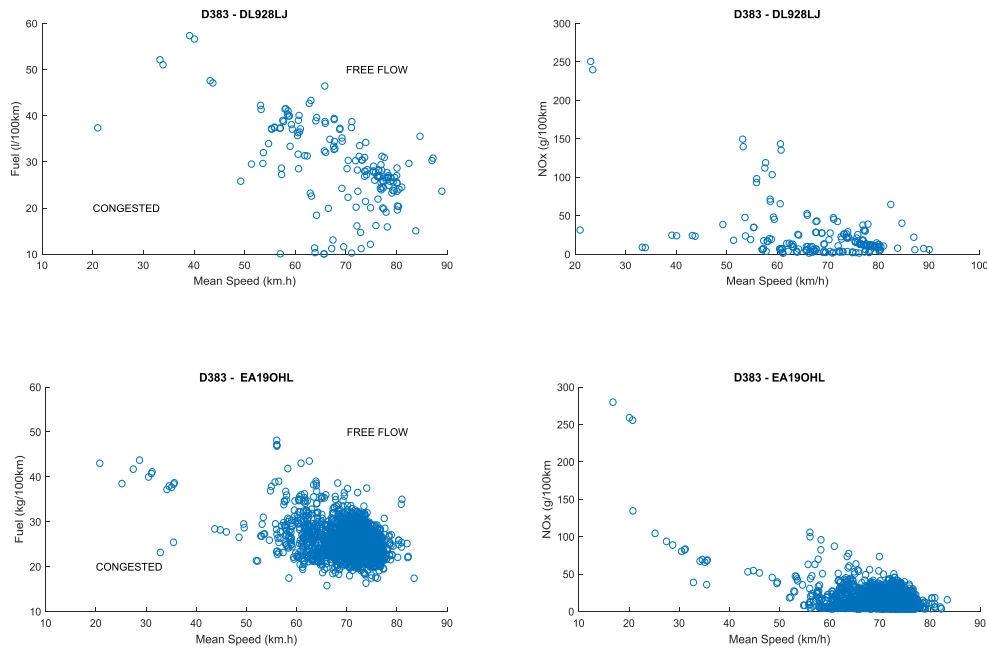


Figure 4.10 : Consommation et émissions - DIESEL (haut) et GAZ (bas)
 Le véhicule gaz a parcouru un kilométrage vingt fois plus important que le véhicule diesel ; cela explique la plus grande densité de points.

4.3.3. Comparaison des résultats sur les deux périphériques

Les différences constatées entre les observations réalisées sur les périphériques d'Annecy et de Lyon relèvent de conditions d'usage différentes. Dans le second cas, on a très peu d'observations en congestion, non pas parce que le périphérique de Lyon est peu congestionné, mais parce que la planification des transports a pu être établie de manière à permettre aux véhicules d'éviter les périodes de congestion. En revanche, sur le site d'Annecy, les camions ne peuvent éviter les périodes de congestion, parce que dans ce cas le siège du transporteur se situe dans la banlieue d'Annecy et que certains de ces trajets sont des départs et retours au dépôt. D'une manière plus générale, les horaires de passage des véhicules sont contraints par les demandes de la clientèle. Ce constat soulève deux problèmes :

- les valeurs moyennes de consommation et d'émissions pour les trajets sur périphérique perdent de leur sens quand on a affaire à un mélange de deux distributions (une distribution pour un trafic fluide et une distribution pour un trafic congestionné).
- la comparaison de trajets sur périphériques devient problématique quand ceux-ci sont empruntés dans des conditions de trafic différentes, par ailleurs indépendantes de la volonté des transporteurs

Cela étant dit, les données collectées sur les deux périphériques, dans des conditions similaires sur chaque site, fournissent au projet la meilleure base de comparaison entre un véhicule gaz et un véhicule diesel en conditions d'exploitation réelle :

- 1. pour les véhicules diesel, la comparaison des données sur Lyon et Annecy montre que les taux d'émission de NO_x varient du simple à l'octuple suivant qu'on a un faible ou un fort trafic au moment des passages**
- 2. pour les véhicules gaz, le taux d'émission varie du simple au double suivant qu'on a un faible ou un fort trafic au moment des passages**
- 3. sur le périphérique d'Annecy, où on observe en moyenne un fort trafic, le taux d'émission de NO_x est cinq fois plus faible pour un véhicule gaz que pour un véhicule diesel**
- 4. autant pour les véhicules diesel que pour les véhicules gaz, la comparaison des données sur Lyon et Annecy montre que la consommation n'augmente que de 10 % suivant qu'on a un faible ou un fort trafic au moment des passages**

Ces conclusions pourraient être généralisées au cas de la circulation en milieu urbain où les feux de signalisation, à l'origine de décélérations suivies de réaccélération, auront le même effet que la congestion.

4.4. Les manœuvres et les conditions de livraison

D'une manière générale, on définit les manœuvres comme l'ensemble des opérations réalisées chez le client ou au dépôt du transporteur. Pour des semi-remorques, les manœuvres sont les opérations de mise à quai ainsi que les opérations de couplage et découplage de remorques.

Bien que le kilométrage parcouru soit *a priori* très faible durant ces opérations, on verra que l'impact sur la consommation et surtout sur les émissions de NO_x est non négligeable. Dans le cadre du projet Equilibre, l'objectif n'est pas de réaliser une étude détaillée de ces opérations mais d'obtenir une estimation de la contribution globale de ces opérations dans le bilan total.

En pratique, quand on part des descriptifs des journées, on définit les manœuvres à partir des ruptures de charge, détectables à partir de la variation du poids total en charge³⁰. La phase de manœuvre est délimitée par l'arrivée et le départ sur le site, lesquels sont définis comme les instants à partir duquel le véhicule dépasse la vitesse de 40 km/h. Ce seuil permet d'inclure dans la phase de manœuvre l'ensemble des micro-déplacements qui y sont réalisés ; toutes les ruptures de charges observées dans la fenêtre temporelle ainsi définie sont incluses dans la même phase de manœuvre.

³⁰ Le cas d'une compensation parfaite entre les chargements et déchargements, couplages et découplages de remorques, serait absolument rarissime.

Une phase de manœuvre est fréquemment réalisée sur une zone privée en dehors du réseau cartographié, mais ce n'est pas une obligation. De plus, si les opérations sont réalisées à proximité immédiate du réseau cartographié, le véhicule peut être localisé à tort sur le réseau.

Les manœuvres sont des opérations très coûteuses en termes de consommation et en termes d'émissions. On peut retenir les ordres de grandeur suivants :

En phase de manœuvre, la consommation est de l'ordre de 100 litres de gazole ou de 100 kilogrammes de gaz aux 100 km.

Comme les distances parcourues chez un client sont très faibles, l'impact des manœuvres dépend de leur fréquence. L'impact est donc faible pour le transport long-courrier et plus ou moins élevé pour la distribution. D'une manière générale, le véhicule employé, le type des opérations de distribution et la nature des routes empruntées conditionnent les coûts relatifs des phases de déplacement et de manœuvres. Faute de données adéquates pour une étude approfondie, ce rapport se contente de révéler l'importance de cet aspect de la mission de transport, en particulier en ce qui concerne les conséquences en matière d'émissions de polluants en zone urbaine ou périurbaine.

Parce que les phases de manœuvres sont encore plus spécifiques de l'usage d'un véhicule que les phases de déplacement, on ne présentera dans ce paragraphe que des résultats à caractère illustratif pour quatre véhicules.

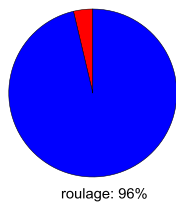
4.4.1. Résultats pour des véhicules 44 t

Les résultats du DX347RQ (voir figure 4.11) sont ceux d'un véhicule gaz réalisant de la distribution. Les résultats ont été obtenus sur un an de données, soit 52.000 kilomètres et 1.900 opérations chez des clients. Les rapports entre les pourcentages de la consommation et des émissions sur le pourcentage du kilométrage total réalisé durant la phase de manœuvre sont les informations les plus importantes. Le kilométrage compte pour seulement 4 %, mais la consommation compte pour 14 % et les émissions de NO_x pour 29 %. Ces émissions sont généralement réalisées en secteur périurbain, dans les zones industrielles et commerciales.

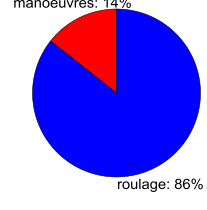
Le temps passé durant ces opérations est tout aussi instructif : il représente 32 % du temps passé moteur allumé et 59 % du temps total d'une journée, qui dure 11h40 mn en moyenne. Il est utile de noter que la répartition des activités (normalisées) du conducteur réalisée par le chronotachygraphe est très éloignée de l'usage qui est fait du véhicule. De ce fait, elle est inutilisée dans ce rapport.

A titre de comparaison, on présente les résultats pour le DY491CV qui est un véhicule du même modèle que le DX347RQ et qui réalise lui aussi des missions de distribution, mais dans un autre secteur géographique et pour une autre clientèle. On obtient alors des chiffres assez différents. Le kilométrage compte pour 2 %, la consommation pour 8 % et les émissions de NO_x pour 15 %. Pour une durée moyenne de la journée de 11h00, les temps passés chez le client sont plus faibles. Enfin, la distance parcourue entre deux phases de manœuvre passe de 30 kilomètres pour le premier véhicule à 80 kilomètres pour le second.

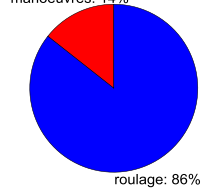
Kilométrage - arrêts par 100 km : 3.6425



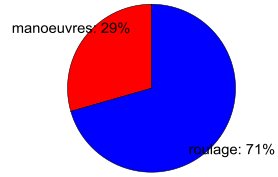
Fuel



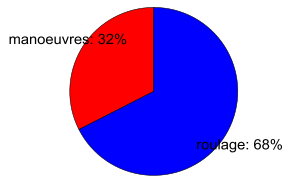
CO2



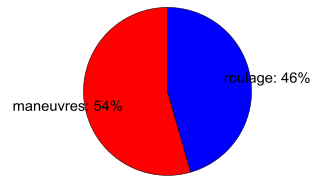
NOx



Temps passé moteur allumé



Temps total passé - durée journée (h) : 11.6762



Répartition des activités

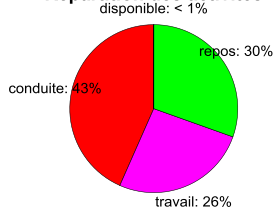
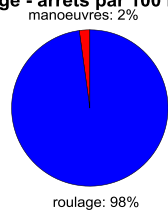
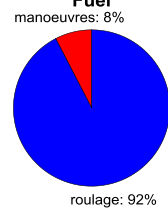


Figure 4.11 : Phases de manœuvres du DX347RQ – GAZ - Distribution

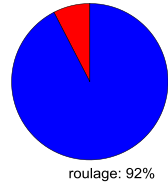
Kilométrage - arrêts par 100 km : 1.3582



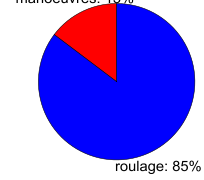
Fuel



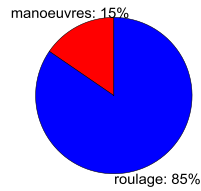
CO2



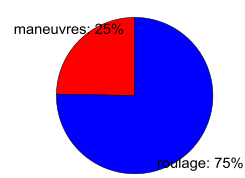
NOx



Temps passé moteur allumé



Temps total passé - durée journée (h) : 11.0675



Répartition des activités

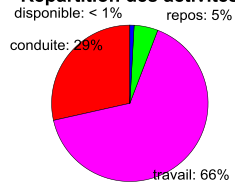


Figure 4.12 : Phases de manœuvres du DY491CV – GAZ - Distribution

Le dernier tracteur présenté est un diesel réalisant principalement des missions long-courrier. Le kilométrage compte pour 1 %, la consommation pour 3 % et les émissions de NO_x pour 11 %. Le rapport très élevé entre le pourcentage d'émissions de NO_x et le pourcentage du kilométrage s'explique par des trajets autoroutiers où les émissions sont très faibles.

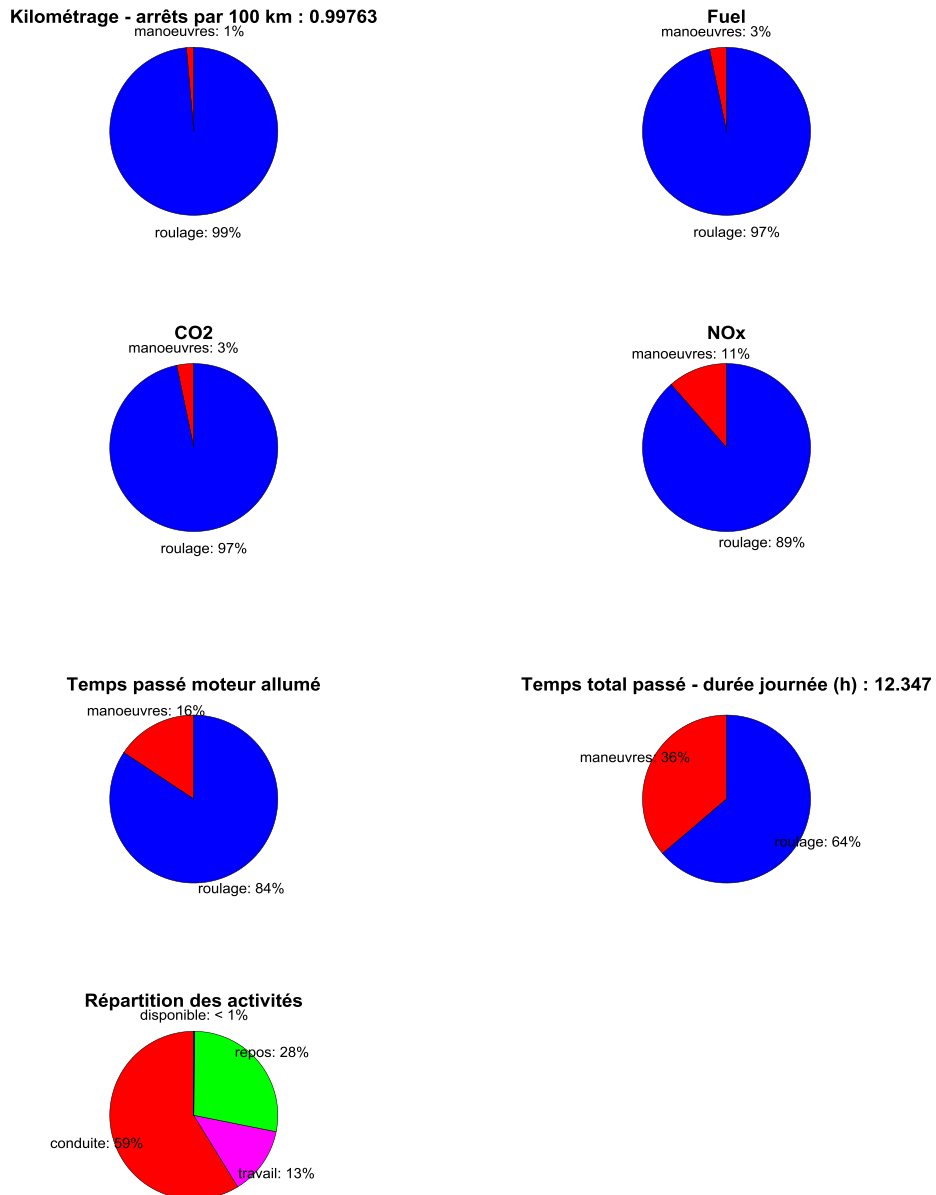


Figure 4.13 : Phases de manœuvres du DE477VE – DIESEL – Long-courrier

4.4.2. Résultats pour des véhicules 19 t

Les résultats pour un porteur de 19 tonnes diffèrent complètement de ceux obtenus pour des 44 tonnes : les manœuvres ou livraisons sont moins coûteuses. La raison fondamentale est que la manœuvre d'un véhicule rigide moyennement chargé ne se compare pas à celle d'un semi-remorque lourdement chargé. Le kilométrage compte alors pour 2 %, la consommation pour 6 % et les émissions de NO_x pour 4 %. Ces chiffres doivent cependant être mis au regard des 40 kilomètres de distance parcourue entre deux phases de manœuvre, lesquels caractérisent un profil de distribution en zone péri-urbaine. Les résultats seraient différents pour un véhicule réalisant de la distribution en centre-ville, avec un nombre d'arrêts deux fois supérieur et des conditions de stationnement difficiles. Pour de tels véhicules, ce sont les conditions de livraison – conditions de circulation, conditions de stationnement et densité du trafic – et non les manœuvres – chargement et mise à quai – qui sont déterminantes.

Le fait que le pourcentage obtenu sur les NO_x soit inférieur à celui obtenu pour le CO₂ est une anomalie qui renvoie au problème de mesure évoqué dans le second chapitre : les émissions sont sous-estimées parce que la mesure des NO_x est impossible durant les premières minutes après le démarrage. Ainsi, dans le cas présent, la mesure n'est reconnue valide que durant 60 % du temps des manœuvres, contre 84 % du temps sur l'ensemble du trajet.

Cette absence de mesure dans les premiers instants qui suivent la mise en marche du moteur est généralisable aux manœuvres de tous les véhicules. Il est cependant impossible d'en estimer précisément l'impact sur le volume total d'émissions. Il est très probable qu'il soit élevé pour les porteurs, pour lesquels la fréquence des arrêts du moteur est élevée. Par contre, il est possible qu'il soit secondaire pour les semi-remorques au regard du coût très élevé des manœuvres.

Pour conclure de manière générale, la description des conditions réelles d'exploitation impose de substituer le concept trop restrictif de manœuvres par celui plus général de livraisons, concept incluant l'arrivée sur le site, les manœuvres, les arrêts du moteur, et le départ du site.

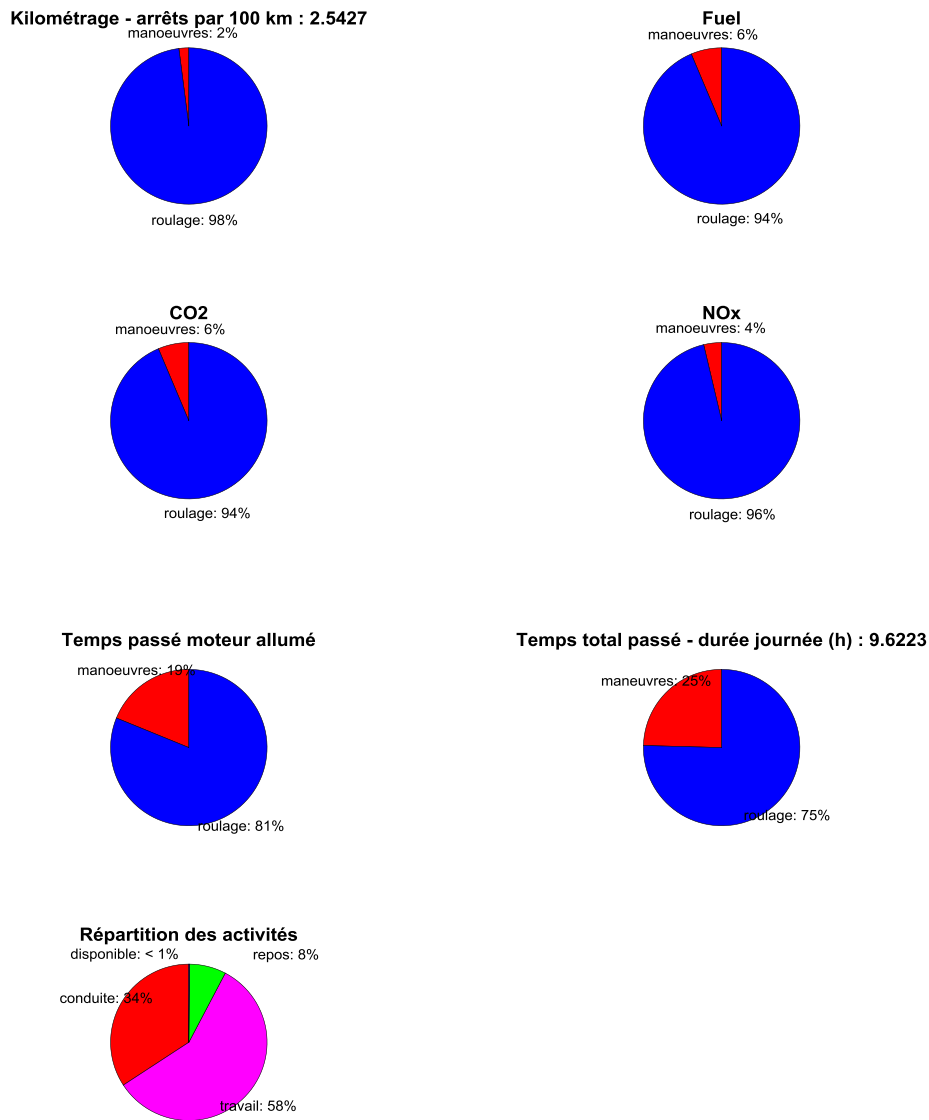


Figure 4.14 : Phases de manœuvres du EB539DE – GAZ – Distribution

4.5. Le vent

Un vent de face a un effet négatif suffisamment prononcé et suffisamment connu pour qu'il conduise les conducteurs à adopter une dangereuse stratégie de « platooning » consistant à suivre de près le véhicule aval pour qu'il fasse écran. A la demande des transporteurs, on a donc cherché à mesurer l'effet du vent. L'étude qui suit s'intéresse à l'impact de l'intensité d'un vent régulier, venant soit de face soit de dos, sur la consommation et les émissions. On n'étudie ni l'effet d'un vent latéral ni l'effet des rafales.

Cette étude a été réalisée sur l'autoroute A7 dans la vallée du Rhône où l'orientation de la route est généralement parallèle à la direction du vent. Le premier secteur retenu a

été un tronçon d'environ 40 km entre Orange et Montélimar. Ce choix du secteur a été motivé par deux raisons :

- on observe une vitesse stable sur une section relativement plane ; on a une pente moyenne inférieure à 1 ‰
- on a un accès libre aux données météorologiques de la station de Montélimar, située un peu plus au nord

Le trajet présenté ci-dessous est un trajet type, sachant que chaque trajet peut présenter de légères variations. La pente maximale du trajet descendant (voir figure 4.15) est de 1 ‰ et la pente moyenne est de 1 ‰. Les véhicules ont un poids total en charge variant entre 35 et 44 tonnes. On notera qu'on a à la fois une vitesse très stable et une variabilité importante de la consommation moyenne (entre 20 et 30 kg/100km) sur des sections d'une longueur de l'ordre de 2 km. Le trajet montant est à peu près symétrique au trajet descendant, avec poids total en charge variant entre 26 et 36 tonnes.

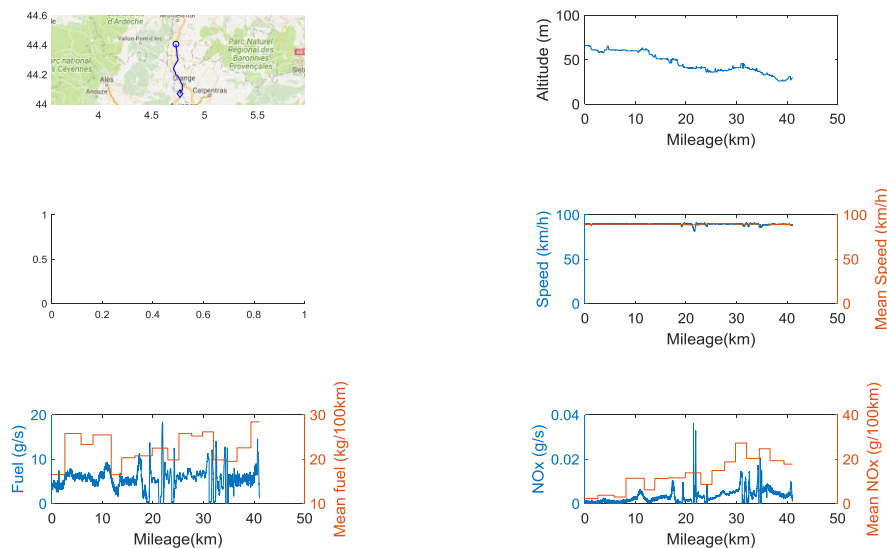


Figure 4.15 : Trajet descendant – autoroute A7 sur la section Montélimar-Orange

Pour confirmer les résultats initiaux, qui seront présentés plus bas, l'étude a ensuite été étendue à un second secteur, long de 25 kilomètres entre Montélimar et Valence. On a enfin considéré le trajet complet entre Orange et Valence, long d'une centaine de kilomètres, incluant le contournement de Montélimar. Comme la vitesse est moins stable sur la section contournant Montélimar, à cause de pentes plus importantes et d'un trafic plus important, l'effet relatif du vent y est moindre.

4.5.1. Description des conditions éoliennes à Montélimar

L'étude a été réalisée sur un véhicule diesel qui a emprunté cette route pendant 21 mois. Une telle durée permet de considérer que la distribution des conditions météorologiques rencontrées est statistiquement représentative.

La figure 4.16 donne la distribution du vent sur la station de Montélimar sur une période de 21 mois avec une mesure par période de 3 heures. Le vent dominant est évidemment le Mistral, lequel n'est pas un vent du nord mais un vent catabatique³¹ de nord-ouest à nord. Le parallélisme entre la direction du vent et l'orientation moyenne de l'autoroute A7 est donc tout relatif; de plus, localement, l'orientation de l'autoroute s'écarte sensiblement de l'axe Nord-Sud. On a donc retenu les trajets pour lequel le vent est approximativement orienté Nord-Sud ou Sud-Nord. Initialement, on a utilisé une marge de tolérance de $\pm 20^\circ$: elle a été étendue à $\pm 30^\circ$ sans que cela change les résultats.

Sur les vingt-et-un mois du projet, on a 138 trajets montants et 121 trajets descendants empruntant la portion d'autoroute entre Orange et Valence. Les distributions des poids total en charge sont différentes suivant le sens du trajet. Pour éliminer la variabilité liée au poids total en charge, on a retenu les trajets montants avec un poids total en charge compris entre 26 et 36 tonnes et les trajets descendants avec un poids total compris entre 35 et 44 tonnes. Suivant le cas, l'échantillon est réduit à 60 ou 90 individus. Enfin, après filtrage sur la direction du vent, le pourcentage de journées utiles varie entre 60% et 90% de l'effectif de la population restante.

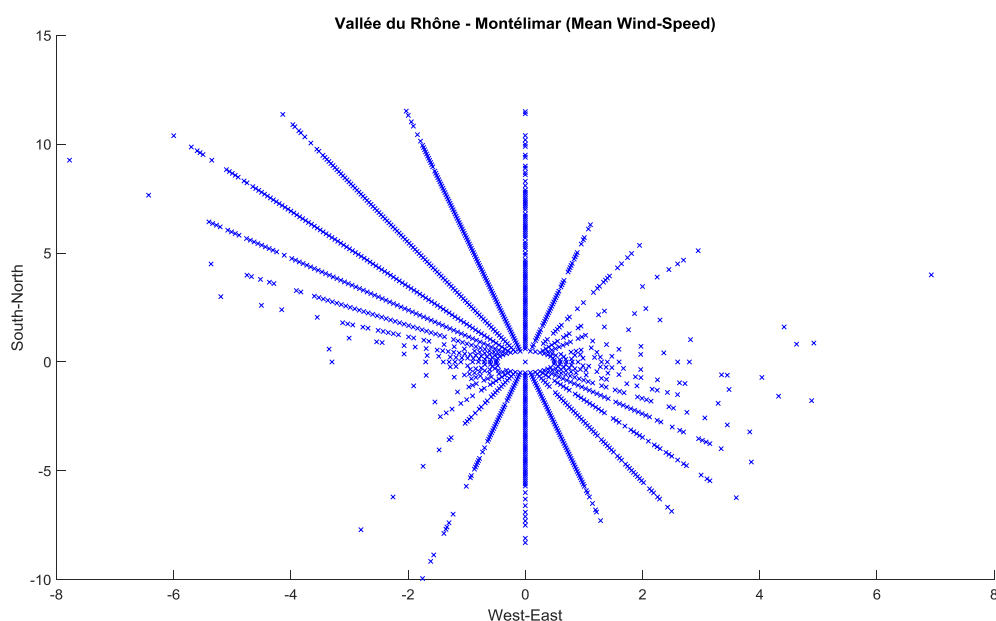


Figure 4.16 : Distribution de la vitesse du vent - station SYNOP de Montélimar

Chaque point indique l'origine du vent et le module du vecteur associé indique sa vitesse (m/s)

On rappelle qu'en règle générale les conditions éoliennes sont saisonnières. Ainsi dans le couloir rhodanien « la période la plus venteuse de l'année dure 5,7 mois, du 8 novembre au 28 avril, avec des vitesses de vent moyennes supérieures à 13,9 kilomètres par heure.

³¹ Un vent catabatique est la conséquence d'une masse d'air froid qui descend des montagnes du fait de son poids.

Le jour le plus venteux de l'année est le 20 mars, avec une vitesse moyenne du vent de 15,2 kilomètres par heure ». Cette saisonnalité n'a pas été prise en compte dans cette étude.

4.5.2. Estimation de l'effet du vent

A partir des observations météorologiques, vitesse et direction du vent, on fabrique une variable de vitesse dont le signe dépend du trajet étudié : suivant que le vent arrive de dos ou de face, la vitesse du vent est considérée comme positive ou négative. La consommation du véhicule est ainsi négativement corrélée à la vitesse du vent. On reporte ensuite la consommation moyenne ainsi que les émissions de NO_x en fonction de la vitesse du vent. On obtient une figure pour les trajets descendants et une autre pour les trajets montants.

Les résultats (voir figure 4.17) montrent que le vent n'a aucun effet visible sur les émissions de NO_x : la distribution des émissions est indépendante de la vitesse moyenne du vent. Cela s'explique par le fait qu'un vent régulier modéré n'implique pas de fortes et brusques accélérations.

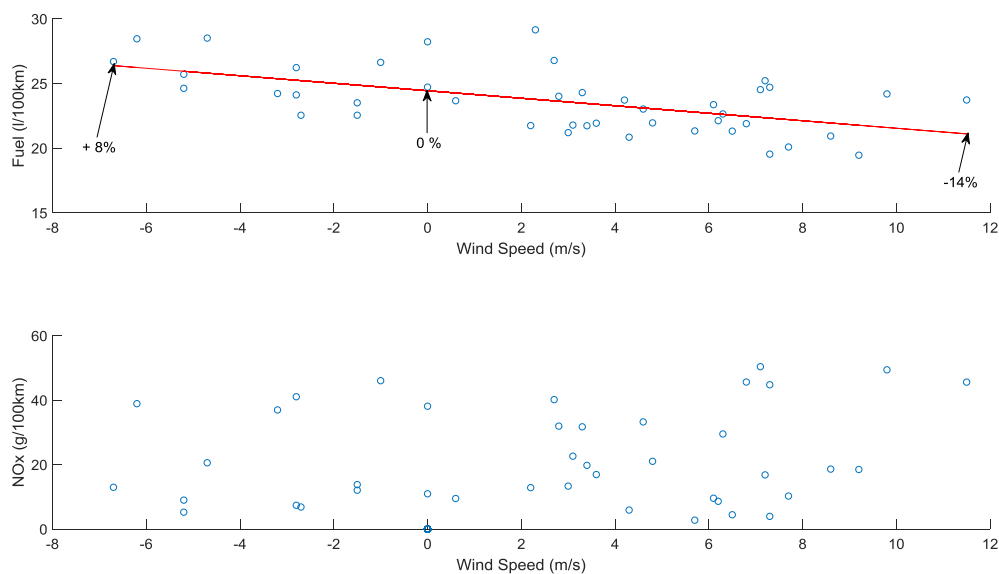


Figure 4.17 : Effet du vent sur les trajets descendants

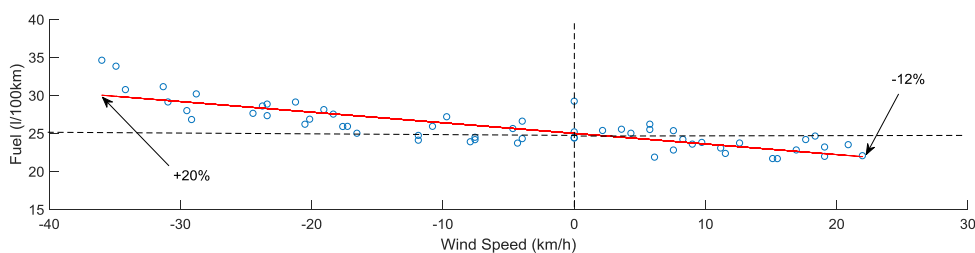


Figure 4.18 : Effet du vent sur les trajets montants

Pour quantifier l'impact du vent sur la consommation d'un trajet type, on a effectué une régression linéaire expliquant la consommation en fonction de la vitesse du vent. La droite de régression a été ajoutée à chaque figure ; effectuer deux régressions indépendantes suivant le signe de la vitesse du vent ne s'est pas révélé pertinent. A partir de la régression, on obtient une estimation de la consommation théorique pour un vent nul et pour les valeurs extrêmes de la vitesse. On définit l'amplitude relative de la variation à partir du rapport de la consommation pour le vent maximal sur la consommation pour un vent nul. Pour la figure 4.17 ces amplitudes sont $[-14\%, +8\%]$. Le tableau 4.5 reporte l'ensemble des résultats sur les sections Orange-Montélimar Montélimar-Valence et Orange-Valence ; la section Orange-Valence inclut le contournement de Montélimar, où la consommation est impactée par de nombreux autres facteurs.

Le résultat fondamental est l'asymétrie des amplitudes suivant que le trajet est montant ou descendant ; l'existence d'un couplage entre l'effet du vent et celui du dénivelé semble probable. On notera que l'effet supposé du poids total moyen, lequel est supérieur dans le sens descendant (40 t vs. 31 t), s'efface devant celui du vent : le véhicule le plus chargé consomme moins.

	Sens Montant	Sens Descendant
Orange - Montélimar-Sud	36 %	20 %
Montélimar-Nord - Valence	36 %	28 %
Orange-Valence		
 pente quelconque	30 %	24 %
 vitesse non stabilisée		

Tableau 4.5 : Amplitude relative de variation de la consommation

Les amplitudes de variation des vitesses du vent sont indépendantes du sens du trajet.

Les observations météorologiques sur les deux populations (voir figures 4.17 et 4.18) révèlent une vitesse maximale du vent de 12 m/s dans le sens Nord-Sud et de 6 m/s dans le sens Sud-Nord. Si les vitesses maximales étaient de 12 m/s dans les deux sens, l'amplitude maximale de variation ne serait plus $[-14\%, +22\%]$ mais $[-22\%, +22\%]$. Les valeurs extrêmes obtenues sur l'échantillon sont par ailleurs inférieures aux valeurs maximales observées dans la vallée du Rhône. Il faut enfin ajouter que la direction du vent n'est pas rigoureusement parallèle à l'axe de la route. L'amplitude maximale des effets du vent serait donc encore supérieure, tout en restant dans des conditions d'exploitation normales.

Sur cet échantillon, on n'a pas de vitesses élevées : aucune vitesse du vent ne dépasse 43.2 km/h³². L'échantillon est néanmoins de taille suffisamment grande pour être statistiquement significatif. Par ailleurs, on notera que la distribution des vitesses du

³² Une manche à air est à l'horizontale pour un vent de 45 km/h, vitesse qui définit la limite pour un vent jugé fort quant à ses effets sur la conduite automobile. D'après Météo France, un vent violent et dangereux commence à 80 km/h. Toujours d'après Météo France, le Mistral peut souffler en plaine jusqu'à 100 km/h.

vent est relativement uniforme (voir les abscisses des points sur les figures 4.17 et 4.18) et que par conséquent un vent fort est aussi probable qu'un vent faible.

4.6. Effet de la température du moteur

En ce qui concerne les émissions de NO_x, le bon fonctionnement des systèmes de dépollution des véhicules diesel et des véhicules gaz supposent des températures assez élevées qui ne sont atteintes respectivement que 20 et 2 minutes après la mise en marche du moteur³³. Durant cette phase de démarrage à froid, les taux d'émissions sont assez élevés pour que, malgré la faible durée, la contribution de cette phase de démarrage puisse avoir un impact majeur. L'objectif de cette partie est donc de quantifier cet impact dans des conditions d'exploitation réelles.

Dans le cadre du projet Equilibre, pour des véhicules de 44 tonnes réalisant de la distribution, la distance moyenne parcourue entre deux opérations varie entre 30 et 60 km suivant les transporteurs. Dans une journée, un véhicule qui parcourt entre 200 et 300 km réalise ainsi plusieurs courts trajets. Le temps passé à l'arrêt varie entre 30 et 60 % du temps total avec un temps moyen passé à l'arrêt de 40 minutes. Ce temps d'arrêt moyen doit être comparé au temps nécessaire au refroidissement du moteur et du système de dépollution, lequel est de 4 heures pour un véhicule diesel et de 2 heures pour un véhicule gaz³⁴. La conclusion est que, dans le cadre de missions de distribution, la température du moteur n'aura aucun effet en dehors du démarrage en début de journée. La possibilité d'un second démarrage à froid ne se pose donc que pour des missions de long-courrier, pour lesquelles on pourrait observer un arrêt de longue durée en milieu de journée dans le cadre d'un aller-retour. Cependant, en pratique, sur vingt-et-un mois d'exploitation d'un véhicule habituellement affecté à ce type de mission, on n'observe qu'une seule fois une pause aussi longue... et ce n'est même pas au cours d'une mission de long-courrier. Allant au-delà de ces quelques observations, une réflexion économique triviale conduit à la conclusion que le cas d'un second démarrage à froid dans la journée ne peut être que marginal : un transporteur ne laisse pas un véhicule inoccupé pendant 4 heures.

En théorie, l'étude des démarrages à froid nécessiterait une mesure de la température et plus précisément de la température du système de dépollution. En pratique, dans le cadre du projet Equilibre, on ne connaît que les températures de l'huile, de l'eau et du carburant. L'examen approfondi des données montre qu'aucune de ces températures n'est suffisamment corrélée à la température du système de dépollution³⁵. Les résultats présentés sur les démarrages à froid ne comportent donc aucune mesure de température et l'existence d'un démarrage à froid est déterminée à partir de la durée de l'arrêt du véhicule. En pratique, une fois établie l'inexistence d'un second démarrage à froid, l'absence d'une mesure de la température du système de dépollution n'est pas gênante - ce n'est que pour établir cette inexistence d'un second démarrage à froid que l'absence de cette mesure a été un handicap.

³³ Communication personnelle de Bernard Guiot (CRMT). Ces chiffres sont susceptibles de varier en fonction des développements technologiques.

³⁴ Communication personnelle de Bernard Guiot (CRMT).

³⁵ Au démarrage, la température de l'eau atteint une valeur stable en 10 minutes, alors que les mesures des émissions de NO_x montrent que le système de dépollution d'un véhicule diesel n'a pas encore atteint son régime optimal.

La figure 4.19 présente les émissions de NO_x au cours de la journée pour un véhicule diesel réalisant un trajet long-courrier. Sur ce trajet, les émissions de NO_x au cours de la phase de démarrage, associée aux dix premiers kilomètres, représentent 14 % des émissions au cours de la journée pour 2.3 % du kilométrage. Comme en témoignent la valeur maximale de la vitesse ainsi que son instabilité, cette phase de démarrage se situe en périphérie de zone urbaine. On note aussi une pente de 2 % sur les derniers kilomètres de cette phase de démarrage, laquelle pente induit une consommation élevée. Sur cet exemple, le taux d'émission dépend donc de la nature de la route, du profil altimétrique et enfin du démarrage à froid.

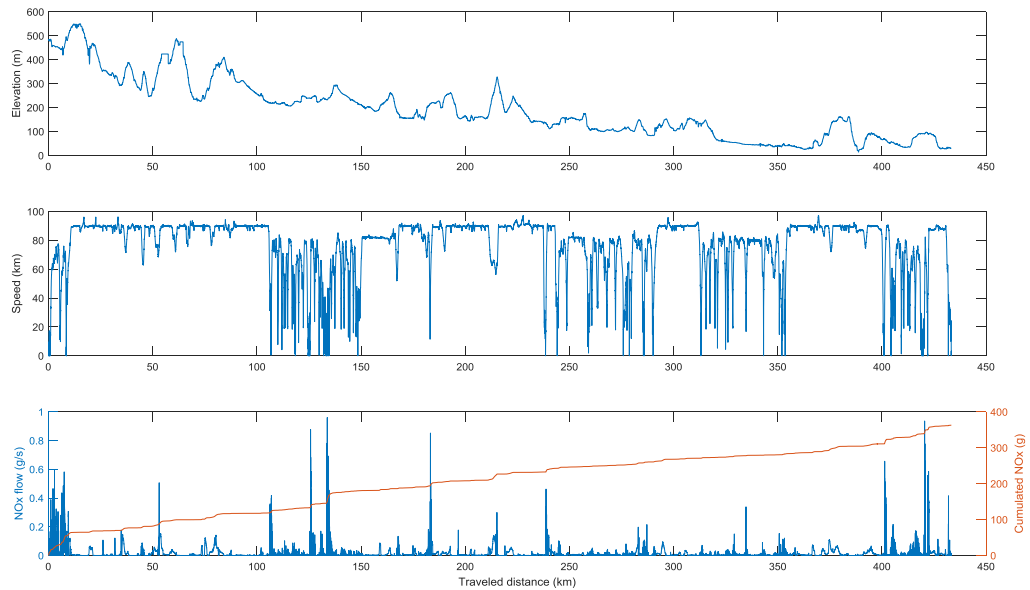


Figure 4.19 : Emissions de NO_x - DIESEL

On a donc recherché un second démarrage à froid réalisé dans des conditions différentes. La figure 4.20 présente un second démarrage à froid au milieu d'un trajet sur route nationale ; la situation est aussi complexe que celle rencontrée en début de journée sur la figure précédente. Cette phase de redémarrage peut être délimitée par la marche sur les émissions cumulées, après quoi la pente retrouve une valeur normale. Durant cette phase, le total des émissions est de 30 grammes ; cette valeur est par ailleurs similaire à celle observée en début de journée.

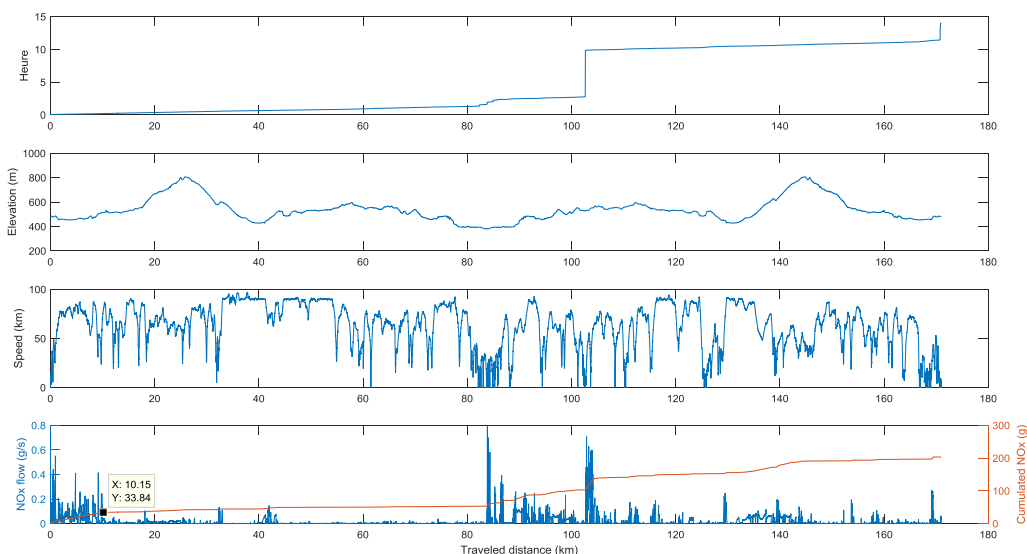


Figure 4.20 : Emissions De NO_x , démarrage à froid au kilomètre 105 - DIESEL

Trajet Annecy-Thonon sur route nationale.

Au kilomètre 105, le « saut » des émissions de NO_x cumulées (courbe rouge sur la figure du bas) est corrélé au redémarrage après un arrêt de plus de 4 heures (figure du haut).

Finalement, pour tous les trajets, on a mesuré les émissions de NO_x sur les vingt premières minutes de la journée, sans chercher à isoler les facteurs explicatifs : sur les vingt-et-un mois de l'expérimentation, ils varient entre 20 et 30 grammes, avec une moyenne à 25 grammes. Comparée aux 250 grammes émis en moyenne sur la totalité d'un trajet, cette valeur signifie que la phase de démarrage compte en moyenne pour 10 % des émissions de NO_x ; si on défalque ce qui est propre à une phase de démarrage, généralement réalisée en zone périurbaine, l'impact d'un moteur froid est encore inférieur à ce pourcentage. Comparé aux aménagements, au trafic, aux conditions de livraison ou aux conditions éoliennes, le démarrage à froid n'est donc finalement qu'un facteur secondaire dont une étude approfondie des effets n'a pas paru prioritaire dans ce projet.

Comparé aux autres facteurs explicatifs, le démarrage à froid (dont il faut défalquer la contribution propre au démarrage) a un impact secondaire sur le total des émissions de NO_x d'un véhicule. En particulier, on notera que l'impact des manœuvres est bien supérieur à celui des démarrages à froid. Cette conclusion pourrait cependant être révisée si on disposait de mesures dans les premières minutes suivant la mise en marche du moteur.

4.7. Conclusion.

La consommation et les émissions d'un véhicule dépendent de nombreux facteurs explicatifs dont les effets sont du premier ordre. Certains de ces facteurs sont observables et prédictibles : nature de la route, profil altimétrique et poids total en charge. Certains sont observables mais l'information n'est pas aisément accessible : aménagements de la voirie. Certains dépendent du temps : conditions de trafic et

conditions météorologiques. Ces derniers peuvent être récurrents ou au contraire imprédictibles ; sachant qu'on ne prédit pas la consommation d'une mission mais *la consommation moyenne d'une série de missions identiques*, cette prédictibilité dépend non seulement de la nature prédictible des événements (congestion, précipitations, etc.), mais aussi de l'identité des descriptifs temporels (heures, jours, saisons) des missions. En résumé :

- **la catégorie de la section de route, le dénivelé et le poids total en charge étant supposés identiques, il reste une variabilité encore importante entre des trajets réalisés sur des routes de même catégorie mais néanmoins très différentes. La densité des aménagements, corrélée au degré d'urbanisation, et la densité du trafic, elle aussi corrélée au degré d'urbanisation, sont les principaux facteurs explicatifs de la variance résiduelle. Dans le cas des missions de distribution, c'est la fréquence des opérations de chargement et déchargement qui est ensuite déterminante. On pourrait encore ajouter des facteurs exceptionnels³⁶ dont l'étude dépasse le cadre de ce projet.**
- **il existe une variabilité journalière irréductible de la consommation entre deux missions réalisées sur une même route et dans des conditions considérées comme similaires. Quand on a tenu compte de la nature de la route, du profil altimétrique et du poids total en charge, on verra dans la suite du rapport que cette variabilité d'un jour à l'autre n'est cependant pas si grande puisqu'elle est de l'ordre de ± 5 %.**
- **dans une situation d'exploitation réelle, l'étude des facteurs explicatifs secondaires est d'autant plus difficile qu'il est généralement impossible de contrôler les facteurs du premier ordre.**
- **les facteurs explicatifs sont fréquemment corrélés entre eux**
- **la consommation et les émissions ne sont pas de simples sommes des contributions des divers facteurs explicatifs ; on observe des effets de couplage entre le profil altimétrique et les conditions éoliennes ou entre le profil altimétrique et des aménagements**

³⁶ Ainsi, la sinuosité, la nature du revêtement et l'étroitesse d'une route secondaire ont un effet majeur ; cet effet n'aura cependant un impact significatif sur la totalité du trajet que pour une mission exceptionnelle où le déplacement s'effectue principalement sur ce type de route. Ce cas de figure a été laissé de côté dans cette étude.

5. Etude des anomalies et dysfonctionnements

Au cours du projet, de multiples défauts de fonctionnement ont été constatés, aussi bien sur des véhicules gaz que sur des véhicules diesel : chute de puissance du moteur, émissions anormales de NO_x. Ces pannes et dysfonctionnements font partie de la situation réelle d'exploitation des véhicules et ce chapitre s'intéresse à leur impact sur la consommation, les émissions et la disponibilité des véhicules. Ces dysfonctionnements sont généralement le fait du véhicule, mais la composition du gaz pourrait être incriminée. Ces défauts ont affecté sept véhicules, appartenant à cinq modèles différents, sur la douzaine du projet ; on rappelle que tous les véhicules sont des modèles commercialisés et non des prototypes ; ces défauts ont affecté aussi bien un véhicule GNC, dont le développement technologique est récent, qu'un véhicule diesel et un véhicule GNL, dont les technologies sont plus éprouvées. Les défauts constatés sont les suivants :

- de manière ponctuelle, un déficit de puissance sur un véhicule gaz
- de manière systématique, des émissions de NO_x anormalement élevées sur un véhicule diesel
- de manière systématique, des émissions de NO_x anormalement élevées sur deux véhicules gaz du même modèle
- de manière ponctuelle, une consommation et des émissions de NO_x anormalement élevées sur un véhicule GNL

5.1. Déficit de puissance

A de multiples reprises, quand la puissance maximale du moteur était sollicitée, un déficit de puissance a été observé par le conducteur sur le véhicule DX347RQ équipé d'un moteur fonctionnant au gaz. Une première étape a consisté à vérifier ce constat, le caractériser et le quantifier.

Dans un premier temps, le conducteur avec son style de conduite a été éliminé comme cause, car c'était toujours le même qui empruntait le même trajet. De même, le carburant a été mis hors de cause, car aucune corrélation n'a pu être établie avec la fréquentation d'une station de gaz.

On a donc étudié en détail le fonctionnement du véhicule DX347RQ qui a la particularité d'être poussé dans ses limites dans des trajets de montagne. Cette chute de puissance a été caractérisée et quantifiée sur un trajet type : la montée du col d'Évires sur une dizaine de kilomètres. Ce dysfonctionnement se traduit par l'incapacité du moteur à fournir une puissance donnée de manière continue : la figure 5.2 montre des pics de puissance après un changement de rapport puis une chute et enfin une stabilisation de la puissance fournie (on a retenu une durée minimale de 20 secondes pour caractériser un tel plateau). La différence entre le fonctionnement normal et le fonctionnement anormal est visible en comparant les puissances au-dessus de la droite des 225 kW sur les figures 5.1 et 5.2 – la puissance nominale du véhicule est 250 kW. On a donc comparé le même trajet sur différentes journées, effectué par le même véhicule et avec le même conducteur. Le tableau 5.1 reporte les valeurs pour plusieurs journées du mois de mars. Les journées en rouge, avec un poids total en charge d'environ 33 tonnes, sont des journées défectueuses qui peuvent être comparées aux journées en vert qui sont des

journées normales. Pour les journées défectueuses, on note l'incapacité du véhicule à soutenir de manière continue une puissance indiquée de 225 kW. On note que ce déficit de puissance ne s'observe que pour un véhicule poussé dans ses limites : en l'occurrence un poids total en charge de plus de trente tonnes avec une pente moyenne de 2.5%.

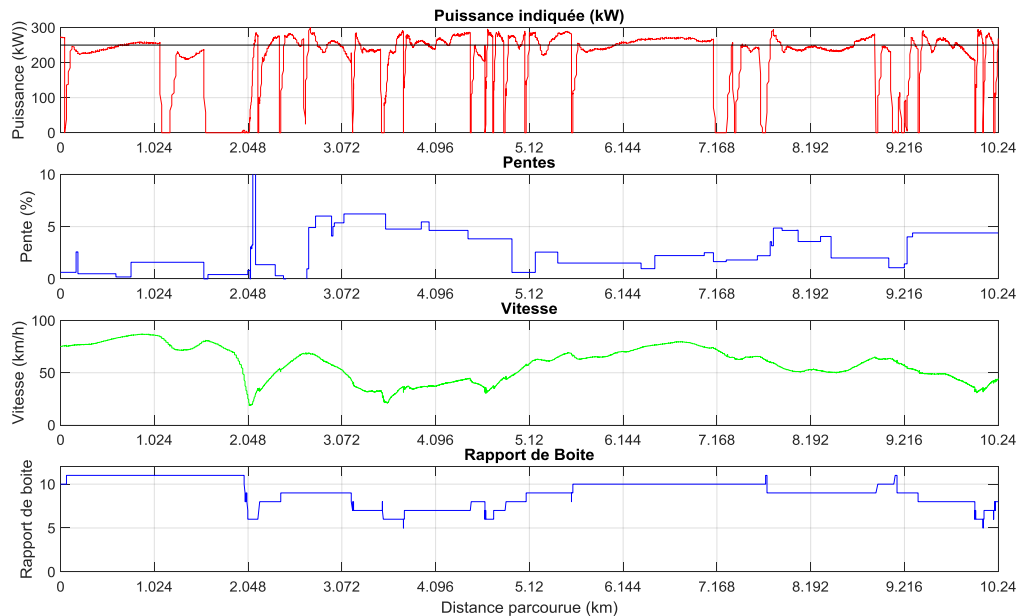


Figure 5.1 : Montée du col d'Évires - Fonctionnement normal

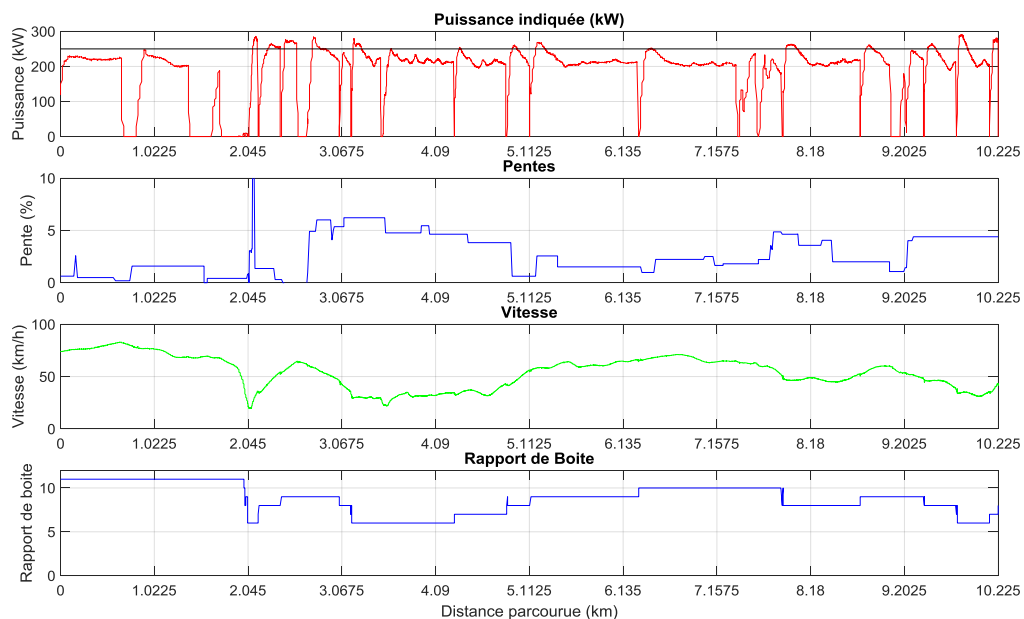


Figure 5.2 : Montée du col d'Évires - Fonctionnement anormal

La différence de fonctionnement s'observe sur le graphique du haut où la courbe de puissance (en rouge) passe au-dessus de la barre des 90 % de la puissance maximale sur la figure 5.1 et demeure en dessous sur la figure 5.2. Les autres courbes montrent la similitude de l'usage du véhicule dans les deux cas.

Les résultats précédents ont été confirmés en novembre 2016 en affectant au même trajet un second véhicule du même modèle : le DY491CV. L'expérience a duré une semaine, du 22 au 30 novembre, avec deux trajets empruntant le col d'Évires. Sur les deux trajets empruntant le col l'un des deux a présenté les mêmes anomalies de fonctionnement que celles observées avec le DX347RQ.

JOUR	PTC Tonnes	DUREE Sec	DUREE > 225 kW	DUREE > 250 kW
2	31	701	253	55
3	19	606	21	0
7	33	725	0	0
8	21	678	44	0
9	34	747	0	0
11	33	722	64	0
16	34	739	95	0
18	33	693	223	0
22	18	595	120	23
23	33	765	213	117
24	21	633	81	0
25	33	688	349	51
31	27	639	277	53

Tableau 5.1 : Journées du mois de mars 2016

vert : journées normales ; rouge : journées anormales ; noir : journées non considérées
 PTC : Poids Total en Charge ; DUREE : temps mis par le véhicule pour monter au col ;
 DUREE > 225kW : temps cumulé, pour lequel la puissance indiquée dépasse 225 kW pendant au moins 20 secondes consécutives. DUREE > 250kW : temps cumulé, pour lequel la puissance indiquée dépasse 250 kW pendant au moins 20 secondes consécutives.

Si les données statistiques et les figures reportant la puissance ont confirmé le ressenti des conducteurs, c'est l'examen de la cartographie moteur qui a permis de caractériser le défaut de fonctionnement³⁷. La comparaison des cartographies met en évidence l'existence de deux régimes de fonctionnement pour les journées défectueuses (voir figure 5.3)

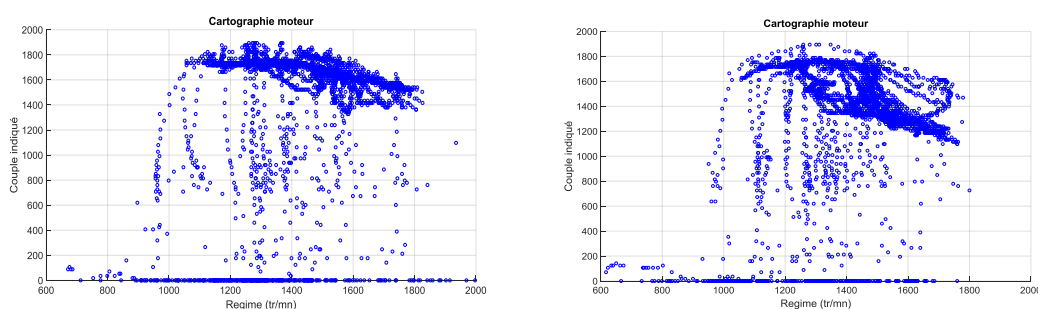


Figure 5.3 : Montée du col d'Évires – fonctionnements normal (g) et anormal (d)

Les données ont été transmises au constructeur et une correction a été retournée, au mois de juillet 2017, sous la forme d'une modification des paramètres du calculateur.

³⁷ Bruno Jeanneret du Laboratoire Transports et Environnement (IFSTTAR) a largement contribué à ce travail.

Une seconde série d'observations a ensuite été réalisée sur de nouvelles montées au col d'Évires. Ces observations réalisées entre juin et décembre 2017 se répartissent avant et après l'intervention du constructeur. Les indicateurs utilisés dans le tableau 5.2 n'ayant pas une fiabilité suffisante, pour qualifier les journées observées, on s'est basé uniquement sur un examen visuel des cartographies moteur. Cet examen a permis de confirmer que toutes les journées après l'intervention sont normales. Un calcul simple permet d'estimer la probabilité que l'amélioration observée ne soit pas le fait du hasard. Avant modification, on observe 5 dysfonctionnements sur 12 observations. Après modification, on n'observe aucun dysfonctionnement sur 8 observations. La probabilité de n'observer aucun dysfonctionnement si le défaut n'a pas été corrigé est $(7/12)^8 = 0.013$. Bien que cette valeur soit très faible, on ne peut totalement exclure la possibilité que le défaut demeure.

Cet exemple reflète la difficulté à caractériser objectivement un défaut mineur - mais néanmoins aisément détecté par les conducteurs. En particulier, sur vingt-et-un mois d'expérimentation en situation réelle d'exploitation, on a obtenu uniquement 20 trajets réalisés dans des conditions à peu près identiques. Il a ensuite fallu un an entre la détection et la correction.

JOUR	PTC Tonnes	DUREE Sec	DUREE > 225 kW	DUREE > 250 kW
2	31	701	253	55
7	33	725	0	0
9	34	747	0	0
11	33	722	64	0
16	34	739	95	0
18	33	693	223	0
23	33	765	213	117
25	33	688	349	51
12 juin 2017	32	762	304	84
21 juin 2017	36	691	376	132
23 juin 2017	39	875	154	22
03 juillet 2017	36	710	303	103
17 juillet 2017	35	747	235	0
18 juillet 2017	31	642	238	0
24 juillet 2017	37	753	376	0
31 juillet 2017	36	730	361	29
16 août 2017	36	741	259	0
21 août 2017	34	679	317	36
22 nov. 2017	37	706	408	91
26 dec. 2017	37	749	369	22

Tableau 5.2 : Utilisation de la puissance

rouge/brun : avant intervention (normal/dysfonctionnement); vert : après intervention

5.2. Emissions de NO_x sur un véhicule diesel

Dès le début du projet, sur une durée de six mois, les émissions moyennes de NO_x d'un des véhicules diesel se sont révélées deux à trois fois supérieures à celles des autres véhicules. Le véhicule en cause est le DL928LJ (voir tableau 5.3).

Ce dysfonctionnement n'ayant eu aucun autre impact visible, sur la consommation ou sur la puissance du moteur, le phénomène est resté inaperçu des conducteurs et des transporteurs. Il n'a été révélé que par les mesures des émissions.

	Autoroute	Route de campagne	Voie rapide urbaine	Traversée d'agglomération	Urbain dense
DE477VE	34	81	-	112	125
DS282LC	32	124	-	117	-
DL928LJ	118	234	-	279	367

Tableau 5.3 : Emissions de NO_x (g/100 km)

Les données ont été transmises au constructeur et une intervention lourde a été réalisée en mai 2017. Sans rentrer dans les détails de l'intervention de nombreux éléments du système de dépollution ayant subi une dégradation accélérée ont été remplacés. La cause était une fuite d'huile, au niveau du turbocompresseur, qui a détérioré le catalyseur.

	Autoroute	Route de campagne	Voie rapide urbaine	Traversée d'agglomération	Urbain dense
DE477VE (6 mois)	34	81	-	112	125
DE477VE (21 mois)	41	101	31	129	142
DS282LC (6 mois)	32	124	-	117	-
DS282LC (12 mois)	41	121	-	126	-
DL928LJ (avant, 6 mois)	118	234	-	279	367
DL928LJ (après, 5 mois)	51	86	50	140	190

Tableau 5.4 : Emissions de NO_x (g/100 km)

Une seconde campagne de mesure a été réalisée après la correction. Celle-ci a été efficace puisque les émissions de NO_x ont diminué d'un facteur deux environ et sont désormais comparables à celles des autres véhicules (voir tableau 5.4). On vérifie que cette amélioration n'est pas le fait du hasard en comparant les résultats obtenus sur d'autres véhicules diesel. Ainsi, pour le DE477VE et le DS282LC, la comparaison des émissions sur deux périodes révèle une variabilité comprise entre dix et vingt pour cent ; le gain de cent pour cent obtenu sur le DL928LJ ne peut donc être expliqué par une variabilité naturelle.

Dans la suite du rapport, la question de la présentation des statistiques relatives au véhicule s'est posée : des données séparées pour chaque période ; des données agrégées sur les deux périodes ; des données pour la seule période après correction du défaut. On a choisi la troisième solution pour faciliter la lecture comparative de résultats, concernant des véhicules en bon état de marche.

Pour un véhicule donné et une catégorie de route, la variabilité des émissions entre deux périodes de mesure est une indication de l'incertitude sur les valeurs présentées. Comme les émissions de NO_x sont très sensibles à des phénomènes transitoires, liés à des facteurs explicatifs non observés, cette variabilité serait aisément explicable par des différences de conditions d'exploitation : aménagements des routes empruntées,

conditions de trafic et conditions météorologiques. Cette question a été étudiée plus en détail dans le chapitre précédent.

5.3. Emissions de NO_x sur des véhicules gaz

De même que pour le véhicule diesel étudié dans le paragraphe précédent, on a observé des émissions moyennes de NO_x d'un modèle de véhicule gaz très supérieures à celles des autres véhicules GNV. Ces émissions élevées ont été observées dans des conditions de vitesse non stabilisée : traversée d'agglomération, urbain dense et route de campagne. Les deux véhicules en cause sont l'EL375RS et l'EN052KT (voir tableau 5.5).

Les données ont été transmises au constructeur et plusieurs interventions ont été réalisées à partir de février 2018. L'intervention a été limitée à un nouveau réglage du calculateur pour le premier véhicule. Pour le second véhicule, en plus du nouveau réglage du calculateur, de nombreux éléments du système de dépollution et de l'échappement ont été remplacés. La cause serait un défaut de fabrication.

	Autoroute	Route de campagne	Voie rapide urbaine	Traversée d'agglomération	Urbain dense
DX347RQ	14	28	22	46	50
DY491CV	20	19	21	41	48
EA190HL	18	93	14	137	157
EL375RS (avant)	6	96	34	130	226
EN052KT (avant)	12	79	33	180	293
EL375RS (après, 40 j)	6	80	24	96	210
EN052KT (après, 10 j)	13	79	15	161	287

Tableau 5.5 : Emissions de NO_x (g/100 km)

Le DX347RQ et le DY491CV sont des véhicules GNC.

L'EA190HL qui est un véhicule GNL

L'EL375RS et l'EN052KT sont des véhicules GNL+GNC. Le premier fonctionne à 95 % en GNL, tandis que le second fonctionne à 100 % en GNC.

Des campagnes de mesure ont été reprises après ces corrections, avec respectivement 40 et 10 journées d'exploitation effective pour ces deux véhicules. A première vue, aussi bien pour l'EL375RS que pour l'EN052KT, les données du tableau 5.5 ne montrent pas d'amélioration après les correctifs apportés par le constructeur :

- les résultats sur autoroute, sur route et en urbain dense sont stables : on a vu dans le § 5.2 que dans des conditions similaires une variabilité de 10 à 20 % des émissions est naturelle
- à l'opposé, la dispersion des émissions en traversée d'agglomération (130, 96, 180 et 161 g/100km) témoigne d'une grande variabilité des situations rencontrées et les résultats sont par conséquent difficilement interprétables.
- on observe une stabilité des émissions, sauf sur voie rapide urbaine où on observe une amélioration ; cette amélioration sera expliquée par des conditions d'exploitation différentes

Pour confirmer et expliquer ces résultats, les données ont été examinées plus en détail. Les tableaux présentent les conditions précises d'expérimentation (tableau 5.6) et les

émissions de NO_x en fonction soit de la distance parcourue soit de l'énergie développée (tableau 5.7). Pour les deux véhicules, le fait notable est que sur voie rapide urbaine la vitesse moyenne est nettement plus élevée durant la période après intervention du constructeur. Cette vitesse moyenne plus élevée témoigne d'un trafic plus fluide et cela explique que, dans ce seul cas, les émissions de NO_x soient plus faibles après intervention. Finalement, éliminant les cas des voies rapides urbaines et des traversées d'agglomération, les résultats sur autoroute, sur route et en urbain dense ne montrent aucune amélioration.

EL375RS				
	Avant révision		Après révision	
	Vitesse moyenne	Distance parcourue	Vitesse moyenne	Distance parcourue
Autoroute	85	54237	85	12485
Route	45	3541	46	5132
Voie Rapide urbaine	58	518	65	1936
Traversée d'agglomération	34	6041	35	5388
Zone urbaine dense	25	238	27	1427

EN052KT				
	Avant révision		Après révision	
	Vitesse moyenne	Distance parcourue	Vitesse moyenne	Distance parcourue
Autoroute	76	1552	78	996
Route	51	1081	51	883
Voie Rapide urbaine	55	297	69	199
Traversée d'agglomération	33	1139	36	933
Zone urbaine dense	24	220	26	194

Tableau 5.6 : Données de l'expérimentation

EL375RS				
	Avant révision		Après révision	
	NOx (g/100 km)	NOx (g/kWh)	NOx (g/100 km)	NOx (g/kWh)
Autoroute	6	40	6	38
Route	97	524	80	431
Voie Rapide urbaine	34	260	24	155
Traversée d'agglomération	130	764	96	527
Zone urbaine dense	226	1288	210	1286

EN052KT				
	Avant révision		Après révision	
	NOx (g/100 km)	NOx (g/kWh)	NOx (g/100 km)	NOx (g/kWh)
Autoroute	12	88	13	98
Route	79	529	79	521
Voie Rapide urbaine	34	270	15	123
Traversée d'agglomération	180	1088	161	1010
Zone urbaine dense	293	1580	287	1671

Tableau 5.7 : Résultats de l'expérimentation

En conclusion, malgré les multiples interventions du constructeur aucune diminution des émissions de NO_x n'a pu être constatée sur ces deux véhicules du même modèle. Les

périodes avant et après intervention ne seront donc pas séparées dans la suite du rapport.

5.4. Consommation et émissions de NO_x sur un véhicule gaz - GNL

Sur une période de dix jours, en octobre 2017, le conducteur a détecté une baisse des performances de son véhicule GNL. Le véhicule en cause est l'EA190HL.

Après signalement du dysfonctionnement, certains éléments matériels défectueux ont été immédiatement remplacés par le constructeur et un retour à la normale a été constaté. Ultérieurement et indépendamment, une analyse des données d'émissions de NO_x a permis de repérer cette phase de dysfonctionnement : le taux d'émission moyen est de 56 grammes aux cent kilomètres en période normale et de 197 grammes durant la période de dysfonctionnement (voir figure 5.4). Sur les vingt-et-un mois de la durée de l'expérimentation, cette phase de surémission n'aura augmenté que de 6 % la quantité totale de NO_x émise.

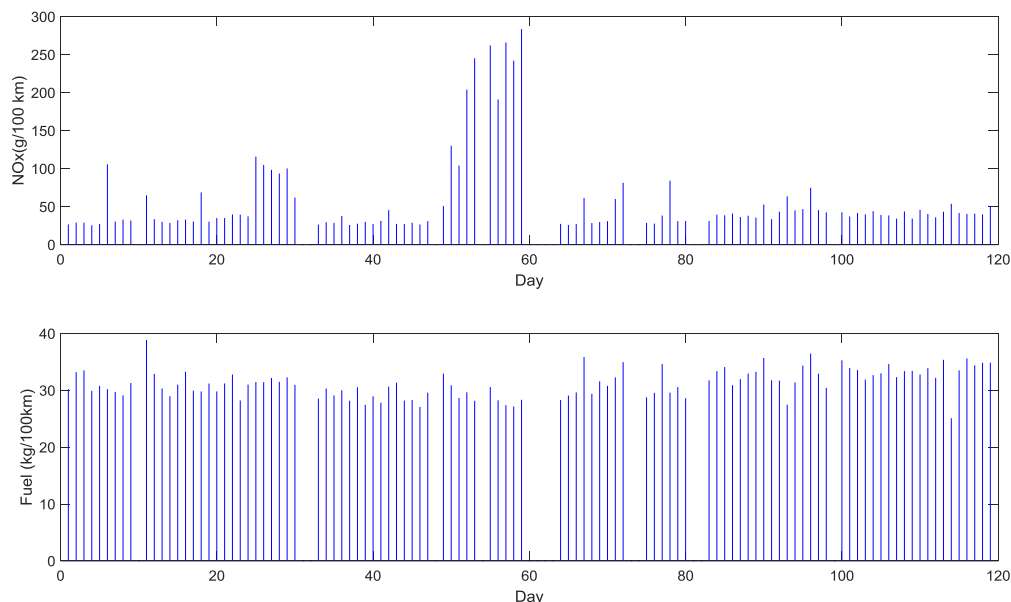


Figure 5.4 : Journées sur la période de août 2017 à janvier 2018 - GNL

Les journées reportées sont celles où le moteur du véhicule a été mis en marche. Les journées avec une valeur nulle ont été éliminées parce que le véhicule a parcouru une distance trop faible (moins de 60 km) dans des conditions généralement exceptionnelles (tracteur sans remorque). On obtient donc finalement 106 journées opérationnelles sur une durée de 6 mois.

Dans la suite du rapport, la question de la présentation des statistiques relatives au véhicule s'est posée. La nature du dysfonctionnement n'étant pas la même que pour le DL928LJ (un très long dysfonctionnement), la réponse a été différente. Parce que l'objectif du projet est la présentation de résultats en situation réelle d'exploitation et

qu'une panne ponctuelle fait partie du quotidien d'un véhicule, on a choisi de présenter des données incluant la période de la panne.

5.5. Conclusions

La caractérisation des dysfonctionnements s'aborde sous différents angles : l'origine du défaut, la gravité et la durée. L'origine du défaut et la gravité du dysfonctionnement sont de la seule responsabilité du constructeur ; la durée du dysfonctionnement dépend du délai nécessaire avant la correction mais aussi du temps nécessaire à sa détection.

Le défaut peut être une panne occasionnelle d'un élément matériel, liée à un historique spécifique, ou résulter soit d'un défaut de conception soit d'un défaut de fabrication. La différence entre la panne occasionnelle et les défauts de conception ou de fabrication est le caractère systématique du défaut dans les deux derniers cas. Ils affectent une flotte de véhicules et non un seul.

La question des délais nécessaires à la correction de pannes ou de défauts de conception dépasse le cadre de cette étude. Le seul constat est que ces délais sont généralement longs et que par conséquent les dysfonctionnements perdurent. La question du temps nécessaire à la détection du défaut est plus intéressante. Si le dysfonctionnement n'affecte ni la puissance du moteur ni la consommation, il ne sera pas détecté par le conducteur ou le transporteur. Cela a été le cas pour le DL928LJ. Dans les conditions réelles d'exploitation, un tel défaut ne peut être constaté que lors d'une visite technique.

Comme la taille de l'échantillon est trop faible pour obtenir une statistique représentative du parc de véhicules en service, il n'est pas question dans ce rapport d'effectuer une estimation de l'impact environnemental de tels défauts.

6. Résultats pour les tracteurs de 44 tonnes

La présentation des résultats statistiques est divisée en trois grandes parties. La première caractérise les trajets. La seconde partie présente séparément les consommations pour les véhicules diesel et pour les véhicules gaz. Aucune comparaison de l'efficacité énergétique n'est effectuée, car une telle étude devrait se faire du puits à la roue (« well to wheel »), ce qui dépasse le cadre de ce projet. La troisième partie compare les émissions de CO₂ et de NO_x des véhicules diesel et des véhicules gaz.

6.1. Caractérisation des trajets

Plutôt qu'une comparaison de deux motorisations, le projet Equilibre compare des usages et en particulier les usages de véhicules diesel à ceux de véhicules gaz. Les kilométrages parcourus sur chaque catégorie de route caractérisent ces usages. Les véhicules qui font du long-courrier roulent principalement sur autoroute, tandis que les véhicules qui font de la distribution circulent majoritairement sur route de campagne ou en zone urbaine ; en règle générale, les véhicules diesel sont affectés à des trajets long-courrier, tandis que les véhicules gaz sont affectés à des missions de distribution (voir figures 6.1 et 6.2). Non seulement, on observe des exceptions, mais un même véhicule peut être affecté à des missions de différente nature au cours de l'année ; ainsi l'EL375RS est un véhicule gaz affecté à des trajets long-courrier, tandis que le DL928LJ est un véhicule diesel qui est passé du long-courrier à la distribution en cours de projet.

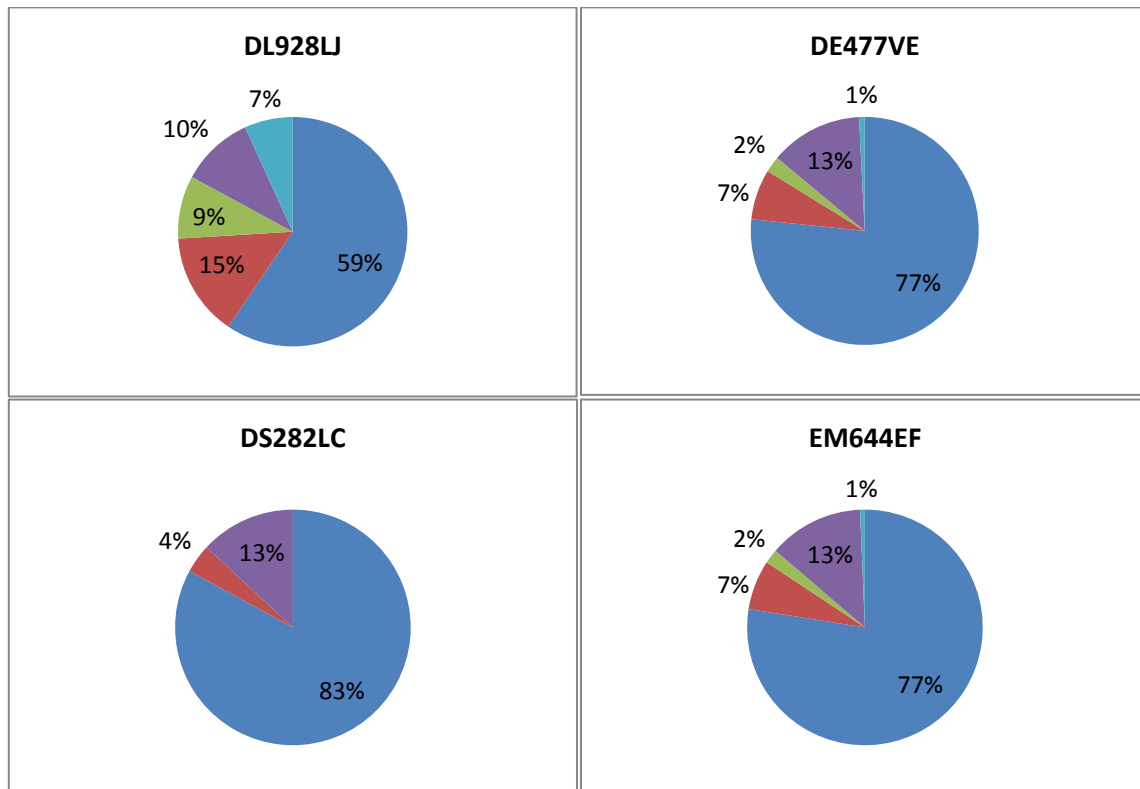
Les kilométrages parcourus sur chaque catégorie de route sont aussi des indicateurs de la représentativité des résultats présentés (voir tableau 6.1). Un faible kilométrage a conduit à ne pas tenir compte des mesures de consommation et d'émission. Les distributions des missions de transport n'étant pas aléatoires, un fort kilométrage n'est pas pour autant une garantie de représentativité statistique. Le cas idéal est celui où un véhicule emprunte des trajets très variés avec des horaires divers ; la réalité est plus proche du cas du véhicule qui dans l'année réalise 52 fois le même trajet aux mêmes horaires.

Du fait de la variabilité intra-classe, la catégorie d'une route n'est pas une information suffisante pour interpréter les résultats. On a donc ajouté trois variables caractérisant les trajets réalisés sur une certaine catégorie de route : le cumul des dénivelés positifs, la vitesse moyenne et le nombre de « stop & go ».

Un fort cumul des dénivelés positifs implique une consommation élevée. Ce critère a surtout un fort impact relatif sur route et autoroute. En pratique, peut-être parce que tous les véhicules opèrent dans les mêmes secteurs géographiques, il n'a guère permis de discriminer les usages sur de très longues périodes (voir tableau 6.2).

Les deux dernières variables sont des indicateurs de la sévérité des conditions d'usage, en zone urbaine essentiellement : une faible vitesse moyenne indique un trafic dense, tandis qu'un nombre élevé de « stop & go » indique une forte densité d'aménagements impliquant des arrêts. Ces critères sont nettement corrélés (voir tableaux 6.3 et 6.4). Le critère des « stop & go », avec des valeurs qui peuvent varier d'un facteur cinq, se révèle déterminant pour une caractérisation plus précise des trajets urbains.

L'explication des valeurs observées peut être complexe. Par exemple, en traversée d'agglomération, on peut observer un nombre de « stop & go » plus élevé pour les véhicules qui font du long-courrier que pour les véhicules qui font de la distribution. L'explication est que pour les premiers cette catégorie correspond uniquement à des livraisons en périphérie des grandes agglomérations, alors que pour les seconds cette catégorie inclut aussi de très nombreuses traversées de petites agglomérations n'entraînant aucun arrêt.



- Classe 1 : Autoroute
- Classe 2 : Route
- Classe 3 : Voie rapide urbaine
- Classe 4: Traversée d'agglomération
- Classe 5 : Zone urbaine dense

Figure 6.1 : Répartitions des kilométrages - Véhicules diesel

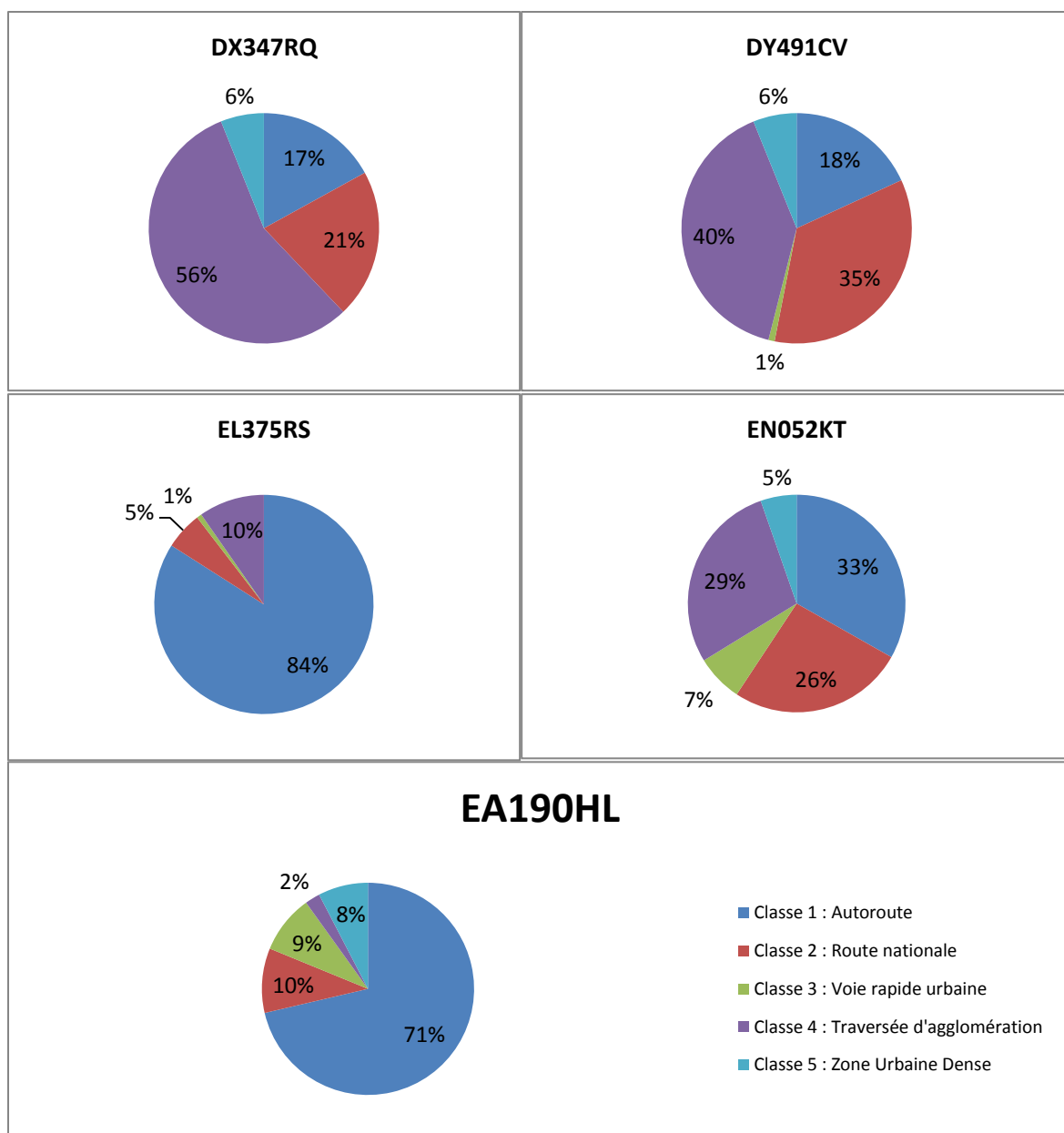


Figure 6.2 : Répartitions des kilométrages - Véhicules gaz
 L'EA190HL est un véhicule GNL. L'EL375RS est un véhicule GNL+GNC fonctionnant au GNL ; son homologue, l'EN052KT fonctionne au GNC.

DIESEL					
	DL928LJ avant révision	DL928LJ après révision	DE477VE	DS282LC	EM644EF
Classe 1 : Autoroute	70782	16779	139152	25187	50061
Classe 2 : Route	17295	6516	12978	1201	4405
Classe 3 : Voie rapide urbaine	10561	2502	4133	69	1277
Classe 4 : Traversée d'agglomération	12209	6753	23837	3980	8430
Classe 5 : Zone Urbaine Dense	8104	1787	1470	203	431
GAZ					
	DX347RQ	DY491CV	EL375RS	EN052KT	EA190HL
Classe 1 : Autoroute	14531	12606	73425	4683	100814
Classe 2 : Route	17883	24257	4843	3681	13915
Classe 3 : Voie rapide urbaine	56	605	641	981	12566
Classe 4 : Traversée d'agglomération	47899	27738	8468	4006	3246
Classe 5 : Zone Urbaine Dense	5194	4249	292	757	10763

Tableau 6.1 : Kilométrages parcourus

Les kilométrages indiqués en rouge sont jugés non représentatifs.

DIESEL					
	DL928LJ avant révision	DL928LJ après révision	DE477VE	DS282LC	EM644EF
Classe 1 : Autoroute	0,8	-	0,5	0,7	0,5
Classe 2 : Route	0,6	-	0,9	0,8	0,8
Classe 3 : Voie rapide urbaine	0,5	-	0,3	-	0,3
Classe 4 : Traversée d'agglomération	0,5	-	0,9	1,5	1,1
Classe 5 : Zone Urbaine Dense	0,6	-	0,8	-	0,8
GAZ					
	DX347RQ	DY491CV	EL375RS	EN052KT	EA190HL
Classe 1 : Autoroute	0,7	0,4	0,4	0,5	1,0
Classe 2 : Route	1,0	0,4	0,7	0,7	0,5
Classe 3 : Voie rapide urbaine	-	0,4	0,3	0,5	0,5
Classe 4 : Traversée d'agglomération	1,1	0,5	0,6	0,7	0,7
Classe 5 : Zone Urbaine Dense	1,5	0,4	-	0,4	0,5

Tableau 6.2 : Rapport des cumuls des dénivelés positifs sur la distance parcourue (%)

En urbain, à cause de la faible longueur des sections et de l'imprécision de l'altimétrie, les valeurs élevées sont sujettes à caution (classes 4 et 5).

Considérant un dénivelé total nul pour chaque catégorie de route, les pentes moyennes (en %) sont le double des valeurs indiquées dans le tableau. Sur autoroute, on distingue clairement l'EA190HL, avec une pente moyenne de 2 %, du DE477VE, avec une pente moyenne de 1 %. Le premier a beaucoup circulé en Auvergne tandis que le second a majoritairement circulé dans la vallée du Rhône.

DIESEL					
	DL928LJ avant révision	DL928LJ après révision	DE477VE	DS282LC	EM644EF
Classe 1 : Autoroute	81	79	85	82	86
Classe 2 : Route	55	56	51	58	51
Classe 3 : Voie rapide urbaine	70	65	69	-	67
Classe 4 : Traversée d'agglomération	40	41	43	42	44
Classe 5 : Zone Urbaine Dense	29	28	34	-	32
GAZ					
	DX347RQ	DY491CV	EL375RS	EN052KT	EA190HL
Classe 1 : Autoroute	81	77	85	77	78
Classe 2 : Route	56	61	45	52	51
Classe 3 : Voie rapide urbaine	-	67	59	64	74
Classe 4 : Traversée d'agglomération	45	41	34	35	37
Classe 5 : Zone Urbaine Dense	39	32	-	26	27

Tableau 6.3 : Vitesses moyennes (km/h)

En-deçà de 30 km/h (en rouge) les conditions d'exploitation sont jugées sévères.

DIESEL					
	DL928LJ avant révision	DL928LJ après révision	DE477VE	DS282LC	EM644EF
Classe 1 : Autoroute	-	2	1	1	0
Classe 2 : Route	-	7	18	6	13
Classe 3 : Voie rapide urbaine	-	6	5	-	4
Classe 4 : Traversée d'agglomération	-	42	47	62	37
Classe 5 : Zone Urbaine Dense	-	140	86	-	81
GAZ					
	DX347RQ	DY491CV	EL375RS(*)	EN052KT	EA190HL
Classe 1 : Autoroute	2	4	1	2	1
Classe 2 : Route	15	3	18	8	9
Classe 3 : Voie rapide urbaine	-	6	18	16	1
Classe 4 : Traversée d'agglomération	41	41	95	85	38
Classe 5 : Zone Urbaine Dense	61	31	-	118	139

Tableau 6.4 : Nombre de « stop & go » aux cent kilomètres

Au-delà de 100 arrêts (en rouge) les conditions d'exploitation sont jugées sévères.

(*)Le véhicule EL375RS réalise des missions long-courrier.

Dans le cours de ce rapport, le poids total en charge moyen a été rarement mentionné. Il y a trois raisons à cette absence. La première est qu'il n'est pas un facteur causal direct : il n'impacte véritablement la consommation que s'il est couplé au dénivelé ou aux accélérations. La seconde raison est qu'il ne discrimine guère les usages. Ainsi, le tableau 6.5 révèle des valeurs assez similaires pour tous les véhicules. La troisième raison est que cette valeur est une moyenne entre des déplacements à pleine charge et des déplacements à vide ou sans remorque³⁸. On notera que les déplacements à vide ne sont pas uniquement des retours à vide, mais aussi des déplacements du dépôt du transporteur au point de charge d'un client, ou du point de dépôt chez un client à un point de charge chez un autre client. Cette proportion des déplacements à vide varie suivant le type de mission du véhicule et suivant la catégorie de la route (voir tableau 6.6) ; il faut en tenir compte quand on compare les poids moyens de missions de distribution avec ceux de missions long-courrier. On notera que la proportion des déplacements à vide n'est jamais négligeable. Cet aspect des missions de transport n'a pas été étudié au cours du projet.

Bien que l'hétérogénéité des poids total en charge en fonction de la catégorie de la route soit faible elle n'est vraisemblablement pas l'effet du hasard. Un semi-remorque peut avoir des stratégies de choix de route différentes – ou des routes imposées – suivant la phase de déplacement en cours ou suivant la distance parcourue : transport d'une charge, retour à vide, rattachement d'un point de chargement, déplacement sans remorque, court déplacement, etc.

DIESEL					
	DL928LJ avant révision	DL928LJ après révision	DE477VE	DS282LC	EM644EF
Classe 1 : Autoroute	26	-	32	24	29
Classe 2 : Route	23	-	27	24	26
Classe 3 : Voie rapide urbaine	24	-	30	-	31
Classe 4 : Traversée d'agglomération	17	-	27	24	26
Classe 5 : Zone Urbaine Dense	23	-	25	-	23
GAZ					
	DX347RQ	DY491CV	EL375RS	EN052KT	EA190HL
Classe 1 : Autoroute	24	25	29	-	26
Classe 2 : Route	20	24	24	-	25
Classe 3 : Voie rapide urbaine	-	25	25	-	25
Classe 4 : Traversée d'agglomération	25	24	21	-	25
Classe 5 : Zone Urbaine Dense	19	25	-	-	25

Tableau 6.5 : Poids total en charge (tonnes)

³⁸ Un poids total en charge moyen de 30 tonnes ne peut pas rendre compte d'un déplacement avec un poids total de 15 tonnes et de deux déplacements avec un poids total de 37.5 tonnes.

	DIESEL	GAZ
Classe 1 : Autoroute	16 %	29 %
Classe 2 : Route	24 %	37 %
Classe 3 : Voie rapide urbaine	11 %	34 %
Classes 4 et 5 : Traversée d'agglomération et urbain dense	27 %	30 %
Toutes classes confondues	18 %	31 %

Tableau 6.6 : Pourcentages des déplacements à vide – données des six premiers mois

Les véhicules diesel effectuent majoritairement des missions long-courrier, tandis que les véhicules gaz effectuent majoritairement des missions de distribution.

6.2. Consommation des véhicules

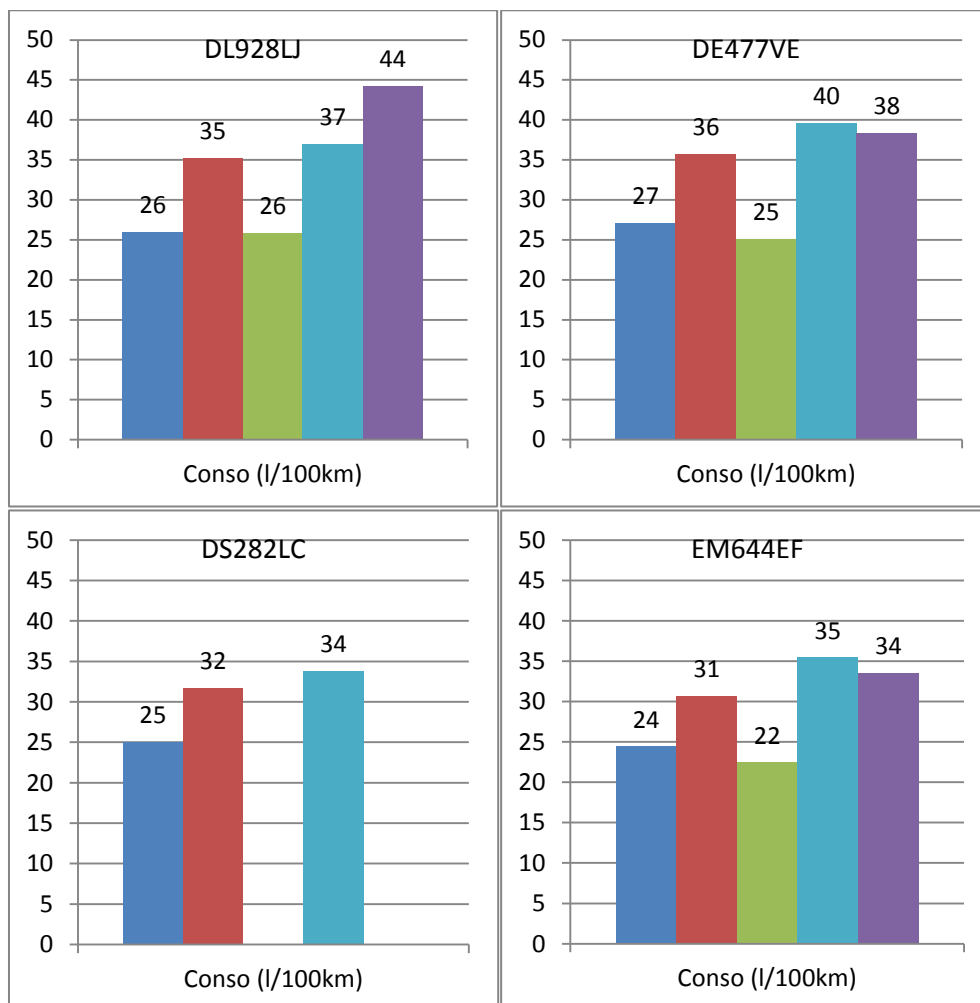
Les consommations des véhicules diesel (voir figure 6.3) sont similaires, mais non identiques, sur autoroutes, routes et voies rapides urbaines. La quasi-identité des consommations sur les voies rapides urbaines et les autoroutes signifie que les premières sont le plus souvent empruntées en dehors des périodes de congestion. La variabilité importante de la consommation pour les traversées d'agglomération, l'urbain dense et les routes témoigne de la variabilité des aménagements urbains et des conditions de trafic. En revanche, la variabilité sur autoroute bien que faible est suffisamment élevée pour être étonnante : la moyenne varie de 24 à 27 litres malgré des distances parcourues de plusieurs dizaines de milliers de kilomètres pour chaque véhicule. Comme il est peu probable que des véhicules diesel présentent un différentiel de consommation de 15 %, une fois de plus il faut incriminer des conditions d'exploitation différentes : dénivelé, poids total en charge, conditions de trafic et conditions météorologiques.

Depuis les normes Euro VI, les réglages des calculateurs équilibrent la consommation et les émissions de NO_x en fonction des choix du constructeur. On verra dans le huitième chapitre que l'écart de consommation entre deux véhicules pourrait atteindre 9 % ; un différentiel de 15 % paraît néanmoins exagéré. Pour éliminer la variabilité propre aux véhicules, en excluant l'EM644EF, on obtient un chiffre de 12 % en comparant l'usage du DL928LJ à celui du DE477VE. C'est cet ordre de grandeur que l'on retiendra³⁹.

En règle générale, les résultats pour les véhicules gaz (voir figure 6.4) confirment les conclusions établies sur les véhicules diesel. On a une forte variabilité de la consommation en urbain et une faible variabilité sur autoroute, voie rapide urbaine et route. Les exceptions seront expliquées dans le paragraphe suivant.

Compte tenu de la variabilité des conditions d'exploitation, d'une année à l'autre ou d'un transporteur à l'autre, sur autoroute, la variabilité de la consommation moyenne d'un véhicule pourrait être de l'ordre de 12 %. On exclut de ce dernier chiffre une variabilité liée à des différences de performances entre véhicules.

³⁹ Il est aussi possible de comparer les chiffres pour un même véhicule d'une période à une autre, en prenant par exemple les chiffres de ce rapport à ceux du rapport de février 2017. On élimine alors la variabilité entre véhicules, mais on perd la variabilité recherchée entre les missions des transporteurs.



- Classe 1 : Autoroute
- Classe 2 : Route
- Classe 3 : Voie rapide urbaine
- Classe 4 : Traversée d'agglomération
- Classe 5 : Zone urbaine dense

Figure 6.3 : Consommation des véhicules diesel

Les données de consommation et d'émissions du véhicule DL928LJ n'incluent que la période postérieure à l'intervention du constructeur.

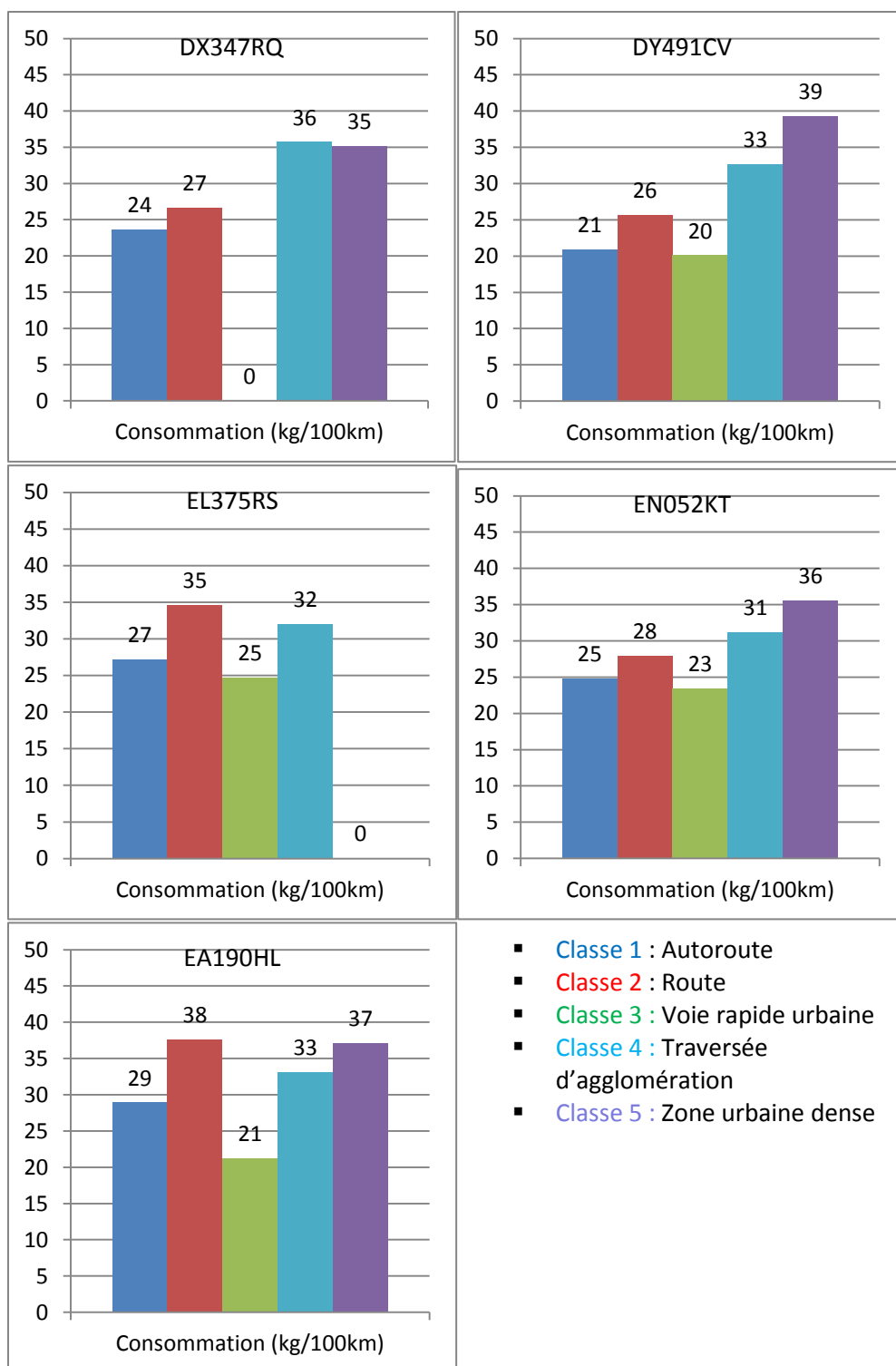


Figure 6.4 : Consommation des véhicules gaz

Les données de consommation et d'émissions des véhicules EL375RS et EN052KT incluent la totalité de la période de l'expérimentation puisque l'intervention du constructeur n'a produit aucune amélioration.

L'examen plus approfondi des résultats pour les véhicules gaz révèle quelques anomalies qui nécessitent des explications.

Sur route, la consommation exceptionnellement élevée de l'EA190HL tient à des passages répétés à Meyzieu dans un secteur où, avec de nombreux ronds-points, la route empruntée présente toutes les caractéristiques d'une traversée d'agglomération.

Sur autoroute, la consommation pour un même modèle de véhicule varie entre 21 et 24 kilogrammes pour les véhicules DY491CV/DX347RQ et entre 25 et 27 kilogrammes pour les véhicules EN052KT/EL375RS. L'écart entre deux véhicules du même modèle s'explique aisément par de légères variations des conditions d'exploitation ; l'écart plus important entre les deux modèles de véhicule s'expliquerait par de fortes variations des conditions d'exploitation. L'explication est évidente pour l'EN052KT qui réalise la plupart de ses missions entre la banlieue lyonnaise, au sud, et Villefranche, au nord, par conséquent sur des autoroutes de contournement à fort trafic : de fait, quand on étudie les trajets un à un, on observe une vitesse très instable (voir figure 6.5) qu'on ne devinait pas au vu de la vitesse moyenne (77 km/h)⁴⁰.

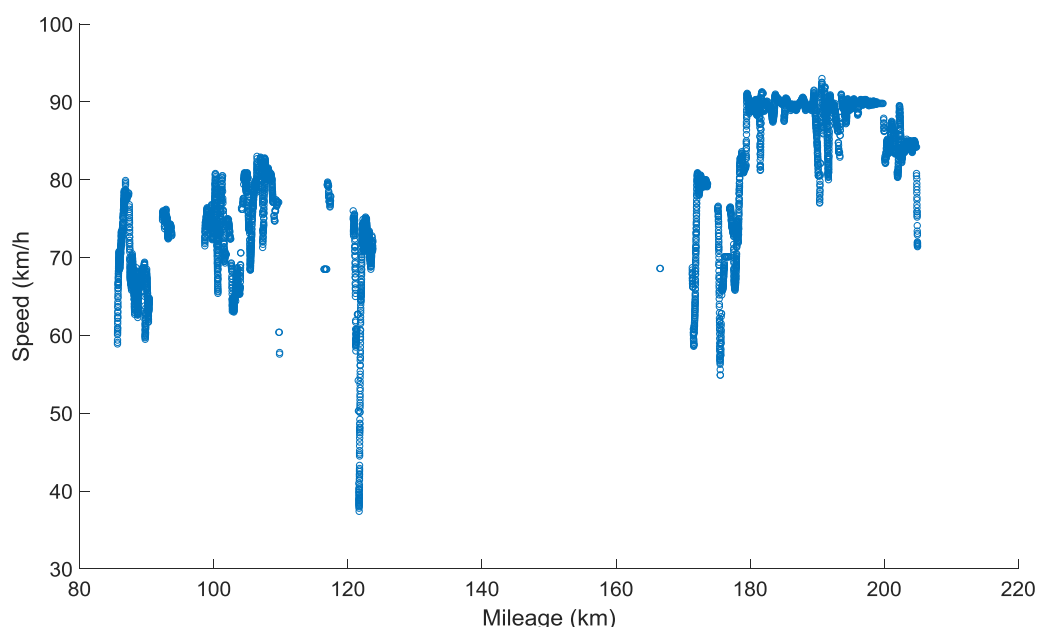


Figure 6.5 : Vitesse de l'EN052KT sur autoroute

L'explication est moins évidente pour l'EL375RS qui réalise la plupart de ses missions entre Chambéry, Lyon ou Grenoble, et Nîmes : de fait, quand on étudie les trajets un à un, il apparaît des chutes prononcées de la vitesse corrélées aux dénivelés positifs, et avec un poids total en charge maximal (voir figure 6.6). L'explication pourrait donc résider dans l'impact du poids total en charge dès lors que sa valeur est très élevée.

Ces explications ne sont que des observations préliminaires. Il aurait fallu une étude approfondie des conditions rencontrées au cours des trajets pour conclure et surtout pour attribuer cet écart à des différences entre véhicules. La focalisation sur les émissions de NO_x des véhicules concernés n'a pas laissé de temps pour cette étude.

⁴⁰ La vitesse moyenne est un indicateur assez pauvre. D'un côté, ses variations importantes permettent de discriminer les grandes catégories de route. D'un autre côté, la lecture des faibles variations est subjective. Ainsi, une vitesse moyenne de 77 km/h suggère (sic) aussi bien une vitesse stable variant entre 74 et 80 km/h qu'une vitesse oscillant entre 64 et 90 km/h.

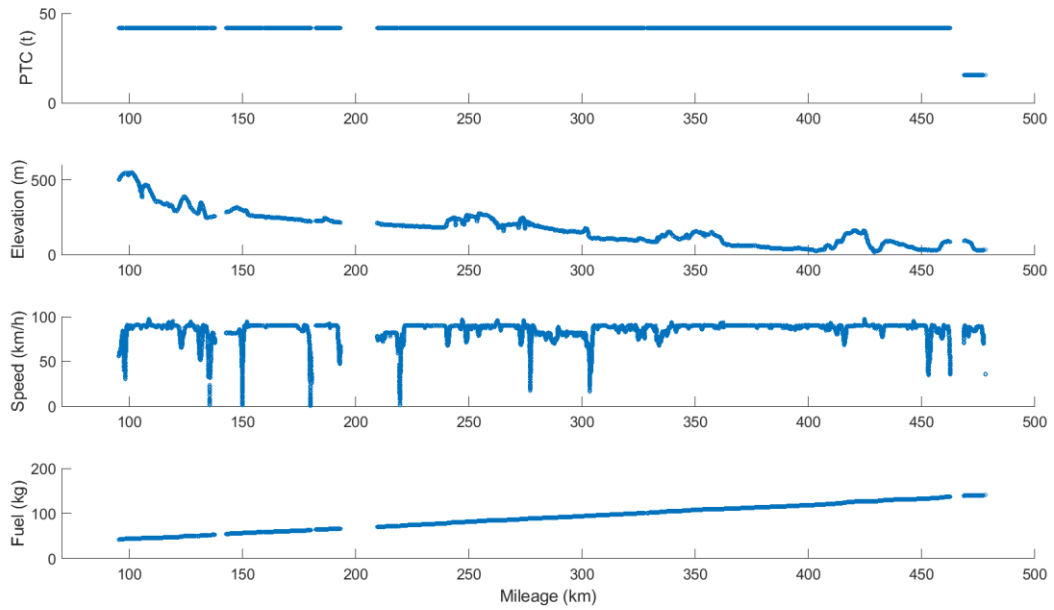


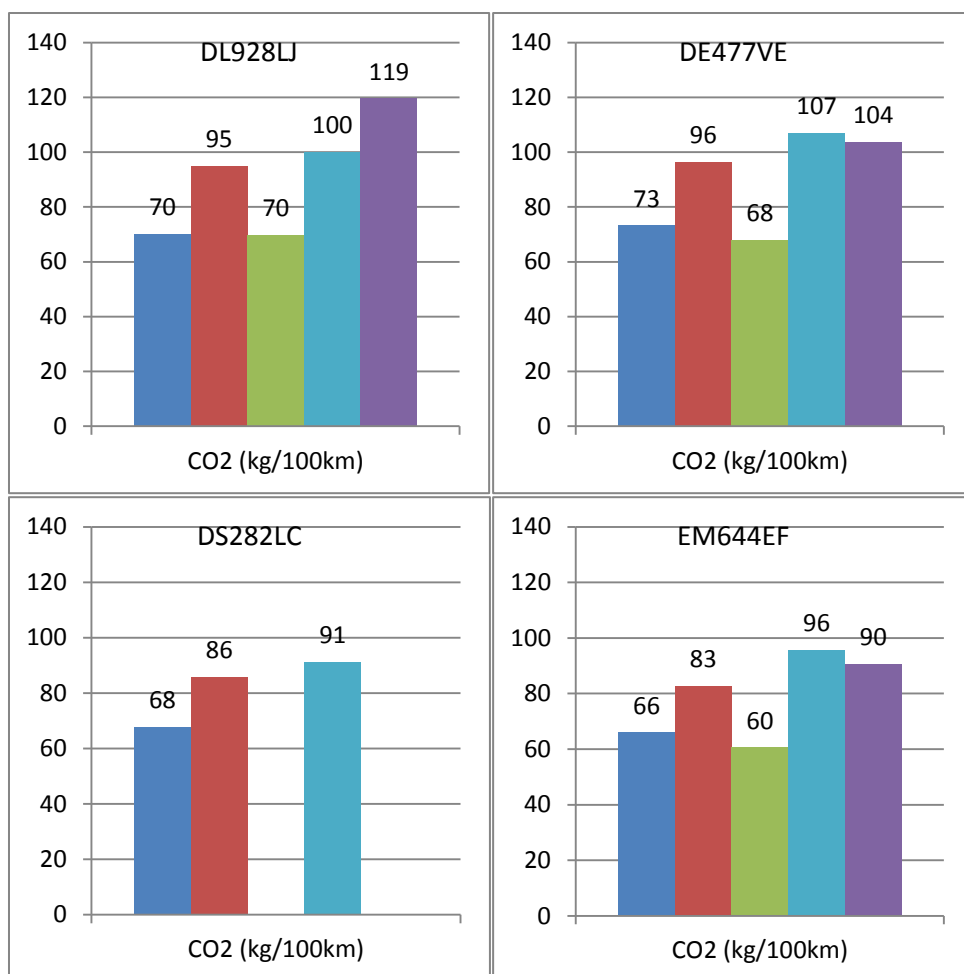
Figure 6.6 : Vitesse de l'EL375RS sur autoroute

6.3. Emissions de CO₂

Les émissions de CO₂ se calculent directement à partir de la consommation :

- émissions de CO₂ par litre de gazole : 2.7 kg
- émissions de CO₂ par kilogramme de gaz : 2.75 kg

Les figures 6.7 et 6.8 se déduisent donc directement des figures 6.3 et 6.4. Le seul intérêt de la présentation des résultats pour le CO₂ est que ces émissions fournissent une base de comparaison entre les véhicules diesel et les véhicules gaz. Compte tenu des faibles différences d'émission entre les véhicules gaz et les véhicules diesel et compte tenu de la variabilité des conditions d'exploitation, pour obtenir une base de comparaison plus large, les résultats ont été agrégés sur l'ensemble des véhicules partageant le même type de motorisation. Les résultats sont présentés sur la figure 6.9 qui, excepté sur autoroute, révèle un léger avantage pour le gaz.



- Classe 1 : Autoroute
- Classe 2 : Route
- Classe 3 : Voie rapide urbaine
- Classe 4 : Traversée d'agglomération
- Classe 5 : Zone urbaine dense

Figure 6.7 : Emissions de CO₂ des véhicules diesel

Les données de consommation et d'émissions du véhicule DL928LJ n'incluent que la période postérieure à l'intervention du constructeur.

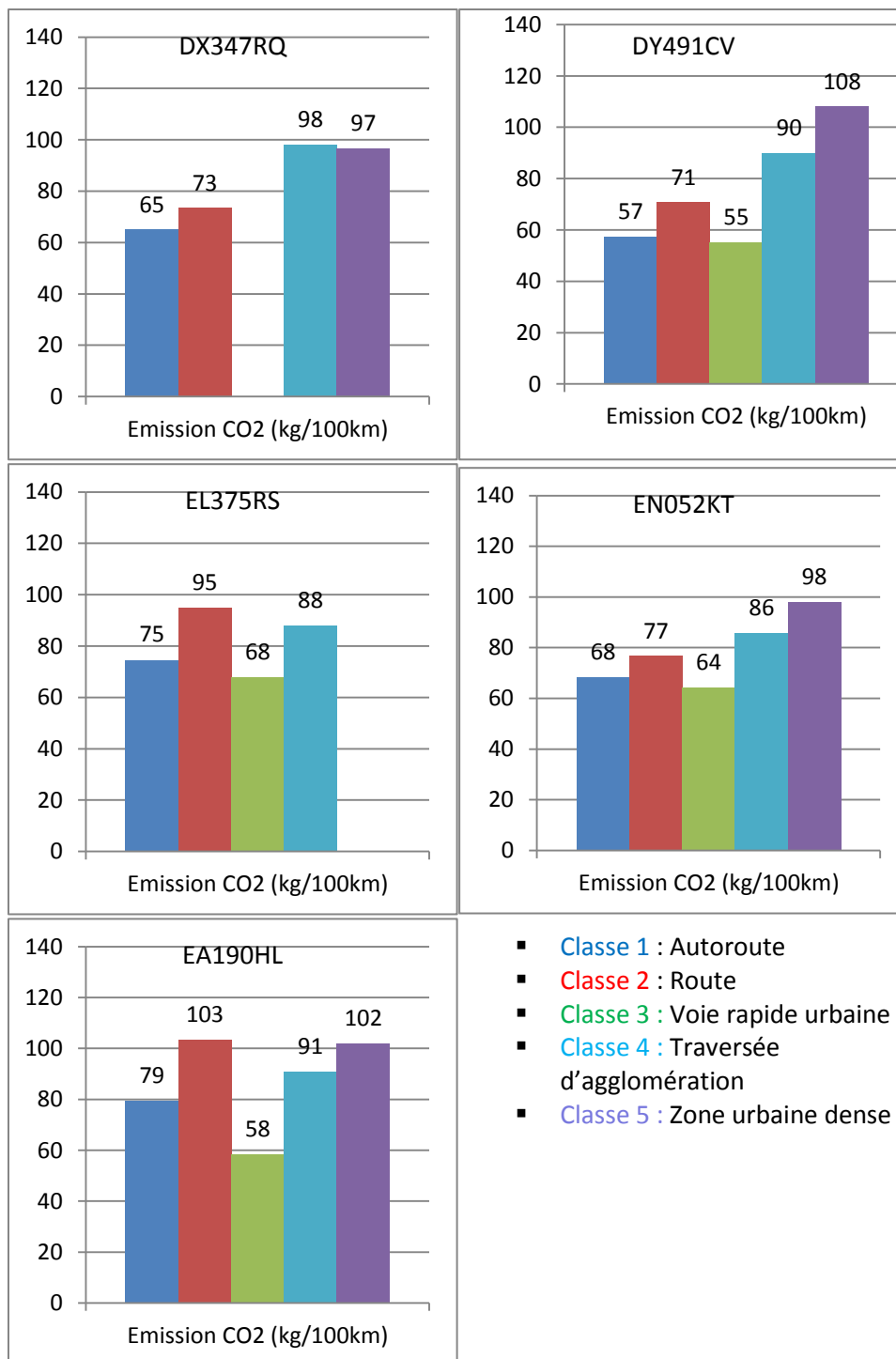


Figure 6.8 : Emissions de CO₂ des véhicules gaz

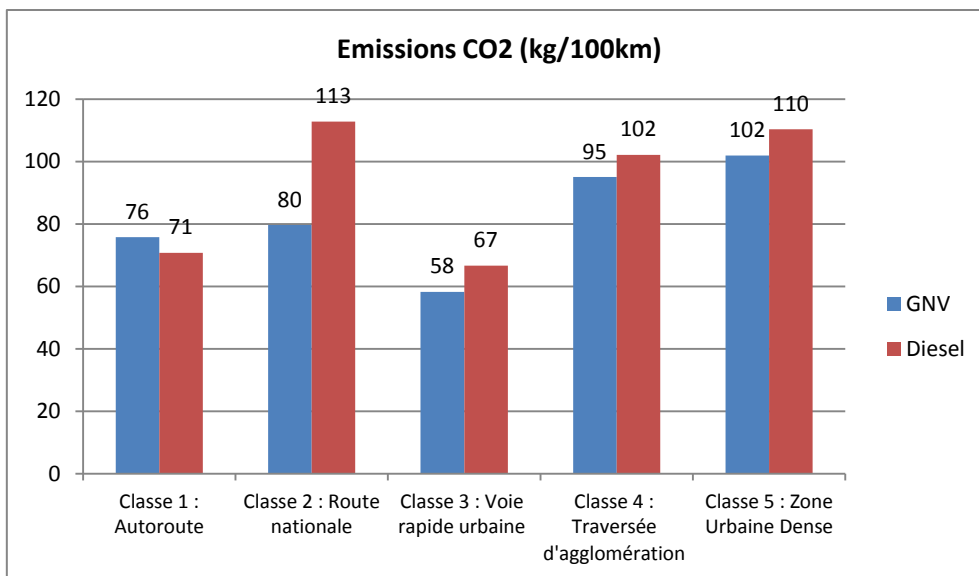


Figure 6.9 : Emissions comparées de CO₂

6.4. Emissions de NO_x

A la différence de la consommation, les émissions de NO_x des véhicules diesel varient sensiblement d'un véhicule à l'autre et cela indépendamment de la catégorie de la route (voir figures 6.10 et 6.12). *A priori*, les conditions d'exploitation sont toujours en cause. Cette variabilité s'explique par la plus grande sensibilité des émissions à des facteurs locaux (e.g. aménagements, conditions de trafic) non pris en compte. Cette sensibilité des émissions à tout facteur rendant la vitesse instable explique aussi le rapport important entre un taux d'émission en zone urbaine et le taux d'émission sur route.

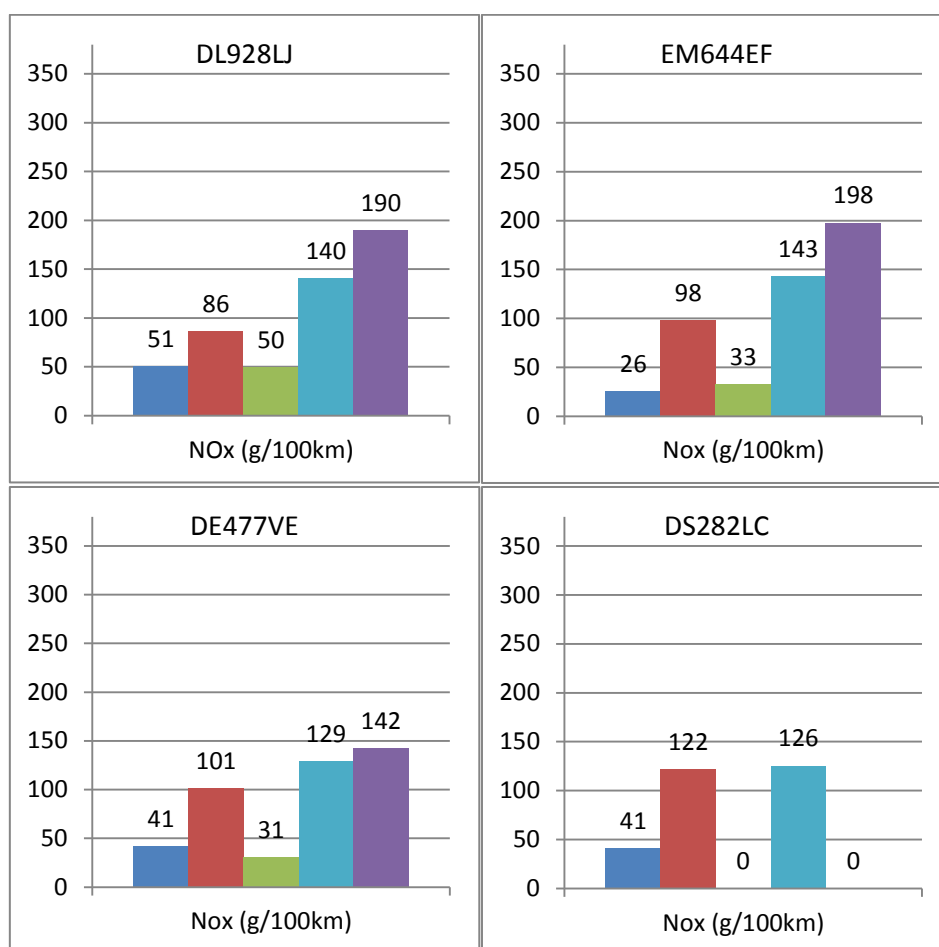
Considérant que la variabilité des conditions d'exploitation pourrait expliquer les différences de taux d'émissions de NO_x, les performances des véhicules diesel en situation réelle d'exploitation sont vraisemblablement très similaires⁴¹.

Du point de vue environnemental, c'est le taux d'émission kilométrique qui présente un intérêt car il rend compte des émissions produites sur une section de route, qui dépendent du véhicule et des conditions environnantes. Le rapport entre les taux d'émission en zone urbaine et le taux d'émission sur route est alors très élevé. Du point de vue du motoriste, qui évalue les performances d'un véhicule, c'est le taux d'émission en fonction de la puissance développée qui présente un intérêt ; ce taux permet de gommer en partie les différences liées aux conditions d'usage. Quand le taux d'émission est exprimé en mg/kWh, le rapport entre le taux d'émission en zone urbaine et le taux d'émission sur route diminue, mais il reste élevé⁴². Cela étant dit, dans la pratique, les

⁴¹ On notera que les véhicules sont équipés de systèmes de dépollution similaires. Le DL928LJ et l'EM644EF sont équipés d'un SCR (système de réduction catalytique sélective). Le DS282LC et le DE477VE sont équipés d'un SCR et d'un EGR (système de recirculation des gaz d'échappement).

⁴² Non seulement, le taux d'émission dépendrait non-linéairement de la puissance, mais il dépendrait aussi de sa variabilité. Le taux d'émission par kWh serait ainsi plus faible à faible puissance en régime stationnaire.

taux d'émissions qu'ils soient exprimés en fonction de la distance parcourue ou en fonction de la puissance développée sont fortement corrélés.



- Classe 1 : Autoroute
- Classe 2 : Route nationale
- Classe 3 : Voie rapide urbaine
- Classe 4 : Traversée d'agglomération
- Classe 5 : Zone urbaine dense

Figure 6.10 : Emissions de NO_x des véhicules diesel (g/100km)

Excepté sur autoroute, les émissions de NO_x des véhicules gaz varient énormément d'un véhicule à l'autre (voir figures 6.11 et 6.13) et cela sans qu'il soit possible d'invoquer les conditions d'exploitation : on passe de variations de l'ordre de 30 % entre des véhicules diesel à des variations de l'ordre de 300 % entre des véhicules gaz. Certains véhicules gaz doivent donc être incriminés pour leurs mauvaises performances. Bien plus, **en urbain**, les taux d'émissions de ces véhicules incriminés se révèlent légèrement supérieurs à ceux de véhicules diesel (voir figures 6.10 et 6.11)⁴³. Par contre, les

⁴³ Le constructeur a été alerté à ce sujet et des correctifs ont été apportés. Une campagne de mesures a donc été relancée après la rédaction de ce rapport ; les résultats sont reportés dans l'Annexe E. Ils ne remettent pas en cause les conclusions générales de ce rapport, mais montrent que les taux d'émissions très élevés des véhicules incriminés sont en partie imputables à des conditions d'exploitation plus sévères.

meilleurs véhicules gaz ont des taux d'émissions en urbain très inférieurs à ceux de véhicules diesel : les taux sont de l'ordre de 40 à 50 g/100 km en urbain contre 135 à 190 g/100 km pour des véhicules diesel.

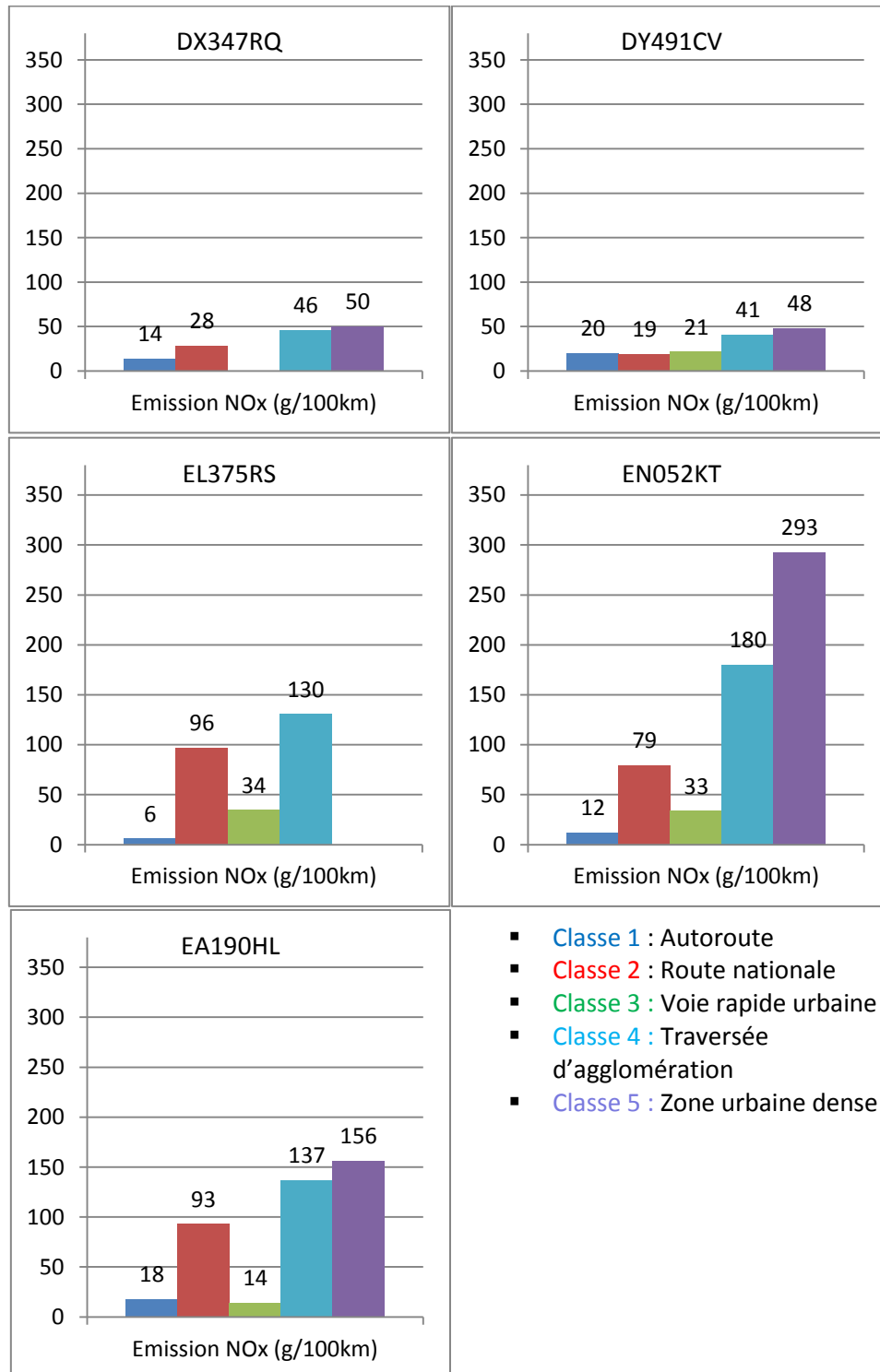
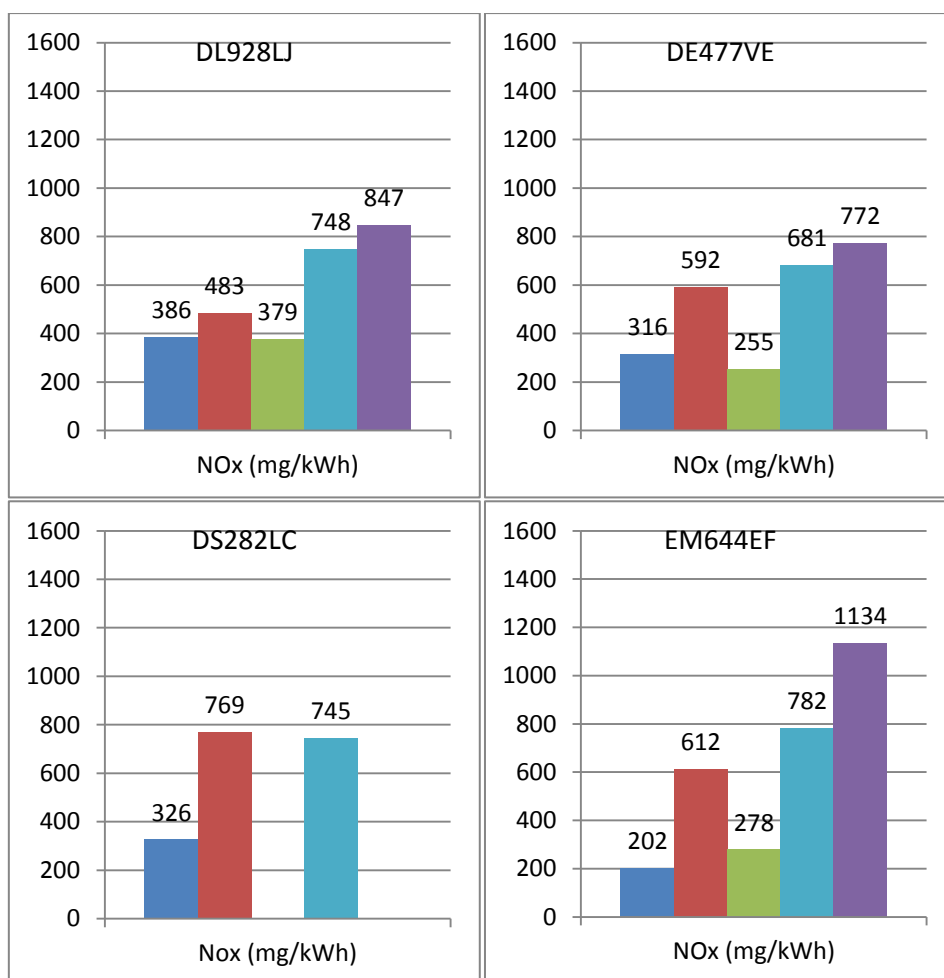


Figure 6.11 : Emissions de NO_x des véhicules gaz (g/100km)



- Classe 1 : Autoroute
- Classe 2 : Route
- Classe 3 : Voie rapide urbaine
- Classe 4 : Traversée d'agglomération
- Classe 5 : Zone urbaine dense

Figure 6.12 : Emissions de NO_x des véhicules diesel (g/kWh)

Pour le DX347RQ et le DY491CV, qui sont des véhicules du même modèle, malgré un kilométrage dépassant la dizaine de milliers de kilomètres sur autoroute et route de campagne, on notera une variabilité des émissions de l'ordre de 50 % (voir figure 6.11). Cette variabilité est à comparer aux 12 % de variabilité pour la consommation sur autoroute.

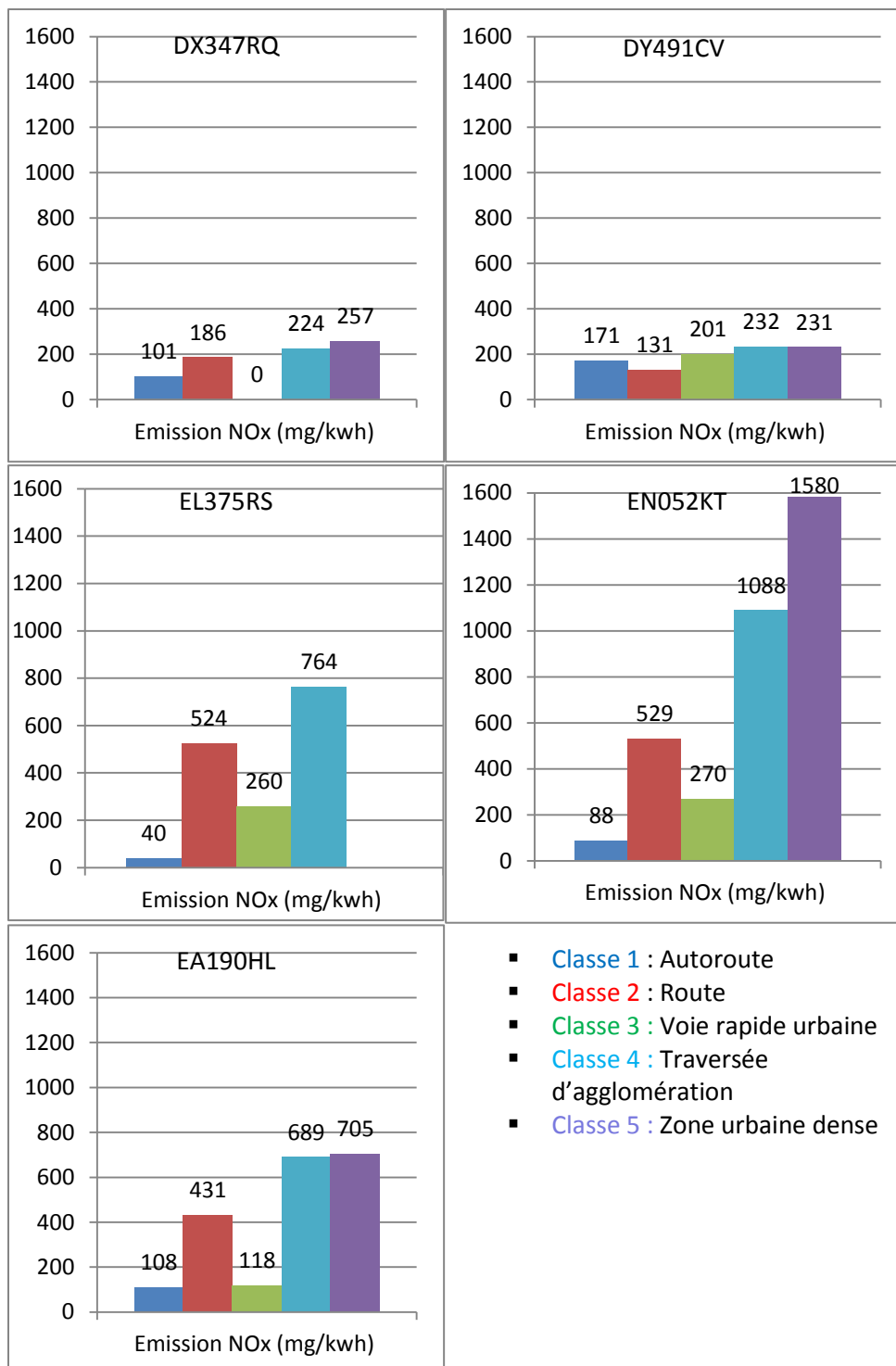


Figure 6.13 : Emissions de NO_x des véhicules gaz (g/kWh)

Quelle que soit la motorisation et quel que soit le modèle de véhicule, on a une grande variabilité des taux d'émissions suivant la catégorie de la route. La norme sur le taux d'émissions (voir figure 6.14), qui est une moyenne pondérée en fonction d'une hypothèse sur les kilométrages parcourus, n'est donc d'aucune utilité pour connaître les émissions sur une route donnée. Par ailleurs le taux d'émission en fonction de la puissance est une information trompeuse, car cet indicateur ne tient aucun compte de la

sollicitation de la puissance du moteur en fonction de la catégorie de la route. Or, comme la puissance du moteur est plus sollicitée en zone urbaine que sur autoroute, le taux d'émission en fonction du kilométrage varie dans un rapport plus important que le taux en fonction de la puissance : ce rapport est en moyenne de l'ordre de 50 % plus élevé sur l'ensemble de la flotte.

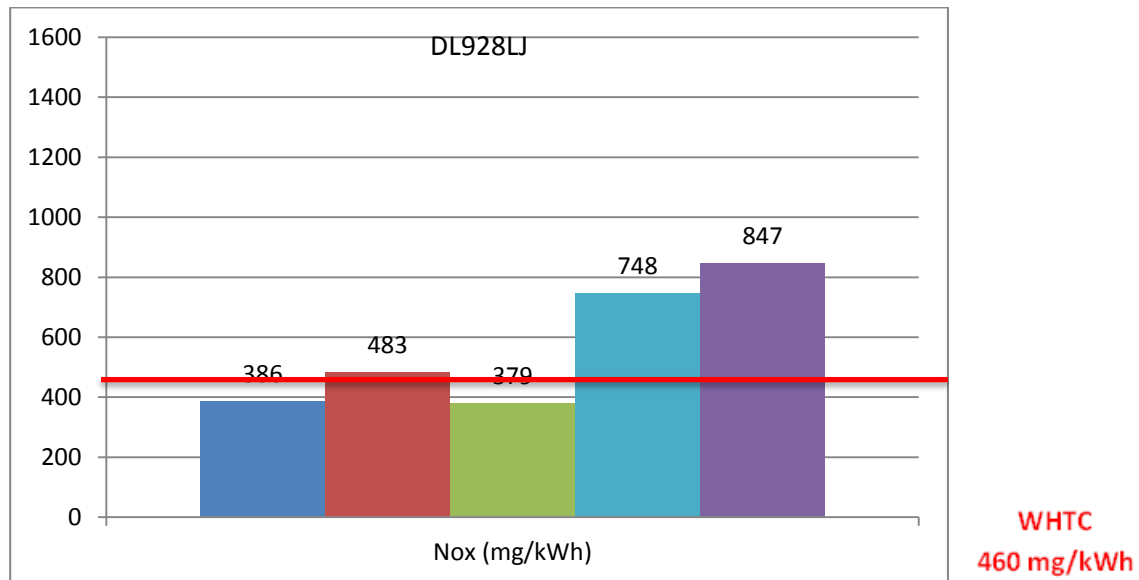


Figure 6.14 : Norme et taux d'émissions de NO_x d'un véhicule diesel (g/kWh)

La norme sur les émissions de NO_x, exprimée en mg/kWh, présente deux défauts majeurs :

- **c'est une moyenne établie sur une distribution qui présente une grande variance**
- **elle ne tient pas compte de la différence de sollicitation de la puissance suivant la nature de la route**

La conséquence de ces défauts est qu'un véhicule qui respecte la norme et dont les réglages sont optimisés pour un déplacement sur autoroute peut présenter des taux d'émissions catastrophiques en zone urbaine.

Les émissions ont été agrégées sur l'ensemble des véhicules partageant le même type de motorisation pour donner une vision synthétique ; cette figure synthétise les résultats du projet Equilibre et ne prétend pas refléter les résultats qui seraient obtenus sur l'ensemble du parc français. Les résultats sont présentés sur la figure 6.15. En toutes circonstances, c'est-à-dire même sur autoroute, ces résultats révèlent un avantage pour le gaz. est plus que douteuse et la figure n'a qu'une valeur illustrative. Elle montre néanmoins ce que l'on pourrait attendre de véhicules gaz performants.

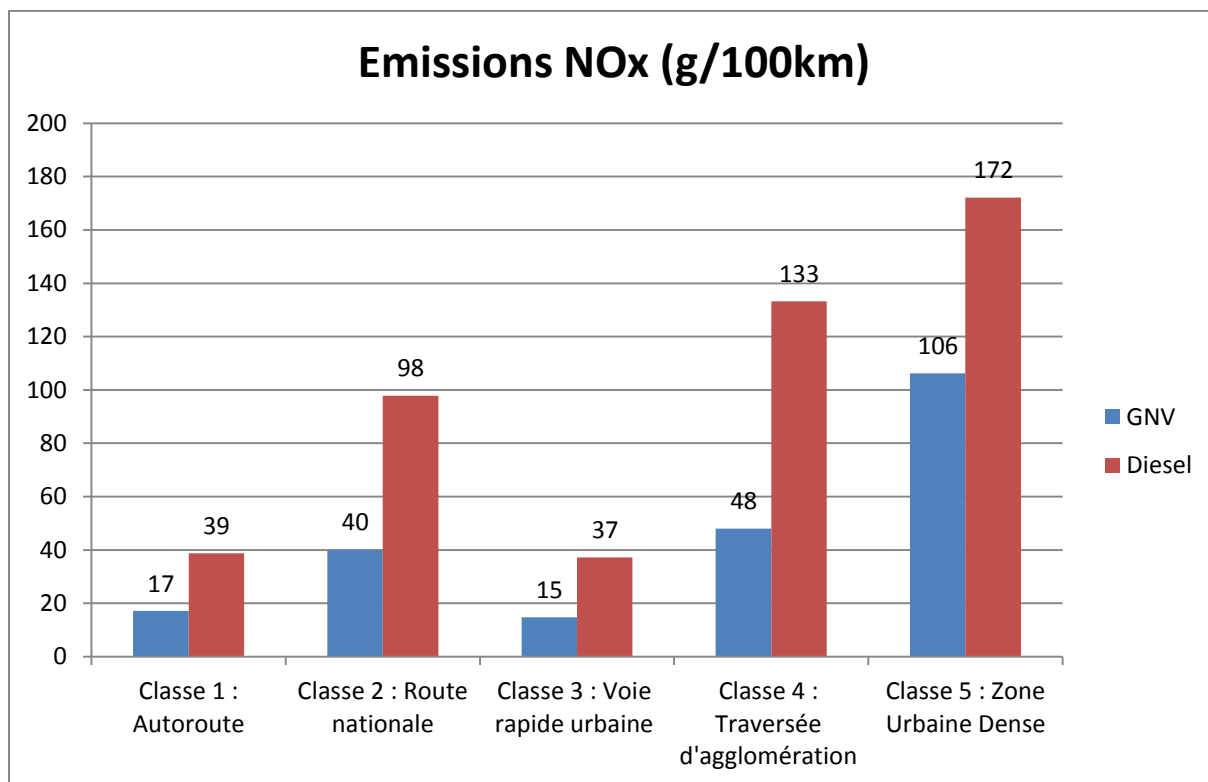


Figure 6.15 : Emissions comparées de NO_x

7. Résultats pour les porteurs de 19 tonnes

Le panel de l'expérimentation ne comprend que des véhicules gaz dans cette catégorie. La présentation des résultats statistiques est divisée en trois grandes parties. La première caractérise les trajets. La seconde partie présente les consommations et les émissions de CO₂. La troisième partie étudie les émissions de NO_x.

7.1. Caractérisation des trajets

Les trajets des semi-remorques peuvent être caractérisés à partir des kilométrages parcourus sur les différentes catégories de route : on distingue ainsi les missions long-courrier, caractérisées par un fort usage de l'autoroute et un fort kilométrage, et les missions de distribution. Cette caractérisation n'est pas pertinente pour les véhicules de 19 tonnes (voir figure 7.1). On a certes un véhicule de 19 tonnes, l'EB539DE, qui effectue une majorité de trajets autoroutiers, mais par contre parcourt journallement de faibles distances (voir tableau 7.1). En fait, ce véhicule réalise la plupart de ses missions entre la banlieue lyonnaise, au sud, et Villefranche, au nord, par conséquent sur des autoroutes de contournement. Il s'agit donc de missions de distribution, tout comme pour les deux autres véhicules de l'expérimentation. Ces deux autres véhicules opèrent en Savoie dans des zones à forte densité de population : 73 à 77 % du kilométrage est ainsi réalisé en zone urbanisée. On verra cependant que ces chiffres dissimulent des différences de sévérité dans les conditions d'exploitation.

Pour les véhicules de 44 tonnes, qui en règle générale n'accèdent qu'à la périphérie des grandes agglomérations, on avait retenu des seuils de 30 km/h et de 100 « stop & go » aux cent kilomètres pour délimiter des conditions d'exploitation sévères. Ces seuils sont tous largement dépassés par les véhicules de 19 tonnes, lesquels accèdent aux centres-villes où les conditions de circulation sont plus difficiles que dans les zones industrielles et commerciales des banlieues. On s'attend donc à ce que les conditions de livraison – circulation, stationnement, etc. – en centre-ville deviennent un facteur explicatif majeur. D'une manière générale, la comparaison des statistiques sur les vitesses moyennes en fonction de la classe des véhicules (voir tableau 7.6) est révélatrice de l'usage des routes : ces vitesses moyennes sont identiques sur route et autoroute, car elles sont liées aux conditions de déplacement, et plus faibles en urbain pour les 19 tonnes, parce qu'elles dépendent des conditions de livraison.

En ce qui concerne les charges transportées, les missions de distribution des véhicules 19 tonnes diffèrent de celles des 44 tonnes : plutôt que des transports de charge unique de point à point, à l'opposé on a des tournées de distribution avec de nombreux clients. L'absence de remorque et le principe de la tournée de distribution expliquent l'extrême homogénéité du poids total en charge sur les différentes catégories de route (voir tableau 7.5).

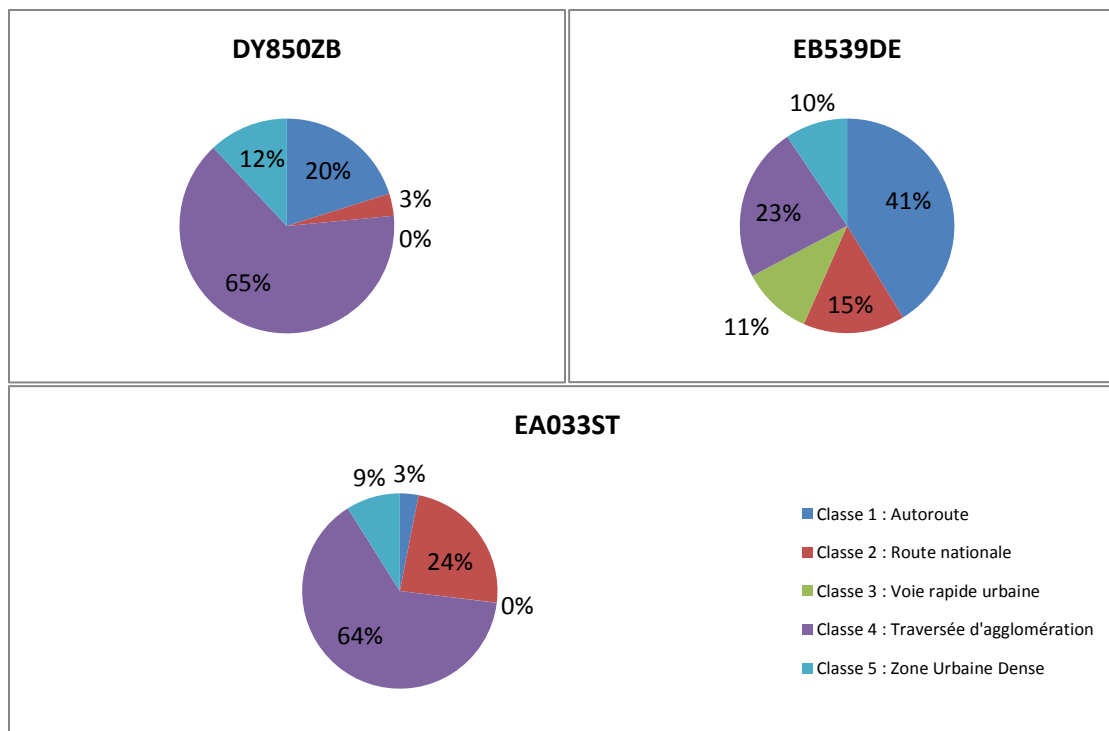


Figure 7.1 : Répartitions des kilométrages

	DY850ZB (*)	EB539DE (**)	EA033ST
Classe 1 : Autoroute	8386	27894	534
Classe 2 : Route	1394	10375	4132
Classe 3 : Voie rapide urbaine	0	7197	5
Classe 4 : Traversée d'agglomération	26869	15767	11116
Classe 5 : Zone Urbaine Dense	5002	6365	1551

Tableau 7.1 : Kilomètres parcourus

Les kilométrages indiqués en rouge sont jugés non représentatifs.

(*) Vingt-trois mois de données.

(**) Vingt-cinq mois de données.

	DY850ZB	EB539DE	EA033ST
Classe 1 : Autoroute	0,4	0,5	0,8
Classe 2 : Route	0,8	0,7	1,1
Classe 3 : Voie rapide urbaine	-	0,7	0,7
Classe 4 : Traversée d'agglomération	0,5	0,7	1,1
Classe 5 : Zone Urbaine Dense	0,8	0,7	1,2

Tableau 7.2 : Rapport des cumuls des dénivelés positifs sur la distance parcourue (%)

En urbain, à cause de la faible longueur des sections et de l'imprécision de l'altimétrie, les valeurs élevées sont sujettes à caution (classes 4 et 5)

	DY850ZB	EB539DE	EA033ST
Classe 1 : Autoroute	86	80	81
Classe 2 : Route	40	57	61
Classe 3 : Voie rapide urbaine	-	58	-
Classe 4 : Traversée d'agglomération	34	37	43
Classe 5 : Zone Urbaine Dense	27	26	24

Tableau 7.3 : Vitesses moyennes (km/h)

En-deçà de 30 km/h (en rouge) les conditions d'exploitation sont jugées sévères.

	DY850ZB	EB539DE	EA033ST
Classe 1 : Autoroute	1	4	1
Classe 2 : Route	19	9	10
Classe 3 : Voie rapide urbaine	-	23	33
Classe 4 : Traversée d'agglomération	71	82	51
Classe 5 : Zone Urbaine Dense	141	174	204

Tableau 7.4 : Nombre de « stop & go » aux cent kilomètres

Au-delà de 100 arrêts (en rouge) les conditions d'exploitation sont jugées sévères.

	DY850ZB	EB539DE	EA033ST
Classe 1 : Autoroute	13	12	-
Classe 2 : Route	13	12	-
Classe 3 : Voie rapide urbaine	-	12	-
Classe 4 : Traversée d'agglomération	14	12	-
Classe 5 : Zone Urbaine Dense	14	12	-

Tableau 7.5 : Poids total en charge (tonnes)

	44 tonnes (9 véhicules)	19 tonnes (3 véhicules)
Classe 1 : Autoroute	81	82
Classe 2 : Route	54	53
Classe 3 : Voie rapide urbaine	67	(*)
Classe 4 : Traversée d'agglomération	40	37
Classe 5 : Zone Urbaine Dense	31	26

Tableau 7.6 : Vitesses moyennes en fonction de la classe des véhicules (km/h)

(*) Résultat non significatif car fondé sur un seul véhicule

7.2. Consommation et émissions de CO₂ des véhicules

Sans surprise aucune, les consommations des véhicules (voir figure 7.2) sont similaires sur routes et autoroutes. Comme toujours la variabilité est liée aux conditions d'exploitation. La variabilité en urbain est similaire à celle observée pour les semi-remorques ; on observe une nette corrélation entre la consommation et les indicateurs

de sévérité – vitesse moyenne et nombre de « stop & go » – des conditions d’usage. Cette forte variabilité en zone urbaine a des conséquences plus importantes pour les 19 tonnes, qui effectuent des tournées de distribution, que pour les 44 tonnes dont les trajets sont plus routiers.

Le DY850ZB et l’EA033ST opèrent tous les deux en Savoie, sauf que le trajet type du premier est dans la vallée de l’Arve et que le trajet type du second est dans le secteur d’Annemasse et Thonon-les-Bains. Or, bien qu’opérant dans le même département avec tous les deux des missions de distribution, ces deux véhicules sont complètement à l’opposé en termes de consommation en zone urbaine⁴⁴. Les émissions de NO_x révéleront la même différence. Un critère géographique d’ordre général n’est donc pas pertinent ; la consommation dépend de propriétés spatiales plus locales qu’une simple désignation régionale.

Ces missions de distribution en centre-ville, où la phase de déplacement est difficilement dissociable de la phase de livraison, mettent en évidence la difficulté à caractériser une mission de transport.

Il n’existe pas de critère simple et unique qui permette de ranger l’usage d’un véhicule dans une certaine catégorie de mission pour prédire sa consommation.

En règle générale, la consommation dépend de deux contributions :

- **la phase de déplacement**
- **la phase de livraison, qui inclut la desserte finale et les manœuvres**

Les importances relatives de ces contributions sont variables et ne sont pas toujours clairement séparables.

⁴⁴ Il existe certes des différences de consommation et d’émissions de NO_x entre deux véhicules, du fait de stratégies de réglage différentes suivant les constructeurs. Cependant, en traversée d’agglomération, cela n’explique pas une consommation de 24 kg/100 km pour le DY850ZB et de 32 kg/100 km pour l’EA033ST (voir figure 7.2).

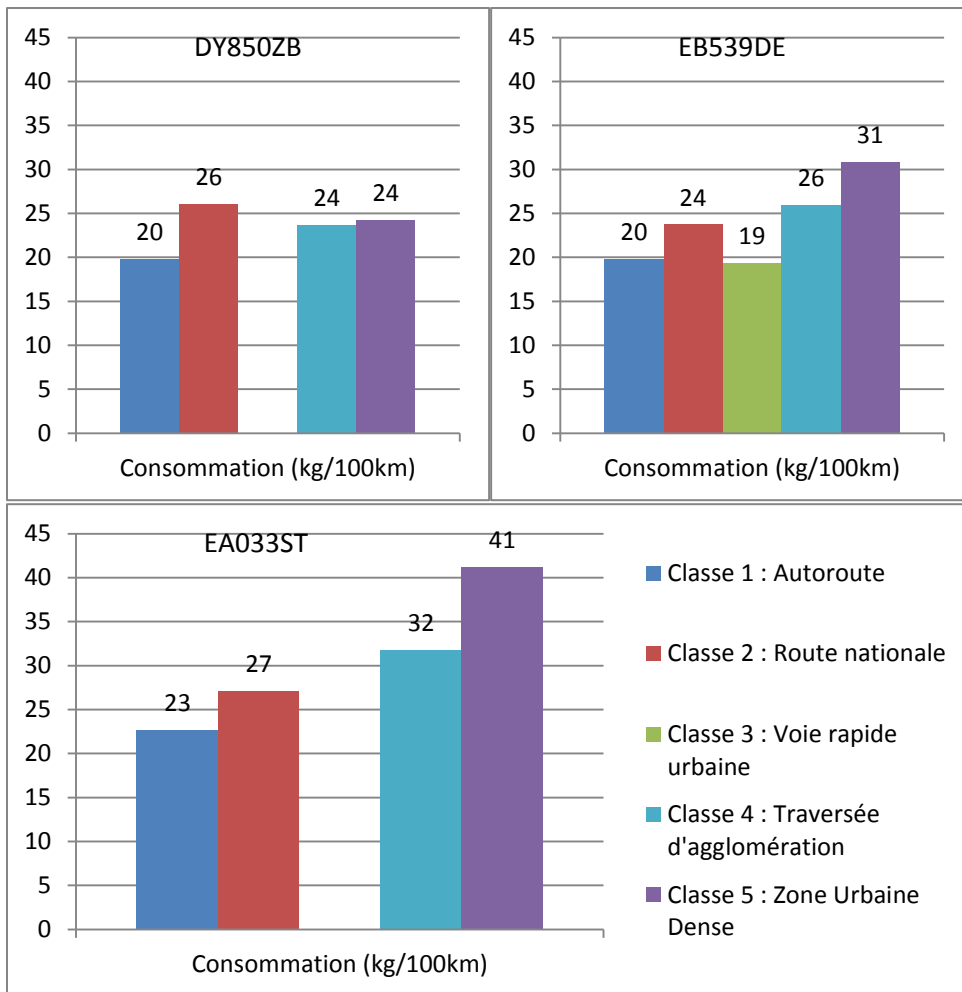


Figure 7.2 : Consommation

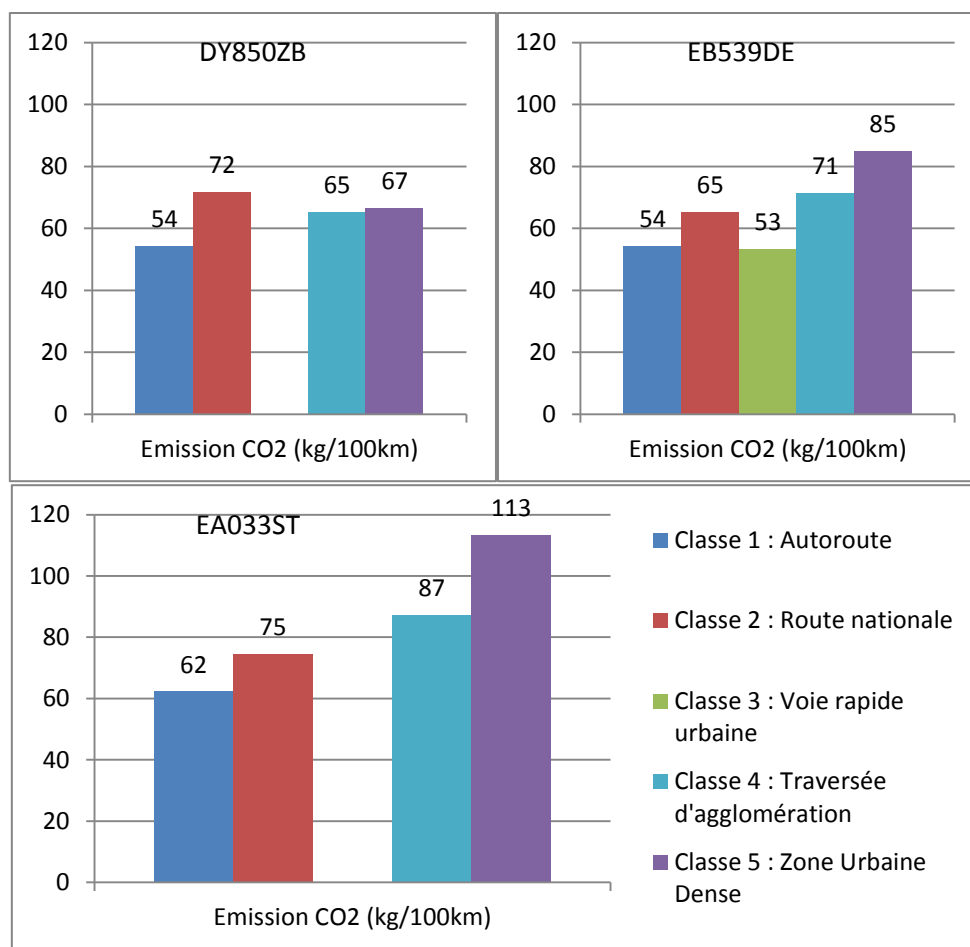


Figure 7.3 : Emissions de CO2

7.3. Emissions de NO_x

Tout comme pour les véhicules de 44 tonnes, les émissions de NO_x varient énormément d'un véhicule à l'autre (voir figures 7.4 et 7.5) et cela sans qu'il soit possible d'invoquer les conditions d'exploitation : les variations sont de l'ordre de 300 %. Dans le cas présent, c'est le DY850ZB, dont les performances sur autoroute sont excellentes, qui est incriminé pour ses mauvaises performances en urbain. Une fois ce véhicule mis à part, l'écart entre l'EA033ST et l'EB539DE n'est remarquable (> 30 %) qu'en urbain dense, or cet écart serait explicable par la plus grande sévérité des conditions d'usage du premier véhicule. On a vu que le nombre de « stop & go » était beaucoup plus élevé pour celui-ci (voir tableau 7.4). Cette différence de sévérité des conditions d'usage est confirmée par l'examen visuel des trajets qui révèle des profils d'exploitation très différents : le premier effectue des livraisons en centre-ville dans le secteur de Thonon-les-Bains, tandis que le second effectue de la distribution en périphérie de l'agglomération lyonnaise.

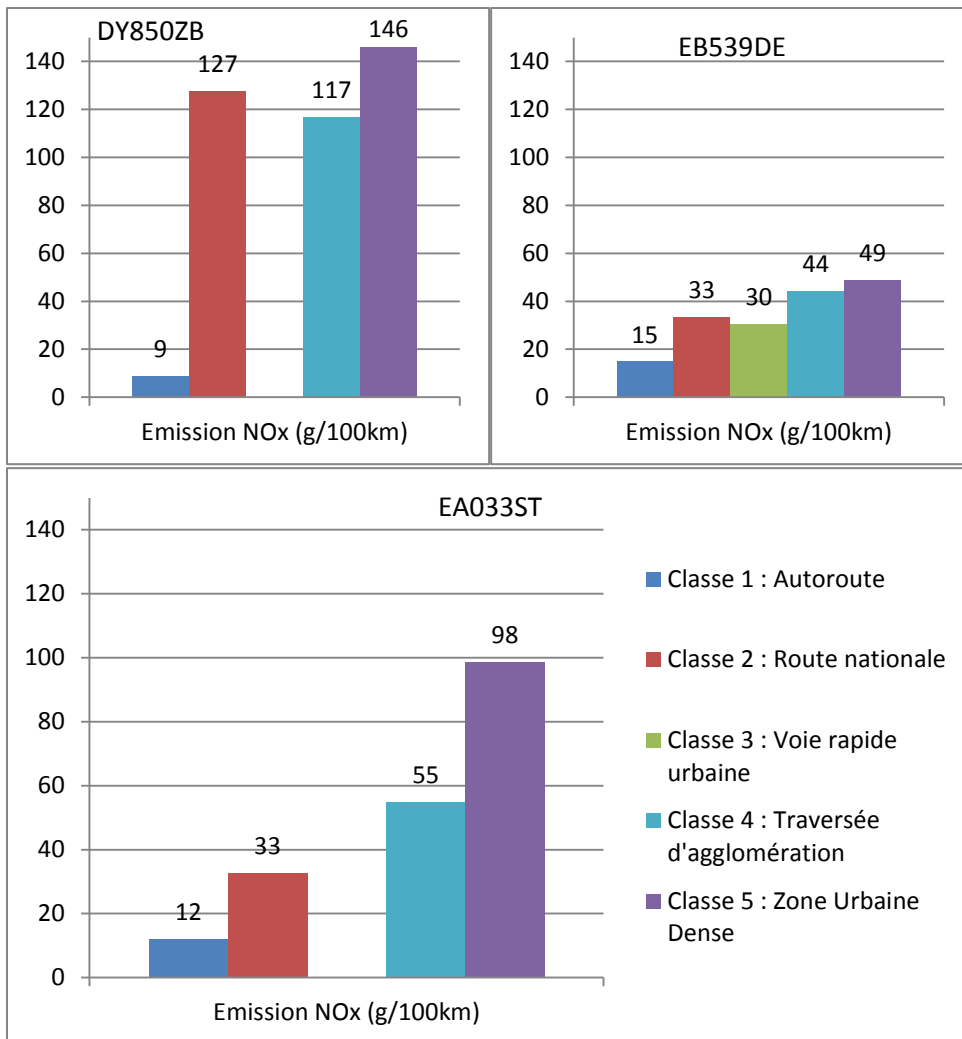


Figure 7.4 : Emissions de NO_x (g/100 km)

On rappelle que la consommation et l'examen détaillé des trajets montrent que les conditions d'exploitation en urbain sont plus sévères pour l'EA033ST que pour le DY850ZB et l'EB539DE.

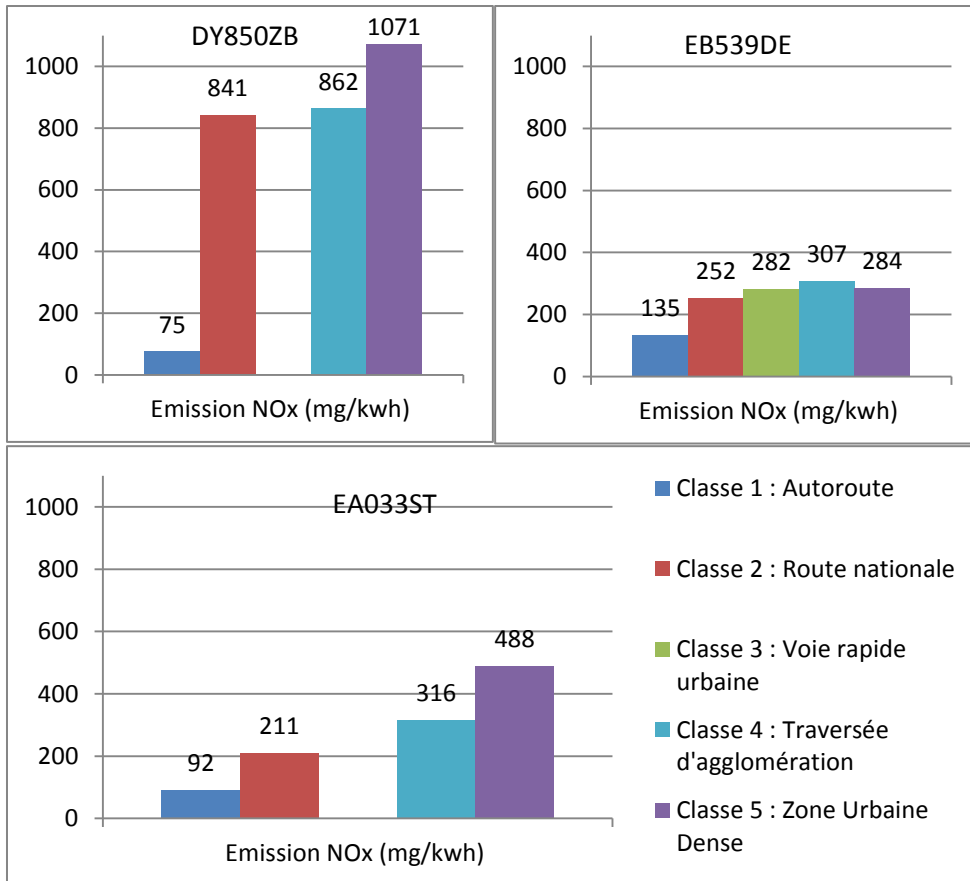


Figure 7.5 : Emissions de NO_x (mg/kWh)

8. Modélisation de la consommation et des émissions

En fonction de leur expérience, les transporteurs sont généralement en capacité de prédire la consommation moyenne (mensuelle voire annuelle) de leurs véhicules pour des missions récurrentes commanditées par des clients habituels. En revanche, ils sont fréquemment incapables d'une prédiction précise de la consommation sur une mission complètement nouvelle. L'objectif des transporteurs est donc le développement d'un modèle de prédiction de la **consommation moyenne** en fonction du véhicule utilisé, de la route⁴⁵ et de la charge transportée. Nous n'avons retenu comme facteurs explicatifs que des variables connues à l'avance par le transporteur et dont les valeurs sont stables dans le temps dans le cas de **missions récurrentes** ; on rappelle qu'un véhicule peut par exemple réaliser le même trajet une fois par semaine pendant un an. Ce calcul prédictif peut s'effectuer plusieurs mois ou plusieurs jours à l'avance, au moment de l'appel d'offre ou de la planification des missions. Ce contexte de mise en œuvre implique que ni les conditions de trafic ni les conditions météorologiques prévalant un jour donné ne sont prises en compte.

Le principe de la modélisation est le développement d'un modèle universel avec un calibrage différent pour chaque véhicule à partir des données recueillies au cours du projet. Il serait envisageable de calibrer un véhicule diesel universel ou un véhicule gaz (GNC) universel, en utilisant l'ensemble des données pour chaque catégorie de motorisation. Les émissions de CO₂ se déduisent automatiquement de la consommation : 2.7 kg de CO₂ par litre de gazole et 2.75 kg de CO₂ par kilogramme de gaz.

On a vu au cours des chapitres précédents que les émissions de NO_x étaient très sensibles à des facteurs conjoncturels (e.g. le trafic un jour donné) ou ponctuels (e.g. un rond-point sur une route) qui sont inconnus dans le cadre d'une description macroscopique. Les variables expliquant la consommation sont donc insuffisantes pour expliquer les émissions de NO_x. La question de la prédiction des émissions sera donc examinée succinctement.

Le modèle de la consommation qui sera proposé est issu d'un modèle dynamique prédisant la consommation instantanée. Il est moyenné de manière à faire apparaître les variables explicatives souhaitées et des paramètres qui seront estimés à l'aide d'une procédure d'estimation statistique. Les données du projet Equilibre permettent cependant d'explorer une voie alternative : il est possible de fabriquer des cycles de vitesse dépendants du profil altimétrique et du poids total en charge. Ces cycles pourraient ensuite être utilisés par des modèles de simulation dynamique, tels que VEHLIB ou VECTO⁴⁶, utilisant en entrée les descriptifs des véhicules.

Ce chapitre est divisé en cinq parties. La première présente le modèle de prédiction. La seconde partie expose la phase de calibration. La troisième partie présente les résultats

⁴⁵ La route est déterminée par un algorithme de calcul du plus court chemin en temps. Le calcul est réalisé en fonction des vitesses moyennes établies par catégorie de section de route. Ce calcul du plus court chemin sort du cadre de ce rapport.

⁴⁶ R. Trigui, B. Jeanneret and F. Badin, "Modélisation systématique de véhicules hybrides en vue de la prédiction de leurs performances énergétiques et dynamiques. Construction de la bibliothèque de modèles VEHLIB," *Recherche Transport Sécurité*, vol. 83, pp. 129-150, 2004.
VECTO : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52017SC0188>

et la phase de validation. La quatrième partie est consacrée aux émissions de NO_x. La cinquième et dernière partie présente la procédure de génération des cycles de vitesse.

8.1. Modèle de prédiction de la consommation

Dans une première étape, on présente le principe de base de la modélisation. Le point de départ est un modèle dynamique⁴⁷ prédisant la consommation instantanée en fonction des données cinématiques du véhicule ; ces modèles basés sur les mêmes lois physiques sont tous similaires. La consommation par unité de temps est donnée par l'expression :

$$C = \frac{(\mu \cos(\theta) + \sin(\theta))Mg}{\varepsilon \eta H} v + \frac{\rho C_d A_f}{\varepsilon \eta H} v^3 + \frac{M + m_0}{\varepsilon \eta H} av + \frac{m_1}{\varepsilon \eta H} a + \eta P_{idle}$$

avec

M : masse du véhicule

$m = m_0 + (m_1/v)$ = masse inertielle du véhicule quand il accélère ; les masses m_0 et m_1 sont des paramètres dépendant du véhicule

a : accélération

g : accélération de la gravité

θ : inclinaison de la route

ε : efficacité thermique

η : multiplicateur de l'efficacité thermique

ρ : densité massique de l'air

C_d : coefficient de freinage aérodynamique

A_f : surface frontale du véhicule

P_{idle} : puissance développée au ralenti

H : efficacité du carburant

v : vitesse du véhicule

Le premier terme de l'expression décrit les forces de frottement liées au roulage ainsi que la force nécessaire pour compenser la pesanteur. Le second terme décrit les forces de frottement aérodynamique. Les troisième et quatrième termes décrivent les forces inertielles, associées aux accélérations. Le dernier terme exprime la consommation au ralenti. La consommation par unité de distance est $c = C/v$. On passe ensuite de ce modèle microscopique à un modèle mésoscopique en prenant la valeur moyenne de la consommation sur une distance Δx pour laquelle le comportement du véhicule est supposé homogène. On obtient alors l'expression linéaire :

$$\bar{c} = \alpha_1 \Delta x + \alpha_2 M \Delta x + \alpha_3 M \Delta z$$

avec les paramètres :

$$\alpha_1 = \frac{\rho C_d A_f}{\varepsilon \eta H} \overline{v^2} + \frac{m_0}{\varepsilon \eta H} \bar{a} + \frac{m_1}{\varepsilon \eta H} \left(\frac{\bar{a}}{\bar{v}} \right) + \left(\frac{1}{\bar{v}} \right) \eta P_{idle}$$

⁴⁷ Zeng W., Miwa T., and Morikawa T. "Prediction of vehicle CO2 emission and its application to eco-routing navigation". *Transportation Research Part C Emerging Technology*, Vol 68, 2016, pp. 194-214.

$$\alpha_2 = \frac{\mu g}{\varepsilon \eta H} \overline{\cos(\theta)} + \frac{\bar{a}}{\varepsilon \eta H} \cong \frac{\mu g}{\varepsilon \eta H} + \frac{\bar{a}}{\varepsilon \eta H}$$

$$\alpha_3 = \frac{g}{\varepsilon \eta H}$$

la définition du dénivelé :

$$\Delta z = \Delta x \sin(\theta)$$

et l'hypothèse d'une pente faible :

$$\overline{\cos(\theta)} \cong 1$$

La distance parcourue Δx , le dénivelé Δz et le poids total en charge M sont des variables observables, tandis que les valeurs des paramètres α sont inconnues. Les données du projet Equilibre permettant de connaître les quadruplets $\langle \bar{c}, \Delta x, M, \Delta z \rangle$, il est cependant possible d'estimer statistiquement⁴⁸ les valeurs de ces paramètres α . Le modèle développé dans le cadre de ce projet repose ensuite sur deux hypothèses :

- les valeurs des paramètres dépendent du véhicule, c'est-à-dire de caractéristiques telles que la puissance du moteur, le rapport de ponts, etc.
- les valeurs des paramètres dépendent de la catégorie de la section de route, laquelle est supposée homogène sur une longueur L

Pour un véhicule donné, compte tenu des cinq catégories de sections de route, le modèle de consommation est décrit par quinze paramètres. Le modèle présenté dans cette première étape est une description simplifiée exposant les principes de base ; le modèle complet est décrit dans l'annexe A.

8.2. Calibrage et validation du modèle

Le développement du modèle a été réalisé dans les premiers temps du projet. Sa calibration et sa validation ont donc reposé sur les données collectées au cours des neuf premiers mois. Pour chaque véhicule, la base de données a généralement été divisée en deux parties inégales : trois mois de données utilisés pour la calibration et six mois de données pour la validation. La base utilisée pour la calibration est constituée en prenant un mois de chacun des trois trimestres de l'expérimentation. Pour la calibration comme pour la validation, nous n'avons retenu que les sections de route identifiées.

En pratique, trois mois de données dans des conditions variées suffisent à la calibration des modèles. Cependant, compte tenu du caractère récurrent des trajets, certaines catégories de routes peuvent être sous-représentées dans une telle base. C'est généralement le cas des voies rapides urbaines pour lesquelles le modèle a rarement pu être calibré.

⁴⁸ Compte tenu de ce qui a été exposé jusqu'ici dans le rapport, on notera qu'on est loin des conditions idéales d'estimation de paramètres indépendants : les valeurs des paramètres α_1 et α_2 sont corrélées ; les observations sont corrélées entre elles (mémoire et anticipation du conducteur) ; les valeurs des paramètres ne sont pas indépendantes des observations.

Initialement, le modèle a été calibré pour sept véhicules : deux 44 tonnes avec une motorisation gaz ; trois 44 tonnes avec une motorisation diesel ; deux 19 tonnes. Les deux véhicules gaz sont identiques. Tous les autres véhicules diffèrent entre eux.

Le modèle a été ensuite validé pour chaque véhicule sur les six mois de données restants, en comparant la prédiction à la consommation observée. Cette validation s'effectue suivant deux critères : l'erreur sur la prévision de la consommation d'une journée ; l'erreur sur la prévision de la consommation totale durant la période de six mois. On notera qu'une partie de l'erreur sur la prévision de la consommation d'une journée peut s'expliquer par les facteurs qui ne peuvent être connus à l'avance par un modèle prédictif : conditions de trafic et conditions météorologiques. Une autre partie de l'erreur peut être expliquée par des erreurs sur les données, telles que les déclarations erronées des transporteurs sur les charges transportées et les inexactitudes de la base de données routières. Enfin, il reste la part de l'erreur imputable au modèle.

A la procédure de validation basée sur les données du véhicule, on a ajouté une procédure du type « validation croisée » en utilisant le modèle calibré avec les données d'un véhicule pour prédire la consommation d'un autre véhicule.

La procédure de validation croisée a été mise en œuvre pour le DX347RQ et le DY491CV ; comme ces deux véhicules sont identiques, les deux modèles produits par la procédure de calibration devraient être eux aussi identiques. Les bases de validation totalisent respectivement 117 et 116 jours pour ces deux véhicules. Le point important est que sur une période de six mois les consommations kilométriques moyennes de ces deux véhicules diffèrent de 13 % du fait des différences de condition d'exploitation. Le tableau 8.1 présente les erreurs observées. Les principales conclusions sont :

- sur une longue période, sauf dans un cas, l'erreur sur la consommation totale est inférieure à 2 %, y compris en validation croisée alors que les consommations moyennes diffèrent de 13 % entre les deux véhicules
- les erreurs sur la prédiction de la consommation d'une journée sont de l'ordre de 5 % ; on impute ces erreurs à une variabilité journalière irréductible
- en moyenne, la classe de la route, le dénivelé et le poids total en charge expliquent la plus grande part de la consommation
- l'augmentation de taille de la base de calibrage n'améliore guère les résultats

Calibration (véhicule+période)	Prédiction (véhicule+période)	Erreurs journalières (%)	Erreur sur la totalité de la période (%)
DX347RQ – 3 mois	DX347RQ - 6 mois	4.9 (4.2)	2.8
DX347RQ – 3 mois	DY491CV – 6 mois	6.9 (4.7)	1.6
DX347RQ – 9 mois	DY491CV – 6 mois	6.5 (4.4)	1.8
DY491CV – 3 mois	DY491CV - 6 mois	5.1 (4.2)	1.7
DY491CV – 3 mois	DX347RQ – 6 mois	4.6 (4.0)	1.8
DY491CV – 9 mois	DX347RQ – 6 mois	4.5 (4.0)	1.4

Tableau 8.1 : Erreurs relatives sur la prédiction de la consommation

Les lignes en vert sont associées à la prévision directe ; les autres lignes correspondent à des cas de prévision croisée.

Ces résultats préliminaires ont validé la faisabilité d'un modèle de prédiction de la consommation. La calibration et la validation ont ensuite été effectuées d'abord pour trois véhicules diesel de 44 tonnes puis pour deux véhicules gaz de 19 tonnes.

Le tableau 8.2a présente les erreurs pour les véhicules diesel de 44 tonnes. A la différence du cas précédent, les prédictions croisées impliquent des véhicules différents. Les deux principales conclusions sont :

- la prédiction directe - usage du modèle du véhicule pour prédire sa propre consommation - continue à se montrer précise sur une longue période (erreur $\leq 3\%$)
- en règle générale, les prévisions croisées se révèlent mauvaises (erreur sur la période de prévision $> 5\%$)

Calibration (véhicule+période)	Prédiction (véhicule+ période)	Erreurs journalières (%)	Erreur sur la totalité de la période (%)
DE477VE - 3 m	DE477VE - 6 m	5.6 (4.2)	+0.3
DE477VE - 3 m	DL928LJ - 5 m	10.7 (6.6)	-9.1
DE477VE - 9 m	DL928LJ - 5 m	12.7 (7.5)	-10.8
DE477VE - 3 m	DS282LC - 3 m	14.4 (10.8)	+7.1
DL928LJ - 3 m	DL928LJ - 5 m	5.0 (4.8)	-0.3
DL928LJ - 3 m	DE477VE- 6 m	7.5 (6.8)	+4.6
DL928LJ - 8 m	DE477VE- 6 m	7.1 (6.5)	+4.1
DL928LJ - 3 m	DS282LC- 3 m	15.0 (8.0)	+11.0
DS282LC - 3 m	DS282LC - 3 m	6.5 (5.0)	-3.0
DS282LC - 3 m	DE477VE - 6 m	7.2 (4.9)	- 5.5
DS282LC - 6 m	DE477VE - 6 m	7.0 (4.8)	-4.8
DS282LC - 3 m	DL928LJ - 5 m	5.4 (5.0)	-1.7
DS282LC - 6 m	DL928LJ - 5 m	6.2 (5.1)	-0.1

Tableau 8.2a : Erreurs relatives sur la prédiction de la consommation

Les lignes en vert sont associées à la prédiction directe ; les autres lignes correspondent à des cas de prévision croisée.

Plutôt que d'incriminer la modélisation, une première explication des mauvais résultats des prédictions croisées est la présence de biais dans les bases de données dus à des conditions d'exploitation différentes pour chacun de ces véhicules. On peut par exemple invoquer les conditions éoliennes sur autoroute pour le DE477VE. Cette hypothèse reste à confirmer. Une explication plus probable est qu'avec l'adoption de la norme Euro VI, les consommations des véhicules diesel sont plus hétérogènes. On a pu vérifier cette seconde explication en comparant plus particulièrement deux véhicules de la base de données du projet, dont l'un a été jugé plus performant par les transporteurs au vu des résultats publiés dans le sixième chapitre. On va voir que les prédictions croisées confirment cette appréciation des transporteurs. Le véhicule identifié est l'EM644EF, lequel présenterait une plus faible consommation que le DE477VE (voir figure 6.3). Effectivement, le modèle pour ce véhicule prédit une consommation plus faible de 7.6 % sur les trajets parcourus par le DE477VE, et réciproquement le modèle du DE477VE prédit une consommation plus élevée de 10.5 % sur les trajets parcourus par l'EM644EF (voir tableau 8.2b).

Au vu de la figure 6.10, il est impossible de déterminer si cette moindre consommation de l'EM644EF s'accompagne ou non de plus fortes émissions de NO_x et, comme on va le

voir plus loin, il est par ailleurs impossible d'effectuer une telle comparaison à partir de modèles d'émissions.

Calibration (véhicule+période)	Prédiction (véhicule+ période)	Erreurs journalières (%)	Erreur sur la totalité de la période (%)
DE477VE - 3 m	DE477VE - 6 m	5.6 (4.2)	+0.3
DE477VE - 3 m	EM644EF - 4m	11.3 (6.1)	+10.5
EM644EF- 3 m	EM644EF - 4 m	5.7 (6.7)	+2.1
EM644EF - 3 m	DE477VE - 6 m	7.8 (4.7)	-7.6

Tableau 8.2b : Erreurs relatives sur la prédiction de la consommation

Les lignes en vert sont associées à la prévision directe ; les autres lignes correspondent à des cas de prévision croisée.

Les véhicules 19 tonnes utilisés pour la validation du modèle sont le DY850ZB et l'EB539DE. Ces deux véhicules ont la même motorisation (GNC - 330 hp), le même poids total en charge moyen et parcourent tous deux entre cent et deux cents kilomètres journaliers. Cependant, on a vu dans le septième chapitre qu'ils ont des profils d'exploitation très différents. Le premier effectue essentiellement des trajets en zone urbaine, tandis que le second emprunte majoritairement l'autoroute. Surtout on a vu que ce dernier véhicule empruntait l'autoroute de contournement de Lyon avec un fort trafic et par conséquent une forte consommation. Dans ce cas précis, on est donc sûr que la calibration n'est pas l'estimation des paramètres d'un véhicule mais **l'estimation des paramètres d'un véhicule dans des conditions d'exploitation spécifiques**. Le tableau 8.3 présente les résultats pour les véhicules de 19 tonnes, lesquelles confirment les prévisions théoriques :

- la prédiction directe se montre toujours précise sur une longue période
- la prévision croisée conduit à une sous-estimation de la consommation de l'EB539DE, lequel effectue une proportion importante de ses trajets sur une autoroute de contournement à fort trafic ; réciproquement, la prévision croisée conduit à une surestimation de la consommation du DY850ZB, lequel effectue la majeure partie de ses trajets en zone urbaine (voir figures 7.1 et 7.2) au cours desquels sa consommation se révèle faible

Calibration (véhicule+période)	Prédiction (véhicule+ période)	Erreurs journalières (%)	Erreur sur la totalité de la période (%)
EB539DE - 3 m	EB539DE - 6 m	4.6 (3.6)	- 1.3
EB539DE - 3 m	DY850ZB- 6 m	16.6 (5.0)	+16.5
DY850ZB- 3 m	DY850ZB- 6 m	4.4 (2.9)	-3.3
DY850ZB - 3 m	EB539DE - 6 m	16.4 (5.0)	-16.4

Tableau 8.3 : Erreurs relatives sur la prédiction de la consommation

Les lignes en vert sont associées à la prévision directe ; les autres lignes correspondent à des cas de prévision croisée.

Avant de conclure, on rappelle que le travail de modélisation de la consommation en est à un stade préliminaire dont l'objectif était de permettre de juger de la faisabilité de la tâche. C'est le cas puisque, quand les conditions d'exploitation sont stables, le modèle

présente dès à présent des performances supérieures aux modèles dynamiques de véhicule⁴⁹. On notera que cette capacité à prédire la consommation apporte aussi la preuve que la catégorie de la route, le profil altimétrique et le poids total en charge suffisent à produire des estimations moyennes correctes sur de longues périodes et hors situation exceptionnelle. Il demeure néanmoins une variabilité de la consommation à l'intérieur de chaque catégorie de route – due aux aménagements, conditions de trafic et conditions météorologiques – dont le modèle ne rend pas compte. Cette variabilité fait partie des conditions d'exploitation et elle est vraisemblablement supérieure (e.g. 16 % ; cf. Tableau 8.3) aux différences de performances entre véhicules (e.g. 7 à 10 % ; cf. Tableau 8.2b). Ce n'est donc pas un progrès dans la description du comportement ou dans la catégorisation des véhicules qui présente un intérêt, c'est la catégorisation des routes qui doit être affinée. Deux solutions sont possibles :

- une catégorisation théorique des routes à l'avance en fonction des aménagements observés sur le trajet d'après une cartographie – ronds-points, ralentisseurs, feux de signalisation et intersections – et de l'historique du trafic connu à partir des informations mises à disposition par les gestionnaires des infrastructures. Un plus grand niveau de détail multiplierait alors par deux ou trois le nombre de catégories de route. Cette solution est adaptée aux autoroutes, routes et voies rapides urbaines dont les descriptions et conditions générales de trafic sont déductibles d'informations géographiques ; il s'agit par exemple de distinguer une autoroute de contournement, avec un fort trafic moyen, d'une autoroute de liaison. A ce stade de la modélisation, une prévision en fonction de la plage horaire, distinguant heures creuses et heures de pointe, n'est pas envisagée et par conséquent une variabilité liée aux conditions d'exploitation demeurera.
- une catégorisation expérimentale des sections de routes à partir des observations de consommation réalisées au cours du projet Equilibre ou de tout autre projet assurant des mesures embarquées de position et de consommation. On attribuera alors une classe de consommation (e.g. A, B, C, D, E) à une section de route à partir des observations de consommation des véhicules qui l'ont empruntée. Cette solution est adaptée aux sections « urbaines » dont les descriptions et conditions de trafic sont peu accessibles⁵⁰.

8.3. Procédure d'estimation des émissions de NO_x

On rappelle qu'à la différence de la consommation, assez similaire pour des (types de) véhicules partageant la même motorisation, les émissions dépendent de systèmes de dépollution et de réglages du calculateur propre à chaque véhicule.

Les émissions de NO_x dépendent pour une part du processus de production et d'autre part du processus d'élimination par le système de dépollution du véhicule. La première part serait théoriquement prédictible, au même titre que la consommation. La seconde est imprédictible par un modèle mésoscopique dont l'échelle de temps – proportionnelle

⁴⁹ L'erreur est de l'ordre de 5 % pour ces modèles, lesquels ne prédisent pas la consommation à l'avance, mais décrivent le comportement du véhicule *a posteriori* en fonction de ses données cinématiques.

⁵⁰ Une catégorisation simple et automatique en classe A, B, C, D et E nécessiterait de connaître les valeurs de une ou deux variables au plus. Cette procédure devrait fonctionner pour les rues de dizaines de milliers de communes. Dans la pratique, à ce stade de l'étude on ne sait pas à partir de quelle information une rue de Massongy, empruntée par l'EA033ST, peut être distinguée d'une rue de Bonneville, empruntée par le DY850ZB

à l'échelle spatiale – est trop grande pour permettre une description des phénomènes transitoires qui conditionnent l'efficacité de ces systèmes de dépollution.

Plutôt que de tenter un développement très incertain d'un tel modèle, dans un premier temps, on s'est attaché à l'évaluation de deux procédures d'estimation grossières mais simples. La première fait dépendre les émissions de la classe de la route et de sa longueur, tandis que la seconde fait dépendre les émissions de la classe de la route et de la consommation estimée. Ces deux procédures donnent de mauvais résultats (voir tableau 8.4), la première parce qu'elle ne tient compte ni de l'altitude ni du poids total en charge, la seconde parce qu'elle dépend d'une estimation approximative de la consommation et ignore ce qui est relatif au processus d'élimination. Cette incapacité à prédire les émissions à partir de la consommation jette un doute sur l'utilité de la valeur obtenue sur le cycle WHTC pour prédire ces émissions. Finalement, sans plus de succès, on a utilisé le même type de modèle linéaire que pour prédire la consommation.

On rappelle qu'en sus des émissions réalisées durant la phase de déplacement, il faudrait ajouter les émissions durant les phases de manœuvre, lesquelles représentent entre 15 et 30 % du total pour des missions de distribution réalisées par des semi-remorques.

Prédiction des émissions en fonction de la distance parcourue			
Calibration (véhicule+période)	Prédiction (véhicule+période)	Erreurs journalières (%)	Erreur sur la totalité de la période (%)
DX347RQ - 3 mois	DX347RQ - 4 mois	16.4 (14.4)	-11.6
DX347RQ - 3 mois	DY491CV - 4 mois	22.1 (17.8)	-20.3
DY491CV - 3 mois	DY491CV - 4 mois	32.1 (23.7)	+21.3
DY491CV - 3 mois	DX347RQ - 4 mois	53.8 (24.3)	+46.5
Prédiction des émissions en fonction de la consommation			
Calibration (véhicule+période)	Prédiction (véhicule+période)	Erreurs journalières (%)	Erreur sur la totalité de la période (%)
DX347RQ - 3 mois	DX347RQ - 4 mois	17.1 (14.3)	-13.3
DX347RQ - 3 mois	DY491CV - 4 mois	22.6 (18.3)	-22.0
DY491CV - 3 mois	DY491CV - 4 mois	44.6 (32.2)	+34.7
DY491CV - 3 mois	DX347RQ - 4 mois	53.8 (24.3)	+46.5
Prédiction des émissions à partir du modèle linéaire			
Calibration (véhicule+période)	Prédiction (véhicule+période)	Erreurs journalières (%)	Erreur sur la totalité de la période (%)
DX347RQ - 3 mois	DX347RQ - 4 mois	16.8 (14.5)	-13.2
DX347RQ - 3 mois	DY491CV - 4 mois	23.0 (18.3)	- 23.1
DY491CV - 3 mois	DY491CV - 4 mois	30.0 (22.5)	+19.2
DY491CV - 3 mois	DX347RQ - 4 mois	66.0 (31)	+60.5

Tableau 8.4 : Prédiction des émissions de NO_x

Le DX347RQ et le DY491CV sont deux véhicules identiques réalisant de la distribution, mais dans des conditions différentes.

En conclusion, en l'état actuel, la prédiction des émissions de NO_x est irréalisable à partir du modèle linéaire.

8.4. Génération des cycles de vitesse

Les données du projet Equilibre permettent d'aborder le sujet de la prédiction avec un autre angle d'approche : elles peuvent servir à fabriquer des cycles de vitesse représentatifs de l'usage réel de poids-lourds.

Cette section est divisée en trois parties. Dans la première partie, on présente le principe de génération d'un cycle de vitesse dans un cas simple. Dans la seconde partie, on présente l'algorithme complet permettant de générer un cycle de vitesse tenant compte de la nature de la route, du profil altimétrique et du poids total en charge. La troisième partie expose les résultats.

8.4.1. Génération d'un cycle urbain simplifié

On examine dans un premier temps, les cycles urbains qui ont la particularité d'être les plus simples : sauf quand il y a un arrêt complet à un feu, la vitesse n'est jamais stabilisée en milieu urbain et un cycle est une succession de phases d'accélération et de freinage. La journée utilisée dans ce document décrit le trajet d'un véhicule de 19t effectuant de la distribution en zone urbaine. La figure 8.1 reporte les traces GPS sur un fond de carte à gauche et le cycle de vitesse à droite. Les données sont caractéristiques d'un cycle en milieu urbain, sauf quelques phases de circulation sur une voie rapide urbaine. La césure au milieu de la figure de droite correspond à un arrêt du véhicule, pendant 10 mn environ, contact non coupé. Ces données décrivent un trajet de deux heures et demie, contact allumé.

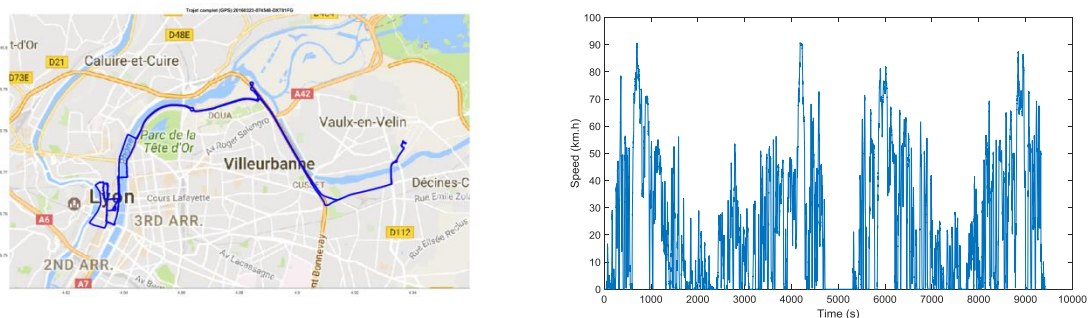


Figure 8.1 : Cycle urbain

D'une manière générale, un prétraitement permet d'attribuer à chaque point (chaque vitesse) trois variables booléennes indiquant s'il s'agit d'un maximum, d'un minimum ou d'un point stable (cf. Annexe B). Dans un premier temps, la version simplifiée de l'algorithme de génération de cycles va ignorer les points stables et les arrêts. En première approximation, un cycle est alors une alternance de phases d'accélération et de décélération entre une vitesse minimum et une vitesse maximum. Un cycle moyen se décrit ainsi par deux distributions conditionnelles : la distribution de la valeur d'un maxima en fonction du minima précédent et la distribution de la valeur d'un minima en fonction du maxima précédent. La production de ces distributions conditionnelles s'effectue en plusieurs étapes :

- une phase de lissage des vitesses
- une phase de définition des extrema et des points stables
- une phase de détermination des distributions conditionnelles

La phase de lissage des vitesses (voir figure 8.2 gauche) élimine les variations de haute fréquence : on utilise un filtre de type passe-bas avec un paramètre RC = 1 (durée de 1 seconde⁵¹), avec 4 passes en sens alterné. La propriété désirée la plus importante pour la courbe filtrée est la minimisation du nombre d'extrema : on ne veut pas de phases d'accélération ou de décélération de très courtes durées. Cette phase est suivie d'un arrondi à zéro des vitesses infimes produites par l'algorithme de lissage.

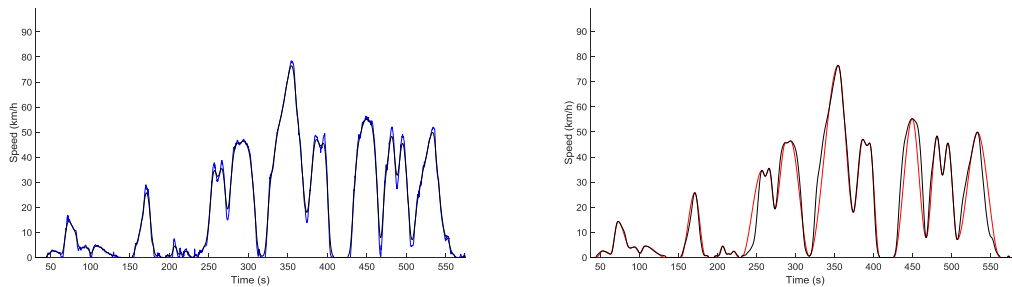


Figure 8.2 : Vitesses avant et après lissage - vitesses lissées et vitesses extrapolées
bleu : données brutes ; noir : données lissées ; rouge : données extrapolées

On détermine ensuite les maxima et les minima des vitesses lissées : sur l'exemple présenté, on passe de 47233 points à 1234 extrema - on rappelle que cette version simplifiée de l'algorithme ignore les points stables. La durée moyenne d'une phase d'accélération ou décélération en zone urbaine est de l'ordre de 4.8 secondes.

On reconstitue le profil de vitesse en tous points à l'aide d'un polynôme d'interpolation du troisième ordre : pour chaque intervalle $[t, t + 1]$, les paramètres du polynôme sont déterminés à partir des conditions $\partial v(t)/\partial t = 0$ aux deux extrémités. Sur un intervalle caractérisé par le couple $(\Delta v, \Delta t)$, le polynôme est défini par :

$$\Delta v = v(\Delta t) - v_0$$

$$v(t) = v_0 + a_2 t^2 + a_3 t^3$$

$$a_2 = 3 \frac{\Delta v}{\Delta t^3} \quad a_3 = \frac{-2\Delta v}{\Delta t^2}$$

Cette procédure d'interpolation conduit à un profil lissé des courbes de vitesse (voir figure 8.2 droite) supposant des profils d'accélération toujours identiques. Au final, on reste donc très proche des vitesses d'origine.

A partir de la séquence des maxima et minima, on obtient les distributions jointes indiquant la valeur d'un minimum de vitesse suivant un maximum et celle d'un maximum de vitesse suivant un minimum. Plus précisément, une distribution jointe indique la valeur de la vitesse suivante ainsi que la durée de la phase d'accélération (décélération) en fonction de la valeur de vitesse précédente et du poids total en charge du véhicule. Dans la suite du texte, pour ne pas surcharger les notations, on omettra la mention du poids total en charge.

⁵¹ La fréquence d'échantillonnage est de 5 Hz pour les données du projet Equilibre.

A partir de ces distributions jointes, une séquence de tirages conditionnels reproduit un cycle urbain ayant les mêmes caractéristiques statistiques que le cycle d'origine. On reproduit un cycle, avec une distance parcourue L , en effectuant des tirages tant que la distance parcourue n'a pas atteint cette valeur. On verra plus loin qu'en produisant une vingtaine de tels cycles, la vitesse moyenne sur l'ensemble de ces cycles est quasiment identique à celle du cycle d'origine.

8.4.2. Génération d'un cycle complet

La génération d'un cycle complet pour un poids lourd repose sur des raffinements de l'algorithme de base avec une prise en compte :

- de la catégorie des routes
- des points stables et des arrêts du véhicule
- du profil altimétrique

La prise en compte de la catégorie des routes et du profil altimétrique nécessite simplement d'établir des distributions jointes par catégorie de route et par signe du dénivelé, soit vingt distributions pour deux signes de l'accélération, cinq catégories de route et deux signes du dénivelé.

Le traitement des phases de stabilité de la vitesse est plus simple qu'il n'y paraît, car tout simplement une vitesse stable n'existe quasiment pas (à l'exception du cas des arrêts complets). Ainsi, sur route ou autoroute, ce qui est considéré par un observateur comme une vitesse stable de 90 km/h sera décrit par une séquence d'extrema variant par exemple entre 89 et 91 km/h. Cette question des vitesses stables et des arrêts est traitée plus en détail dans l'annexe B.

On suppose que le trajet que l'on veut étudier est connu : catégories des sections de route et profil altimétrique. La prise en compte du profil altimétrique nécessite en premier lieu de définir des distributions jointes par signe du dénivelé, soit un total de vingt distributions (5 catégories \times 2 signes de l'accélération \times 2 signes du dénivelé). A chaque étape de l'algorithme de génération, l'état initial est défini par le quadruplet (x, z, v, s) où :

- x est la position sur le trajet
- $z = z(x)$ est l'altitude déterminée par la position sur le trajet
- v est la vitesse
- $s = \text{sign}(\partial v / \partial t)$ est le signe de l'accélération

A chaque étape, la génération de l'état suivant se fait en plusieurs phases : tirage conditionnel de la distance parcourue en fonction de la vitesse et du signe de l'accélération ; détermination de l'altitude de la nouvelle position permettant de calculer le dénivelé ; tirage conditionnel du différentiel de vitesse en fonction de la vitesse initiale, du dénivelé et du signe de l'accélération ; détermination du nouvel état. Le schéma est le suivant :

- $(v, s) \rightarrow \Delta x = f_s(v)$ tirage conditionnel de la distance parcourue
- $\Delta z(x + \Delta x) = z(x + \Delta x) - z(x)$ est obtenu à partir du profil altimétrique

- $(v, \Delta z, s) \rightarrow \Delta v = g_s(v, \Delta z)$ tirage conditionnel du différentiel de la vitesse
- $v(x + \Delta x) = v + \Delta v$; $\Delta t = \Delta x / \bar{v} = \Delta x / (v + 0.5\Delta v)$; $s = -s$

Plus de détails sur les distributions jointes $f_s(v)$ et $g_s(v, \Delta z)$ ainsi que sur l'algorithme de génération des cycles sont exposés dans l'annexe C. L'identification des variables explicatives est décrite dans l'annexe D.

Une première étape de validation de la méthode des cycles de vitesse s'effectue sur la base de la comparaison des temps de trajet sur un ensemble de journées de test. Pour chaque journée de la base de test, on génère n cycles de vitesse associés au trajet de cette journée. On compare ensuite le temps de trajet observé sur la journée à la moyenne des temps de trajet établie sur ces n cycles.

Les cycles de vitesse produits peuvent servir de données d'entrée à des modèles de comportement dynamique du véhicule. Ces modèles peuvent servir à leur tour à prédire la consommation et les émissions des véhicules⁵². Mais on peut aussi utiliser la même méthodologie pour prédire directement la consommation et les émissions avec les distributions jointes adéquates. Ainsi, à chaque étape de génération du cycle, une première distribution jointe prédit le différentiel de vitesse, une seconde distribution prédit la consommation et une troisième prédit les émissions de NO_x. On peut espérer de meilleures prévisions qu'avec le modèle linéaire. En effet, caractériser une section par son dénivelé est insuffisant, puisque le comportement d'un véhicule sur cette section dépend de la section précédente et de la section suivante. Le modèle des cycles qui découpe le trajet en phases délimitées par le signe de l'accélération est *a priori* plus réaliste.

Le tableau 8.5 reporte les prévisions réalisées à partir de la méthode des cycles en utilisant les mêmes données de calibration que pour le modèle linéaire (voir tableau 8.4) – les bases de validation sont différentes. Pour chaque trajet, on génère aléatoirement vingt cycles de vitesse et on établit les moyennes de la consommation et des émissions sur ces vingt cycles. D'un côté, la prévision directe et la prévision croisée sur la consommation du DX347RQ montrent des performances similaires au modèle linéaire, tandis que d'un autre côté les prévisions directe et croisée obtenues sur la consommation du DY491CV sont mauvaises. Pour ce dernier véhicule, on peut donc se poser la question de la représentativité des 4 mois de données de la base de validation.

En règle générale, dans cette phase préliminaire, les bases de calibration et de validation contiennent toutes les journées et la qualité des données est par conséquent discutable⁵³. Les résultats pourraient donc être améliorés aussi bien pour le modèle linéaire que pour la méthode des cycles de vitesse. Par ailleurs, pour pouvoir comparer

⁵² Au cours du projet, on a utilisé le logiciel VEHLIB avec en entrée des trajets observés et une description du véhicule utilisé. La comparaison des observations et des prédictions de VEHLIB a ainsi permis de détecter des erreurs dans les déclarations du poids total en charge. A des fins de test, on a aussi utilisé en entrée les cycles associés à deux journées particulières. Pour la prédiction de la consommation, les erreurs moyennes ont été respectivement de +7.2% et -1.9% sachant que la précision des estimations d'un modèle de type VEHLIB est de l'ordre de 5 %. Ces résultats demandent à être confirmés sur un plus grand nombre de journées.

⁵³ Le temps a manqué pour éliminer des journées « exceptionnelles » (e.g. travaux, présence de manœuvres, etc.) ou des données erronées. Chaque trajet devrait être examiné en détail et le traitement des événements spéciaux (e.g. travaux, queues aux péages, livraisons, etc.) nécessite une réflexion méthodologique préalable.

les méthodes devrait utiliser les mêmes bases de calibration et de validation ; or, si la taille de la base de calibration est suffisante pour le modèle linéaire, elle est vraisemblablement trop petite pour la méthode des cycles qui utilise des algorithmes de type « k-mean ».

Prédiction de la consommation			
Calibration (véhicule+période)	Prédiction (véhicule+période)	Erreurs journalières (%)	Erreur sur la totalité de la période (%)
DX347RQ - 3 mois	DX347RQ - 4 mois	6.1 (4.4)	+3.9
DX347RQ - 3 mois	DY491CV - 4 mois	14.2 (11.7)	+12.2
DY491CV - 3 mois	DY491CV - 4 mois	12.6 (11.0)	+10.3
DY491CV - 3 mois	DX347RQ - 4 mois	6.2 (5.2)	+0.7
Prédiction des émissions			
Calibration (véhicule+période)	Prédiction (véhicule+période)	Erreurs journalières (%)	Erreur sur la totalité de la période (%)
DX347RQ - 3 mois	DX347RQ - 4 mois	19.0 (16.4)	+4.7
DX347RQ - 3 mois	DY491CV - 4 mois	19.6 (14.8)	-5.9
DY491CV - 3 mois	DY491CV - 4 mois	20.0 (15.2)	-7.5
DY491CV - 3 mois	DX347RQ - 4 mois	17.6 (15.6)	+1.5
DE477VE - 3 mois	DE477VE - 4 mois	18.0 (14.0)	-11.5
DS282LC - 3 mois	DS282LC - 4 mois	47.2 (16.5)	-52.1
EM644EF - 3 mois	EM644EF - 4 mois	60.7 (11.3)	- 61.6

Tableau 8.5 : Prévisions par la méthode des cycles de vitesse

En ce qui concerne les émissions de NO_x, on observe de faibles erreurs sur la totalité de la période de prévision. Ce résultat étonnant nous a conduit à chercher une confirmation sur des véhicules diesel ; de fait, les prédictions obtenues (les trois dernières lignes du tableau 8.5) ne confirment pas les bons résultats observés avec les véhicules gaz, qui sont donc uniquement le fruit du hasard.

Pour conclure, en ce qui concerne la consommation, la méthode des cycles est une alternative au modèle linéaire. Les résultats et le potentiel d'amélioration (voir les annexes) sont encourageants pour un travail préliminaire. En ce qui concerne les émissions, il est probable que le développement d'un modèle physique des émissions soit incontournable.

8.5. Conclusions de la modélisation

La conclusion majeure de ce chapitre est la possibilité de prédire la consommation **moyenne** d'un véhicule avec une grande précision. Pour un véhicule dont le modèle a été calibré sur quelques dizaines de milliers de kilomètres⁵⁴ parcourus en situation réelle d'exploitation, la précision est de l'ordre de 2 à 3 % pour une moyenne semestrielle. Pour un trajet, réalisé un jour donné, du fait des aléas, comme les conditions de trafic, les conditions météorologiques ou les caractéristiques très spécifiques d'une route, la précision est moindre. Elle est plutôt de l'ordre de 5 à 6%.

⁵⁴ La difficulté ne réside pas dans le kilométrage parcouru, mais dans la nécessité de réaliser des missions très diversifiées.

Pour réaliser cette prédiction, on dispose du modèle « linéaire » décrit dans le § 8.1 et dans l'annexe A. Il nécessite la connaissance de quatre variables : la classe de la section de route, sa longueur, le dénivelé et le poids total en charge du véhicule. Ce modèle repose sur l'originalité de la classification des sections. Le calibrage pour chaque véhicule dépend de la cartographie et des données décrivant les trajets des véhicules collectés durant le projet Equilibre. En résumé :

- **on dispose d'un modèle prédisant précisément la consommation moyenne d'un véhicule**
- **la constitution d'un outil opérationnel nécessite deux prérequis :**
 - **une cartographie routière à jour, à laquelle il devra être ajouté la catégorisation IFSTTAR des sections de routes**
 - **le calibrage du véhicule sur un ensemble de trajets diversifiés**

La prévision des émissions de NO_x est beaucoup plus aléatoire. Une solution grossière consiste à se baser sur les émissions moyennes mesurées durant la période de calibration sur une classe de route⁵⁵. Cette solution ne permet pas de saisir la variabilité liée aux conditions d'exploitation, or les émissions de NO_x sont plus sensibles que la consommation à ces dernières. À titre heuristique, on suggère de considérer une imprécision de l'estimation des émissions supérieure d'un ordre de grandeur à l'imprécision de l'estimation de la consommation (voir tableau 8.4).

Les données du projet Equilibre présentent un échantillon de 500.000 kilomètres de trajets, en situation réelle d'exploitation, finement caractérisés. On dispose en particulier des cycles de vitesse des véhicules. Il a donc été possible de définir des distributions statistiques des vitesses en fonction du véhicule, de son poids total en charge et du trajet suivi, caractérisé par la classe des sections de route et du profil altimétrique. Cette caractérisation statistique du cycle de vitesse pour une mission a été validée à partir des estimations du temps de trajet et de la consommation. On envisage une utilité à ces cycles de vitesse :

- ils peuvent intéresser les motoristes en règle générale
- plus particulièrement, un tel cycle de vitesse pourrait servir d'entrée à un modèle de calcul instantané des émissions de NO_x (un premier modèle de calcul de la production par le moteur et un second modèle de calcul de l'élimination par le système de dépollution)

⁵⁵ L'application du modèle « linéaire » pour estimer les émissions de NO_x se révèle inefficace. La raison fondamentale est que le gros de ces émissions se concentre sur des périodes de courte durée, alors que les variables explicatives retenues sont associées à de plus grandes échelles d'espace et de temps.

9. Conclusions

Les conclusions du projet Equilibre se rangent dans quatre catégories :

- la variabilité de la consommation et des émissions en fonction de conditions d'exploitation réelles
- le comparatif entre les deux motorisations étudiées en fonction de conditions d'exploitation réelles
- la concentration des émissions de NO_x en zone urbaine
- la prédiction de la consommation et des émissions (ces conclusions sont exposées dans le chapitre précédent)

9.1. Variabilité de la consommation et des émissions

L'apport fondamental du projet Equilibre n'est pas dans les résultats mais dans la méthodologie :

La variabilité des conditions d'exploitation – véhicules, routes, conditions de trafic, conditions météorologiques, conditions de livraison, etc. – est telle qu'il faut s'intéresser aux variances et non aux moyennes.

En règle générale, ces variances sont très élevées parce que l'information portée par le descriptif usuel d'un objet est soit non pertinente soit trop pauvre. Ainsi la catégorisation administrative d'une route ne détermine pas plus la consommation et les émissions, que la norme WHTC ne rend compte des émissions de NO_x pour un trajet effectué sur cette route. On rappelle que les données ont montré un rapport de un à vingt entre les émissions sur autoroute et celles en zone urbaine et un rapport de un à huit sur le même type de route suivant que le trafic est fluide ou très dense.

Cette variabilité des usages, des routes et plus généralement de l'ensemble des conditions d'exploitation rend illusoire la caractérisation de missions de transport ou la caractérisation de trajets **en termes généraux**. La consommation et les émissions dépendent fortement des **caractéristiques particulières** de la mission de transport et du trajet emprunté. Concrètement les résultats dépendent des charges transportées, des manœuvres, des retours à vide, du groupage des opérations pour divers clients, d'horaires imposés et enfin de la densité des aménagements routiers limitant la vitesse, laquelle densité dépend de politiques locales.

Non seulement les variances sont élevées mais les répartitions des diverses caractéristiques des missions ne sont pas aléatoires. Le type de la route empruntée dépend du secteur géographique où le transporteur et sa clientèle habituelle sont implantés. La possible spécialisation d'un transporteur lui fait viser une clientèle spécifique et par conséquent il effectuera des missions dont les profils sont similaires.

Pour chaque transporteur – et pour chaque véhicule – il existe donc un biais par rapport à la moyenne.

Pour caractériser des trajets, on a utilisé le nombre de « stop & go » et la vitesse moyenne, laquelle est corrélée à l'instabilité de la vitesse. Ces indicateurs sont cependant insuffisants. Ainsi, les « stop & go » n'incluent pas les ralentissements jusqu'à une vitesse très faible, tandis qu'une vitesse moyenne faible peut aussi bien être la conséquence d'une vitesse instable que le reflet d'une faible vitesse de croisière liée à des caractéristiques particulières du trajet. Il est donc indispensable de disposer de meilleurs indicateurs, sachant que la cause physique n'est pas l'instabilité de la vitesse, mais la phase d'accélération.

Pour caractériser les phases d'accélération, on propose d'utiliser le cumul des variations positives de la vitesse aux cent kilomètres, qui n'est autre que l'intégrale des phases d'accélération.

$$\sum \Delta v_{>0} \equiv \int \gamma_{>0} dt$$

9.2. Comparatif entre les motorisations

L'objectif principal du projet Equilibre était l'étude comparative de véhicules gaz et diesel dans des conditions d'exploitation réelles. En la matière, les conclusions diffèrent pour la consommation et les émissions.

En ce qui concerne la consommation, les résultats sont très proches au sein d'une même catégorie de motorisation ; les faibles écarts pouvant être imputés aux différences de conditions d'exploitation, sauf exception, il est difficile de dire qu'un véhicule est meilleur qu'un autre dans une même catégorie. Du point de vue du projet, cette homogénéité au sein d'une catégorie de motorisation signifie qu'il est possible de comparer les motorisations sur la question de la consommation et des émissions de CO₂ qui s'en déduisent.

La situation est différente pour les émissions de NO_x. Elles sont très similaires pour les véhicules diesel, mais diffèrent d'un facteur deux ou trois pour les véhicules gaz – les différences de conception liées à la jeunesse de la technologie expliqueraient l'hétérogénéité des performances pour les véhicules gaz. Cela étant dit, cette hétérogénéité au sein des véhicules gaz rend délicate la comparaison des motorisations sur la question des émissions de NO_x. Pour effectuer une telle comparaison, il est nécessaire de prendre les meilleurs représentants de chaque classe.

On observe un net avantage des véhicules gaz par rapport aux véhicules diesel en termes d'émissions de NO_x. Cet avantage va en augmentant quand les conditions de circulation se dégradent – on a observé un gain d'un facteur cinq sur le périphérique d'Annecy, emprunté aux heures de pointe.

9.3. Concentration des émissions de NO_x en zone urbaine

La troisième conclusion est relative à la localisation des émissions de NO_x. La norme Euro VI établit une moyenne pondérée des émissions en fonction de la puissance développée par le véhicule – le taux d'émission est exprimé en mg/kWh. Cette norme établit ainsi une moyenne entre des émissions sur autoroute et en ville. Le problème est que dans la réalité les émissions dépendent très fortement du profil de cycle de vitesse, lequel dépend lui-même fortement de la catégorie de la route. Ainsi en zone urbaine, le taux d'émission réel est très supérieur à la moyenne. Finalement, tous les véhicules du projet vérifient donc la norme Euro VI mais avec pour certains des émissions très faibles sur autoroute et très élevées en ville.

Le principal problème concerne l'utilité de cette norme. Celle-ci repose sur une moyenne des émissions en zone rurale et en zone urbaine, alors qu'en pratique les émissions de NO_x se concentrent en ville et que c'est sur la santé, de populations essentiellement urbaines, que celles-ci sont censées avoir un impact.

Le second problème est la sous-estimation des émissions réelles. L'existence de zones d'ombre dues aux limites de la mesure et aux difficultés d'analyse est responsable de cette sous-estimation. Premièrement, on ne sait pas ce qui est émis en dehors de la période de mesure, c'est-à-dire essentiellement au moment de la mise en route du moteur. Deuxièmement, l'analyse et l'explication des émissions sont difficiles sur les zones non cartographiées, c'est-à-dire principalement sur les parkings privés des clients et des transporteurs. Or, toutes ces émissions inconnues ou mal connues sont *a priori* localisées en zone périurbaine.

La localisation des émissions de NO_x ne faisant pas partie des objectifs du projet Equilibre, cette tâche a été réalisée grossièrement. Le caractère urbain ou rural des zones d'émission est donc approximatif quand il faut qualifier des secteurs proches de très petites agglomérations ; on a néanmoins pu valider le peu d'impact de cette approximation. Le point le plus discutable serait plutôt le regroupement dans une même catégorie de très petites agglomérations et de zones fortement urbanisées et de grande étendue, mais il dépasse le cadre de ce projet.

Laisant de côté la caractérisation discutable du caractère urbain d'une zone géographique, le fait indiscutable établi au cours du projet Equilibre est la concentration de la majeure partie des émissions sur des secteurs restreints. Suivant les véhicules et aussi en fonction des conditions d'exploitation, d'une catégorie de route à l'autre le taux d'émission varie approximativement dans un rapport compris entre 3 et 7 ; il s'agit cependant là de valeurs moyennes établies sur l'ensemble du projet, dissimulant des variabilités locales encore plus grandes. En règle générale, les taux d'émissions varient moins d'une catégorie de route à l'autre pour les véhicules gaz que pour les véhicules diesel, dont les systèmes de dépollution sont très sensibles à la sévérité des conditions d'exploitation.

Annexe E. Résultats complémentaires

Les mauvais résultats obtenus par certains véhicules d'IVECO ont été signalés au constructeur qui a apporté des correctifs. Une campagne de mesure a donc été poursuivie entre mai et septembre 2018, après la fin prévue pour le projet Equilibre. Ces nouveaux résultats ne modifient en rien les conclusions du rapport, mais démontrent que les véhicules d'IVECO étaient exploités dans des conditions beaucoup plus sévères que leurs concurrents, expliquant en partie les taux élevés d'émissions de NO_x.

E.1. Émissions avant réalisation de correctifs par IVECO

Les véhicules EN052KT et EL375RS sont deux véhicules du même modèle, exploités dans des conditions différentes. On rappelle que pour ces véhicules on ne connaît que trop rarement le poids total en charge. En règle générale, le premier véhicule effectue de la distribution en région lyonnais, tandis que le second véhicule réalise des trajets longues distances entre la Savoie et le Languedoc. Les périodes de mesure utilisées avant réalisation de correctifs par IVECO sont :

- EL375RS : 201705, 201706, 201707, 201708, 201709, 201710, 201711, 201712, 201801
- EN052KT : 201707, 201708, 201709, 201710, 201711, 201712, 201801

Les kilométrages parcourus sont donnés par la figure E.1.

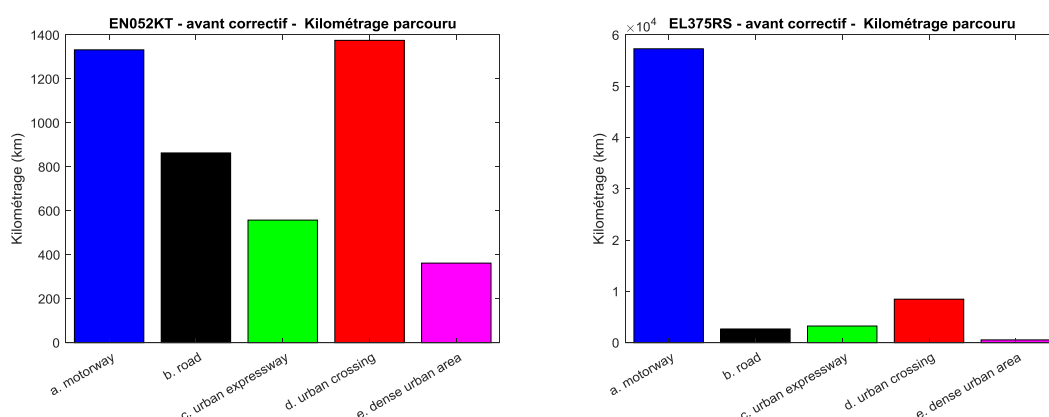


Figure E.1. Kilométrages EN052KT et EL375RS, avant le correctif

Le kilométrage le plus faible est celui réalisé en zone urbaine dense par l'EN052KT ; cette valeur de 400 km est cependant suffisante pour obtenir une mesure significative

des émissions, à défaut d'être précise. Pour ces deux véhicules, les figures ci-dessous montrent donc que les taux d'émissions en urbain dense sont de l'ordre de 200 g aux 100 km, très supérieurs à celles d'autres véhicules gaz (i.e. de l'ordre de 50 g aux 100 km).

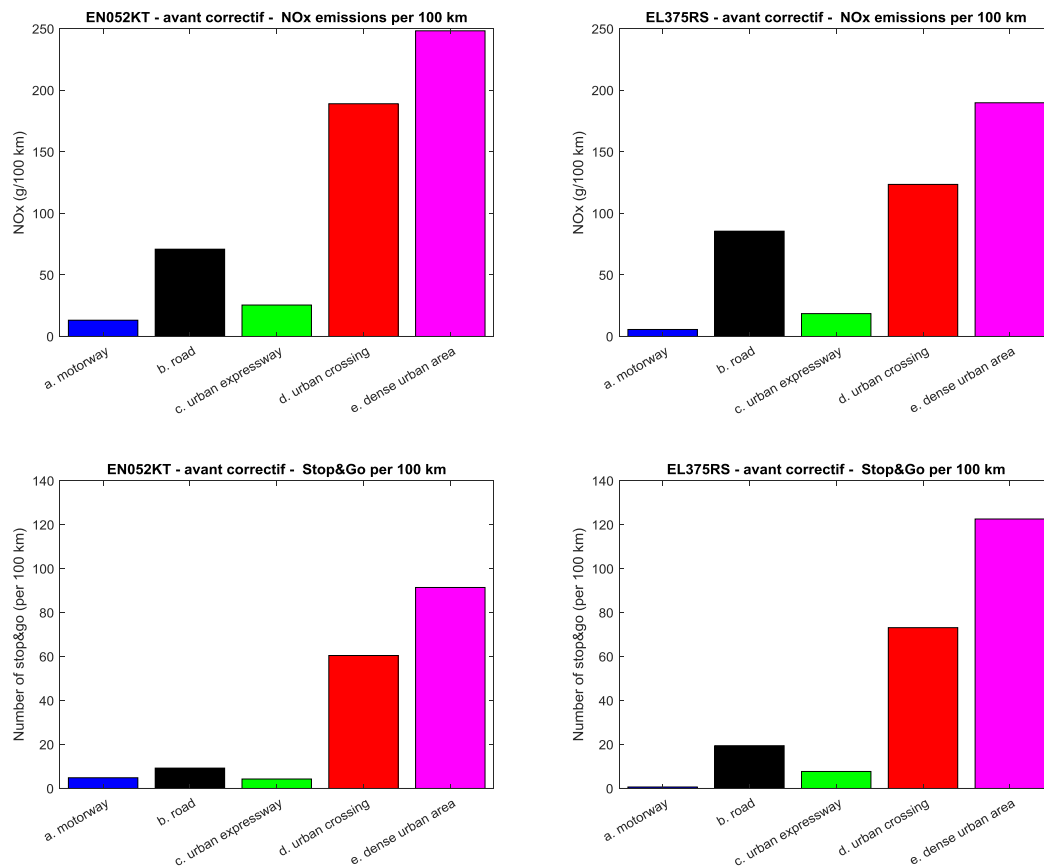


Figure E.2. Émissions de NO_x et « stop & go », avant le correctif

Ces figures révèlent une grande variabilité des émissions entre les deux véhicules : entre 20 et 50 % en traversée d'agglomération et en zone urbaine dense. Ces émissions sont associées à des taux élevés de « stop & go », comparés à ceux d'autres véhicules gaz. Sur ces figures, on observe cependant des émissions plus faibles pour l'EL375RS qui a des taux de « stop & go » un peu plus élevés. Pour expliquer cette corrélation négative entre le taux d'émissions et le nombre de « stop & go », il faut supposer l'existence d'autres facteurs explicatifs plus déterminants. On peut avancer plusieurs hypothèses :

- un poids total en charge plus élevé pour l'EN052KT
- le style de conduite du conducteur
- une mise en cause du carburant
- une différence entre l'EN052KT et l'EL375RS

- le nombre de « stop & go » ne rend compte qu'imparfaitement de l'instabilité de la vitesse (il tient pas compte des décélérations jusqu'à des vitesses très faibles, dues à la congestion ou à la signalisation)

E.2. Émissions après réalisation de correctifs par IVECO

Les périodes de mesure utilisées après réalisation de correctifs par IVECO sont :

- EL375RS : 201805, 201806, 201807, 201808, 201809
- EN052KT: 201806, 201807, 201808, 201809

On a éliminé les périodes intermédiaires, de février à avril, pour lesquelles l'état d'équipement de chaque véhicule était difficile à déterminer.

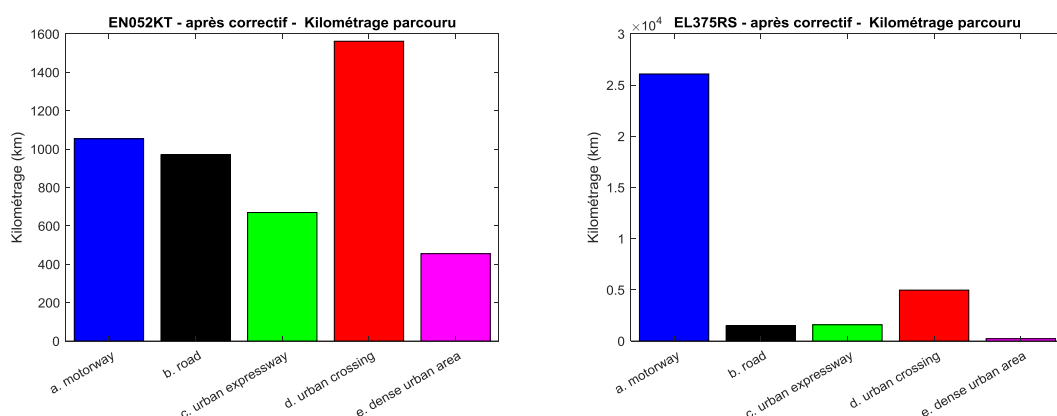


Figure E.3. Kilométrages EN052KT et EL375RS, après le correctif

Le kilométrage le plus faible est celui réalisé en zone urbaine dense par l'EN052KT ; la valeur de 500 km est cependant suffisante pour obtenir une mesure significative des émissions. Les émissions (voir figure E.4), après réalisation du correctif, révèlent une inversion du classement de l'EL375RS et de l'EN052KT. Désormais c'est l'EL375RS qui émet le plus en zone urbaine. Les différences de taux d'un véhicule à l'autre n'est cependant que de l'ordre de 20 %. On note aussi une inversion dans le nombre de « stop & go ». Désormais, c'est l'EN052KT qui a le taux de « stop & go » le plus élevé. D'un véhicule à l'autre, on a donc toujours une corrélation négative entre le taux d'émissions et le nombre de « stop & go » ! Dans le cas où les conducteurs n'auraient pas changé entre les deux périodes de mesure, l'explication par le style de conduite pourrait être éliminée⁵⁶.

⁵⁶ Il est certain que le conducteur n'a pas changé pour l'EL375RS.

Alors qu'il n'y a pas de corrélation visible entre les émissions et le nombre de « stop & go » sur les mesures en zone urbaine, on observe une corrélation très nette sur route de campagne (voir figures E.2 et E.4).

La conclusion majeure de cette comparaison est que l'extrême sensibilité des émissions aux conditions de circulation (aménagements et trafic), jointe à la difficulté d'obtenir un estimateur précis de ces conditions de circulation, fait qu'on estime à 50 % la marge d'imprécision des résultats.

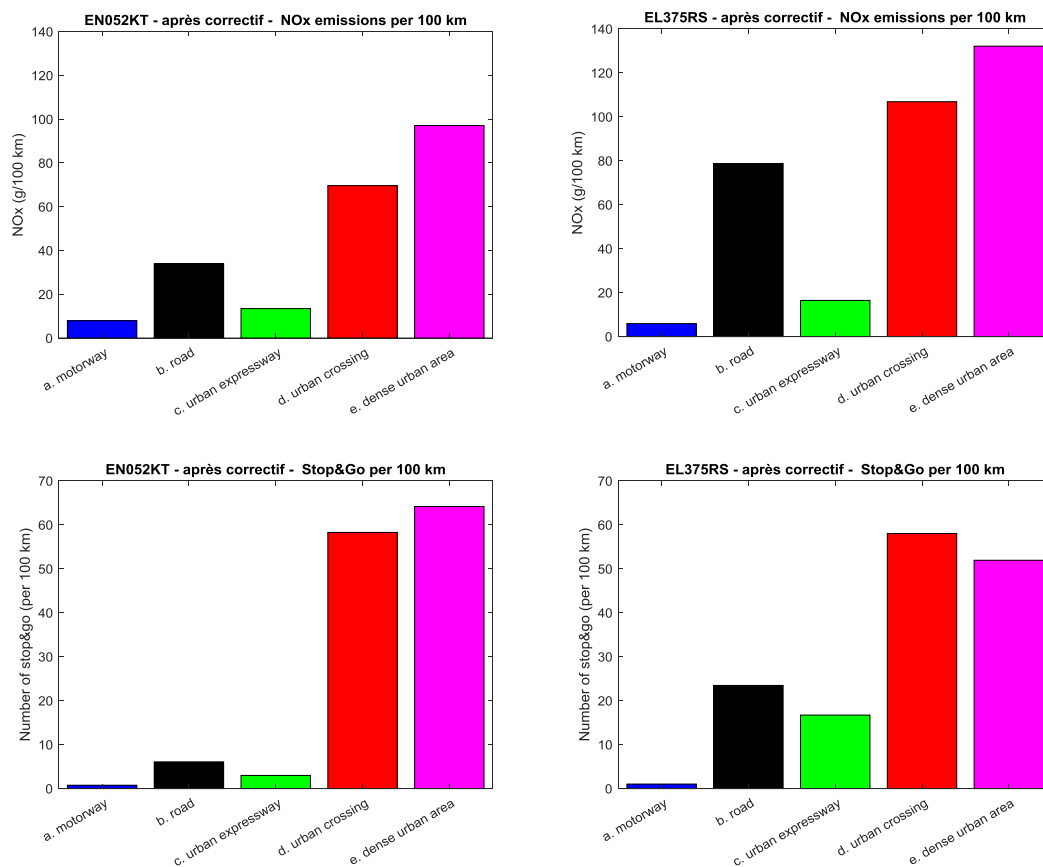


Figure E.4. Émissions de NO_x vs. « stop & go », après le correctif

E.3. Comparaison avant-après

Pour l'EL375RS (voir figure E.5), les conditions expérimentales sont théoriquement identiques avant et après : mêmes missions avec le même conducteur. En zone urbaine dense, on observe néanmoins une réduction de 30 % des émissions de NO_x entre les deux périodes. Cette réduction est cependant corrélée à une division par deux du nombre de « stop & go ». Par ailleurs, on n'observe aucune amélioration significative des

émissions en traversée d'agglomération ou sur route, catégories pour lesquelles le nombre de « stop & go » reste stable.

Pour l'EL375RS, la conclusion est qu'il n'existe aucune amélioration due au correctif (le gain observé en urbain s'explique par de meilleures conditions de circulation).

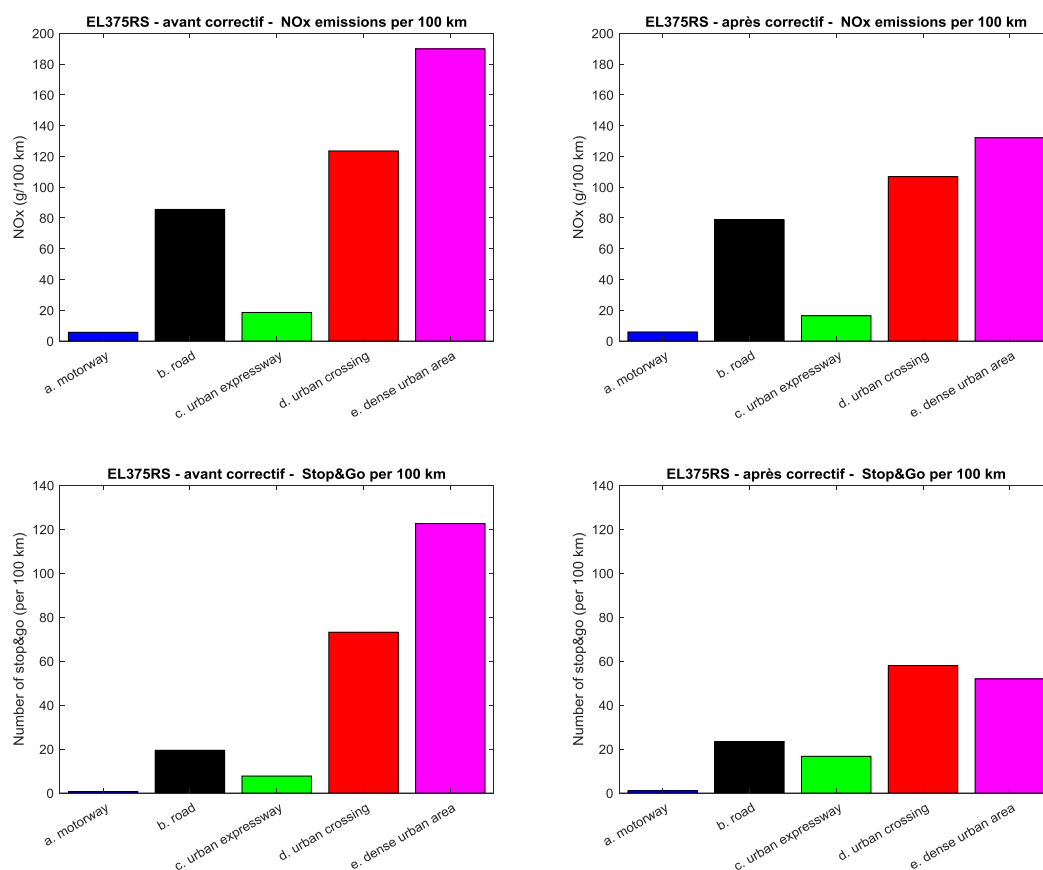


Figure E.5. Comparaison avant-après, EL375RS

Pour l'EN052KT (voir figure E.6), en zone urbaine les émissions de NO_x sont à peu près divisées par deux entre les deux périodes. En zone urbaine dense, cette réduction est cependant corrélée à réduction du nombre de « stop & go ». Après le correctif, on notera qu'en traversée d'agglomération et en zone urbaine dense, les taux d'émissions sont pratiquement identiques pour des nombres de « stop & go » eux aussi quasiment identiques.

Pour l'EN052KT, l'ensemble des résultats en urbain suggèrent une amélioration, mais la marge d'imprécision des conditions de circulation (estimées à partir du nombre de « stop & go ») rend la conclusion incertaine.

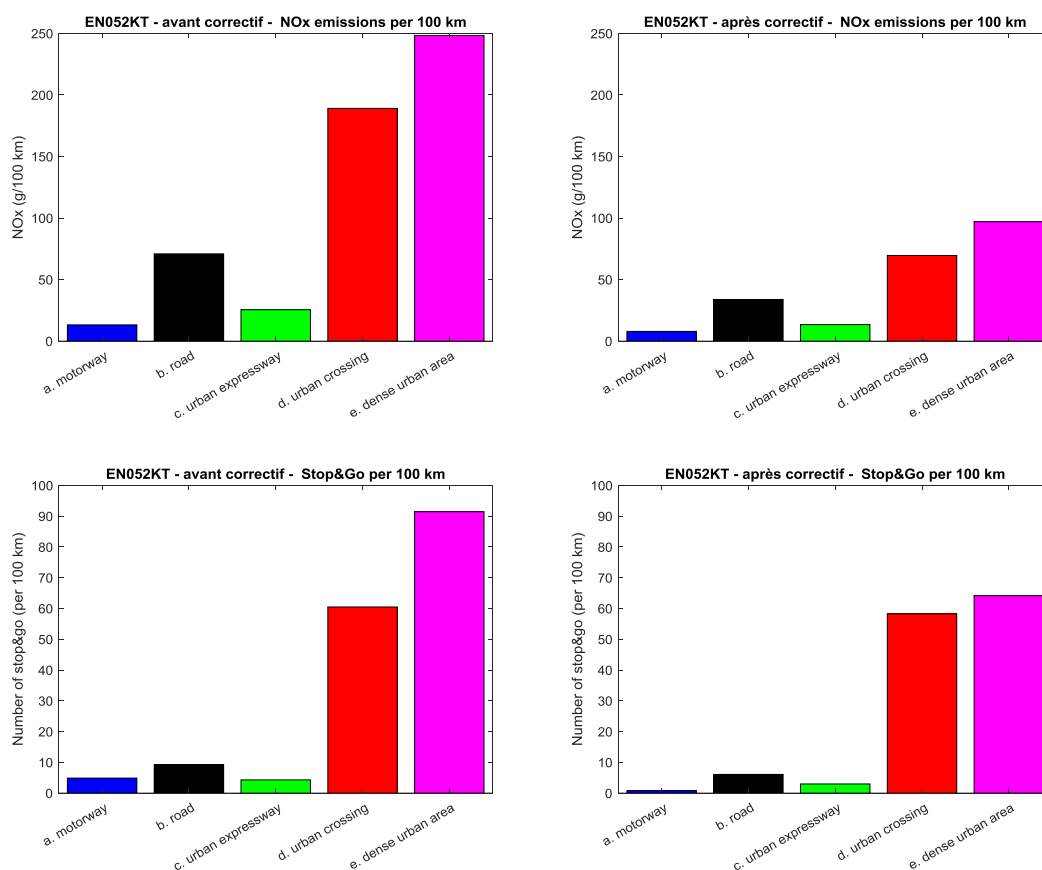


Figure E.6. Comparaison avant-après, EN052KT

Pour résumer, on n’observe aucune amélioration sur le premier véhicule et une amélioration sur le second. À ce stade, il est donc impossible de se prononcer sur l’efficacité du correctif.

E.4. Comparaison DX347RQ – EN052KT

Laisant de côté la question de l’efficacité du correctif, on réexamine la comparaison des véhicules NGV au regard des nouvelles mesures, qui révèlent une forte diminution des émissions de NO_x quand le nombre de « stop & go » diminue. Pour effectuer cette comparaison, on a donc repris les données du DX347RQ (sur une période différente de celle présentée dans les chapitres précédents) avec la nouvelle procédure de calcul des « stop & go » utilisée dans cette annexe. Le nombre de « stop & go » est alors comparable pour le DX347RQ et l’EN052KT, après le correctif – on a provisoirement retenu ce cas de figure, car il présente les meilleurs résultats obtenus pour les véhicules d’IVECO. Dans ces conditions relativement similaires, le taux d’émission des véhicules IVECO n’est alors que peu supérieur (inférieur à la marge d’imprécision de 50 %) à celui du DX347RQ ; la comparaison est par contre plus défavorable si on remplace l’EN052KT par l’EL375RS.

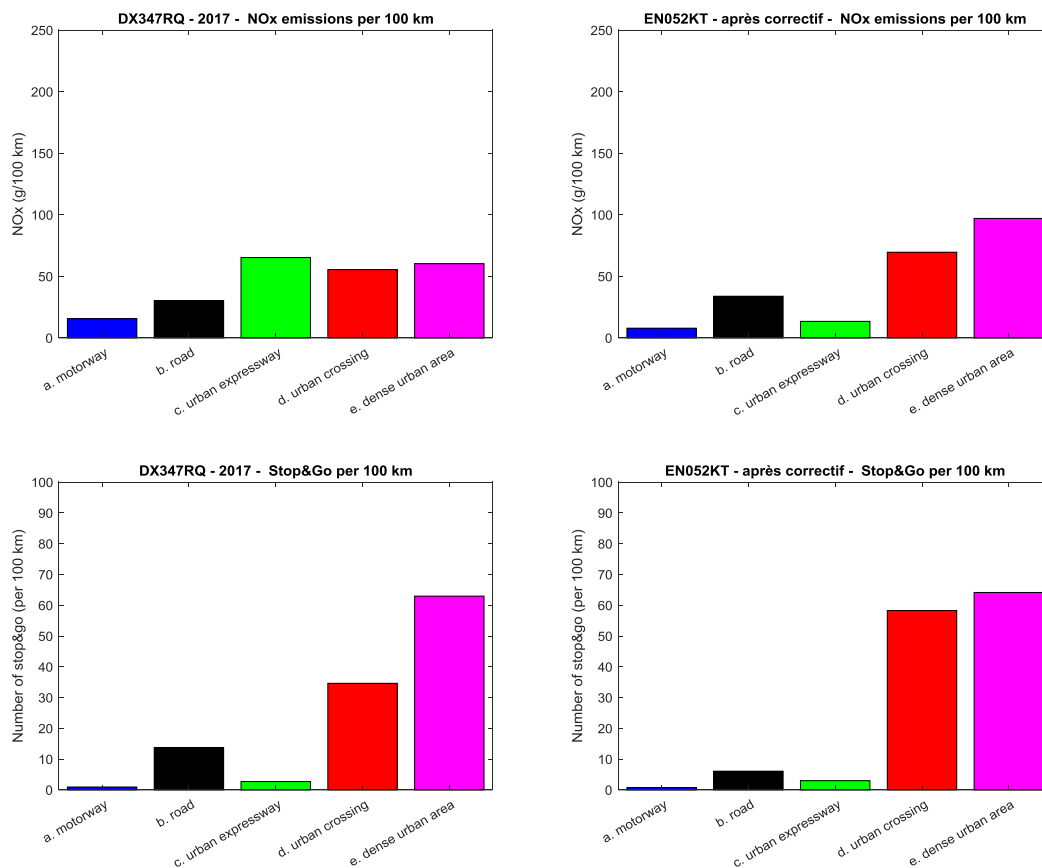


Figure E.7. Émissions du DX347RQ et de l'EN052KT

Le trajet du DX347RQ sur voie rapide urbaine (un total de 295 km) est réalisé à proximité de Thoiry et Neydens ; la raison du taux très élevé d'émissions de NO_x ne peut être expliquée ni par les « stop & go », ni par la consommation (c'est-à-dire le poids total en charge ou d'autres facteurs explicatifs) ni par le cumul des différentiels de vitesse positifs (voir plus bas pour la définition de cet indicateur)

La conclusion de l'ensemble des mesures est l'extrême sensibilité des émissions de NO_x aux conditions de circulation. Les très mauvais résultats de l'EL375RS et l'EN052KT, publiés dans les précédents chapitres, tiennent donc au moins pour une part aux conditions de circulation très sévères rencontrées par ces véhicules durant le projet (jusqu'au printemps 2018).

E.5. Usage d'un nouvel indicateur des conditions de trafic

Comme on l'a déjà expliqué, le nombre de « stop & go » est un indicateur imparfait de l'instabilité de la vitesse, car il ne rend pas compte des réaccélérations à partir de vitesses très basses, mais non nulles. On le remplace donc par le rapport du cumulé des différentiels positifs de vitesse sur la distance parcourue (le principe est analogue au cumulé des différentiels d'altitude positifs).

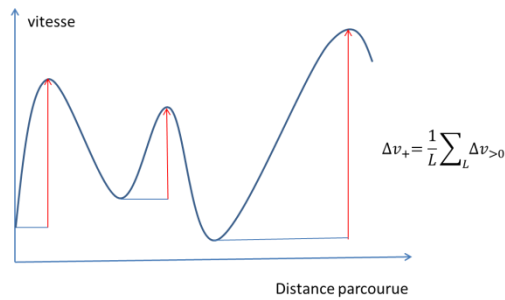


Figure E.8. Cumul des différentiels de vitesse positifs

Comme le montrent les figures ci-dessous, ce nouvel indicateur et le nombre de « stop & go » sont corrélés. Le nouvel indicateur montre cependant des conditions de circulation similaires pour l'EN052KT et l'EL375RS alors que le nombre de « stop & go » suggère de meilleures conditions pour le premier véhicule. Il s'accorde donc mieux avec les émissions de NO_x qui indiquent de plus mauvaises conditions pour le premier véhicule (voir § 1).

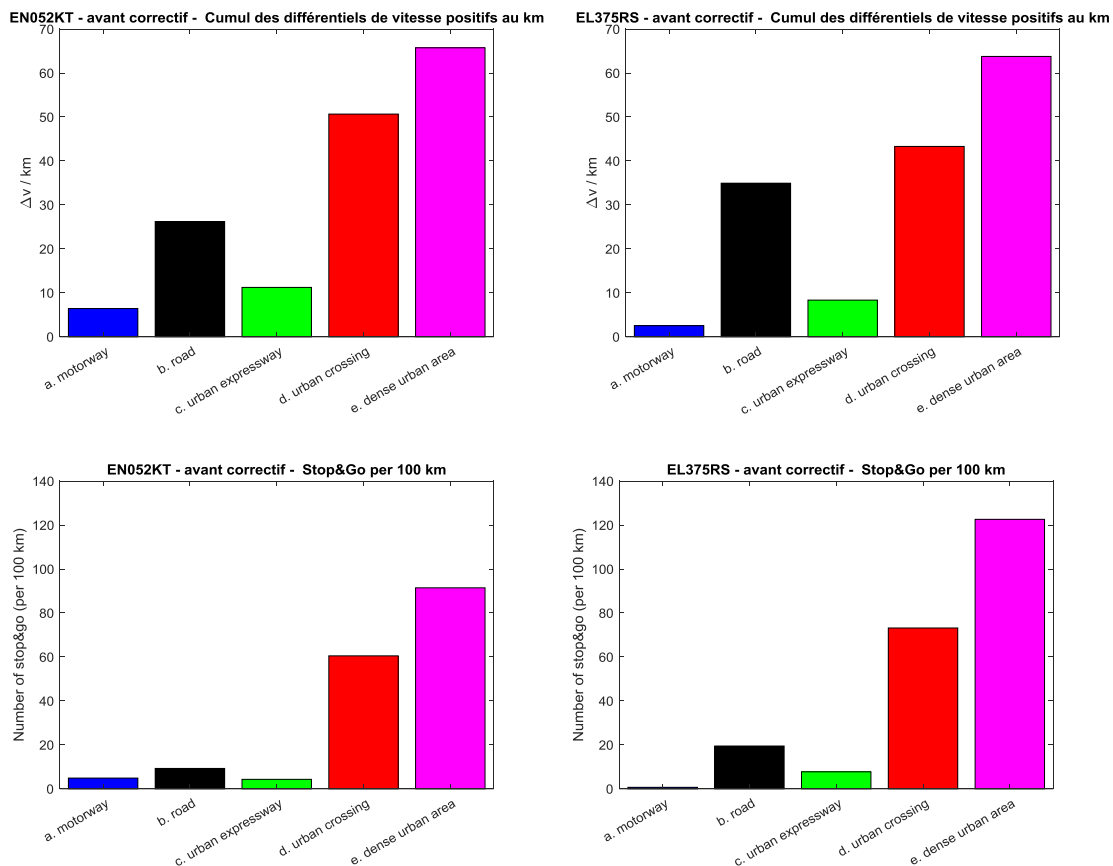


Figure E.9. « Stop & go » et cumul des différentiels de vitesse positifs

Sur route et voie rapide urbaine, où les arrêts complets sont rares, le cumul des différentiels de vitesse positifs rend mieux compte des difficultés de circulation que le nombre de « stop & go ».

E.6. Nouvelle comparaison avant-après

D'après le nouvel indicateur, pour l'EN052KT (voir figure E.10), les conditions de circulation sont quasiment inchangées avant et après le correctif d'IVECO. On confirme donc les conclusions d'une efficacité du correctif.

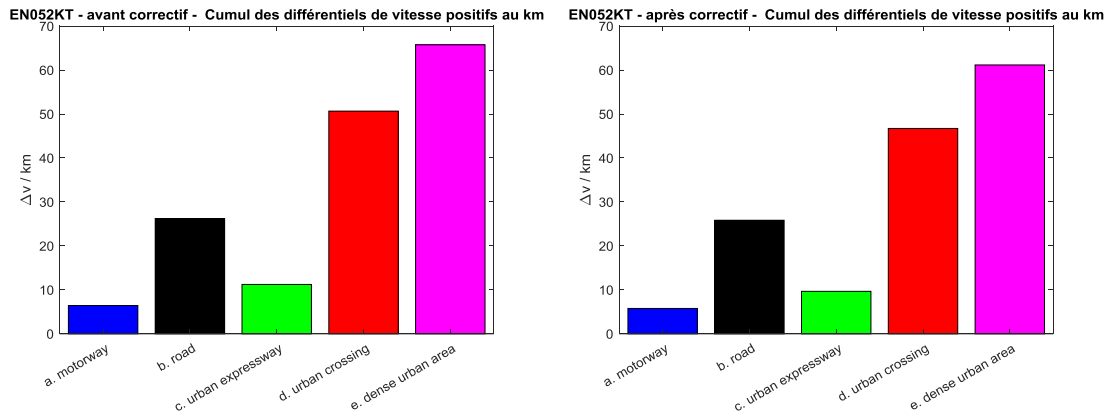


Figure E.10. Véhicule EN052KT

Pour l'EL375RS (voir figure E.11), le nouvel indicateur confirme les conclusions tirées du nombre de « stop & go » : une nette amélioration des conditions de circulation en zone urbaine dense, et une stabilité sur route. On réitère donc la conclusion précédente (voir § 3) : on attribue le plus faible taux d'émissions à l'amélioration des conditions du trajet et non au correctif apporté par IVECO.

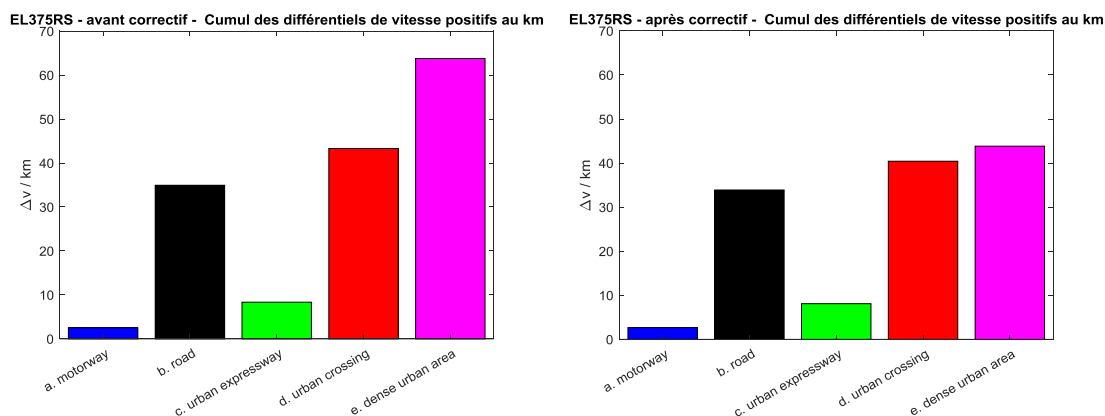


Figure E.11. Véhicule EL375RS

Pour terminer, il se pose la question de la différence des taux d'émission des deux véhicules (voir § 3) qui est au plus de l'ordre de 25 %. Comme celle-ci n'est pas très importante (pour des émissions de NO_x qui fluctuent beaucoup), elle pourrait être expliquée par des différences de conditions de circulation (non détectées), le poids total en charge, le carburant ou le conducteur.

E.7. Nouvelles comparaisons sur la base de la consommation

Le cumulé des différentiels positifs de vitesse (voir figure E.12) confirme la similitude des conditions de circulation pour le DX347RQ et l'EN052KT.

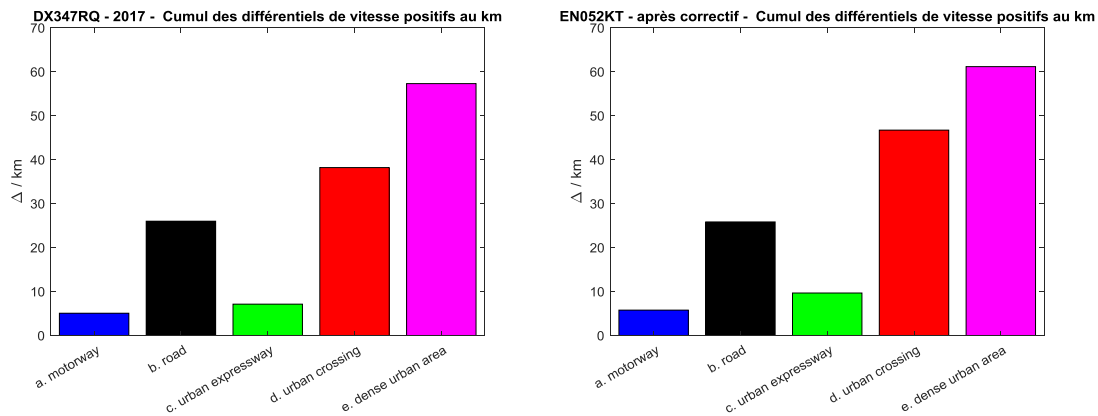


Figure E.12. Cumulé des différentiels de vitesse positifs

L'indicateur précédant révélant des conditions de circulation assez similaires pour toutes les catégories, on cherche ce qui peut différencier l'usage des différents véhicules. On examine donc la consommation (voir figure E.13), qui dépend des conditions de circulation, mais aussi du poids total en charge (inconnu dans la plupart des cas) ou d'autres facteurs. Ainsi, avec la consommation, on obtient ce qui différencie les usages : l'EL375RS consomme beaucoup plus que l'EN052KT. Une différence de 10 à 20 % entre les deux véhicules, variable en fonction de la catégorie de la route, est extrêmement élevée pour la consommation. Comme il s'agit du même modèle de véhicule, on impute cette différence à des conditions d'usage différentes : poids total en charge, carburant ou conducteur. Dans le cas présent, la raison exacte est sans importance ; ce qui compte c'est que l'EL375RS émet plus que son homologue parce qu'il consomme plus (la relation entre consommation et émissions de NO_x est vraisemblablement non linéaire).

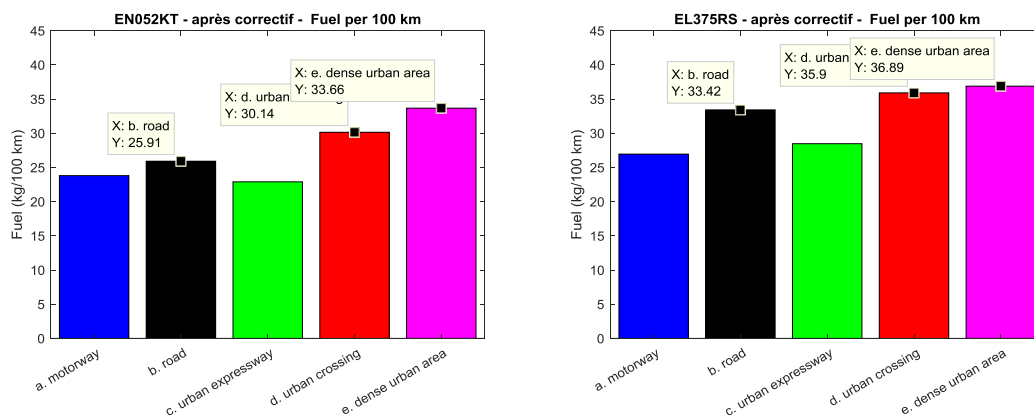


Figure E.13. Consommation des véhicules, EN052KT et EL375RS

On compare maintenant les consommations de l'EN052KT et du DX347RQ (voir figure E.14) : le DX347RQ consomme beaucoup plus que l'EN052KT. Bien que les modèles de véhicule diffèrent, on impute toujours cette différence à des conditions d'usage différentes⁵⁷ : poids total en charge ou conducteur.

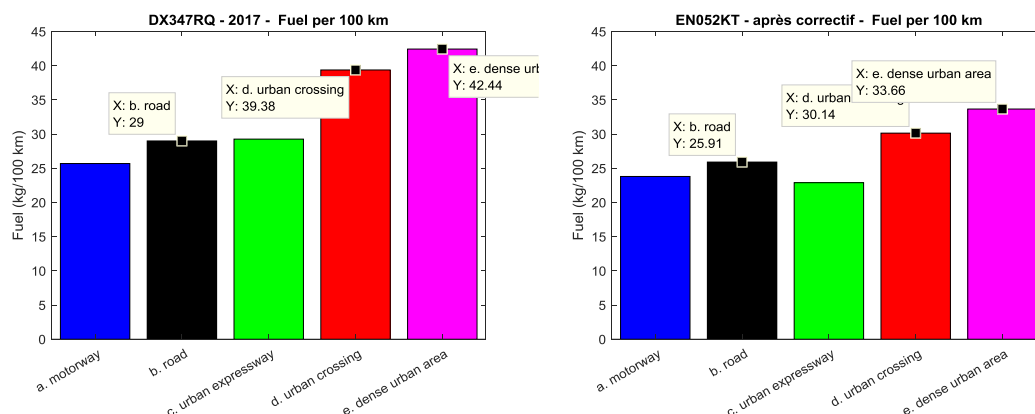


Figure E.14. Consommation des véhicules, DX347RQ et EN052KT

Comme les consommations du DX347RQ sont très supérieures à celle de l'EN052KT on comparera les émissions du premier véhicule à celles de l'EL375RS ; les consommations du DX347RQ sont encore supérieures à celle de l'EL375RS (voir figures E.13 et E.14). La conclusion de ces observations est que le taux d'émissions est environ deux fois supérieur pour l'EL375RS (voir figure E.15) dans des conditions d'exploitation considérées comme similaires - des résultats complémentaires, exposés plus bas, vont montrer que dans des conditions d'exploitation mieux contrôlées le rapport des taux d'émissions est plus faible. On rappelle que, du fait de conditions d'exploitation bien plus sévères pour l'EL375RS, ces taux étaient auparavant trois à sept fois supérieur dans le sixième chapitre.

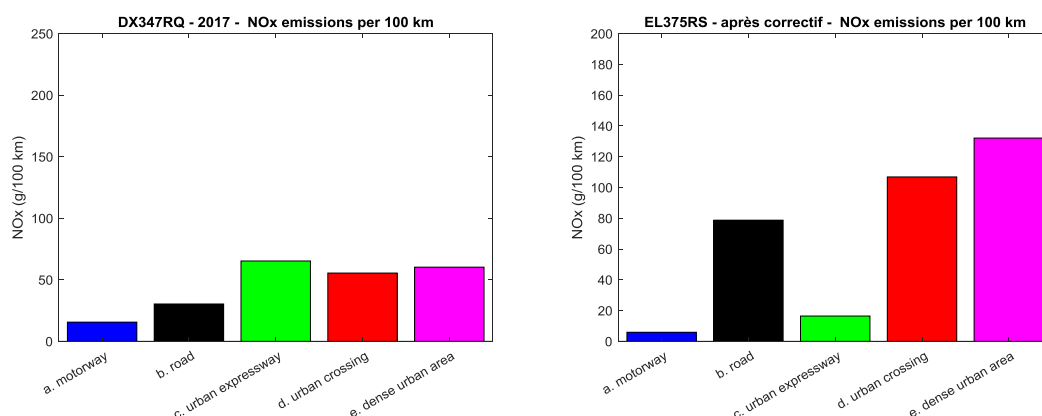


Figure E.15. Émissions du DX347RQ et de l'EL375RS

Les conditions d'usage sont considérées comme similaires.

⁵⁷ Il serait envisageable d'imputer cette différence de consommation à des différences de performances des véhicules, mais nous n'avons aucun élément permettant de supporter une telle affirmation.

On notera les taux d'émission élevés sur voie rapide urbaine, pour le DX347RQ, et sur route de campagne, pour l'EL375RS. Pour ce dernier véhicule, l'explication réside dans le fait que les routes de campagne sont en réalité des sorties d'agglomération, à Nîmes et Annecy, avec un cumul des différentiels de vitesse positifs élevé (voir figure E.11). Dans le cas du DX347RQ, on ne dispose d'aucune explication : ni les « stop& go » ni le cumul des différentiels de vitesse positifs (noté Δv_+) n'expliquent ces émissions ; on élimine aussi le PTC de la liste des facteurs explicatifs, car il est plus faible sur voie rapide urbaine qu'en zone urbaine.

Pour obtenir la base de comparaison la plus similaire possible, on compare les observations sur le périphérique d'Annecy pour l'EL375RS, le DX347RQ et le DE477VE (voir chapitre 4 et tableau E.1). Les résultats ne sont présentés qu'à titre indicatif car le kilométrage parcouru par l'EL375RS est faible. Ils montrent cependant un taux d'émission de NO_x très inférieur à celui d'un véhicule diesel, pour des conditions d'exploitation, révélées par la vitesse moyenne et la consommation, un peu plus sévères que pour le véhicule diesel. **Ce taux d'émission se rapproche aussi de celui du DX347RQ : pour des conditions identiques, on serait plus proche d'un écart de 50 % que de 100 %.**

	Kilométrage (km)	Vitesse moyenne (km/h)	Consommation (.../100km)	Emissions de NO_x (g/100 km)
DE477VE (diesel)	2521	52.9	31.2 l	160.3
DX347RQ (gaz)	5293	54.5	27.6 kg	33.2
EL375RS (gaz)	308	50.3	31.7 kg	56.2

Tableau E.1 : Périphérique d'Annecy - valeurs moyennes

Pour terminer, on examine les consommations de l'EN052KT avant et après le correctif pour déterminer si les conditions d'usage ont varié. La réponse est non (voir figure E.16). Au vu de cette stabilité des conditions d'usage et de la baisse des émissions, on maintient donc la conclusion de l'efficacité de la correction pour ce véhicule.

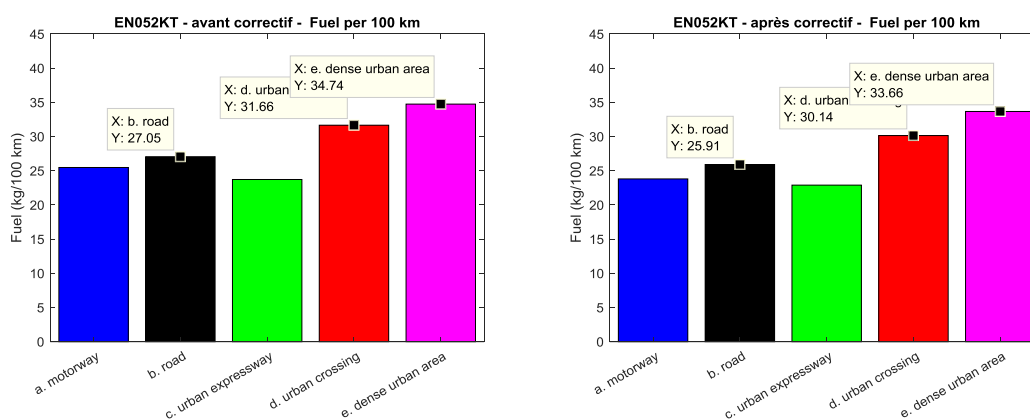


Figure E.16. Consommations avant-après, EN052KT

E.8. Nouvelles comparaisons sur la base des émissions par kWh

Les émissions par kWh sont censées refléter des taux d'émissions quelles que soient les conditions d'usage. Du fait de la relation de non-linéarité entre le taux d'émissions et la puissance, cette croyance est erronée en règle générale ; cependant, cet indicateur est pertinent quand les sollicitations du moteur sont similaires. Or, on a vu que les conditions d'usage de l'EN052KT sont similaires sur route et en traversée d'agglomération avant et après le correctif : cela est vrai pour les « stop & go (voir figure E.6), pour le cumul des différentiels de vitesse positifs (voir figure E.10) et enfin pour la consommation (voir figure E.16).

Les émissions par kWh (voir figure E.17) confirment donc les conclusions précédentes :

- on a une très faible baisse du taux d'émissions par kWh pour l'EL375RS, explicable par l'amélioration des conditions de circulation.
- on a une division par deux du taux d'émissions par kWh pour l'EN052KT, qui ne peut être imputée à l'amélioration des conditions d'usage. On l'impute donc à l'action du correctif. On notera que les performances de l'EL375RS et l'EN052KT deviennent alors similaires.

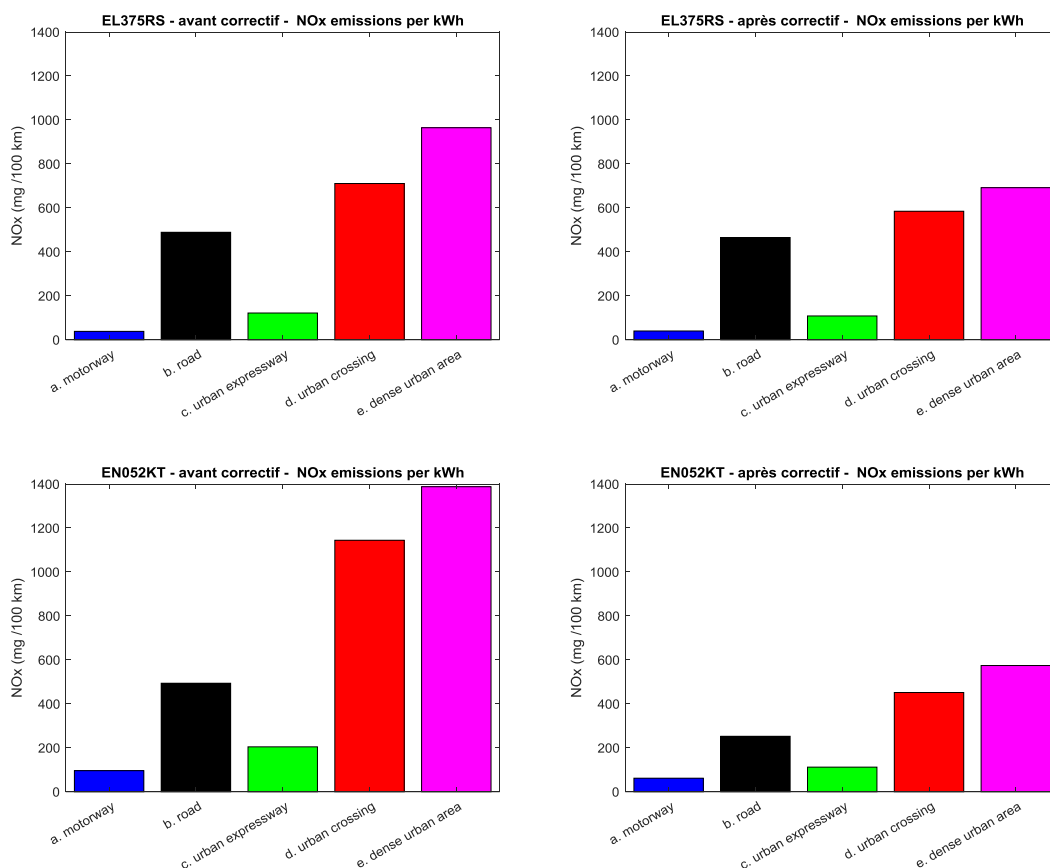


Figure E.17. Taux d'émissions par kWh

Le taux d'émission par kWh confirme à la fois l'efficacité du correctif apporté par IVECO (ou l'effet de l'évolution d'une autre variable⁵⁸) pour l'EN052KT, et l'absence d'effet pour l'EL375RS. Le premier véhicule revient au niveau du second.

E.9. Conclusions

Les véhicules EN052KT et EL0375RS rencontrent des conditions de circulation assez similaires, mais leur conditions d'usage sont vraisemblablement différentes (e.g. poids total en charge, conducteur, carburant), à moins bien entendu que ces deux véhicules ne soient pas strictement identiques. Le second véhicule consomme ainsi nettement plus et cela suffirait à expliquer des taux d'émission supérieurs. Malgré la variabilité des résultats, on peut donc affirmer que les résultats de ces véhicules s'accordent.

Les conclusions de cette annexe sont au nombre de trois :

- **on attire l'attention sur l'extrême sensibilité des taux d'émissions de NO_x à la sévérité des conditions d'exploitation : conditions de circulation (aménagement routiers et trafic) et aux conditions d'usage (poids total en charge, carburant, conducteur et autres facteurs).**
 - **Elle rend très incertaine la définition d'un taux d'émissions en zone urbaine (une différence d'un facteur deux, quasiment proportionnelle au nombre de « stop & go », est fréquente)**
 - **Elle rend difficiles les comparaisons entre deux véhicules d'un même modèle et encore plus entre deux véhicules de modèles différents.**
- **il existe une différence notable entre les véhicules EL375RS/EN052KT et le DX347RQ en matière d'émissions de NO_x, bien que nettement moins marquée qu'à l'issue du sixième chapitre. Tous ces véhicules présentent des taux d'émissions plus faibles que des véhicules diesel.**
- **au vu des résultats avant et après intervention sur l'EN052KT, les résultats de ce véhicule sont au même niveau que celui de l'EL375RS. Par contre, on n'observe aucun changement pour l'EL375RS avant et après intervention. Cela étant dit, on ignore si les différences de résultats pour l'EN052KT sont dus à l'intervention du constructeur ou à d'autres facteurs ou encore à une combinaison de plusieurs facteurs.**

⁵⁸ Il n'y a pas eu de changement de carburant ou de station d'approvisionnement. Par contre, plusieurs conducteurs se sont succédés au cours de l'expérimentation.

