



HAL
open science

Modélisation et estimation des émissions de polluants du trafic routier - rapport 7.1 du projet MOCOPo

Michel Andre, Herî Chanut, Anaïs Pasquier, Cindy Pellet, Antoine Montenon

► To cite this version:

Michel Andre, Herî Chanut, Anaïs Pasquier, Cindy Pellet, Antoine Montenon. Modélisation et estimation des émissions de polluants du trafic routier - rapport 7.1 du projet MOCOPo. [Rapport de recherche] IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. 2014, 104 p. hal-04617737

HAL Id: hal-04617737

<https://hal.science/hal-04617737v1>

Submitted on 19 Jun 2024

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.



Programme PREDIT- Groupe Opérationnel 2 – Gestion du trafic

Contrat n° 2010 MT CVS 121

Financement : Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement

Rapport n° 7.1 Mesure et mOdélisation de la COngestion et de la Pollution

Tâche 7 - Modélisation et estimation des émissions de polluants du trafic routier

Janvier 2014

Michel André, Hervé Chanut, Anaïs Pasquier,
Cindy Pellet, Antoine Montenon

IFSTTAR-LTE
AIR-RHÔNE-ALPES

MOCOPO *Measuring and mOdelling
traffic COngestion and POLLution*



Auteurs :

Michel André

*Directeur de recherche
Transports et pollution de l'air
IFSTTAR, LTE*

Anais Pasquier

*Ingénieur d'études
Transports et pollution de l'air
IFSTTAR, LTE*

Antoine Montenon

*Ingénieur d'études
Transports et pollution de l'air
IFSTTAR, LTE*

Hervé Chanut

*Responsable Service Emissions
Air-Rhône-Alpes*

Cindy Pellet

*Chargée d'Etudes
Air-Rhône-Alpes*

Fiche bibliographique

1 UR (1 ^{er} auteur) LTE, Laboratoire Transports et Environnement	2 Projet n°	3 Rapport n°	
4 Titre Modélisation et estimation des émissions de polluants du trafic routier			
5 Sous-titre : Livrablé 7.1 du projet de recherche MOCOPO, Mesure et modélisation de la congestion et de la pollution		6 Langue F	
7 Auteur(s) Michel André, Hervé Chanut, Anaïs Pasquier, Cindy Pellet, Antoine Montenon		8 Rattachement ext.	
9 Nom adresse financeur, co-éditeur PREDIT G02		10 N° contrats, conv.	
		11 Date de publication Janvier 2014	
12 Remarques			
13 Résumé <p>Ces travaux concernent la problématique d'estimation par modélisation des émissions de polluants atmosphériques du trafic, et en particulier la caractérisation des parcs automobiles en circulation. Une expérimentation a été menée sur une voie urbaine rapide de Grenoble, avec observation du trafic et caractérisation du parc en circulation par caméra vidéo, lecture des plaques d'immatriculation et identification des caractéristiques techniques des véhicules via le fichier des immatriculations. La technique vidéo pose de nombreuses difficultés mais permet in fine la caractérisation dynamique de la composition du parc local, avec des variations assez sensibles entre les périodes de la journée ou de la semaine.</p> <p>L'analyse des émissions de polluants et de leur sensibilité est effectuée en utilisant 2 approches de calcul et les données expérimentales de trafic et de parc. On observe une forte sensibilité à la composition du trafic et notamment au trafic poids lourds (moins de 5% du trafic mais jusqu'à 30% des émissions de NOx et PM). Les épisodes de congestion représentent jusqu'à 8% du temps (mais près de 50% des heures de pointe), 15% du trafic et 14 à 20% des quantités d'émission. Les facteurs d'émissions (g/veh.km) sont plus élevés en congestion, mais les différences restent assez limitées (4 à 30%). La diminution de la congestion apporterait en conséquence et globalement de faibles gains.</p> <p>Les surémissions de démarrage à froid constituent un enjeu important (40 à 50% de l'émission de l'ensemble du trafic pour certains polluants comme CO, et les composés organiques volatils). Avec l'évaporation de carburant et la charge des poids lourds, ces paramètres mal appréhendés en temps et en lieu limitent considérablement la précision des estimations locales d'émissions.</p> <p>La sensibilité des estimations à divers aspects de la composition du parc (trafic de camion, diésélisation, réglementations) et à divers paramètres de calcul notamment la résolution temporelle est également analysée.</p>			
14 Mots clés Émission, polluant, trafic, parc automobile, composition, voitures, camions, véhicules utilitaires, in situ, expérimentation, vidéo, modèle, Copert		15 Diffusion libre	
16 Nombre de pages 104 pages	17 Prix — — — — €	18 Confidentiel jusqu'au	19 Bibliographie oui

Publication data form

1 UR (1st author) Transport and Environment Laboratory		2 Project n°	3 IFSTTAR report n°
4 Title Modelling and estimation of the pollutant emissions from the road traffic			
5 Subtitle Deliverable 7.1 of the research project MOCOPO, Measurement and modelling of congestion and pollution		6 Language F	
7 Author(s) Michel André, Hervé Chanut, Anaïs Pasquier, Cindy Pellet, Antoine Montenon		8 Affiliation	
9 Sponsor, co-editor, name and address PREDIT G02		10 Contract, conv. n°	11 Publication date January 2014
12 Notes			
13 Summary <p>These works deal with the estimation of the air pollutant emissions from the road traffic by modelling. They focus also on the characterization of the in situ vehicle fleets. An experiment was conducted on a high-speed urban road in Grenoble (ring). The traffic was observed and the vehicle was monitored by video camera, enabling the capture of the vehicle registration number and the identification of their detailed technical characteristics through the national register. The video technics raised up several difficulties but enabled a dynamic characterization of the local fleet, with significant variations according to the day-time and day in the week.</p> <p>Pollutants emissions as well as their sensitivity are analysed using two approaches and the traffic and fleet experimental data. A strong sensitivity to the fleet composition is observed. Heavy vehicles that represent less than 5% of the traffic, emit up to 30% PM and NOx. Congested events represent about 8% of the time, 50% of the peak hours, 15% of the total traffic and 14 to 20% of the emissions quantities. Emission factors (g/veh.km) are higher in congestion but the differences remain limited (4 to 30%). The congestion decrease would thus provide limited gains.</p> <p>Cold start over-emission is really important (40 to 50% of the CO and volatile organic compounds emission from the whole traffic). Together with the evaporative emission and the heavy duty load rates, these phenomenon are badly approached as regards spatial and temporal distribution. They limit thus significantly the ability to assess local emissions.</p> <p>The sensitivity of emission estimations is also analysed, with respect to fleet composition (lorries, diesel rate, emission regulation) and various calculation parameters of which the time resolution.</p>			
Key-words: Pollutants, emission, road traffic, vehicle fleet, composition, cars, lorries, light duty vehicles, in situ experiment, video monitoring, emission model, Copert		15 Distribution statement free	
16 Nb of pages 104 pages	17 Price — — — — €	18 Declassification date	19 Bibliography yes

Table des matières

INTRODUCTION	5
1. CONTEXTE EXPERIMENTAL	7
1.1. Site expérimental : la rocade grenobloise	7
1.2. Les observations expérimentales	8
2. OBSERVATION ET CARACTERISATION DU PARC AUTOMOBILE	11
2.1. Introduction	11
2.2. Description expérimentale et observations brutes	11
2.3. Analyse de la fiabilité des CLAP	12
2.3.1. Difficultés d'identification véhicules	13
2.3.2. Taux d'observations de plaques rapporté au trafic	13
2.3.3. Dysfonctionnement lié à la densité du trafic	14
2.3.4. Imprécision des relevés (trafic ou observations vidéo)	15
2.3.5. Plaques enregistrées plusieurs fois successives	15
2.3.6. Fluctuations des plaques « étrangères »	16
2.3.7. Confirmation des dysfonctionnements par l'identification des véhicules	17
2.3.8. Récapitulatif et conclusions	17
2.4. Classement des immatriculations en catégories de véhicules	19
2.4.1. Identification et caractéristiques techniques des véhicules	19
2.4.2. Recodages pour les analyses temporelles	20
2.4.3. Élaboration de la composition du parc	20
2.4.3.1. Catégories de véhicules	20
2.4.3.2. Motorisation, segments de « taille » et catégorie réglementaire EURO	21
2.4.4. Construction de la composition du parc	23
2.5. Analyse du parc local	23
2.5.1. Analyse par catégories de véhicules	24
2.5.2. Analyse selon les motorisations et types de véhicules	25
2.5.3. Analyse de la composition du parc selon les réglementations EURO	26
2.5.4. Conclusion	28
2.6. Variabilité temporelle du parc local Mocopo	29
2.6.1. Parc roulant des samedi, dimanche et week-end	29
2.6.1.1. Différenciation des parcs selon les catégories de véhicules	29
2.6.1.2. Différenciation des parcs selon motorisations, types de véhicules et réglementations pollution	29
2.6.2. Variabilité de la composition du parc en heures creuse et de pointe	31
2.6.2.1. Différenciation des parcs selon les catégories de véhicules	31
2.6.2.2. Différenciation des parcs selon motorisations, types de véhicules et réglementations pollution	31
2.6.3. Conclusions	33
2.7. Conclusions	33
3. PROBLEMATIQUE DU CALCUL D'EMISSIONS	35
3.1. Méthode et outil Copert 4	35
3.1.1. Émission à chaud	36
3.1.2. Surémission à froid	37
3.1.3. Émissions par évaporation	37
3.1.4. Les émissions non échappement de particules	37
3.1.5. Données d'entrées et limites de Copert	38
3.2. Approche opérationnelle MOCAT	38
3.2.1. Approche annuelle	38
3.2.2. Approche horaire	40
3.3. Approche expérimentale CopCETE	41
3.3.1. Logiciel CopCete	41
3.3.2. Principes et hypothèses des calculs et leurs implications	42
3.3.2.1. Principes généraux	42
3.3.2.2. Cas d'application et hypothèses	43
3.3.2.3. Phasage temporel	44
3.3.2.4. Analyses	45

4. ANALYSE GLOBALE DES EMISSIONS	47
4.1. Analyse sectorielle (MOCAT)	47
4.2. Résultats détaillés par site et campagne d'expérimentation	47
4.2.1. Comparaison entre sites	48
4.2.2. Comparaison entre campagnes expérimentales	48
4.3. Profils horaires d'émission selon le jour de la semaine	50
5. ANALYSES DETAILLEES DES EMISSIONS ET FACTEURS D'EMISSION	53
5.1. Émissions et facteurs d'émission	53
5.2. Comparaison des sens de circulation	54
5.3. Analyse selon les jours de semaine	55
5.4. Analyse selon les heures de la journée	56
5.5. Émissions de polluants et épisodes de congestion	57
5.5.1. Émissions moyennes horaires	57
5.5.2. Analyse détaillée des émissions liées aux phénomènes de congestion	59
5.5.3. Conclusions	62
6. INFLUENCE DU PARC AUTOMOBILE	63
6.1. Émissions selon les catégories de véhicules	63
6.2. Sensibilité à différentes compositions du parc automobile	65
6.3. Variabilité du parc automobile et des émissions	67
6.3.1. Variabilité du trafic poids lourds	67
6.3.2. Sensibilité des émissions à la variabilité du trafic poids lourds	68
6.3.3. Variabilité de l'équilibre Essence - Diesel et émissions	69
6.3.4. Variabilité des réglementations Euro et émissions	70
6.4. Conclusions	71
7. AUTRES ASPECTS DE L'ESTIMATION DES EMISSIONS DE POLLUANTS	73
7.1. Incidence de différents paramètres de calcul des émissions	73
7.1.1. Prise en compte du démarrage à froid	73
7.1.1.1. Importance de l'émission à froid	73
7.1.1.2. Variation de l'émission à froid selon les trajets	74
7.1.2. Évaporations de carburant	75
7.1.3. Influence du paramètre de chargement des camions	76
7.1.4. Conclusions	76
7.2. Corrélations entre émissions, pollution et trafic	78
7.2.1. Observation des évolutions	78
7.2.2. Profil horaire par type de jour (approche MOCAT)	80
7.2.3. Profil 6 minutes par type de jour	81
7.2.4. Relation entre émissions et concentrations mesurées	82
7.2.5. Conclusions	83
7.3. Incidence du pas de temps sur les émissions	84
7.3.1. Analyse visuelle	84
7.3.2. Analyse détaillée de l'influence du pas de temps	87
7.3.2.1. Bilans intégrés d'émissions	87
7.3.2.2. Pas de temps et épisodes de congestion	88
7.3.3. Conclusions	90
CONCLUSIONS	91
BIBLIOGRAPHIE	93
ANNEXES	95
Annexe 1. Observations des immatriculations par pays	97
Annexe 2. Variabilité du trafic	99
Annexe 3. Variabilité des émissions au cours d'une semaine (NOx, sens Est-Ouest)	100

Introduction

Les émissions de polluants dues au trafic constituent un enjeu de santé public croissant dans les agglomérations. A ce titre, les agglomérations cherchent à mettre en œuvre des mesures de gestion du trafic, planification des déplacements, report modal vers les transports en commun, etc. visant à diminuer les émissions de polluants du trafic.

L'évaluation et le monitoring de la contribution des transports à cette pollution de l'air, nécessite des outils de calcul d'émission, de dispersion des polluants et de calcul de leurs concentrations, et surtout l'articulation de ces outils avec de nombreuses hypothèses et données de trafic. Ces outils et données sont également nécessaires pour l'évaluation a priori des différentes politiques de transports mises en œuvre.

Le projet MOCOPO, par un développement expérimental important sur un site urbain, visait en particulier à confronter, consolider ces approches de modélisation, et à analyser le lien entre trafic, congestion et pollution.

Plus spécifiquement, dans ce cadre (tâche 7 du projet), le projet se proposait d'aborder les questions suivantes :

- quelle est la composition réelle - locale du parc automobile, et peut-on l'appréhender au travers de moyens d'observations vidéo ? Ce parc est-il différent des estimations nationales (obtenues par modélisation) ?
- quelle est l'incidence de la prise en compte d'une composition réelle observée du parc local dans le calcul d'émissions de polluants et de la pollution de l'air, par rapport aux approches traditionnelles utilisant un parc moyen ?
- quels sont les points de sensibilité des calculs d'émissions, les enjeux (quantité d'émissions associées), les données associées et leur éventuelle fragilité (analyse de la méthodologie de calcul et sensibilité à différents paramètres) ?
- peut-on corréler un calcul d'émissions précis (sur des données de trafic fines décrivant notamment l'apparition de la congestion) avec la pollution mesurée en proximité du trafic ?

Une campagne expérimentale focalisée sur l'observation du parc, du trafic, et les mesures de concentrations des différents polluants a donc été menée dans le cadre du projet MOCOPO.

La prise en compte de la voie ferrée et des émissions des trains dans le bilan global a été traitée par ailleurs (cf. Pasquier et al. 2013).

Ce rapport décrit les travaux effectués qui s'inscrivent clairement dans 2 grands registres :

- l'observation in situ et la caractérisation du parc automobile en circulation sur la rocade de Grenoble,
- l'estimation des émissions à partir des données de trafic durant la campagne expérimentale, et l'analyse de l'influence de la composition du parc d'une part mais aussi de nombreux paramètres entrant dans les calculs.

Le chapitre 1 décrit succinctement le contexte expérimental. Le chapitre 2 traite de l'analyse du parc automobile, y compris le retour d'expérience sur la mise en œuvre de l'observation vidéo des plaques d'immatriculations.

Le chapitre 3 donne les éléments méthodologiques des calculs d'émission. Deux approches de calcul dérivées de la même méthode européenne COPERT4 ont été mises en œuvre. La première MOCAT a surtout un objectif de quantification d'émissions sur le territoire en vue de la détermination des concentrations de polluants. La seconde a été mise en œuvre afin de permettre une analyse fine et paramétrée des émissions et facteurs d'émissions, à la fois à un niveau global et par catégories détaillées de véhicules.

Les chapitres 4 à 7 analysent les résultats des estimations d'émission de polluants et leur sensibilité aux différents paramètres : phénomènes de congestion, composition du parc, paramètres divers du calcul.

1. Contexte expérimental

Ces travaux s'intègrent dans le cadre du projet MOCOPO, et bénéficient en conséquence d'un site expérimental et de données qui sont récapitulées brièvement dans ce chapitre.

1.1. Site expérimental : la rocade grenobloise

Grenoble est une ville française de la région Rhône-Alpes. La communauté d'agglomération de Grenoble a une population estimée à 397 200 habitants en 2009 (*source : INSEE*).

Outre le fait qu'elle soit la troisième commune et deuxième agglomération de la région Rhône-Alpes, Grenoble est la plus grande agglomération des Alpes françaises et la deuxième des Alpes européennes derrière Turin. Cela lui confère un statut de carrefour routier important. En effet, outre le fait d'être reliée aux grandes agglomérations décisionnelles comme Lyon ou Genève, Grenoble reste le point d'accès principal vers les stations alpines (Figure 1).

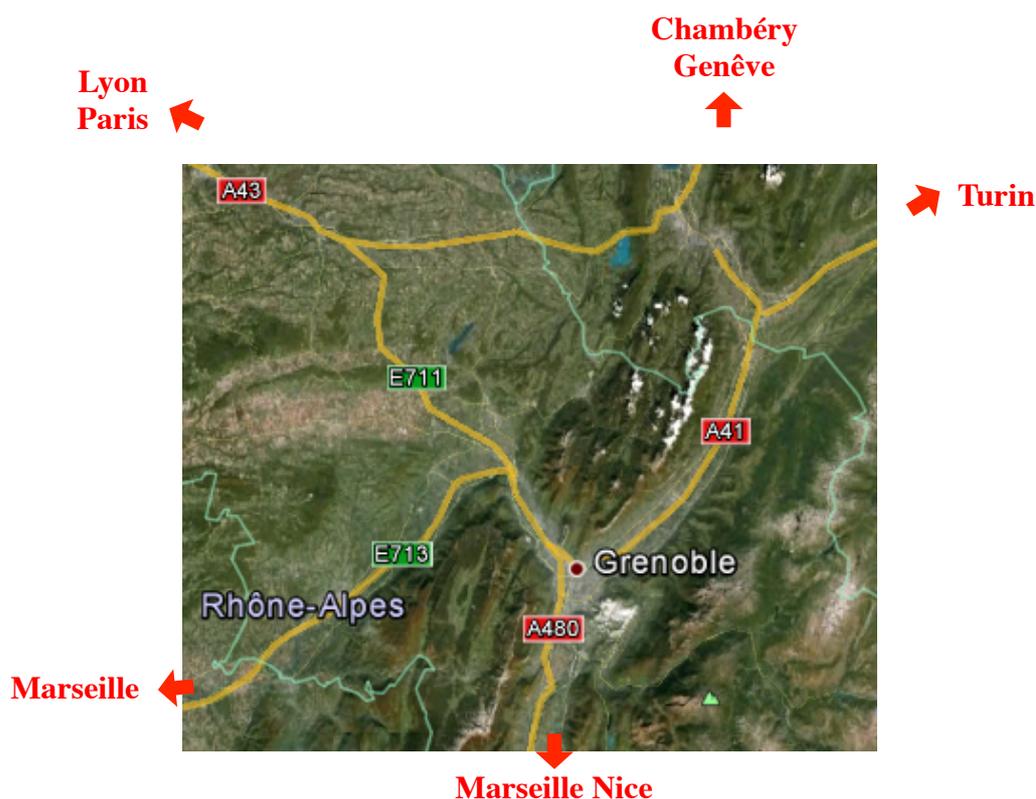


Figure 1 : Voies principales de communication autour de l'agglomération grenobloise

Le réseau routier de l'agglomération de Grenoble se structure autour d'un axe périphérique permettant de relier les trois autoroutes principales desservant l'agglomération. C'est cet axe

périphérique, appelé également N87 par la typologie habituelle, qui fait l'objet d'étude du projet Mocopo.

L'axe périphérique est une route en 2x2 voies limitée à 90 km/h. A l'extrémité ouest, la vitesse limite est de 70 km/h (Point de mesure du Rondeau). Cette limite s'applique entre la sortie 8 le grand échangeur du Rondeau (intersection avec l'autoroute A480) direction Ouest et entre le grand échangeur du Rondeau et l'entrée 8 direction Est, soit sur une longueur d'environ 750 mètres. L'axe périphérique mesure environ 10 km entre l'échangeur du Rondeau et l'échangeur de Meylan (intersection avec l'autoroute A41).

1.2. Les observations expérimentales

Le projet Mocopo a permis le recueil de différents types de données sur le site expérimental. Ces données concernent :

- Le trafic, mesuré par des boucles électromagnétiques SIREDO sur la chaussée, ainsi que par d'autres capteurs. On dénombre 6 points de mesures : (d'Ouest en Est) Rondeau, Etats Généraux, Echirolles, Eybens, Saint-Martin-d'Hères, Meylan. Ces mesures ont été effectuées en 2011. Les boucles électromagnétiques ont été utilisées pour un comptage total du trafic, sans distinction de type de véhicule ni de voie empruntée, ainsi que la vitesse moyenne de ces véhicules, et par créneau de 6 minutes. Les données de trafic relevées par les boucles électromagnétiques SIREDO ont été relevées (et sont disponibles) sur des périodes indiquées en Tableau 1.

Site	Hiver	Printemps	Été	Automne
RON (Rondeau)	-	du 24/03 au 11/04	X	du 11/09 au 29/09
EG (Etats Généraux)	du 17/01 au 02/02	du 24/03 au 09/04	du 17/06 au 22/06 (très partielles jusqu'au 30/06)	X
ECH (Echirolles)	du 17/01 au 02/02	du 24/03 au 11/04	du 17/06 au 04/07	du 11/09 au 29/09
EYB (Eybens)	du 17/01 au 02/02	du 24/03 au 11/04	X	du 11/09 au 29/09
SMH (Saint-Martin d'Hères)	du 17/01 au 18/01 (15h) (partielles du 28/01 au 03/02)	du 24/03 au 11/04	du 17/06 au 22/06 (14h)	du 11/09 au 14/09 (22h)
MEY (Meylan)	du 17/01 au 02/02	-	du 17/06 au 03/07	du 11/09 au 29/09

Tableau 1 : Périodes de comptage de trafic

- Les immatriculations des véhicules, en vue d'analyse de la composition du parc automobile, pour la période allant du 8 septembre au 10 octobre 2011, au site d'Echirolles. Ces immatriculations ont été prélevées par photographie de l'avant des véhicules à chaque passage puis traitement d'images.

- Les trajectoires et vitesses des véhicules, relevées par hélicoptère ainsi que par un véhicule dans le trafic, pour appréhender les conditions de circulation et la congestion.
- Les concentrations de certains polluants, sur 4 sites de mesures : Rondeau, Les Frênes (fond urbain), Echirolles, Eybens. Ces mesures concernent les polluants NO, NO₂, PM₁₀ et PM_{2,5}, auxquels s'ajoutent les relevés de température, vitesse et direction du vent. Les mesures ont été effectuées au cours de quatre périodes de l'année 2011, avec un pas de temps de mesure de 15 minutes, moyennées sur une heure : Hiver (du 17 jan.-9:00 au 3 fév.-11:00), Printemps (du 24 mars-15:00 au 12 avr.-11:00), Eté (du 14 juin-13:00 au 7 juil.-10:00) et Automne (du 7 sep.-1:00 au 27 sep.-9:00). Les différents points de mesures sont signalés sur la Figure 2.

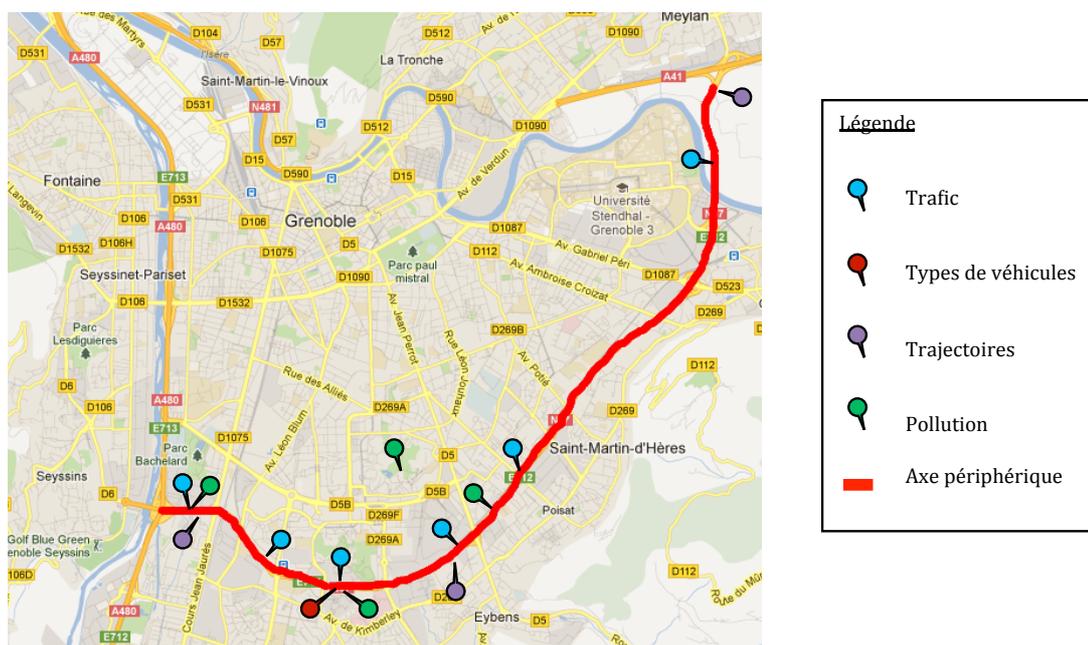


Figure 2 : Points de mesures sur l'axe périphérique

Les observations visant à caractériser le parc automobile in-situ ayant été effectuées sur le site d'Echirolles, c'est principalement sur ce site et à partir des données le concernant que sont effectués les analyses de parcs, et plusieurs travaux sur les émissions et leur modélisation.

2. Observation et caractérisation du parc automobile

2.1. Introduction

Dans ce cadre, l'objectif était d'observer et caractériser la composition automobile en circulation, de tester l'incidence de la qualité de représentation des parcs automobiles dans les calculs d'émission, et d'envisager des calculs plus précis des émissions en considérant éventuellement la variabilité du parc.

On a ainsi déployé un dispositif de 4 caméras vidéos de lecture et enregistrement des plaques minéralogiques des véhicules sur les voies du site d'Échirolles (en parallèle aux mesures de trafic). L'identification des véhicules a permis de déterminer leurs caractéristiques techniques détaillées à partir du fichier national des immatriculations. On connaît ainsi de manière très précise la composition du parc circulant à hauteur d'Echirolles, ce qui doit permettre de calculer de manière fine les émissions dues au trafic routier sur la RN 87 pendant la campagne de mesures de septembre 2011.

L'observation du parc local doit nous permettre de comparer les distributions technologiques des véhicules déterminées avec les statistiques de parc obtenues au niveau national. On détermine ainsi, une composition moyenne sur l'ensemble de la campagne d'observation, mais on peut également en connaître la variabilité en fonction des périodes de la journée / semaine et du pas des mesures (par 6 minutes, 15 minutes, et par heure).

Le rapport (Pasquier et al. 2013) décrit la méthodologie des observations de parcs en détail ainsi que les résultats.

Dans ce chapitre, nous décrivons brièvement l'approche expérimentale et d'analyse des données, et nous analysons également la technique d'observation (qui a présenté de nombreuses défaillances). Nous récapitulons ensuite les principaux éléments de description du parc local et de comparaison aux hypothèses nationales.

2.2. Description expérimentale et observations brutes

Les quatre caméras étaient positionnées sur un panneau à message variable à hauteur d'Echirolles, deux dans chaque sens de circulation :

- Les caméras 1 et 2 observaient les véhicules circulant d'Ouest en Est,
- Les caméras 3 et 4 observaient les véhicules circulant d'Est en Ouest.

Au total sur les 1 694 370 passages relevés de véhicules, il y a 896 232 passages de véhicules supposés français (par analyse de la constitution et de la forme de l'immatriculation), soit près de 53 % des observations. Ces observations françaises représentent 353 721 immatriculations différentes (des immatriculations sont observées plusieurs fois sur la période).

Caméra	Nombre d'observations	Pourcentage
CLP 1	614328	36,3 %
CLP 2	478239	28,2 %
CLP 3	220869	13,0 %
CLP 4	380934	22,5 %
Total	1694370	100 %

Tableau 2 : Nombre d'observations d'immatriculations par caméra du 8 septembre au 10 octobre 2011

Les données obtenues contiennent les informations suivantes :

- Caméra d'observation : CLP1, CLP2, CLP3 ou CLP4,
- Pays
- Immatriculation
- Année, mois, jour d'observation
- Heure, minute, seconde, centième d'observation

Les données brutes décrites ci-dessus, ont été importées dans Access.

2.3. Analyse de la fiabilité des CLAP

Des erreurs de lecture et / ou dysfonctionnements de caméras ont été observés. Il importe en conséquence d'en analyser les causes et les conséquences sur les résultats, notamment en terme de variabilité au cours du temps. On a donc analysé les différents facteurs d'erreurs et leur variation au cours du temps. La fiabilité des observations dépend de plusieurs facteurs qui peuvent être liés au dispositif expérimental ou à l'environnement, parmi lesquels : l'angle de prise de vue, les conditions de trafic qui peuvent produire des effets de masque, la luminosité, les conditions météorologiques, l'ensevelissement (notamment en cas de contrejour). D'autres paramètres intrinsèques au dispositif peuvent être défaillants : la reconnaissance d'une plaque sur l'image brute, la qualité de l'algorithme de reconnaissance de caractère qui transforme l'objet graphique en une suite de chiffres et de lettres.

Il faut enfin mentionner les limites liées à l'installation des caméras : la visée vers l'avant des véhicules ne permettra pas de prendre en compte les 2 roues, tandis qu'une prise par l'arrière identifierait les remorques au lieu des tracteurs routiers ou camions qui les tractent.

L'erreur d'identification peut conduire à reconnaître un autre véhicule (au travers du fichier national des immatriculations). C'est ainsi que de nombreux véhicules ont été identifiés comme étrangers (italiens ou belges) compte tenu de la relative similarité des

plaques. De même des 2-roues ou remorques ont été également identifiées alors que l'approche ne permettait pas d'en voir.

2.3.1. Difficultés d'identification véhicules

Alors que 53% des observations ont été identifiées comme françaises, près de 20 % ont été associées à des immatriculations italiennes, 10 % à des immatriculations belges et 10 % n'ont pu être associées à un pays d'origine (mauvaise lecture de la plaque, soit près de 178 000 véhicules, cf. Annexe 1). Les 10 % restant correspondent à des plaques identifiées allemandes, autrichiennes, britanniques, et portugaises, etc. Les plaques italiennes et belges étant assez similaires aux immatriculations françaises, les taux importants de ces plaques sont certainement dus à de mauvaises identifications.

Toutes les autres nationalités représentent chacune moins de 1 % des observations sauf les plaques identifiées comme autrichiennes, avec près de 2%.

2.3.2. Taux d'observations de plaques rapporté au trafic

Le nombre d'observations rapporté aux comptages de trafic donne une idée du taux d'efficacité des enregistrements (les comptages étant cependant eux-mêmes incertains à hauteur de 5 à 15% selon les experts, et environ 20% des créneaux d'observation présentent des valeurs manquantes). Sur les créneaux valides, le taux d'observations est en moyenne de 57% sur l'ensemble de la période. Il a été beaucoup plus faible dans le sens Est-Ouest : 40% contre 77% dans l'autre sens.

Ces résultats globaux cachent cependant une grande variabilité (entre les caméras, selon les créneaux horaires) et on notera par ailleurs que des taux supérieurs à 100% peuvent être observés (nombre de plaques vues par les 2 caméras d'un sens supérieur au comptage de trafic correspondant).

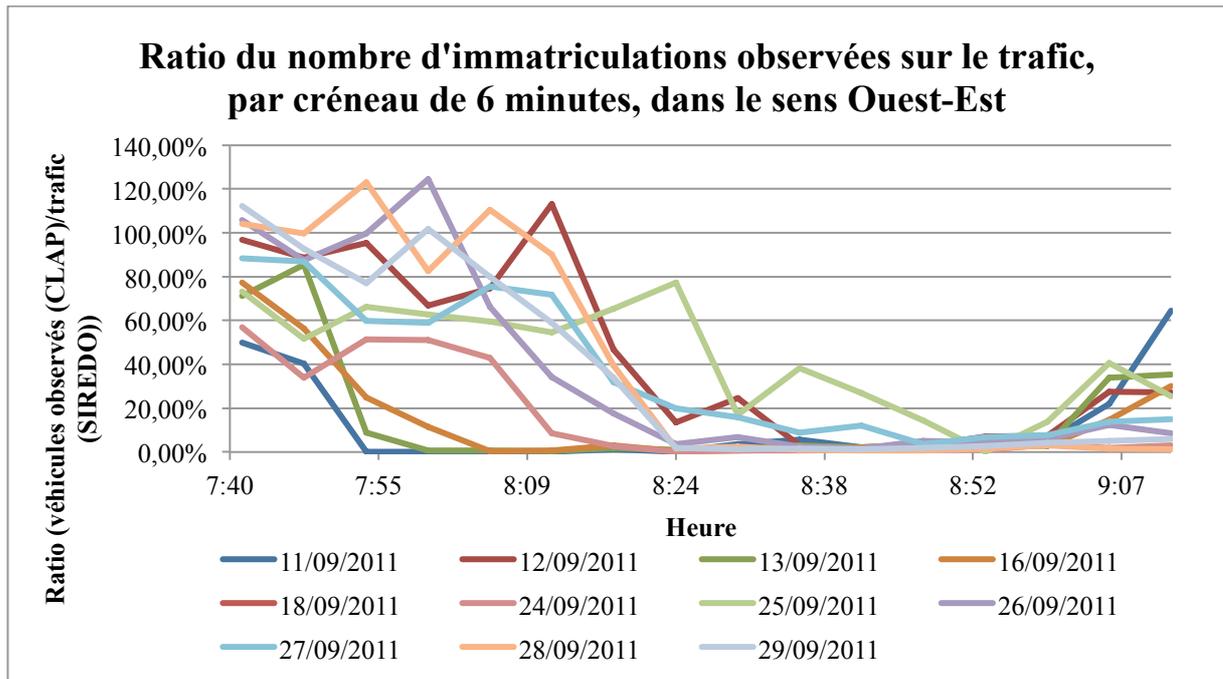


Figure 3: Fiabilité des CLAPs (caméra vidéo), ratio du nombre d'immatriculations observées sur le trafic par créneau de 6 minutes, dans le sens Ouest-Est

2.3.3. Dysfonctionnement lié à la densité du trafic

Au titre des dysfonctionnements observés, on notera d'abord de fortes perturbations pour la circulation dans le sens Ouest-Est, les matins entre 7h54 et 9h00, pour 11 journées entre les 11 et 29 septembre, avec des taux d'observation très faibles (très peu d'immatriculations vues), alors que ce créneau correspond à l'heure de pointe (cf. Figure 3). Quelques jours échappent à ce phénomène (14, 15, 17 et 19 septembre). Ainsi, ce problème pourtant identifié assez rapidement lors de la campagne d'observation, n'a pas été réglé.

Ce phénomène peut être dû à l'orientation des caméras (contre-jour, mais nous ne sommes pas en contre-jour dans ce sens le matin, surexposition, mauvais contraste, reflet, ombre), mais aussi à un trafic trop dense ne permettant pas la capture des plaques.

Dans l'autre sens de circulation, i.e. de l'Est vers l'Ouest, le taux d'observation est bien meilleur (sauf les 11 et 19 septembre, pour lesquels il varie entre 10 et 20 % seulement). Le phénomène n'est donc pas aussi important et notamment en fin d'après-midi, mais on observe également des taux faibles mais qui restent dans ces cas assez constants sur l'ensemble de la journée (autour de 20-25 % les 19, puis 25, 26, 27, 28, 29 septembre, contre 35 à 65 % les autres jours typiquement).

2.3.4. Imprécision des relevés (trafic ou observations vidéo)

La nuit, entre minuit et 5h00 du matin, on peut observer de grandes fluctuations du taux d'observations, entre 0 % et plusieurs centaines de pourcents, mais ceci est dû aux faibles nombres d'observations par période de 6 minutes, et à l'imprécision des dispositifs de mesure dans ces conditions.

Pour d'autres périodes hors nuit, le taux d'observation peut être supérieur au trafic et cependant concerner des débits élevés. La distance entre la visée vidéo et la boucle électromagnétique (au pied du portique, soit quelques dizaines de mètres) ne peut expliquer ces écarts.

2.3.5. Plaques enregistrées plusieurs fois successives

La recherche de créneaux avec des observations vidéo plus nombreuses que le comptage du trafic (par exemple le 15 septembre entre 7h48 et 8h20) montre que certaines immatriculations ont été relevées plusieurs fois (jusqu'à une dizaine d'occurrences) à très peu d'intervalle (à la seconde près, entre 6 et 13 centièmes d'intervalle), ce qui est manifestement impossible. Une recherche approfondie montre que ces observations successives peuvent aussi inclure des erreurs de caractères (1,2, ou 3), mais manifestement concerner cependant le même véhicule.

Une recherche systématique de ces erreurs dites « doublons » a été effectuée avec Matlab, sur les plaques consécutives, identiques à 3, 2, 1 ou 0 caractères près, par caméra et par sens. On note que les observations qui concernent des plaques vues à l'identique sont peu nombreuses, mais de l'ordre de 110,000 à un caractère près, 150,000 à 2 caractères près, et 180,000 à 3 caractères près (cf. Tableau 3).

Nombre de caractères qui différent	Nombre de doublons CLAP 1	Nombre de doublons CLAP 2	Nombre de doublons CLAP 3	Nombre de doublons CLAP 4
3 ou moins	55519	72397	25426	26165
2 ou moins	44241	65825	23076	18660
1 ou moins	28807	52755	19538	10942
0	379	4	5	332
Nombre d'observations	614328	478239	220869	380934

Tableau 3: Nombre d'observations qui apparaissent être des erreurs, car vues à très faible intervalle de temps sur une même caméra

Le nombre total d'observations concernées par ce phénomène (à 3 caractères près ou moins) est de 179,507 observations (soit environ 10% du nombre d'observations, mais moins

de 5% des immatriculations). Toutes ces observations ont été exclues des analyses ultérieures car la possibilité de plusieurs immatriculations valides (existantes) rendait impossible de les conserver.

La Figure 4 montre le nombre de doublons par créneau de 6 minutes rapporté au flux de trafic mesuré dans chaque sens de circulation (Taux D/F E-O sens Est-Ouest et O-E sens Ouest-Est).

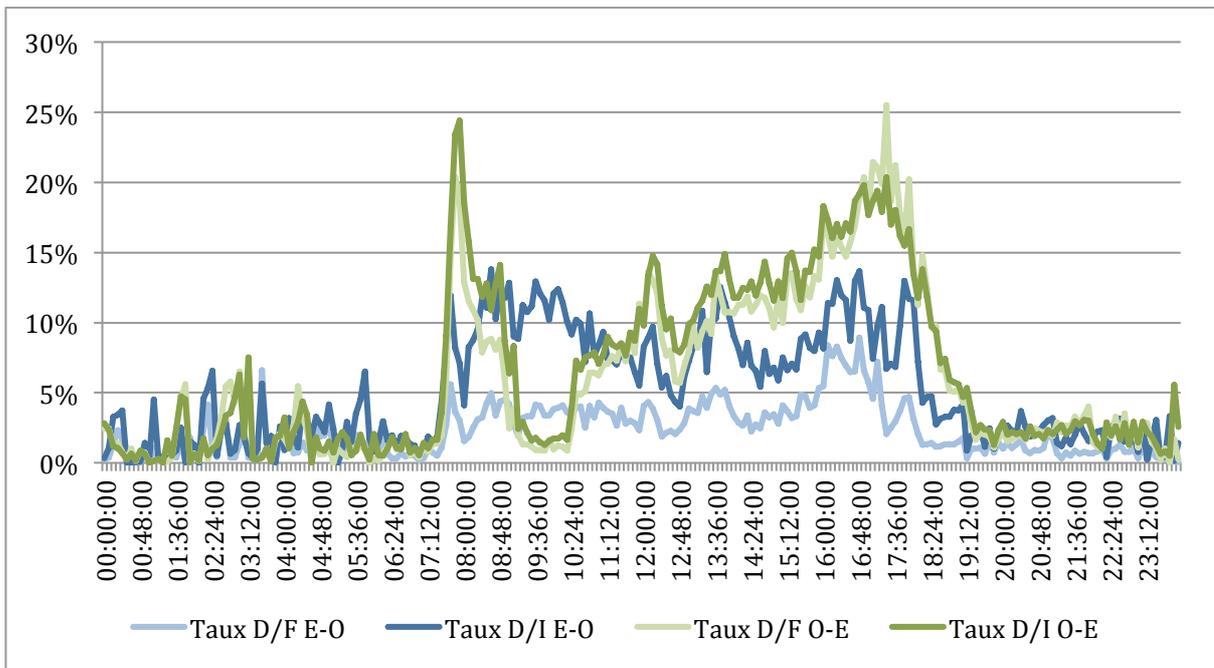


Figure 4: Taux moyen de doublons par créneaux de 6 minutes

Entre 19h30 et 7h ce taux reste en-dessous de 5%, et augmente avec le trafic, et notamment en période de pointe. On remarque en particulier un pic à 8h, dans le sens de circulation de Grenoble vers Chambéry, et dans une moindre mesure dans l'autre sens. Les taux de doublons sont à nouveau importants entre 16h30 et 17h30. Il est vraisemblable que ce phénomène soit en conséquence lié à des épisodes de congestion (véhicules immobiles ou presque).

2.3.6. Fluctuations des plaques « étrangères »

L'analyse de la variabilité de la composition du parc (plaques françaises versus étrangères) permet également d'illustrer les dysfonctionnements du système d'observation vidéo. En moyenne, dans la journée, le taux d'immatriculations identifiées comme françaises oscille autour de 50-60 %. On remarque cependant des variations entre 8h et 9h30 dans le sens Ouest-Est, qui coïncident avec les faibles taux d'observations dans ce sens. Ces variations ne sont sans doute pas représentatives du trafic circulant en journée, mais bien liées à la défaillance des systèmes d'observations.

Et la nuit, les variations sont également importantes, mais peuvent s'expliquer par la non-représentativité des faibles trafics (quelques dizaines de véhicules).

2.3.7. Confirmation des dysfonctionnements par l'identification des véhicules

Les paragraphes précédents ont décrit différents phénomènes conduisant à un dysfonctionnement du système d'observation vidéo. Ces problèmes ont été confirmés par l'identification (à partir des immatriculations et via le fichier central) de deux-roues (alors que leur plaque d'immatriculation est généralement située à l'arrière et n'aurait pas pu être visualisée), ainsi que de remorques ou semi-remorques.

Globalement 10,000 immatriculations sont ainsi erronées (Cf. Tableau 4).

Il est également possible d'analyser les fréquences d'observations de ces erreurs selon les créneaux horaires (par pas de 6 minutes). Ce taux d'erreur varie entre 0 et 4% en journée (8h à 19h). Il est plus élevé pour la caméra 4. Sur la caméra 2, les taux sont plus faibles et moins variables. Les taux d'erreurs les plus importants sont observés la nuit (identification plus difficiles et faible trafic).

Caméra	Nombre d'immatriculations 2-roues, remorques ou semi-remorques	Nombre total lu
1	4576	293955
2	1979	217682
3	742	109916
4	2794	135494
4 caméras	10091	757047

Tableau 4: Nombre d'immatriculations erronées correspondant à des 2-roues, remorques ou semi-remorques

2.3.8. Récapitulatif et conclusions

Le taux moyen d'observation (par rapport aux comptages trafic) est globalement de l'ordre de 57%. Ceci signifie que la technique vidéo est en tous cas insuffisante pour appréhender le trafic. Cela ne veut cependant pas dire que c'est un mauvais outil pour caractériser la composition du parc automobile, car l'échantillonnage est très conséquent, et de toutes façons il n'existe pas d'autres moyens aussi satisfaisants pour appréhender à cette échelle le parc automobile.

Le Tableau 5 récapitule les différents problèmes décrits précédemment. Sur 1,6 Millions d'observations vidéo (soit de l'ordre de 2,8 Millions de véhicules comptés par les boucles magnétiques), un peu plus de 10% correspondent à des « doublons » (multiplication d'observations à intervalle restreint). Environ 50% des observations (hors doublons) sont identifiées comme françaises de par leur forme. Mais de fait, il est vraisemblable que 20 à 30% d'observations complémentaires ont été considérées comme d'origines belge, italienne ou non identifiées, mais qu'en fait elles étaient également françaises.

Sur ces immatriculations françaises, au moins 1-2% sont en tous cas mal lues puisqu'elles conduisent à reconnaître des 2-roues, ou des remorques et semi-remorques.

	Sens	Nombre total de plaques lues	Dont doublons	Nombre de plaques valides	
Clap 1	Ouest-Est	614328	55519		
Clap 2		478239	72397		
Clap 3	Est-Ouest	220869	25426		
Clap 4		380934	26165		
Total		1694370		1514683	
		Nombre de plaques françaises	% de plaques françaises	Nombre de plaques arrière	% plaques arrières
Clap 1	Ouest-Est	293 955	51,67%	4 576	1,56%
Clap 2		217 682	52,58%	1 979	0,91%
Clap 3	Est-Ouest	109 916	55,10%	742	0,68%
Clap 4		135 494	37,46%	2 794	2,06%
Total		757 047	49,20%	10 091	1,33%

Tableau 5: Récapitulatif des nombres d'observations, immatriculations et erreurs par caméra

Par ailleurs, on a pu observer que les dysfonctionnements étaient observés le plus souvent en période de pointe, en particulier lorsque le trafic était dense, et très certainement lorsqu'interviennent des immobilisations de véhicules. Les perturbations de nuit sont de moindre importance car elles n'affectent que de très faibles nombres de véhicules.

En conclusion, il ressort que la technique employée ici n'est pas parfaite. Elle ne permet pas d'appréhender la totalité du trafic ni les périodes de forte densité. Elle constitue cependant une méthode satisfaisante d'observation du parc en circulation, par un échantillonnage très conséquent.

2.4. Classement des immatriculations en catégories de véhicules

L'ensemble des analyses et la gestion des données d'observations d'immatriculations ont été effectués à l'aide du logiciel de gestion de base de données Access. Les données brutes ont été importées et comportent les informations suivantes :

- Le numéro de caméra parmi 4 : CLP1 et CLP2 correspondant aux caméras enregistrant les immatriculations de véhicules circulant de l'Ouest vers l'Est, et CLP3 et CLP4 enregistrant les immatriculations des véhicules circulant de l'Est vers l'Ouest
- La date et l'horaire de passage (au centième de seconde) du véhicule
- Le pays identifié (selon la forme de la plaque) et la chaîne de caractères de la plaque d'immatriculation

2.4.1. Identification et caractéristiques techniques des véhicules

Les seules observations valides françaises ont été sélectionnées puisque les caractéristiques techniques des véhicules ne sont accessibles qu'au travers du fichier national des immatriculations. Ces observations ont été « dé-doublonnées » (une immatriculation ayant pu être observée plusieurs fois), et représentent in fine environ 350,000 immatriculations. Le fichier des immatriculations françaises observées a été transféré à l'Association Auxiliaire de l'Automobile qui gère le fichier des cartes grises françaises depuis 1983. L'analyse s'est faite en plusieurs temps :

- les immatriculations ont d'abord été recherchées dans le fichier des immatriculations actuelles (« il n'y a pas eu de changement de l'immatriculation depuis l'observation »), sur les 353 271 immatriculations fournies, 61 % des immatriculations (216 537) ont ainsi été retrouvées.
- Les 136 734 immatriculations non identifiées en première approche ont été recherchées ensuite dans les « immatriculations précédentes » (« le véhicule a été l'objet d'une transaction depuis la date de l'observation, c'est-à-dire entre septembre 2011 et octobre 2012 »). On retrouve ainsi 36 582 autres immatriculations.
- Les 100 152 immatriculations restant non identifiées, sont ensuite recherchées dans les 2 ou trois immatriculations antérieures (« le véhicule a été l'objet de 2 ou 3 transactions dans les précédents mois »), et 18 672 immatriculations ont ainsi été retrouvées.

Au total, 77 % des immatriculations ont été retrouvées. Il est probable que si la recherche avait été effectuée très tôt après les observations, l'identification directe aurait été plus élevée, mais la possibilité d'identification après transactions améliore considérablement le taux d'identification, et sans doute à un niveau équivalent malgré le délai.

On a donc ainsi restitué les caractéristiques techniques de 271 791 immatriculations, importées dans la base de données et associées aux observations correspondantes.

Environ 80 informations détaillées sont disponibles pour chaque véhicule, parmi lesquelles :

- Le « Genre_V », puis la « carrosserie » pour déterminer le type de véhicule,
- L'« Energie » pour déterminer le type de motorisation (Diesel, essence, autre)
- Le poids total PTR (en fait correspondant à un PTAC), pour différencier certains VUL des PL, et les mettre en classes de poids,
- La date de 1^{ère} immatriculation Date_1^{er}_cir pour déterminer l'âge du véhicule et lui associer une catégorie EURO (réglementation émission de polluants),
- La Cylindrée (qui détermine la taille des moteurs et différencie les véhicules légers).

2.4.2. Recodages pour les analyses temporelles

Les données de trafic d'une part et de qualité de l'air d'autre part ayant été mesurées selon des pas horaires de 6, 15 minutes et 1 heure (voire plusieurs heures pour certains polluants), il est nécessaire d'analyser les observations vidéo selon les mêmes pas de temps. Chaque observation (instantanée) a donc été associée à un créneau horaire de 6 minutes et un autre de 15 minutes. Ces créneaux sont codés sous la forme : « CLPx-2011/MM/JJ-yyh-Crzz » avec x numéro de la caméra de 1 à 4, yy l'heure, et zz le créneau de 6 minutes entre 01 et 10, et sous la forme : « CLPx-2011/MM/JJ-yyh-CRww », avec ww le créneau de 15 minutes entre 01 et 04. La création de ces créneaux facilite la gestion des différentes données de trafic, pollution, observations d'immatriculations etc. pour la suite du travail sur le projet MOCOPo.

2.4.3. Élaboration de la composition du parc

Les caractéristiques techniques correspondant à chaque immatriculation ont permis de les classer selon les catégories détaillées de véhicules, nécessaires aux calculs d'émissions de polluants. Les différentes affectations ont été réalisées comme décrit ci-après.

2.4.3.1. Catégories de véhicules

Un premier classement par catégorie de véhicules repose sur l'information « GENRE_V » de l'AAA, comme suit :

- VP pour les voitures particulières (sauf les minibus),
- CAM pour les poids lourds dont le PTR (correspondant en fait à un PTAC), était supérieur à 3500 kg,
- CAM pour les VUL dont le PTR était inférieur ou égal à 3500 kg, ainsi que les Minibus de VP, et les QM dont le poids excède une tonne (les deux seuls QM observés et qui excèdent une tonne sont des modèles de VUL),
- pour les bus et cars, le « GENRE_V » correspondant était « TCP » pour transport en commun de personnes,

Les données n'ayant pas été classées dans les catégories précédentes ont donc été affectées dans une catégorie « NPC » (non pris en compte), lorsqu'une ou des informations étaient manquantes et

ne permettaient donc pas d'identifier le type de véhicule. Ces données représentent 0,6 % des immatriculations françaises reconnues. On notera également que les 2-roues n'ont pas été analysés (ni observés par le dispositif vidéo).

2.4.3.2. Motorisation, segments de « taille » et catégorie réglementaire EURO

La déclinaison des véhicules nécessite l'identification de la motorisation (essence, Diesel, etc.), une segmentation par « taille » (cylindrée des véhicules légers, type de VUL ou poids pour les véhicules lourds), et le classement selon les réglementations d'émissions de polluants. Les informations utiles sont respectivement :

- le type de carburant (ENERGIE),
- la cylindrée (CYLINDREE) pour les véhicules légers (VP, 2-Roues),
- le PTAC (à défaut de données plus précises, on prend la donnée PTR, qui correspond au PTAC dans la plupart des cas), pour les VUL, et véhicules lourds
- l'année de construction du véhicule (à défaut, on prend la date de première mise en circulation DATE_1^{ER}_CIR).

Lorsque pour une immatriculation, une ou des informations ne sont pas disponibles, l'immatriculation en question n'est pas prise en compte.

La condition sur la date de 1^{ère} mise en circulation, indique la condition utilisée dans la base de données pour classer les véhicules dans les catégories Euro.

Classement des voitures particulières, VP Diesel ou Essence

Le classement des VP s'est fait selon la cylindrée (< 1,4l, 1,4-2,0l, > 2,0l) et selon les critères indiqués Tableau 6.

VP Diesel			VP Essence		
Condition date 1 ^{ère} mise en circulation	Année mise en service de la norme	Nom de la réglementation	Condition date 1 ^{ère} mise en circulation	Année mise en service de la norme	Nom de la réglementation
<1986	1919	PC-D-<1986	<1973	1919	PC-P-<ECE
			>1973 Et <1976	1973	PC-P-ECE-15'00
			>1976 et < 1986	1976	15'01/02
>1986 et <1993	1986	PC-D-1986-1988	>1986 et <1987	1986	PC-P-ECE-15'03
			>1987 et <1993	1987	PC-P-ECE-15'04
>1993 et <1997	1993	PC-D-Euro-1	>1993 et <1997	1993	PC-P-Euro-1
>1997 et <2001	1997	PC-D-Euro-2	>1997 et <2001	1997	PC-P-Euro-2
>2001 et <2006	2001	PC-D-Euro-3	>2001 et <2006	2001	PC-P-Euro-3
>2006 et <2010	2006	PC-D-Euro-4	>2006 et <2010	2006	PC-P-Euro-4
>2010	2010	PC-D-Euro-5	>2010	2010	PC-P-Euro-5

Tableau 6 : Correspondances entre normes EURO et date de 1^{ère} mise en circulation pour les VP

Classement des véhicules utilitaires légers VUL

Les petits véhicules utilitaires sont classés d'une part selon les catégories (M, N1-I, -II et -III) et d'autre part selon les critères indiqués en Tableau 8 (motorisation et réglementation).

Poids	Type de VUL
<1305 kg	M1
	N1-1
1305-1760 kg	N1-2
1760-3860 kg	N1-3

Tableau 7 : Types de VUL

VUL Diesel			VUL Essence		
Condition date 1 ^{ère} mise en circulation	Année mise en service de la norme	Nom de la réglementation	Condition date 1 ^{ère} mise en circulation	Année mise en service de la norme	Nom de la réglementation
<1986	1919	<1986	<1981	1919	<1981
>1986 et <1995	1986	LCV-D-XXIII	>1981 et <1995	1981	>1981
>1995 et <1998	1995	LCV-D-Euro-1	>1995 et <1998	1995	LCV-P-Euro-1
>1998 et <2001	1998	LCV-D-Euro-2	>1998 et <2001	1998	LCV-P-Euro-2
>2001 et <2006	2001	LCV-D-Euro-3	>2001 et <2006	2001	LCV-P-Euro-3
>2006 et <2010	2006	LCV-D-Euro-4	>2006 et <2010	2006	LCV-P-Euro-4
>2010	2010	LCV-D-Euro-5	>2010	2010	LCV-P-Euro-5

 Tableau 8 : Correspondances entre normes EURO et date de 1^{ère} mise en circulation pour les VUL

Classement des camions / tracteurs routiers, autobus et autocars

Les camions sont d'abord classés selon leur type (camions rigides ou tracteurs routiers) directement par l'information `GENRE_V`, puis selon leur poids dans les 16 classes prévues par les outils de calcul d'émission (cf. André et al. 2013). Le classement selon la réglementation pollution est donné Tableau 11.

Les autobus et autocars sont d'abord différenciés en type (cars, bus), puis classés selon les 3 catégories Midi-, standard- et articulés avec les critères indiqués Tableau 10. Le classement selon la réglementation est similaire à celui des camions.

Genre_V	Catégorie PL
CAM	RigidTruck
TRR	Tractor

Tableau 9 : Catégories de poids lourds

Poids	Bus	Cars
<15t	Midibus	Midicars
>=15t Et <26t	Standards	Standards
>=26t	Articulés	Articulés

Tableau 10 : Catégories de bus / cars et PTAC

Condition date 1 ^{ère} mise en circulation	HGV (Camions / tracteurs)		Autocars		Autobus	
	Application de la norme	Nom de catégorie	Application de la norme	Nom de catégorie	Application de la norme	Nom de catégorie
<1960	1919	HGV-D-50ties	1929	Coach-D-50ties	1929	UBus-D-50ties
1960 -1970	1960	HGV-D-60ties	1960	Coach-D-60ties	1960	UBus-D-60ties
1970 -1980	1970	HGV-D-70ties	1970	Coach-D-70ties	1970	UBus-D-70ties
1980 -1994	1980	HGV-D-80ties	1980	Coach-D-80ties	1980	UBus-D-80ties
1994 - 1997	1994	HGV-D-Euro-I	1994	Coach-D-Euro-I	1994	UBus-D-Euro-I
1997 - 2002	1997	HGV-D-Euro-II	1997	Coach-D-Euro-II	1997	UBus-D-Euro-II
2002 - 2007	2002	HGV-D-Euro-III	2002	Coach-D-Euro-III	2002	UBus-D-Euro-III
2007 - 2010	2007	HGV-D-Euro-IV	2007	Coach-D-Euro-IV	2007	UBus-D-Euro-IV
>=2010	2010	HGV-D-Euro-V	2010	Coach-D-Euro-V	2010	UBus-D-Euro-V

Tableau 11 : Classement des camions, autobus et autocars, selon les réglementations EURO

2.4.4. Construction de la composition du parc

Nous avons considéré les 271 791 immatriculations françaises identifiées et documentées des caractéristiques techniques des véhicules par l'AAA. Des requêtes de classement des immatriculations dans les différentes catégories (selon les critères décrits précédemment) ont été développées puis appliquées à ces données. Les catégories ainsi construites sont affectées aux données d'origine par une requête union. On génère ensuite la table complète « Données_classées » qui réunit les données d'immatriculations et leurs affectations selon les différents critères.

Cette table des données d'immatriculations classées est ensuite recombinaisonnée avec la table des observations vidéo. On réaffecte ainsi les caractéristiques des véhicules chaque fois qu'ils ont été observés, ce qui correspond à 757047 passages de véhicules français. Pour définir le parc on enlève d'abord les véhicules que l'on ne peut pas classer (« NPC »), ce qui laisse 754145 passages de véhicules.

2.5. Analyse du parc local

Au final, la composition du parc local repose sur un total de 270,000 immatriculations (dont 737 quadricycles ou tricycles à moteur de PTAC inférieur à 1 tonne) et 757,000 observations.

On notera que l'analyse des seules données d'immatriculations permet d'approcher la composition du parc « statique », c'est-à-dire tel qu'il existe, indépendamment de son utilisation. Cependant, contrairement à d'autres approches, cette approche du « parc statique » suppose qu'il y ait eu au moins une utilisation de chacun des véhicules (un passage devant une caméra), alors que dans les approches autres (enquêtes, modélisation) un véhicule qui n'a pas été utilisé peut être comptabilisé. On verra par les analyses que l'approche vidéo est peu appropriée pour observer la composition du parc statique.

Par ailleurs, l'analyse des « observations » (immatriculations vues éventuellement plusieurs fois) permet d'approcher la composition du parc « roulant » ou en circulation, ou simplement la composition du trafic, chaque véhicule étant pondéré par son utilisation. Cependant, dans cette

approche d'observation vidéo, l'utilisation est vue en « nombre de passages », alors que les autres approches de détermination des parcs roulants utiliseront les kilométrages annuels effectués.

Nous allons par la suite analyser la structure du parc (« pseudo-statique » et en circulation) résultant de ces observations, et la comparer à celle du parc national de l'année 2011 (analyses Ifsttar, version 2011 du parc national¹, André et al. 2013). Les comparaisons portent d'abord sur le poids de chacune des catégories de véhicules (voitures particulières VP, poids lourds PL, véhicules utilitaires légers VUL, bus et autocars). Nous analyserons ensuite la part respective des motorisations essence / Diesel des véhicules légers, et des classes de poids des véhicules lourds. Nous comparerons enfin la répartition selon les catégories réglementaires EURO, liée également à l'âge moyen du parc. Des analyses temporelles de ces indicateurs seront également effectuées au chapitre suivant.

2.5.1. Analyse par catégories de véhicules

La répartition par catégorie de véhicules est donnée Tableau 12 (parc statique) et Tableau 13 (parc en circulation). La répartition des différentes classes de véhicules est globalement cohérente avec celle du parc national IFSTTAR.

Dans le parc statique, on remarque que la part des poids lourds est près de 2 fois plus importante dans le parc MOCOPO que pour le parc national (au détriment des véhicules utilitaires légers et voitures particulières qui sont légèrement inférieures). Les pourcentages de bus et cars sont quasi identiques.

A l'inverse, dans le parc roulant, les voitures particulières et les véhicules utilitaires légers sont légèrement plus nombreux ou fréquents dans le parc local MOCOPO, que dans le parc national. L'écart avec le parc statique s'explique aisément par le fait que les véhicules légers ont une probabilité plus forte d'être ré-observés que les camions dont une partie est de transit.

Véhicules	Nombre d'immatriculations MOCOPO	Composition du Parc local MOCOPO	Composition du parc IFSTTAR 2011
VP	218377	82,4 %	83,1 %
VUL	38196	14,4 %	15,1 %
PL	7740	2,9 %	1,5 %
Cars	472	0,2 %	0,2 %
Bus	176	0,1 %	0,1 %
Total général	264961	100,0%	100,0%

Tableau 12 : Parcs « pseudo-statique » local MOCOPO et statique national 2011 IFSTTAR par catégories de véhicules

¹ Nota : le parc IFSTTAR utilisé dans ce cadre correspond aux travaux menés jusqu'en 2011 et diffusés en novembre 2011. Une révision des hypothèses et mise à jour des compositions de parc a été effectuée depuis et publiée en 2013, qu'il conviendra de préférer dorénavant

Véhicules	Nombre d'observations MOCOPo	Composition du Parc roulant local MOCOPo	Composition du parc roulant IFSTTAR 2011
VP	598965	80,2 %	77,4 %
VUL	118436	15,9 %	18,8 %
PL	27253	3,7 %	3,5 %
Cars	1172	0,16 %	0,26 %
Bus	896	0,12 %	0,14 %
Total général	746722	100,0 %	100,0 %

Tableau 13 : Parcs roulants local MOCOPo et national 2011 IFSTTAR par catégories de véhicules

2.5.2. Analyse selon les motorisations et types de véhicules

L'analyse de la composition du parc selon les motorisations (Essence, Diesel), et types de véhicules (classes de poids) montre que :

- Pour les voitures particulières, on observe une proportion légèrement plus faible de motorisations Diesel pour le parc roulant MOCOPo que pour le parc roulant national (68,5 % contre 72,2 %, cf. Tableau 14) ; Ces estimations locales MOCOPo sont cependant très conformes aux estimations de parc urbain national (68% de Diesel, 32% d'essence, cf. André et al 2013).
- On notera qu'au niveau des immatriculations ou du parc statique cette tendance est inversée (67 % contre 60 % respectivement), ce qui démontre la pertinence de l'observation vidéo comme outil de description du parc en circulation, et la moindre pertinence pour le parc statique.
- Pour les véhicules utilitaires légers, les résultats sont très proches (97 et 99% de Diesel), mais l'écart indique que les véhicules utilitaires Essence sont encore présents.
- Concernant les autocars et autobus, on observe localement des proportions plus importantes d'autobus et autocars « standards » (18-26 tonnes, 96% contre 82% dans le parc national), et moindres de Midibus et Midicars et articulés. Il faut cependant souligner que ces statistiques sont très fortement liées aux points d'observation et contexte d'exploitation des transports en commun (fréquentation ou non par les TC et types de bus / cars affectés).
- Pour les poids lourds, les camions rigides (ou porteurs) sont plus fréquents localement qu'au niveau du parc national (56% et 50% respectivement), au détriment des tracteurs routiers. (44% et 50% respectivement).
- Dans le cas des camions, on notera qu'au niveau du parc statique (ou de l'analyse des seules immatriculations observées) les tracteurs routiers sont plus fréquents au niveau local que national (54% contre 37%). Leur moindre représentation au niveau des observations (parc roulant) tient à ce qu'ils ne sont vus qu'une ou quelques fois (car en transit ou transport longue distance, etc.). Ceci conforte également la pertinence de l'outil vidéo pour la composition du parc en circulation.

Véhicule Catégories et types	Nombre d'observations MOCOpo	Composition du Parc roulant local MOCOpo		Composition du parc roulant IFSTTAR 2011	
			Par catégorie		Par catégorie
VP	598965	80,2 %	100,0 %	77,4 %	100,0 %
Diesel		54,9 %	68,5 %	55,9 %	72,2 %
Essence		24,5 %	30,6 %	21,3 %	27,5 %
Autres		0,75 %	0,94 %	0,21 %	0,28 %
Inconnus		0,04 %	0,05 %	-	-
VUL	118436	15,9 %	100,0 %	18,8 %	100,0 %
Diesel		15,4 %	97,2 %	18,5 %	98,7 %
Essence		0,32 %	2,0 %	0,24 %	1,3 %
Autres		0,12 %	0,75 %	0,01 %	0,06 %
PL	27253	3,6 %	100,0 %	3,5 %	100,0 %
Rigides		2,0 %	56,1 %	1,7 %	49,7 %
Tracteurs		1,6 %	43,9 %	1,8 %	50,3 %
Cars	1172	0,16 %	100,0 %	0,26 %	100,0 %
Articulés		0,00 %	1,2 %	0,02 %	6,3 %
MidiCars		0,03 %	17,7 %	0,05 %	18,8 %
Standards		0,13 %	81,1 %	0,20 %	74,9 %
Bus	896	0,12 %	100,0 %	0,14 %	100,0 %
Articulés		0,00 %	2,5 %	0,01 %	6,5 %
MidiBus		0,00 %	1,3 %	0,01 %	11,0 %
Standards		0,12 %	96,2 %	0,11 %	81,7 %
Autres		-	-	0,00 %	0,84 %
Total général	746722	100,0 %		100,0 %	

Tableau 14 : Parcs roulants local - MOCOpo et national par catégories et motorisations ou types de véhicules

2.5.3. Analyse de la composition du parc selon les réglementations EURO

Le Tableau 15 compare les compositions des parcs roulants locaux - MOCOpo en nationaux (année 2011) en ce qui concerne les réglementations pollution que respectent les véhicules. Les observations vidéo n'ont pas permis de différencier les véhicules EURO 5 avec ou sans dispositif de filtre à particules qui sont donc considérées globalement. On a par ailleurs regroupé ici les catégories pre-Euro (ou Euro0), Euro1 et Euro2 qui concernent les véhicules les plus anciens afin de faciliter les comparaisons (pour plus de détails, cf. Pasquier et al., 2013b).

Véhicule Catégories et réglementation EURO	Nombre d'observations MOCOPO	Composition du Parc roulant local MOCOPO		Composition du parc roulant IFSTTAR 2011	
			Par catégorie		Par catégorie
VP	598965	80,2 %	100,0 %	77,3 %	100,0 %
Euro-0-1-2		20,1 %	25,2 %	19,2 %	24,9 %
Euro-3		28,6 %	35,7 %	20,6 %	26,7 %
Euro-4		24,4 %	30,4 %	29,3 %	37,9 %
Euro-5		6,1 %	7,7 %	1,78 %	2,30 %
Euro-5 DPF		-	-	6,3 %	8,2 %
Autres		0,79 %	0,99 %	-	-
VUL	118436	15,9 %	100,0 %	18,8 %	100,0 %
Euro-0-1-2		2,4 %	15,6 %	3,1 %	16,4 %
Euro-3		4,5 %	28,3 %	5,1 %	27,4 %
Euro-4		6,9 %	43,5 %	7,9 %	42,2 %
Euro-5		2,0 %	12,6 %	2,6 %	14,1 %
PL	27253	3,6 %	100,0 %	3,5 %	100,0 %
Euro-0-I-II		0,58 %	16,1 %	0,42 %	12,1 %
Euro-III		1,3 %	35,0 %	1,0 %	28,9 %
Euro-IV		1,4 %	37,1 %	1,4 %	38,8 %
Euro-V		0,43 %	11,7 %	0,70 %	20,2 %
Autres		0,00 %	0,08 %	-	-
Cars	1172	0,16 %	100,0 %	0,26 %	100,0 %
Euro-0-I-II		0,02 %	18,4 %	0,06 %	19,3 %
Euro-III		0,06 %	37,8 %	0,07 %	27,1 %
Euro-IV		0,05 %	33,7 %	0,10 %	36,9 %
Euro-V		0,02 %	10,2 %	0,04 %	16,7 %
Bus	896	0,12 %	100,0 %	0,14 %	100,0 %
Euro-0-I-II		0,05 %	47,5 %	0,04 %	27,8 %
Euro-III		0,06 %	46,8 %	0,04 %	29,1 %
Euro-IV		0,00 %	3,0 %	0,04 %	31,8 %
Euro-V		-	-	0,02 %	11,4 %
Autres		0,00 %	2,7 %	-	-
Total	746722	100,0 %		100,0 %	

Tableau 15 : Parcs roulants local - MOCOPO et national, par catégories et selon les réglementations des émissions de polluants EURO

De ces comparaisons, il ressort que :

- Pour les voitures particulières : les catégories Euro 0, 1 et 2 observées localement sont équivalentes aux estimations nationales 2011 (environ 25 % du total). Les voitures Euro 3 sont observées plus fréquemment en local (36% contre 27%). Les véhicules Euro4 et Euro5 sont moins fréquents localement qu'au niveau national (respectivement 30 et 8% contre 38 et 10,5%). Cela signifie qu'il y a un différentiel assez significatif au niveau du parc des voitures particulières, en âge et réglementation, avec un parc plus ancien et « moins propre » en région grenobloise.
- Pour les véhicules utilitaires légers : La proportion de véhicules anciens Euro 0, 1 et 2 est proche des statistiques du parc national (environ 16%). Les autres catégories Euro 3 à Euro5 sont également très similaires aux estimations nationales (écarts de 1 à 1,5%).
- Pour les poids lourds : La proportion de véhicules anciens Euro 0, 1 et 2 est supérieure localement de +4 % aux estimations nationales (respectivement 16 et 12%). Les véhicules Euro 3 sont également plus fréquents (35% contre 29% au niveau national). Les véhicules plus récents Euro 4 et surtout Euro 5 sont en conséquence moins nombreux (respectivement

37 et 12% contre 39 et 20% dans le parc national). On observe ici également une distorsion assez forte de parc, avec un parc de camions plus ancien et moins propre que le parc national, circulant sur la rocade de Grenoble.

- Pour les autobus : l'essentiel des véhicules observés localement était Euro 3 ou antérieur (respectivement 47 et 48%), et les véhicules Euro 4 ou ultérieurs ne représentent que 3%. Alors que les estimations nationales prévoient de l'ordre de 43% de véhicules Euro 4 ou 5. Cette distorsion très forte peut cependant être liée au contexte d'exploitation des transports publics (achat et affectation de véhicules sur les lignes, retrofiting, etc.).
- Pour les autocars : Les distributions sont relativement plus équilibrées que pour les autobus. Les véhicules anciens Euro 0,1 et 2 sont observés à hauteur comparable aux estimations nationales (18-19%). Les véhicules Euro3 sont plus fréquents (38% contre 27% nationalement). Les véhicules récents Euro 4 et 5 sont en conséquence moins nombreux (respectivement, 3 et 10% contre 37 et 17% au niveau national).

Remarque : au niveau des immatriculations et estimations des parcs statiques, on observe généralement des tendances assez différentes voire contraires à ce qui est observé au niveau des parcs roulants, avec des nombres de véhicules anciens plus faibles localement que dans le parc national et des véhicules récents plus nombreux localement. Cette contradiction semble indiquer que : 1- les véhicules anciens seraient sur-utilisés par rapport aux hypothèses nationales (ce qui est possible pour un usage urbain local), 2- les véhicules récents seraient moins utilisés, ou utilisés pour des trajets plus longs (moindre probabilité de les revoir).

2.5.4. Conclusion

En conclusion, on observe quelques distorsions assez significatives entre le parc observé localement et le parc national Ifsttar 2011.

Ces distorsions concernent principalement l'âge et la réglementation pollution des véhicules et en particulier les voitures et les camions avec un parc local plus ancien (différentiel absolu d'environ 10%, illustré également en Figure 5).

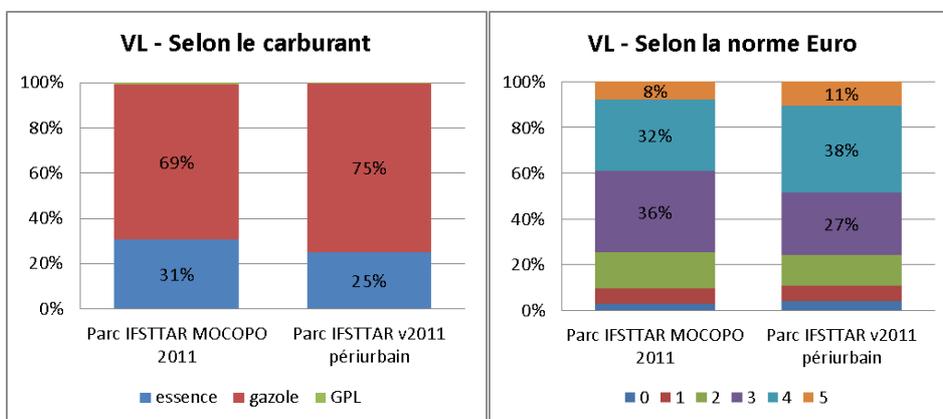


Figure 5 : Comparaison des parcs roulants (voitures particulières) par carburant et normes Euro, en considérant un parc national péri-urbain/rural

Les véhicules utilitaires légers sont très proches du parc national. Les écarts observés pour les autobus et autocars sont significatifs, mais de moindre importance car ils ne concernent qu'une très faible proportion du trafic.

On observe également une distorsion de motorisation Diesel / Essence pour les voitures (69% contre 72% au niveau national, ou 75% si l'on considère les estimations de parc périurbain ou rural, comme illustré Figure 5). Le parc local présente une plus grande proportion de véhicules essence (31% contre 25% pour le parc national), et semble plus ancien que le parc national (60% des véhicules du parc local ont une norme inférieure ou égale à 3, contre seulement 1 véhicule sur 2 pour le parc Ifsttar périurbain).

2.6. Variabilité temporelle du parc local Mocopo

Dans ce qui suit, nous cherchons à analyser la variabilité temporelle de la composition du parc observée sur la rocade de Grenoble : nous analyserons d'abord le parc selon les jours de la semaine et en particulier nous rechercherons à identifier des spécificités de week-end, puis nous analyserons le parc selon l'heure de la journée.

2.6.1. Parc roulant des samedi, dimanche et week-end

2.6.1.1. Différenciation des parcs selon les catégories de véhicules

En ce qui concerne les catégories de véhicules (Tableau 16), on observe une nette différence entre le parc moyen global et le parc week-end, avec une diminution du trafic poids lourds (3,7 % en moyenne, 0,7 % le week-end, 0,35 % le dimanche), et des véhicules utilitaires légers (de 16% à 9,5% le week-end). La part des bus est faible et diminue encore les week-ends. En revanche, la proportion de véhicules particuliers augmente de 80 % à 89 % le week-end.

Véhicules	Composition de parc roulant local Mocopo			
	Moyen	Samedi	Dimanche	Week-end
VP	80,2 %	89,1 %	90,3 %	89,6 %
VUL	15,9 %	9,8 %	9,1 %	9,5 %
PL	3,7 %	0,91 %	0,35 %	0,68 %
Cars	0,16 %	0,13 %	0,20 %	0,16 %
Bus	0,12 %	0,09 %	0,05 %	0,08 %
Total général	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %

Tableau 16 : Parc roulant MOCOPo moyen et parcs roulant du samedi, dimanche et week-end par type de véhicules

2.6.1.2. Différenciation des parcs selon motorisations, types de véhicules et réglementations pollution

Il y a assez peu de différences entre le parc roulant moyen et le parc roulant du week-end quant à la répartition de chaque catégorie de véhicule par motorisations et types. On relève une différence pour les autocars et autobus avec une plus grande proportion d'autocars/bus standards (15-26t) au détriment des « Midicars/bus » (<15t). On n'observe pas ou peu de différence en terme de motorisation (Essence / Diesel) des voitures et VUL, ni de catégories PL.

Véhicules	Composition de parc roulant local Mocopo			
	Moyen	Week-end	Moyen par catégorie	Week-end par catégorie
VP	80,2 %	89,6 %	100,0 %	100,0 %
Diesel	54,9 %	62,1 %	68,5 %	69,3 %
Essence	24,5 %	26,7 %	30,6 %	29,8 %
Autres	0,75 %	0,78 %	0,94 %	0,87 %
Inconnus	0,04 %	0,04 %	0,05 %	0,04 %
LCV	15,9 %	9,5 %	100,0 %	100,0 %
Diesel	15,4 %	9,2 %	97,2 %	96,7 %
Essence	0,32 %	0,05 %	2,0 %	0,50 %
Autres	0,12 %	0,27 %	0,75 %	2,8 %
HGV	3,6 %	0,68 %	100,0 %	100,0 %
Rigides	2,0 %	0,40 %	56,1 %	58,55 %
Tracteurs	1,6 %	0,28 %	43,9 %	41,45 %
Cars	0,16 %	0,16 %	100,0 %	100,0 %
Articulés	0,00 %	0,00 %	1,2 %	1,7 %
MidiCars	0,03 %	0,02 %	17,7 %	10,0 %
Standards	0,13 %	0,14 %	81,1 %	88,3 %
Bus	0,12 %	0,08 %	100,0 %	100,0 %
Articulés	0,00 %	0,01 %	2,5 %	7,1 %
MidiBus	0,00 %	0,00 %	1,3 %	2,8 %
Standards	0,12 %	0,07 %	96,2 %	90,1 %
Total général	100,0 %	100,0 %		

Tableau 17 : Parc roulant moyen et parc roulant week-end par catégories et types de véhicules

Véhicules	Composition de parc roulant local Mocopo			
	Moyen	Week-end	Moyen par catégorie	Week-end par catégorie
VP	80,2 %	89,6 %	100,0 %	100,0 %
Euro-0-1-2	20,3 %	21,9 %	25,2 %	24,5 %
Euro-3	28,6 %	32,9 %	35,7 %	36,7 %
Euro-4	24,4 %	27,3 %	30,4 %	30,5 %
Euro-5	6,1 %	6,6 %	7,7 %	7,4 %
Autres	0,8 %	0,82 %	1,0 %	0,9 %
VUL	15,9 %	9,5 %	100,0 %	100,0 %
Euro-0-1-2	2,4 %	2,2 %	15,6 %	22,8 %
Euro-3	4,4 %	3,1 %	28,3 %	32,5 %
Euro-4	6,8 %	3,3 %	43,5 %	34,4 %
Euro-5	2,0 %	0,98 %	12,6 %	10,3 %
PL	3,6 %	0,67 %	100,0 %	100,0 %
Euro-0-I-II	0,58 %	0,14 %	16,1 %	19,9 %
Euro-III	1,3 %	0,21 %	35,0 %	31,3 %
Euro-IV	1,4 %	0,25 %	37,1 %	36,7 %
Euro-V	0,43 %	0,08 %	11,7 %	12,1 %
Autres	0,00 %	0,00 %	0,08 %	0,00 %
Cars	0,16 %	0,16 %	100,0 %	100,0 %
Euro-0-I-II	0,02 %	0,02 %	18,4 %	12,3 %
Euro-III	0,06 %	0,06 %	37,8 %	35,5 %
Euro-IV	0,05 %	0,07 %	33,7 %	41,2 %
Euro-V	0,02 %	0,02 %	10,2 %	11,0 %
Bus	0,12 %	0,08 %	100,0 %	100,0 %
Euro-0-I-II	0,05 %	0,03 %	47,6 %	35,4 %
Euro-III	0,06 %	0,04 %	46,8 %	56,0 %
Euro-IV	0,00 %	0,01 %	3,0 %	8,5 %
Euro-5	-	-	-	-
Autres	0,00 %	0,00 %	2,7 %	0,00 %
Total	100,0 %	100,00 %		

Tableau 18: Parcs roulants moyen et week-end par catégories de véhicules et selon la réglementation pollution EURO

En ce qui concerne la répartition dans les catégories EURO (Tableau 18), on ne relève pas de différences pour les voitures particulières entre le parc moyen et le parc week-end. Cependant on

voit une légère différence pour les véhicules utilitaires légers, qui sont moins représentés les week-ends dans les catégories EURO 4 et 5, mais plus présents dans les catégories EURO plus anciennes.

2.6.2. Variabilité de la composition du parc en heures creuse et de pointe

Dans le cadre du projet, il a été décidé de définir les heures de pointe (jours de semaine) comme correspondant aux périodes 7h-9h, le matin, et 16h-19h, l'après-midi. On analysera donc les créneaux de 6 minutes compris entre 07h00 et 08h59 et entre 16h00 et 18h59 pour représenter les heures de pointe, tandis que les créneaux entre 00h00 et 06h59, puis entre 09h00 et 15h59 et entre 19h00 et 23h59 constitueront les heures creuses. On notera cependant que ces « heures de pointe » représentant globalement une période de 5 heures sur la journée, période très large et ne correspondent heureusement pas à une réelle période de congestion ou de trafic dense.

Nous ne considérerons par ailleurs que le trafic des jours de semaine (lundi à vendredi) pour ces analyses, la notion d'heure de pointe étant nécessairement différente pour le week-end.

2.6.2.1. Différenciation des parcs selon les catégories de véhicules

Le Tableau 19 montre peu de différences entre les heures creuses et heures de pointes, on peut seulement noter une proportion légèrement supérieure de poids lourds en heures creuses, et ainsi une part légèrement plus faible de voitures particulières.

Véhicules	Composition du parc roulant local Mocopo			
	Moyen	Semaine	Heure creuse	Heure de pointe
VP	80,2 %	77,1%	76,1 %	78,9 %
VUL	15,9 %	18,0 %	18,2 %	17,6 %
PL	3,7 %	4,6 %	5,4 %	3,3 %
Cars	0,16 %	0,15 %	0,15 %	0,16 %
Bus	0,12 %	0,13 %	0,15 %	0,11 %
Total général	100 %	100 %	100%	100%

Tableau 19 : Parcs roulants moyen, moyen en semaine, heures creuses et heures de pointes, par catégories de véhicules

2.6.2.2. Différenciation des parcs selon motorisations, types de véhicules et réglementations pollution

Comme pour le type de véhicules, on ne note pas de réelles différences entre les heures creuses et les heures de pointe pour la répartition des véhicules dans les différentes catégories (Tableau 20).

L'analyse selon les réglementations pollution EURO (Tableau 21) montre que les parcs roulants en heures creuses et en heure de pointe ont des compositions assez équivalentes dans les différentes catégories EURO. On notera cependant un glissement systématique de quelques pourcents vers des véhicules plus anciens pour l'heure de pointe (+2,2% des voitures anciennes Euro 0-1-2 et -2,2% de voitures récentes Euro 3-4-5, +2,5 et -2,5% pour les VUL, +4,2% de camions anciens Euro 0-1-2, etc.). Au global, il en résulte bien un différentiel d'au moins 5% pour l'ensemble vers un parc plus ancien en heure de pointe.

Véhicules	Composition du parc roulant local Mocopo (par catégories)			
	Moyen	Semaine	Heure creuse	Heure de pointe
VP	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
Diesel	68,5 %	68,1 %	68,6 %	67,4 %
Essence	30,6 %	30,8 %	30,3 %	31,6 %
Autres	0,94 %	0,97 %	0,99 %	0,93 %
Inconnus	0,05 %	0,05 %	0,05 %	0,05 %
VUL	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
Diesel	97,2 %	97,3 %	97,1 %	97,6 %
Essence	2,04 %	1,91 %	2,04 %	1,7 %
Autres	0,75 %	0,79 %	0,85 %	0,7 %
PL	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
Rigides	56,1 %	56,0 %	55,7 %	56,8 %
Tracteurs	43,9 %	44,0 %	44,3 %	43,2 %
Cars	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
Articulés	1,2 %	1,0 %	1,5 %	0,30 %
MidiCars	17,7 %	20,3 %	22,5 %	16,7 %
Standards	81,1 %	78,7 %	76,0 %	83,0 %
Bus	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
Articulés	2,5 %	1,6 %	1,7 %	1,3 %
MidiBus	1,3 %	1,1 %	0,8 %	1,8 %
Standards	96,2 %	97,3 %	97,5 %	96,9 %

Tableau 20 : Parcs roulants moyen, moyen de semaine, heures creuses et heures de pointes, par catégories, motorisations et types de véhicules

Véhicules	Composition du parc roulant local Mocopo (par catégories)			
	Moyen	Semaine	Heure creuse	Heure de pointe
VP	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
Euro-0-1-2	25,2 %	25,6 %	25,2 %	26,2 %
Euro-3	35,7 %	35,3 %	34,7 %	36,3 %
Euro-4	30,4 %	30,4 %	30,6 %	30,0 %
Euro-5	7,7 %	7,8 %	8,5 %	6,5 %
Autres	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %
VUL	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
Euro-0-1-2	15,6 %	14,3 %	14,0 %	14,9 %
Euro-3	28,3 %	27,5 %	26,9 %	28,6 %
Euro-4	43,5 %	45,1 %	45,1 %	45,1 %
Euro-5	12,6 %	13,0 %	14,0 %	11,4 %
PL	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
Euro-0-I-II	16,1 %	16,0 %	14,9 %	19,1 %
Euro-III	35,0 %	35,2 %	35,7 %	33,7 %
Euro-IV	37,1 %	37,2 %	37,2 %	37,0 %
Euro-V	11,7 %	11,7 %	12,2 %	10,2 %
Autres	0,08 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Cars	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
Euro-0-I-II	18,4 %	20,4 %	19,9 %	21,3 %
Euro-III	37,8 %	38,6 %	39,7 %	36,8 %
Euro-IV	33,7 %	31,1 %	30,3 %	32,5 %
Euro-V	10,2 %	9,9 %	10,1 %	9,4 %
Bus	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
Euro-0-I-II	47,6 %	49,8 %	42,2 %	67,9 %
Euro-III	46,8 %	48,2 %	56,1 %	29,5 %
Euro-IV	3,0 %	2,0 %	1,7 %	2,7 %
Euro-V	-	-	-	-
Autres	2,7 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %

Tableau 21 : Parcs roulants moyen, moyen de semaine, heures creuses et heures de pointes, par catégories et réglementations pollution EURO

2.6.3. Conclusions

En conclusion, le parc roulant du week-end diffère assez significativement du parc moyen en particulier sur la répartition dans les catégories de véhicules, avec une proportion bien moins importante de poids lourds et de véhicules utilitaires légers qui circulent les week-ends.

Les différences sont peu marquées entre les heures de pointe et les heures creuses, hormis un glissement vers un parc plus jeune et propre en heures creuses. Mais ces faibles écarts pourraient être atténués par la fenêtre large de définition des heures de pointe.

2.7. Conclusions

La campagne d'expérimentation et d'observations vidéo menée sur la rocade de Grenoble a permis d'enregistrer 1,7 Millions d'observations parmi lesquelles il est possible d'identifier 350,000 immatriculations françaises (900,000 observations).

L'analyse de ces données a d'abord permis un retour d'expérience sur la technique d'observation vidéo et ses difficultés (dysfonctionnements de matériel, imprécisions, etc.), ainsi que sur la reconstitution des caractéristiques techniques des véhicules via le fichier central des immatriculations (erreurs ou difficultés d'identification).

Les immatriculations françaises ont permis d'élaborer une composition locale du parc en circulation, y compris dans sa variabilité temporelle.

L'analyse de ces données par rapport aux estimations nationales montre des spécificités locales de parc, en terme de répartition par catégories de véhicules (voitures, véhicules utilitaires légers et lourds), de diésélisation (moindre à Grenoble), ou de réglementations d'émission (les véhicules récents sont moins fréquents). On observe une forte variabilité de la composition du parc entre semaine et week-end, par la part de trafic représentée par les véhicules utilitaires lourds mais aussi légers, et de même entre heures de pointes et heures creuses de semaine. Globalement le parc de voitures heure de pointe est un peu moins diésélisé et plus ancien qu'en heures creuses et week-end.

L'analyse détaillée de ces données permet d'envisager une composition locale de parc automobile qui sera utilisée ensuite pour les estimations des émissions de polluants du trafic. Celle-ci sera également déclinée en parc semaine, week-end, heures de pointe et heures creuses afin d'apprécier la sensibilité des estimations d'émissions au facteur parc.

3. Problématique du calcul d'émissions

Dans le cadre du projet MOCOPO, les calculs d'émissions de polluants du trafic routier sur le site expérimental - et pour l'ensemble de l'agglomération - ont été envisagés à partir de la plate-forme de calcul d'émission MOCAT, qui est l'outil opérationnel sur ce périmètre géographique. En complément l'outil SIRANE sera la base principale des calculs de concentrations de polluants, envisagées notamment dans les tâches de modélisation et de confrontation des calculs aux données de pollution mesurées.

Parallèlement, une approche alternative CopCETE a été utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre. Cette approche a permis des analyses relativement rapides de sensibilité des calculs d'émissions, notamment pour mesurer l'incidence de la composition du parc, de sa variabilité, et de différentes hypothèses de calculs d'émission. Cette approche ne sera utilisée que pour des calculs d'émissions.

Les 2 approches sont cependant assez proches en terme de méthode : elles reposent toutes 2 sur la méthodologie COPERT4 (avec potentiellement des écarts méthodologiques sans doute mineurs), et sont décrites dans ce chapitre.

On rappelle au préalable les grandes lignes de la méthodologie COPERT, commune aux deux approches et décrite en (André et al. 2012).

3.1. Méthode et outil Copert 4

COPERT² est un outil disponible sur internet, dont la méthode est explicitée dans (Guidebook, documents EMEP/EEA 2009 a, b, et c). COPERT4 s'appuie sur des mesures d'émission sur cycles d'essai représentatifs et concerne les polluants atmosphériques des différentes catégories de véhicules routiers. Il permet de réaliser un inventaire d'émission agrégé sur un territoire, en distinguant les milieux « urbain », « rural » et « autoroute », à partir des véhicules x kilomètres et de vitesses de circulation, et calcule :

- les émissions à chaud pour les véhicules légers (voitures, véhicules utilitaires légers, 2-roues) et lourds (camions, autobus et autocars) ;
- les surémissions à froid pour les véhicules légers ;
- les surémissions liées à la pente et au chargement pour les véhicules lourds ;
- les corrections liées aux améliorations des carburants ;
- les corrections liées au vieillissement des catalyseurs et leur maintenance ;
- les émissions par évaporation des véhicules légers (essence) ;
- l'émission non échappement (usure des freins et pneumatiques seulement).

Tous les calculs de la méthodologie COPERT4 sont accessibles et paramétrables dans l'outil.

Les véhicules sont subdivisés en 242 types (63 VP, 14 VUL, 99 PL, 46 bus, 20 deux roues), selon le carburant, la taille du moteur ou le poids du véhicule, la technologie, les réglementations émissions.

² Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport, <http://www.emisia.com/copert/>

3.1.1. Émission à chaud

L'émission à chaud dépend de la distance parcourue, la vitesse du véhicule (ou le type de route), son âge (dégradation), la taille du moteur ou le poids du véhicule. Pour une période de temps (heure, jour, an) et un type de véhicule, elle s'exprime comme suit :

$$\text{Emission [g]} = \text{FE [g/km]} \times \text{N [veh]} \times \text{Km [km/veh]}$$

- FE facteur ou fonction spécifique d'émission pour un polluant i (fonction de la catégorie ou segment du véhicule, de sa vitesse de circulation, du type de route)
- N nombre de véhicules
- Km kilométrage (annuel) par véhicule

Cette formule s'applique pour chaque segment de véhicule et on réalise une somme sur l'ensemble des catégories. Elle est également utilisée pour calculer la consommation de carburant.

Les fonctions d'émissions varient fortement selon la vitesse des véhicules et sont de la forme :

$$EF = (a + c \times V + e \times V^2) / (1 + b \times V + d \times V^2)$$

les coefficients a, b, c, d, e étant déterminés par régression sur les données expérimentales d'émission et les caractéristiques des cycles de conduite.

Ces fonctions sont illustrées Figure 6 pour les voitures essence et Diesel. On notera les écarts importants entre les véhicules de différentes réglementations européennes, et les fortes variations à basses et à hautes vitesses. On notera cependant que pour une large plage de vitesses intermédiaires les facteurs d'émissions (g/km) sont assez stables.

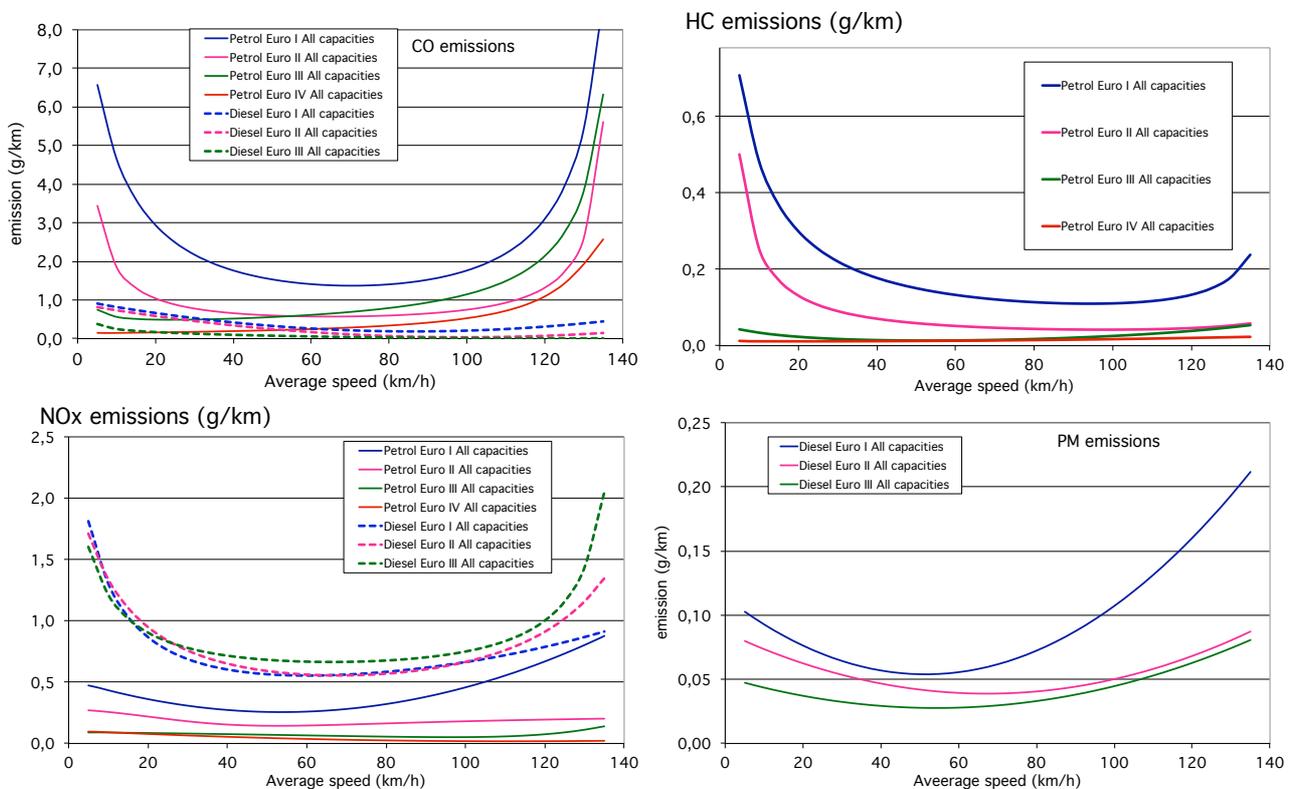


Figure 6 : Courbes d'émission types de la méthode Copert4 : CO et NOx (tous types de voitures essence et diesel), HC véhicules essence, PM véhicules Diesel

3.1.2. Surémission à froid

Cette surémission ne concerne que les véhicules légers en urbain et rural. Pour un polluant donné, l'équation s'écrit :

$$E_{\text{froid},j,V} = \beta \times E_{\text{chaud},j,V_{\text{urbain}}} \times (e_{\text{surémission},j} - 1)$$

avec :

- $E_{\text{froid},j,V}$ = surémission à froid pour les véhicules de type j circulant à la vitesse V
- β = fraction des kilomètres parcourus à froid par les véhicules de type j (dépend de la température ambiante et la distance moyenne du déplacement)
- $E_{\text{chaud},j,V_{\text{urbain}}}$ = émission à chaud pour le véhicule j circulant à la vitesse V_{urbain}
- $e_{\text{surémission},j}$ = coefficient de surémission à froid pour le véhicule de type j (dépend aussi de la température ambiante)
- V_{urbain} = vitesse de circulation en milieu urbain (valeur unique dans COPERT, < à 50km/h).

3.1.3. Émissions par évaporation

L'émission (véhicules essence seulement) est fonction de la cylindrée, du volume du réservoir et du dispositif de piégeage des vapeurs de carburant, des conditions de températures et des caractéristiques du carburant (volatilité). Le calcul distingue 3 facteurs d'émission selon l'équation suivante :

$$E_{\text{voc}} = \sum_s D_s \times \sum_j N_j \times (HS_j + e_{d,j} + RL_j)$$

avec,

- E_{voc} = l'émission de COV par évaporation sur une période (année, etc.)
- D_s = le nombre de jours pour lesquels le facteur d'émission saisonnier doit être appliqué
- N_j = le nombre de véhicules à essence de type j

et les facteurs d'émission par évaporation :

- HS_j = évaporation après arrêt moteur chaud [g/jour], fonction du nombre de trajets journalier
- $e_{d,j}$ = évaporation journalière due aux variations de température ambiante pour un véhicule en stationnement [g/jour]
- RL_j = évaporation du véhicule en circulation [g/jour].

3.1.4. Les émissions non échappement de particules

Les particules (PM) concernent l'usure des pneus et des freins du véhicule. Deux méthodes sont proposées dans le Guidebook 2009, mais COPERT en utilise une troisième non explicitée, mais qui s'appuie sur des facteurs d'émission spécifiques selon les types de véhicule et la vitesse moyenne.

3.1.5. Données d'entrées et limites de Copert

Pour chacun des types de véhicule (selon technologie, carburant, taille et réglementation pollution), les données nécessaires sont :

- Les nombres de véhicules, kilométrages annuels [km/an] et totaux cumulés [km],
- La distribution du kilométrage annuel selon les milieux urbain, rural et autoroute,
- La vitesse de circulation selon ces milieux (avec cependant des limites basses - 10km/h pour les véhicules légers, 12 km/h pour les véhicules lourds -, et hautes)
- La taille du réservoir et de l'absorbeur
- le type d'injection
- Les températures (max/min) et la tension de vapeur mensuelles,
- les spécifications des différents carburants (teneurs en métaux lourds, soufre, HC, OC mg/kg)
- Les distances moyennes de déplacement et nombres de trajets journaliers
- pour les véhicules lourds, l'indication de la pente de la route (-6 à +6% par pas de 2%) et du chargement (0, 50 ou 100% en poids)
- l'affectation de l'évaporation selon les milieux urbain/rural/autoroute.

L'approche COPERT et l'outil sont principalement adaptés pour le calcul à échelles macroscopiques (agglomération, région, pays, heure, journée, année). De fait l'outil COPERT propose un cadre d'analyse en 3 milieux urbain / rural / autoroute (sans spatialisation et à échelle annuelle), non adapté pour l'analyse d'un réseau routier par exemple. Pour cette raison, de nombreux outils sont développés à partir de la méthode COPERT / Guidebook, pour des applications locales, et intégrant généralement des hypothèses nationales (parcs automobiles, données de météo, longueur des trajets, etc.).

3.2. Approche opérationnelle MOCAT

3.2.1. Approche annuelle

L'outil MOCAT (MOdèle de CAcalcul des émissions du Trafic) a été construit initialement pour assurer un calcul annuel des émissions du trafic routier, alimentant le cadastre des émissions de la région Rhône-Alpes. Les calculs sont entièrement assurés sous base de données PostgreSQL pour des raisons de temps de calcul et de sécurisation des données. Le principe (schéma Figure 7) consiste à identifier, pour chacun des 140 000 tronçons routiers de la région, les caractéristiques de la route (sinuosité, rampe, vitesse réglementaire, congestion,...) et des trafics de véhicules y circulant (débit total, part de véhicules longs, profil de vitesse, type de véhicules, parc roulant). Le calcul des émissions routières repose sur la méthodologie européenne COPERT 4 (actuellement version 10) décrite plus haut. Les émissions calculées par MOCAT peuvent être déclinées géographiquement par tronçon, commune ou maille kilométrique, selon plusieurs types d'agrégation : par classes de véhicules, carburant, norme euro...

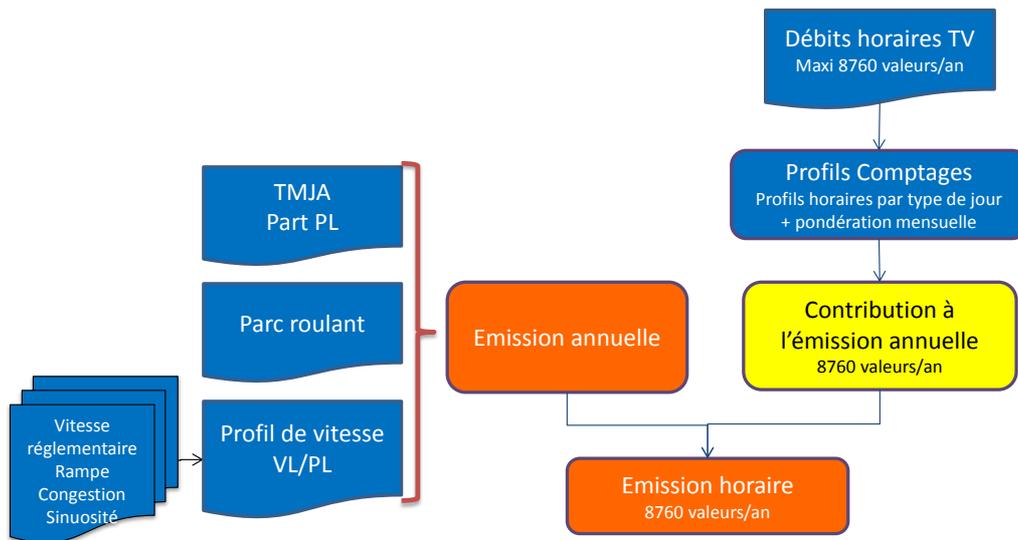


Figure 7 : principe de fonctionnement de MOCAT en mode annuel

La prise en compte de la vitesse des véhicules dans MOCAT repose sur un profil annuel moyen de vitesse construit sur la base de quatre critères :

- Vitesses réglementaires VL et PL
- Rampe (une route en forte pente impactera la vitesse pratiquée)
- Sinuosité (on ne peut pas rouler à 90 km/h sur une route de montagne même si la réglementation le permet !)
- Congestion : un indicateur à trois modalités est établi pour chaque commune pour différencier les communes urbaines denses (Lyon, Grenoble..) des autres communes urbaines et des communes rurales où il n'y a généralement pas de congestion.

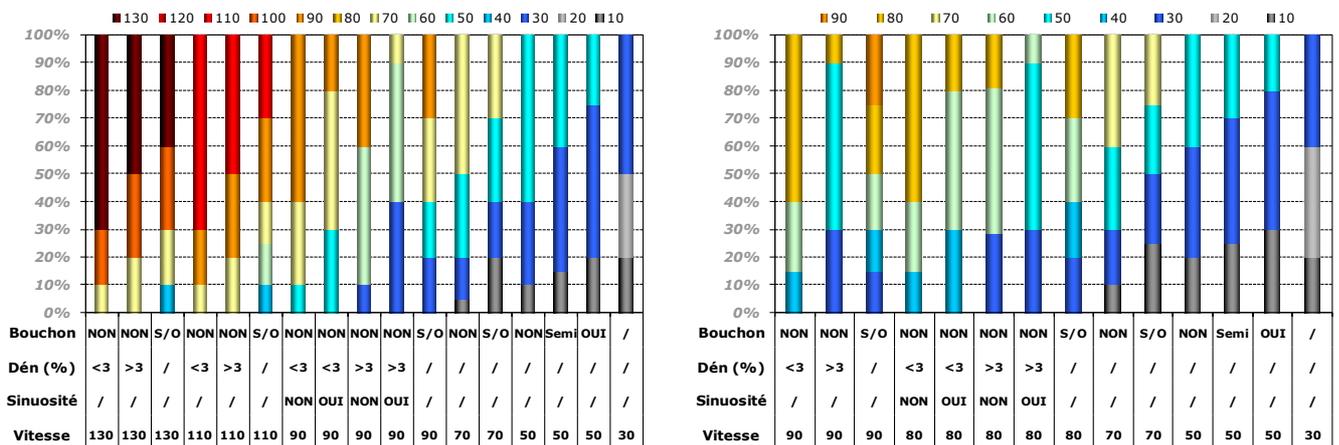


Figure 8 : profils annuels de vitesse utilisés dans MOCAT

Les profils annuels associés à des vitesses réglementaires supérieures à 90 km/h ont été calés sur des comptages, tandis que les profils en agglomération permettent de retranscrire les vitesses moyennes généralement pratiquées.

Concernant la charge des véhicules lourds :

- une valeur moyenne de 60% est considérée pour les PL (enquêtes cordon donnant le pourcentage de PL circulant à vide, pesées dynamiques effectuées par les sociétés d'autoroutes)

- les autocars sont affectés d'une charge moyenne de 50% (correspondant à un taux de remplissage moyen)

3.2.2. Approche horaire

L'approche horaire, opérationnelle dans MOCAT depuis 2011, consiste à calculer directement les émissions à un pas de temps fin, à partir des données délivrées par les comptages SIREDO (débit tous véhicules TV et poids-lourds PL, vitesse moyenne). Si cette méthode n'est pas pertinente à l'échelle régionale, elle trouve tout son sens sur un axe routier particulier, comme la rocade sud de Grenoble, où des données fines de trafic existent d'une part et où la variabilité des conditions de trafic permet une meilleure précision dans les calculs que l'approche annuelle ventilée par profils.

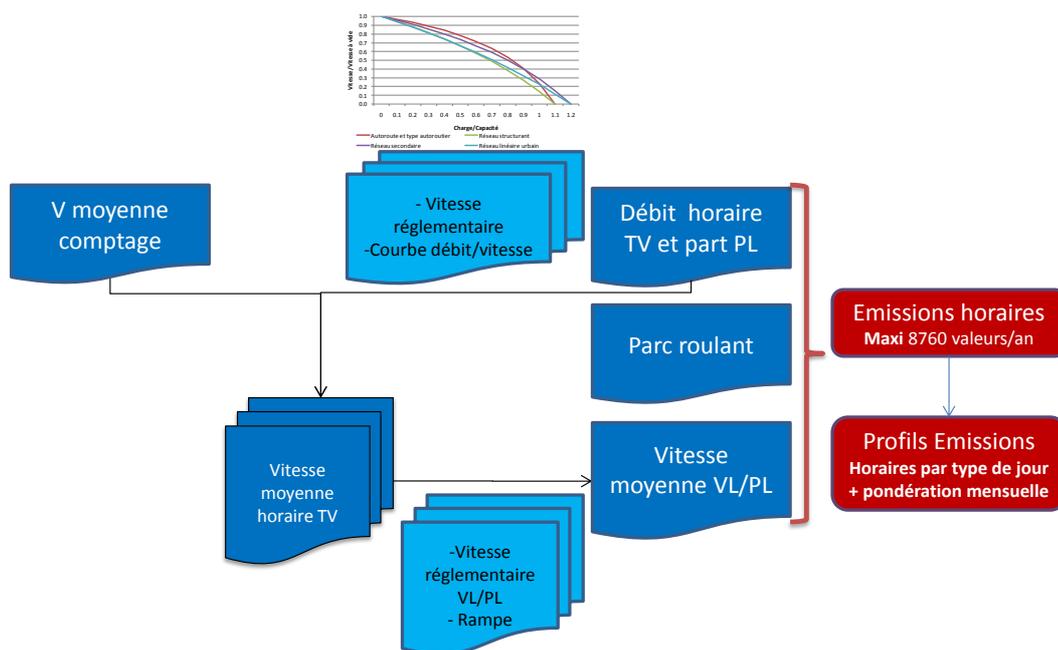


Figure 9 : principe de fonctionnement de MOCAT en mode horaire

Dans le cadre de ce projet, les émissions fines ont été calculées à deux pas de temps :

- Pas de temps horaire à partir des données suivantes :
 - o Débit tous véhicules
 - o Classes de vitesses (< 50 km/h, 50-70, 70-90, 90-110, 110-130, >130 km/h)
 - o Débit des véhicules par classes de longueur (0-6m, 6-7m, 7-9m, 9-25.5m)
- Pas de temps 6 minutes au moyen de données légèrement différentes :
 - o Débit tous véhicules
 - o Vitesse moyenne de tous les véhicules
 - o Taux d'occupation (% de temps où le capteur est « occupé » par un véhicule)

Pour alimenter l'outil MOCAT, on a besoin du débit tous véhicules, de la part des Poids Lourds (PL) et de la vitesse moyenne des véhicules. Comme la part PL et la vitesse ne sont pas exactement fournies de la même manière selon le pas de temps considéré, il a fallu choisir la donnée la plus précise :

- Pour la part des PL, il a été décidé (après validation avec le Conseil Général de l'Isère) que les Poids Lourds concernent les véhicules ayant une longueur supérieure à 7m (soit les 2 dernières

classes). Ainsi, on a bien une part PL pour les données horaires. Cette part PL est dupliquée pour les données 6 minutes.

- Pour les vitesses moyennes horaires, les classes étant peu précises, il a été convenu de se baser sur les données 6 minutes. Ainsi, à partir de ces données, par moyenne pondérée, on obtient des vitesses moyennes horaires. De plus, les vitesses inférieures à 10 km/h sont ramenées à 10 km/h (seuil minimum de vitesses pour avoir un facteur d'émissions associé, selon la méthodologie COPERT).

3.3.Approche expérimentale CopCETE

L'approche CopCETE a été mise en œuvre en raison de sa souplesse d'utilisation et d'adaptation des hypothèses de calcul. Elle n'a cependant pas été utilisée pour un calcul plus complet de pollution de l'air (dispersion, concentrations, prise en compte des autres apports, etc.), qui relève de MOCAT.

3.3.1. Logiciel CopCete

Le logiciel COPCETE est une adaptation du modèle COPERT4 (version 9), réalisée par le Ministère du Développement Durable pour le cas français et coordonné par le CETE Normandie-Centre, Il permet de travailler à partir d'une grande série de tronçons ou segments routiers, plutôt que les 3 seuls cas urbain / rural / autoroutier envisagés par l'outil COPERT. De fait CopCETE permet de traiter également des cas d'études « banalisés » (non linéaires, zones, régions, etc.) pourvu que ceux-ci puissent être traduits en nombres de véhicules et véhicules x km.

Pour chaque tronçon, l'émission est calculée à partir du nombre de véhicules par catégorie (VL, VUL, PL, bus) et du trafic en utilisant la méthode et les équations COPERT4 (version 9), plus certains facteurs d'émissions spécifiques dérivés de travaux français. On notera que l'approche des émissions de démarrage à froid et par évaporation au niveau de tronçons nécessite une interprétation de la méthode Copert, non toujours appropriée au niveau du tronçon.

CopCETE intègre le parc automobile français élaboré par l'Ifsttar (version 2011, déclinaison selon Copert4, cf. ci-dessus) et permet l'introduction de parcs alternatifs. Cet outil relativement ouvert, n'envisage que le calcul des émissions (pas d'articulation directe avec les modèles de trafic ou de dispersion des polluants) et permet l'ajustement de nombreux paramètres et du parc pour des études de sensibilité, etc.

Le calcul d'émissions sur un réseau routier au cours d'une période t nécessite d'abord des paramètres de simulation globaux :

- La période (mois) renvoyant aux conditions de température.
- Le chargement des véhicules lourds (0, 50% ou 100%)
- La longueur des trajets (ou un facteur de démarrage à froid) et leur nombre journalier pour la détermination des surémissions de démarrage à froid et par évaporation de carburant, et par ailleurs la définition pour chaque tronçon de (cf. Figure 10) :
 - la longueur du tronçon et sa pente moyenne (par classe de 2%),
 - Le milieu (urbain diffus, urbain dense, campagne, autoroute), et le parc en circulation,

- Les nombres de véhicules légers et lourds ayant circulé pendant la période sur ce tronçon, un pourcentage du VUL dans le flux VL, le nombre de bus et de camions,
- La vitesse de circulation des VL, PL et bus
- Des données liées au démarrage à froid et aux évaporations (taux de froid, nombre d'arrêt au cours de la période), si celles-ci doivent être estimées au niveau des tronçons.

A		B		C		D		E		F		G		H		I		J		K		L		M		N		O		P	
COPCETE v4		Validation des données		Format de rendu		3		Unité		2		Nombre de polluants		30		Evaporations		3		Pas temps		h									
CALCUL		Année 2011		Mois 9		Nb trajet/l		4,8		Long trajet moy (km)		7,8		Bêta froid		3		Charge PL		50											
CARACTERISTIQUES DU TRONCON										PARC				DONNEES DE TRAFIC						AUTRES DONNEES											
id	Nom	Longueur (km)	Pente	Code Pente	Milieu	Parc	Clé VUL	Nbre VL	Vitesse VL	Nbre PL	Vitesse PL	Nbre Bus	Vitesse Bus	Taux froid perso	Nb arrêts période																
1	11/09/2011 00:00	0,9567	0	3	u2	1	0,16509	85	89,87	3,00	69,87	0,00	30,00	0	0																
2	11/09/2011 00:06	0,9567	0	3	u2	1	0,16509	62	90,98	2,00	70,98	0,00	30,00	0	0																
3	11/09/2011 00:12	0,9567	0	3	u2	1	0,16509	59	88,84	2,00	68,84	0,00	30,00	0	0																
4	11/09/2011 00:18	0,9567	0	3	u2	1	0,16509	69	92,05	3,00	72,05	0,00	30,00	0	0																
5	11/09/2011 00:24	0,9567	0	3	u2	1	0,16509	66	90,10	3,00	70,10	0,00	30,00	0	0																
6	11/09/2011 00:30	0,9567	0	3	u2	1	0,16509	67	92,08	3,00	72,08	0,00	30,00	0	0																
7	11/09/2011 00:36	0,9567	0	3	u2	1	0,16509	56	92,87	2,00	72,87	0,00	30,00	0	0																
8	11/09/2011 00:42	0,9567	0	3	u2	1	0,16509	50	93,97	2,00	73,97	0,00	30,00	0	0																

Figure 10 : Fichier Excel COPCETE

Les résultats donnés par COPCETE se présentent sous forme de tableau, donnant pour chaque polluant, les émissions par tronçon et par catégorie détaillée de véhicule (VP Diesel-Essence-Hybrides-GPL, VUL Diesel-Essence-Electriques, PL, autocars, autobus). COPCETE peut également agréger les résultats par grandes catégories (VP, VUL, PL, etc.), par tronçon, et pour l'ensemble des tronçons.

3.3.2. Principes et hypothèses des calculs et leurs implications

3.3.2.1. Principes généraux

Le calcul d'émission repose d'une part sur les principes et hypothèses propres au modèle et d'autre part sur les données d'entrée, avec plusieurs implications que nous récapitulons ci-après :

- pour chaque tronçon et pas de temps, on ne définit qu'une vitesse moyenne par groupe de véhicules ; en conséquence, tous les véhicules circulent à la même vitesse sur le tronçon, stable au cours de la période, et on ne capte pas plus finement qu'à ce niveau la dynamique du trafic ;
- Les vitesses de circulation sont approchées par les observations des capteurs de trafic ; cependant, celles-ci ne distinguent pas les catégories de véhicules. L'hypothèse habituelle d'un différentiel fixe de vitesse entre VL et PL/Bus (20 km/h, 10 km/h) avait été retenue en première approche, puis un écart plus représentatif (nul en dessous de 70 km/h puis proportionnel à la vitesse au-delà, cf. Figure 11, selon Buisson, communication personnelle) a été adopté.

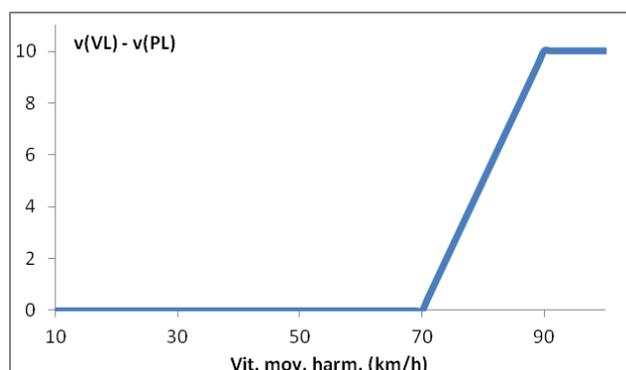


Figure 11 : Profil $dv_{it} = v(PL) - v(VL)$ proposé dans le cadre du projet Mocopo

- La répartition du trafic selon les catégories véhicules légers, véhicules lourds (/PL/Bus) est variable selon les tronçons et périodes et peut être prise en compte dans l'analyse. Cependant les capteurs de trafic n'ont pas renseigné cette information. Une étude dynamique de cette répartition a été effectuée par la DIRCE et utilisée par Air Rhône-Alpes en raison de l'intérêt que représentent ces données pour la modélisation statistique de l'exposition des populations. Cependant des incohérences fréquentes avec les données de trafic au cours de la période d'expérimentation du projet Mocopo ont été relevées, et il nous a semblé en conséquence préférable d'utiliser pour des analyses fines, une répartition variable à chaque créneau d'observation, conformément aux observations vidéo du parc. Ces observations vidéo ont de plus l'avantage de décrire précisément la composition selon voitures, véhicules utilitaires légers, camions, autocars et autobus.
- Mis à part l'équilibre entre catégories de véhicules qui peut varier d'un tronçon ou d'une période à l'autre, la composition de parc par technologies, cylindrées, réglementations EURO a été considérée comme constante (et égale à celle résultant de l'ensemble des observations vidéo). On distinguera cependant une composition de parc globale (calculée sur l'ensemble des observations), et des compositions de week-end, heures creuses et heures de pointe de semaine. Enfin dans le cadre d'analyses de sensibilité, on envisagera des variations de compositions (trafic utilitaires, proportions de Diesel, proportions de véhicules récents selon la variabilité observé).
- Pour l'estimation des émissions de démarrage à froid et par évaporation, nous avons considéré les données climatiques et de longueur et nombre de trajets constantes sur l'ensemble des tronçons et périodes. Celles-ci correspondent à la météo observée en septembre 2011 et aux statistiques de déplacements telles qu'observées par l'enquête ménage déplacement (EMD) de Grenoble. La sensibilité des émissions à ces paramètres de calcul sera également envisagée.
- La charge des véhicules lourds (camions et bus) a été prise à 50%, et on envisagera les hypothèses 0% et 100% pour l'analyse de sensibilité.
- Le kilométrage total moyen des véhicules par catégories détaillées (qui conditionne la « dégradation des facteurs émissions » avec le temps ou l'utilisation de ces véhicules) est défini selon le parc IFSTTAR (pour l'année 2011) à défaut d'autres hypothèses.

3.3.2.2. Cas d'application et hypothèses

Nous récapitulons ici les principaux éléments des analyses décrites au chapitre suivant.

- Les calculs sont effectués sur le site d'Echirolles, avec les données de trafic au pas de temps de 6 mn, dans les deux sens de circulation, en distinguant à chaque créneau les différentes catégories de véhicules proportionnellement aux observations vidéo, et avec une composition détaillée du parc local moyen correspondant aux observations vidéo sur l'ensemble des expérimentations (4 semaines). Les parcs locaux de week-end, heures creuses et heures de pointe, ainsi que le parc national IFSTTAR pour l'année 2011 (version 2011) seront également considérés.
- Compte tenu des lacunes de données (trafic sur certaines périodes), les analyses seront restreintes aux 2 seules semaines d'expérimentation (soit environ 3360 créneaux de 6 minutes et 6720 observations compte tenu des 2 sens) pour lesquelles il est possible de constituer un jeu de

données exhaustif. Pour l'analyse de sensibilité à la composition du parc, un échantillon aléatoire de 20% des observations a été considéré (1344 observations de 6 minutes).

- On considère un segment ou tronçon routier pour l'intégration des données d'émission sur le pas de 6 minutes. Une donnée de comptage doit également être intégrée sur une distance afin de calculer les émissions produites. Il aurait été possible de tenir compte des distances réelles (par relevés topographiques) pour les différents sites voire pour les différents sens (courbures éventuelles). Pour le site d'Échirolles et afin d'équilibrer les calculs dans les 2 sens, nous avons adopté une distance unique de 956 mètres (en cohérence avec les calculs sous MOCAT).
- Les données aux pas de 6 minutes seront par ailleurs intégrées aux pas de temps 15 mn et horaires pour l'analyse de sensibilité à la précision des données de trafic.
- Le fichier texte des données SIREDO a été géré sous Access et sous Excel, pour la synchronisation avec les données de parc (et les données de pollution), et pour diverses analyses
- L'estimation des vitesses des véhicules lourds et légers suit la règle précisée ci-dessus. A partir de la vitesse globale du trafic sur un créneau de 6 minutes et des nombres de VL et PL, on calcule séparément les vitesses VL et PL de manière à ce que la vitesse moyenne calculée (pondération des vitesses par les nombres de véhicules) corresponde à la valeur observée.
- Pour un tronçon et sens, on considérera autant de lignes de calculs que de créneaux temporels pour lesquels on dispose des données de trafic (flux, vitesses) et pour lesquels seront estimées les émissions. Ces lignes seront donc importées dans le logiciel COPCETE (fichier et onglet données) comme autant de « tronçon - sens - créneau horaires » à traiter.
- Par nécessité de l'outil, les créneaux à flux nuls sont exclus des calculs, et les vitesses hors des limites de validité de Copert seront ajustées (10 et 12 km/h minimum pour les véhicules légers et lourds respectivement, 130 et 86 km/h pour les maximas).

3.3.2.3. Phasage temporel

L'identification des heures de pointe et heures creuses s'est faite comme discuté en section 2.6.2 p. 31. Cependant, au-delà de ce découpage assez trivial (2 heures de pointe le matin et 3h l'après-midi) il est intéressant de considérer les profils réels de distribution du trafic au cours de la journée. Les Figure 12 et Figure 13 illustrent la variabilité du trafic et de la vitesse de circulation au cours d'une journée de semaine et du week-end.

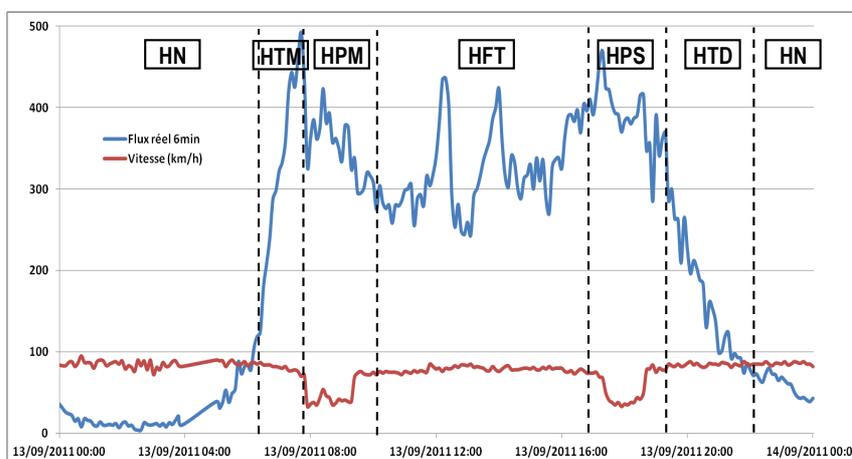


Figure 12 : Données de trafic et vitesse du 13/09/2011 à Echirolles - Est-Ouest

Ces profils caractéristiques permettent d'identifier différentes phases au cours d'une journée type sur la rocade grenobloise :

- Une période nocturne (HN), correspondant à des niveaux bas de trafic, accompagnés d'une vitesse moyenne relativement élevée (fréquemment au-dessus de la limite autorisée).
- Deux périodes de pointe, le matin et le soir (HPM et HPS). Ces périodes correspondent à un flux de trafic élevé (supérieur à 2000 véhicules/heure) et à une vitesse souvent ralentie.
- Deux périodes de transition montante et descendante, le matin et le soir (HTM et HTS). Ces périodes se caractérisent par une augmentation franche (resp. diminution) du flux de trafic.
- Une période de fort trafic (HFT), située entre les deux heures de pointe, où l'on observe une variation de flux assez importante mais très rarement une diminution de la vitesse.

Le week-end, les périodes de pointe sont absentes (sauf exception, cf. Figure 13), mais on retrouve les différentes phases. On peut remarquer des périodes de transition plus progressives.

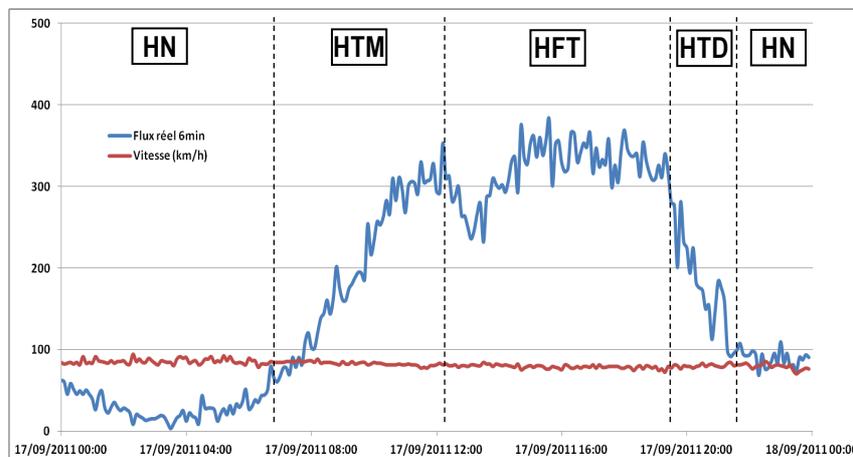


Figure 13 : Données de trafic et vitesses du 17/09/2011 à Echirolles - Est-Ouest

Sur ces bases, on constate qu'il serait pertinent d'envisager un découpage temporel plus fin et approprié, ayant en particulier la capacité d'appréhender les créneaux à basses vitesses, dès lors que ce paramètre (et la congestion) semble être un enjeu de pollution et en tous cas du projet Mocopo.

Nous constatons que les « créneaux » de « réelle congestion » interviennent dès lors que la vitesse moyenne sur 6 minutes passe en dessous de 70 km/h environ. Nous retiendrons en conséquence ce seuil pour définir des phases de réelle congestion. Cette congestion peut cependant être observée sur l'un ou l'autre sens, et pas nécessairement sur les 2 sens de manière concomitante. Nous pourrions définir la situation la plus sévèrement congestionnée comme celle impliquant la congestion dans les 2 sens.

3.3.2.4. Analyses

L'analyse de la variabilité (ou sensibilité) des émissions est envisagée selon les paramètres suivants :

- Variabilité saisonnière : en tenant compte des données de trafic sur quatre saisons du site d'Echirolles.
- Variabilité temporelle (semaine) : en analysant les données d'Echirolles correspondantes.
- Variabilité temporelle (heure de pointe) : en analysant les données d'Echirolles correspondantes.

- Émissions en situation de congestion : au lieu de considérer l'heure de pointe nous considérerons les créneaux de réelle congestion (vitesses inférieures à 70 km/h) ou plus sévèrement (seuil de 40 km/h).
- Variabilité selon le parc : le parc par défaut (Ifsttar 2011) est comparé au parc moyen observé localement (vidéo) et à une combinaison des parcs observés Heure Creuse, Heure de Pointe et Week-end. Pour ce faire, nous avons utilisé les compositions de parc élaborées au chapitre 2. Sur ces bases, nous avons distingué les données heures creuses, heures de pointe et week-ends et effectué les calculs d'émission séparément. Les répartitions par catégories de véhicules (véhicules légers, véhicules utilitaires légers, camions, bus) ont été fixées selon les compositions de parc réellement observées par vidéo. Par contre les distributions des véhicules d'une catégorie selon les technologies, réglementations, etc. sont fixées par la composition unique de parc et ne varient en conséquence pas à chaque pas de 6 minutes. On notera également que le calcul d'émission requiert une estimation des kilométrages totaux des véhicules, pour le calcul de la dégradation des émissions. Ne disposant pas par l'observation de cette information, nous reprendrons les estimations nationales (parc Ifsttar 2011).

Par ailleurs une analyse des résultats d'émissions selon la qualité des données de trafic (liée au pas de temps) sera effectuée. Dans ce but, on intègre les données 6 minutes à des intervalles de 15 minutes et 1h, en utilisant la date des informations. On répartit ainsi les créneaux 6 minutes vers les créneaux 15 minutes (avec répartition entre 2 créneaux « 15 minutes » différents de un créneau 6 minutes sur 3), et vers les créneaux 1 heure (10 créneaux 6 min).

- Analyse selon les sites ou points de mesure : la comparaison des sites d'Eybens, du Rondeau avec le site d'Echirolles a été faite avec l'approche MOCAT en raison de l'intérêt d'analyser l'exposition des populations riveraines (lien avec la modélisation de la qualité de l'air). Elle n'a pas été faite dans le cadre des analyses de sensibilité effectuées avec CopCETE, car elle ne conduit in fine qu'à comparer les trafics et conditions de trafic sur ces différents sites (non connaissance du parc local).

Par ailleurs diverses analyses de sensibilité sont effectuées :

- sensibilité aux paramètres ambiants et de calcul des émissions de démarrage à froid et par évaporation, et poids relatif de ces sur-émissions
- analyse de la variabilité temporelle de la composition du parc (trafic de véhicules utilitaires et PL, taux de Diesel, et taux de véhicules récents), et incidence sur les estimations d'émissions.

4. Analyse globale des émissions

4.1. Analyse sectorielle (MOCAT)

Une première analyse sectorielle des émissions 2010 sur les communes traversées par la rocade sud de Grenoble (Echirolles, Eybens, Gières, Meylan et St-Martin d'Hères) a été réalisée à partir du cadastre régional des émissions. La figure suivante montre que le transport routier est le premier contributeur de NOX (80%) et PM10 (33%). La part de la rocade sud dans ces émissions routières est d'environ **un tiers**.

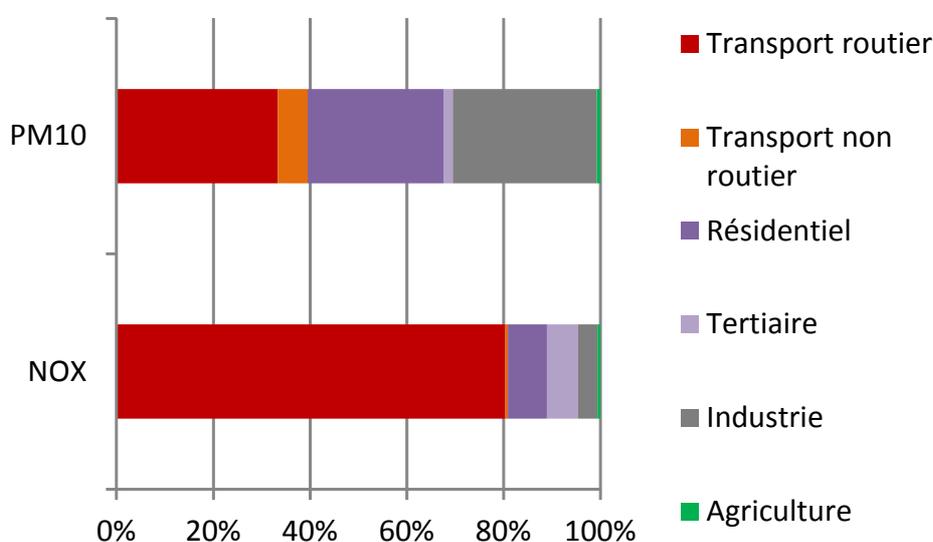


Figure 14 : Bilan des émissions 2010 sur les cinq communes traversées par la rocade sud de Grenoble – Source : Air Rhône-Alpes version 2012-2.

4.2. Résultats détaillés par site et campagne d'expérimentation

Une première analyse spatio-temporelle est proposée, sur la base des données 6 mn :

- Comparaison des conditions de trafic et des émissions calculées selon cinq comptages SIREDO répartis le long de la rocade sud.
- Comparaison entre les quatre campagnes saisonnières de mesure de qualité de l'air.

Cette analyse cible trois conditions de trafic et leurs effets sur les émissions :

- Trafic **fluide** : vitesse moyenne supérieure à 70 km/h ;
- Trafic **faiblement congestionné** : vitesse comprise entre 40 et 70 km/h ;
- Trafic **fortement congestionné** : vitesse moyenne inférieure à 40 km/h.

4.2.1. Comparaison entre sites

Les trois paramètres étudiés selon les conditions de trafic sont illustrés Figure 15 :

- Temps passé : pourcentage de données 6 mn répondant aux critères de congestion
- Trafic total : répartition du volume de trafic détecté par les boucles de comptages
- Emissions de NO2 : répartition des émissions calculées par MOCAT

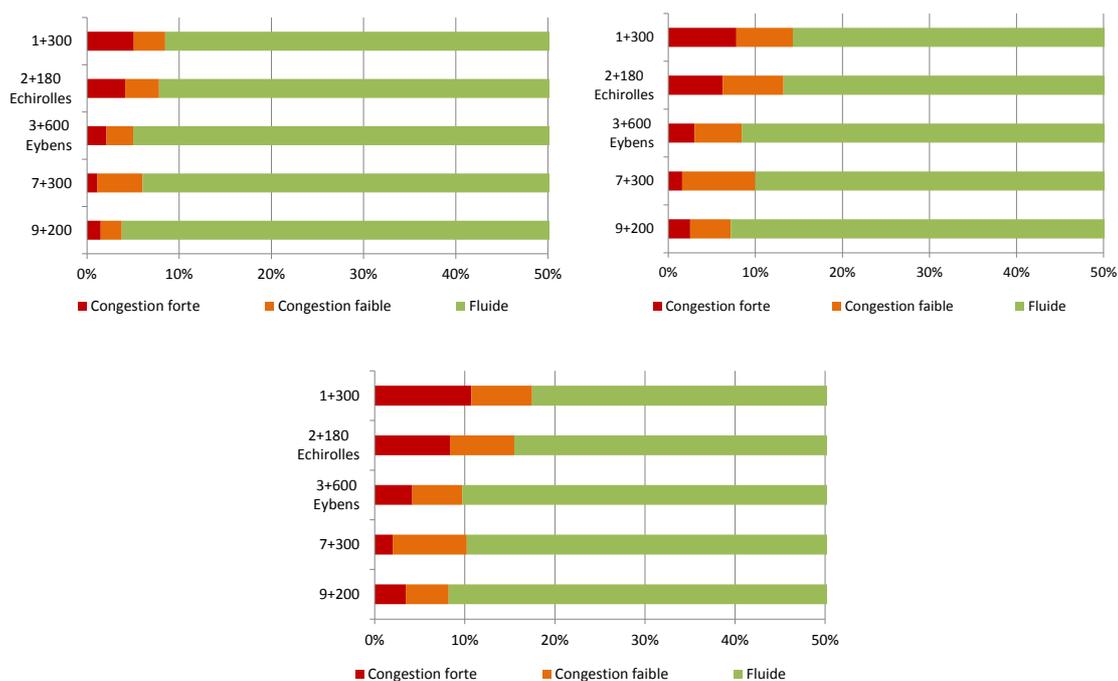


Figure 15 : Répartition par site du temps passé (en haut à gauche), du trafic total (à droite) et des émissions NO2 (en bas) durant les quatre campagnes de mesures de qualité de l'air.

Les sites présentant la plus forte congestion se situent près du Rondeau (dont Echirolles) : la congestion peut atteindre jusqu'à 8,5% du temps, soit 14,3% du trafic et 17,5% des émissions de NO2 (même ordre de grandeur pour les PM10). La forte congestion représente jusqu'à 5.1% du temps, soit 7,8% du trafic et 10,7% des émissions de NO2. **On observe ainsi un facteur 2 entre la part du temps où il y a de la congestion et la contribution des émissions associées à cette congestion.**

4.2.2. Comparaison entre campagnes expérimentales

Une seconde analyse par campagne de mesure est proposée sur les deux sites d'Echirolles et Eybens : C1 correspond à la campagne hivernale (janvier 2011), C2 au printemps (avril 2011), C3 à l'été (juin 2011) et C4 à l'automne (septembre 2011).

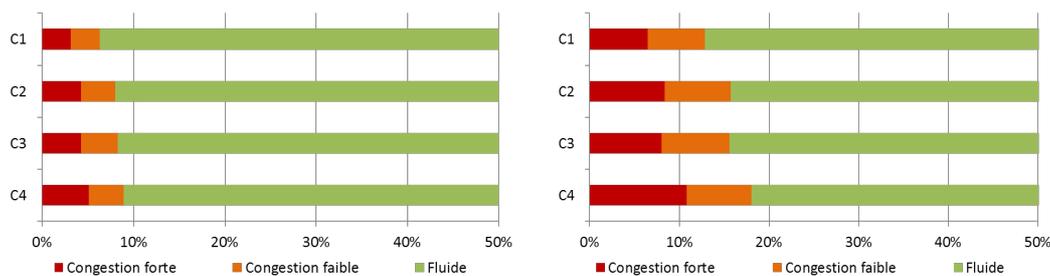


Figure 16 : Répartition à Echirolles du temps passé (à gauche) et des émissions NO2 (à droite) par campagne de mesures de qualité de l'air.

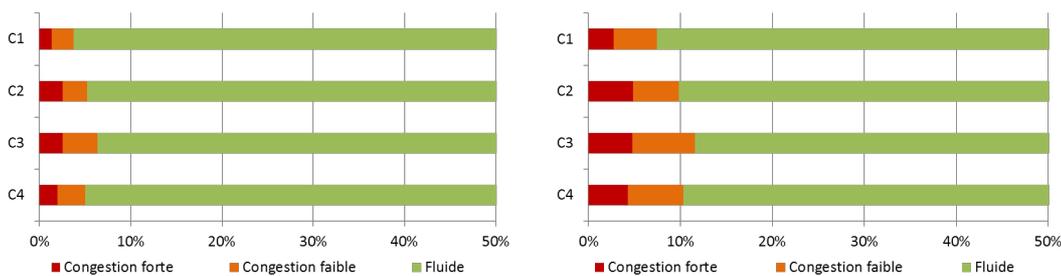


Figure 17 : Répartition à Eybens du temps passé (à gauche) et des émissions NO2 (à droite) par campagne de mesures de qualité de l'air.

La congestion a été la plus importante sur la dernière campagne C4 qui a mobilisé tous les moyens d'instrumentation, et ce quel que soit le site. La forte congestion est davantage présente à Echirolles (50% du temps total de congestion) qu'à Eybens (30%).

Point de comptage	Emissions moyennes de NOx (en g/h/km)	Emissions moyennes de PM10 (en g/h/km)
Le Rondeau – sens Est > Ouest	1 716	162
Le Rondeau – sens Ouest > Est	1 803	170
Etats Généraux – sens Est > Ouest	1 749	162
Etats Généraux – sens Ouest > Est	1 597	149
Echirolles – sens Est > Ouest	1 592	153
Echirolles – sens Ouest > Est	1 515	144
Eybens – sens Est > Ouest	1 572	150
Eybens – sens Ouest > Est	1 531	147
St Martin d'Hères – sens Est > Ouest	1 425	136
St Martin d'Hères – sens Ouest > Est	1 415	134
Meylan – sens Est > Ouest	1 333	128
Meylan – sens Ouest > Est	1 292	125

Tableau 22 : Emission par poste de comptage et sens de circulation

Comme les données trafic sont fournies, toutes les heures pour les 2 sens de circulation, en 6 points de mesure le long de la Rocade Sud, les émissions horaires moyennes de chacun de ces comptages peuvent être fournies pour les PM10 et les NOx. Les résultats présentés Figure 14 correspondent à un calcul horaire MOCAT à partir du parc national IFSTTAR sur les 4 campagnes de mesure.

Au niveau du Rondeau, les émissions sont les plus élevées en NOx et en PM10. A l'inverse, c'est à Meylan que les émissions horaires moyennes sont les plus faibles.

4.3. Profils horaires d'émission selon le jour de la semaine

Une analyse des profils horaires d'émissions a été réalisée pour chaque jour de la semaine. Tous les graphes suivants sont présentés en heure locale. Pour plus de facilité, les données de la campagne d'hiver ont été exclues. Cependant, la pertinence statistique est conservée puisque pour les données horaires, on travaille à partir de près de 1 400 données par point de comptage par sens, ce qui fait un total d'environ 16 000 données.

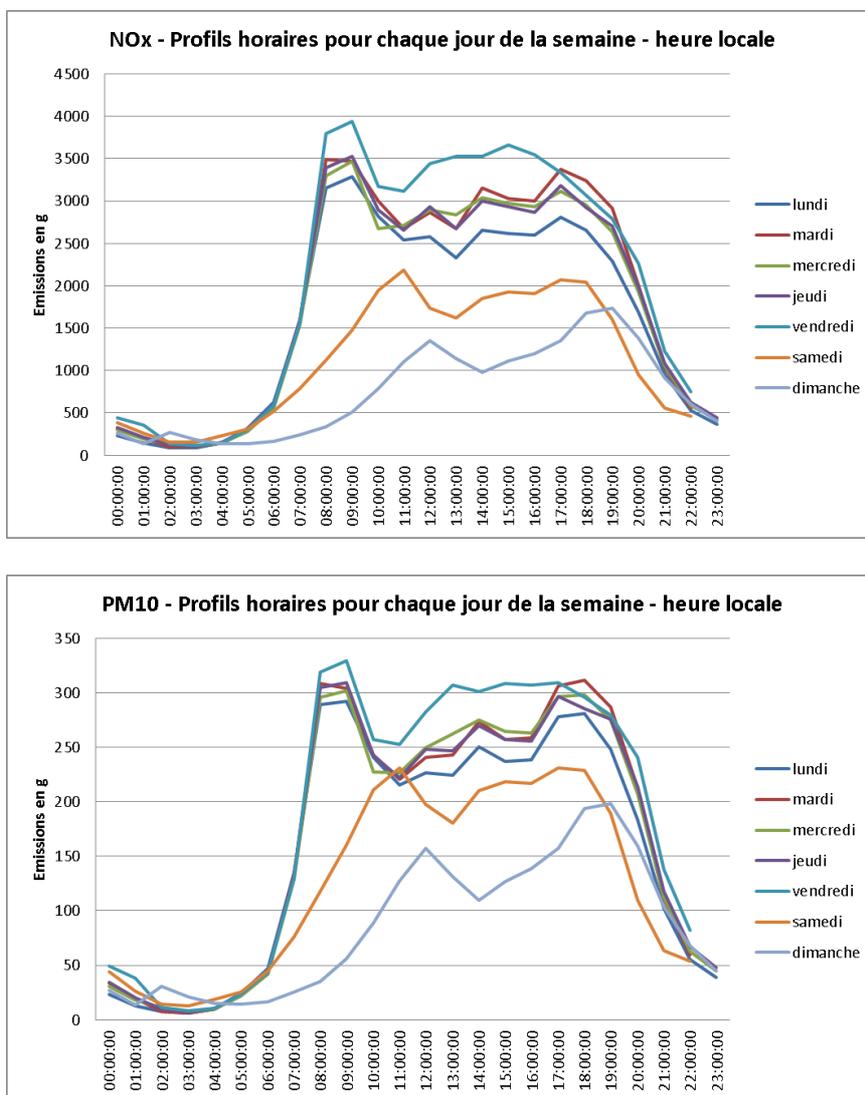


Figure 18 : profils horaires d'émissions de NOx et PM10, selon les jours de la semaine

Pour une meilleure interprétation, les jours de la semaine correspondent à des jours ouvrés hors vacances scolaires. Globalement, quel que soit le polluant, les émissions suivent les mêmes tendances. Pour les jours ouvrés, les courbes ont la même allure : pic d'émissions entre 8 et 9h, puis

diminution et stabilisation des émissions au cours de la journée, nouveau pic vers 17 – 18h (mais moindre que celui du matin) et finalement forte décroissance des émissions pendant la nuit. On note tout de même que le vendredi est plus atypique avec des émissions relativement fortes durant tout l'après-midi. Enfin, pour les 2 jours du week-end, les heures de pointes du matin ont disparu au profit d'un pic en fin de matinée et fin de journée.

Ainsi, il semblerait que les émissions sont fortement corrélées avec le trafic. L'examen des profils horaires journalier du volume tous véhicules et également des véhicules longs permet de confirmer cette hypothèse.

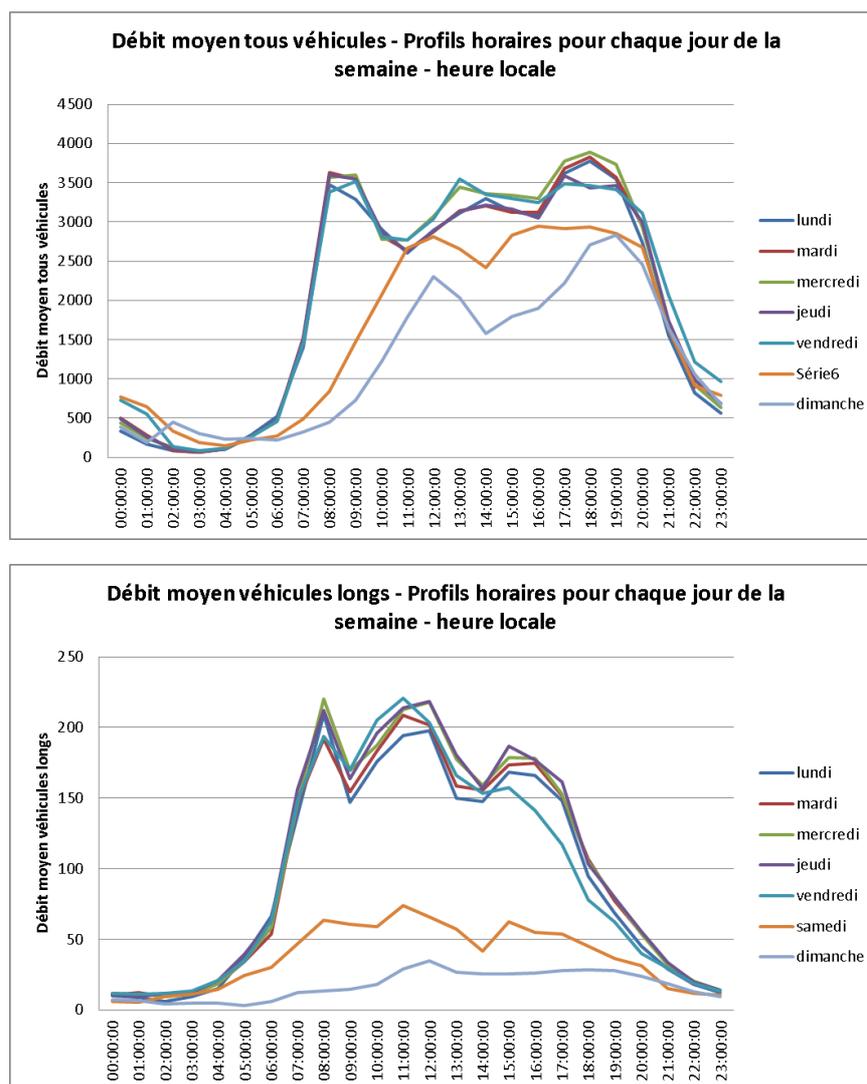


Figure 19 : profils horaires de débits tous véhicules et véhicules longs, selon les jours de la semaine

Comme précédemment, les courbes correspondant aux jours ouvrés sont globalement similaires, avec des pics de trafic associés aux heures de pointe. Au niveau du volume de trafic de l'ensemble des véhicules, le pic de trafic du matin se situe aux alentours de midi pour les jours du week-end. Enfin, pour les poids lourds, la baisse de circulation est très marquée entre les jours de la semaine et les samedis et dimanches : baisse de 70% des véhicules longs entre un lundi 8h et un samedi 8h.

Le dernier paramètre associé aux données trafic utilisé en donnée d'entrée de l'outil MOCAT est la vitesse moyenne des véhicules. Un profil horaire journalier a été calculé.

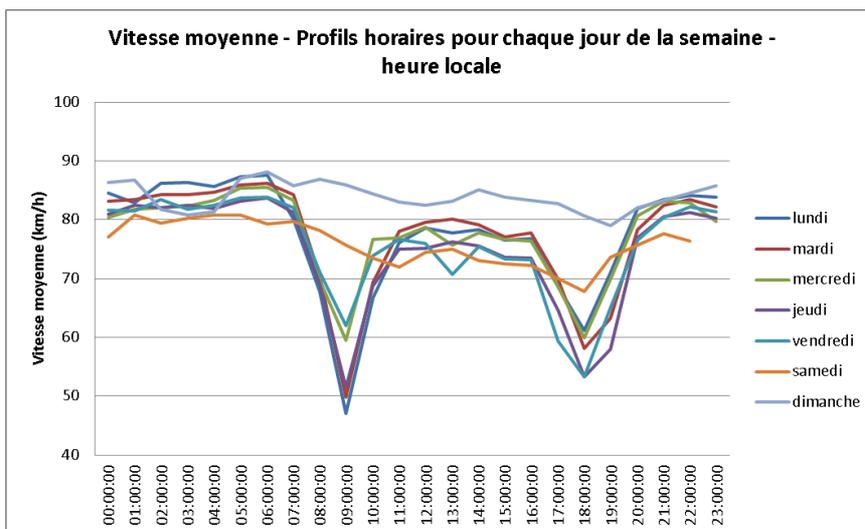


Figure 20 : profils horaires de vitesse tous véhicules, selon les jours

L'allure de ces courbes est totalement cohérente avec le volume total de véhicules : plus il y a de véhicules sur la chaussée, plus la vitesse moyenne est faible.

En première approche, les modulations du trafic, et donc des émissions, pour les jours ouvrés sont équivalentes quel que soit le jour de la semaine considéré, et il est en conséquence légitime d'établir des profils horaires types jours ouvrés / week-end.

5. Analyses détaillées des émissions et facteurs d'émission

5.1. Émissions et facteurs d'émission

Le Tableau 23 récapitule les résultats de simulation des émissions des principaux polluants sur les 2 semaines d'expérimentation (calcul sur données de trafic 6 minutes ; estimation des vitesses des camions selon une loi dynamique ; parc Mocopo observé global). On donne également les volumes de trafic ainsi que leur répartition par catégories de véhicules, ainsi que les vitesses moyennes de circulation.

Globalement, les 2 semaines ne diffèrent que de 1% en ce qui concerne les volumes totaux de trafic (mais la semaine 2 compte cependant un taux presque fois 2 plus élevé de camions / bus). Les vitesses de circulation sont globalement stables et de 69,5 km/h ce qui est relativement élevé. Les vitesses des véhicules légers sont de 69,6 km/h tandis que les véhicules lourds circulent à 66,8 km/h (soit un différentiel de 3 km/h environ). Cette faible différence s'explique par le fait que des nombres importants de véhicules légers circulent lors des épisodes de congestion ou de pointe, tandis que les véhicules lourds circulent plutôt en heures creuses.

	global	semaine 1	semaine 2	Proportions relatives (%)		écart %
				semaine 1	semaine 2	
Trafic (véh.km)	1215273	610819	604454	50,3	49,7	-1,0
CO2 (kg)	233332	112911	120422	48,4	51,6	6,7
CO (kg)	979,0	486,7	492,3	49,7	50,3	1,1
NOx (kg)	981,9	455,9	526,0	46,4	53,6	15,4
COV (kg)	94,8	46,7	48,1	49,3	50,7	2,9
Benzène (kg)	3,61	1,84	1,78	50,8	49,2	-3,2
PM (kg)	119,3	55,3	64,0	46,3	53,7	15,8
CO2 FE (g/véh.km)	192	185	199			7,8
CO FE (g/véh.km)	0,806	0,797	0,814			2,2
NOx FE (g/véh.km)	0,808	0,746	0,870			16,6
COV FE (g/véh.km)	0,078	0,077	0,080			4,0
Benzène FE (g/véh.km)	0,003	0,003	0,003			-2,2
PM FE (g/véh.km)	0,098	0,091	0,106			17,0
Trafic %PL + Bus	4,8	3,6	6,1			72,8
Trafic %VP	79,2	80,2	78,3			-2,4
Trafic %VUL	15,9	16,2	15,6			-4,0
Trafic %Diesel (VP, VUL, PL)	74,9	74,6	75,3			0,8
Vitesses (km/h)	69,5	69,4	69,6			

Tableau 23 : Émissions et facteurs d'émission observés sur les 2 semaines d'expérimentation

Les quantités d'émissions sont assez similaires entre les 2 semaines (1 à 7% d'écarts) sauf pour NOx et PM plus élevés la 2^{ème} semaine en raison d'une plus forte circulation de poids lourds. Compte tenu de volumes de trafic très similaires, les écarts observés sur les quantités d'émissions se retrouvent dans les facteurs d'émissions agrégés sur le trafic et la période : seuls les facteurs

d'émission de NOx et PM sont de 16-17% plus élevés en 2^{ème} semaine, en raison du trafic poids lourds.

Les facteurs d'émission agrégés sur l'ensemble des 2 semaines, des catégories de véhicules et des trafics s'établissent comme suit : 192 g/km de CO2, 0,81 g/km de CO et NOx, 0,08 g/km de COV, 0,1g/km de particules et 0,003g/km de benzène. On notera que les émissions de particules incluent les émissions à l'échappement mais aussi les émissions par usure, frein, pneu.

5.2. Comparaison des sens de circulation

Le Tableau 24 compare les 2 sens de circulation (sur l'ensemble de la période). On observe un trafic sensiblement plus élevé sur Est-Ouest (de 6%), avec des vitesses un peu plus élevées (+2,5 km/h, mais ceci est dû aux véhicules légers), et un taux de poids lourds plus élevé également (5,5% contre 4,2%). On notera que les vitesses moyennes PL sont un peu plus élevées que les vitesses des véhicules légers sur le sens OE. Ceci s'explique par le fait que les camions sont (en proportion) plutôt observés aux heures creuses et donc bénéficient de conditions plus favorables.

		global	sens 1 - OE	sens 2 - EO	Proportions relatives (%)		écart %
					sens 1	sens 2	
Trafic	(véh.km)	1215273	590407	624866	48,6	51,4	5,8
CO2	(kg)	233332	112427	120905	48,2	51,8	7,5
CO	(kg)	979,0	486,1	492,9	49,7	50,3	1,4
NOx	(kg)	981,9	463,2	518,7	47,2	52,8	12,0
COV	(kg)	94,8	46,1	48,7	48,7	51,3	5,5
Benzène	(kg)	3,61	1,80	1,82	49,7	50,3	1,2
PM	(kg)	119,3	56,0	63,3	46,9	53,1	13,0
CO2	FE (g/véh.km)	192	190	193			1,6
CO	FE (g/véh.km)	0,806	0,823	0,789			-4,2
NOx	FE (g/véh.km)	0,808	0,784	0,830			5,8
COV	FE (kg/véh.km)	0,078	0,078	0,078			-0,3
Benzène	FE (g/véh.km)	0,003	0,003	0,003			-4,4
PM	FE (g/véh.km)	0,098	0,095	0,101			6,8
Trafic	%PL + Bus	4,8	4,2	5,5			32,1
Trafic	%VP	79,2	79,5	79,0			-0,6
Trafic	%VUL	15,9	16,4	15,5			-5,1
Trafic	%Diesel (VP, VUL, PL)	74,9	74,8	75,0			0,2
Vitesses	Tous véhicules	69,5	70,7	68,2			
(km/h)	Véhicules légers	69,6	71,0	68,2			
	Camions + bus	66,8	65,1	69,5			

Tableau 24 : Émissions et facteurs d'émission observés selon le sens de circulation

Les quantités de CO2 (qui suivent grossièrement les consommations et donc les volumes de trafic) sont plus élevées dans ce sens (7,5%). On observe également une augmentation des quantités de PM et NOx qui s'explique sans doute par le trafic poids lourds plus élevé.

Les facteurs d'émissions agrégés par sens sont par contre très resserrés (moins de 7% d'écarts entre les 2 sens, principalement liés au trafic poids lourds).

5.3. Analyse selon les jours de semaine

L'analyse selon les jours de la semaine montre des contrastes beaucoup plus forts (Tableau 25). Le week-end représente 24% du trafic total de la semaine (contre 76% pour la semaine), ce qui montre une répartition assez homogène tout au long de la semaine (15% du trafic un jour de semaine, 12% un jour de week-end). Proportionnellement au trafic, les quantités globales d'émissions sont de 67 à 78% plus faibles le week-end, que celles émises sur l'ensemble de la semaine.

Le trafic compte nettement moins de camions / bus et de VUL le week-end (11% au total contre 24% en semaine), et donc également un trafic un peu moins diésélisé (72% au lieu de 76%). Les conditions de circulation sont beaucoup plus favorables le week-end (82 km/h contre 66 km/h en semaine).

Les facteurs d'émission agrégés sur les trafics de semaine et de week-end sont relativement contrastés : de 18% plus faibles le week-end pour CO₂ (et consommation, en raison et d'une moindre proportion de véhicules lourds et peut-être de vitesses plus fluides), -29% pour les NO_x et PM (lié au plus faible taux de Diesel et de camions), -11% de COV, +4% de CO et Benzène.

	global	Semaine	Week-end	Proportions relatives (%)		écart %
				Semaine	Week-end	
Trafic (véh.km)	1215273	927344	287929	76,3	23,7	-69,0
CO ₂ (kg)	233332	185781	47551	79,6	20,4	-74,4
CO (kg)	979,0	740,3	238,7	75,6	24,4	-67,7
NO _x (kg)	981,9	803,5	178,4	81,8	18,2	-77,8
COV (kg)	94,8	74,2	20,6	78,3	21,7	-72,2
Benzène (kg)	3,61	2,73	0,88	75,5	24,5	-67,6
PM (kg)	119,3	97,9	21,5	82,0	18,0	-78,1
CO ₂ FE (g/véh.km)	192	200	165			-17,6
CO FE (g/véh.km)	0,806	0,798	0,829			3,9
NO _x FE (g/véh.km)	0,808	0,866	0,620			-28,5
COV FE (g/véh.km)	0,078	0,080	0,072			-10,6
Benzène FE (g/véh.km)	0,003	0,003	0,003			4,4
PM FE (g/véh.km)	0,098	0,106	0,075			-29,3
Trafic %PL + Bus	4,8	6,0	1,0			-82,9
Trafic %VP	79,2	76,2	89,1			17,0
Trafic %VUL	15,9	17,8	9,9			-44,6
Trafic %Diesel (VP, VUL, PL)	74,9	75,8	72,0			-5,1
Vitesses Tous véhicules (km/h)	69,5	66,4	82,1			
Véhicules légers	66,6	66,4	82,2			
Camions + bus	69,8	66,5	72,4			

Tableau 25 : Émissions et facteurs d'émission observés selon semaine et week-end

La Figure 21 compare les vitesses de circulation selon les jours de la semaine et les catégories de véhicules. On observe un écart très significatif les samedis-dimanches, avec des vitesses des véhicules légers très supérieures à celles des véhicules lourds. En semaine, les vitesses sont légèrement supérieures le mercredi et plus faibles les jeudis et vendredis. Les vitesses globales suivent très précisément les vitesses des véhicules légers, ceux-ci étant en très grande proportion.

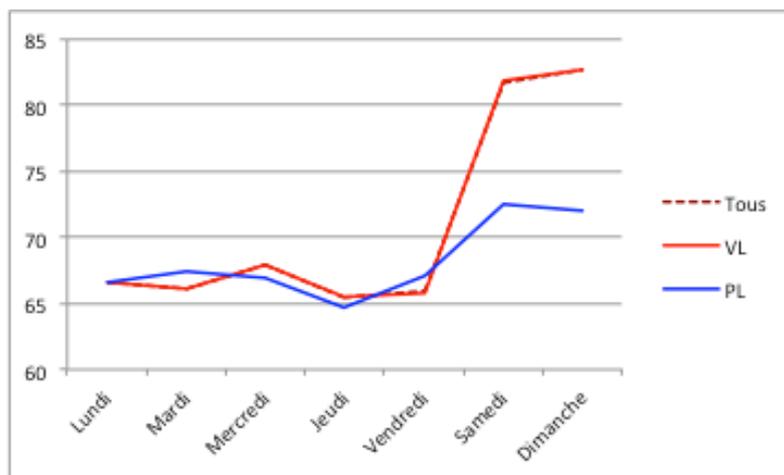


Figure 21 : Vitesses moyennes véhicules légers, lourds et tous selon le jour de la semaine

Selon les jours de la semaine, tous les facteurs d'émissions sont plus faibles et quasiment équivalents les samedis et dimanches, sauf le CO (quasi stable et un peu plus élevé le week-end en raison d'un trafic plus élevé de véhicules essence). Les écarts entre les minis et maxis sont de l'ordre de 25% pour CO₂ (163g/km le dimanche, 204 g/km le mardi), et de 50% pour les oxydes d'azote NO_x et particules (0,6 à 0,88 g/km NO_x, et 0,07 à 0,11 g/km PM). Ces écarts importants trouvent leur justification dans la différence de composition du parc (en catégories de véhicules).

5.4. Analyse selon les heures de la journée

On compare ici les heures de pointe (7-9h et 16-19h) et heures creuses de semaines seulement (lundi à vendredi), cette distinction ayant peu de sens pour les samedis-dimanches. Les heures de pointe représentent globalement 21% de la journée (5h / 24h) et 36% du trafic, tandis que les heures creuses représentent 79% du temps et 64% du trafic. Cela signifie que les heures creuses représentent un réel enjeu en matière de pollution car les quantités émises au cours de ces périodes sont très significatives et supérieures à ce que représentent les heures de pointe (respectivement entre 60-68% contre 32-40%).

Le trafic poids lourds est inférieur en heure de pointe (4% contre 7% en heures creuses), mais on n'observe pas de différences concernant les véhicules utilitaires légers (environ 18%). Les vitesses moyennes de circulation sont de l'ordre de 51 km/h en heure de pointe contre 80 km/h en heures creuses, soit un différentiel de près de 30 km/h (supérieur à celui observé entre semaine et week-end).

Paradoxalement, malgré cet écart très important des vitesses, les facteurs d'émissions de CO₂ sont quasiment équivalents (200 g/km). Les COV et le benzène sont plus élevés en heure de pointe (+17 et +25%), car liés aux véhicules essence et aux plus faibles vitesses. Par contre les émissions de NO_x et de particules sont globalement plus faibles à l'heure de pointe (moindre proportion de camions, et vitesses moyennes inférieures sans être critiques).

Global - semaine			HC	HP	Proportions relatives (%)		écart %
					HC	HP	
Trafic (véh.km)		927344	597689	329655	64,5	35,5	-44,8
CO2 (kg)		185781	119806	65975	64,5	35,5	-44,9
CO (kg)		740,3	478,1	262,2	64,6	35,4	-45,2
NOx (kg)		803,5	535,6	267,9	66,7	33,3	-50,0
COV (kg)		74,2	45,1	29,1	60,7	39,3	-35,4
Benzène (kg)		2,73	1,62	1,11	59,3	40,7	-31,3
PM (kg)		97,9	66,5	31,4	68,0	32,0	-52,8
CO2 FE (g/véh.km)		200	200	200			-0,2
CO FE (g/véh.km)		0,798	0,800	0,795			-0,6
NOx FE (g/véh.km)		0,866	0,896	0,813			-9,3
COV FE (g/véh.km)		0,080	0,075	0,088			17,2
Benzène FE (g/véh.km)		0,003	0,003	0,003			24,6
PM FE (g/véh.km)		0,106	0,111	0,095			-14,5
Trafic %PL + Bus		6,0	7,0	4,3			-38,1
Trafic %VP		76,2	75,3	77,8			3,4
Trafic %VUL		17,8	17,8	17,9			0,4
Trafic %Diesel (VP, VUL, PL)		75,8	76,1	75,3			-1,1
Vitesses Tous véhicules (km/h)		66,4	79,9	51,0			
Véhicules légers		66,4	80,4	51,0			
Camions + bus		66,5	73,5	52,3			

Tableau 26 : Émissions et facteurs d'émission observés selon heures creuses et heures de pointe en semaine

Contrairement à certaines idées reçues, on observe donc ici à la fois l'enjeu des heures creuses (en quantités globales d'émissions) et le fait qu'elles ne devraient pas être causes de surémissions spécifiques par les vitesses plus faibles. Seul le volume important de trafic contribuerait en fait à augmenter la pollution au cours de ces périodes.

En Annexe 4, on observe la variabilité des émissions de NOx au cours des heures et journées de la semaine. Globalement, on observe de fortes disparités entre le week-end et les jours de semaine, avec des écarts d'émissions de 25 à 40 %. Les jours de semaine, l'allure générale des courbes reste très proche et suit l'évolution du trafic.

5.5. Émissions de polluants et épisodes de congestion

Afin d'aller plus loin dans la compréhension des émissions et de la congestion, nous envisageons celle-ci au travers d'autres critères que les seules heures de pointe de semaine. Il serait en effet possible de considérer les heures « critiques » selon le dépassement d'un seuil de niveau de trafic ou de taux d'occupation des voies, d'un seuil de pollution, ou encore une circulation en-dessous d'un seuil de vitesse.

La définition d'un seuil de vitesse nous semble le critère le plus pertinent pour faire cette analyse. Le seuil de 70 km/h est généralement utilisé par les gestionnaires de trafic, mais nous considérerons également un seuil de 40 km/h comme explicité antérieurement.

5.5.1. Émissions moyennes horaires

Sur un jour ouvré, la congestion au seuil de 70 km/h représente en moyenne 4h (soit 17% des observations), étalées de 8h à 9h et de 16h à 19h. En revanche, en considérant des données 6

minutes, les périodes de congestion couvrent 20% de la journée. La vitesse moyenne la plus faible se retrouve à l'heure de pointe du matin, entre 8h et 9h, autour de 55 km/h. De plus, sur cette heure-là, en moyenne, il y a 3 500 véhicules/h sur la rocade. Par comparaison, en moyenne sur un dimanche, la vitesse moyenne la plus faible est de 79 km/h, entre 18 h et 19h, et le trafic est d'environ 2 700 véhicules/h.

Si on fait la moyenne des émissions en période de congestion comparée à des phases de trafic fluide, on obtient le bilan donné en Tableau 27.

POUR UNE JOURNEE	En période de congestion	Avec un trafic fluide
<i>Nombre de données horaires</i>	4	20
émission moyenne de NOx	2 874 g/h	1 479 g/h
émission moyenne de PM10	282 g/h	136 g/h
<i>Nombre de données 6 minutes</i>	49	191
émission moyenne de NOx	2 600 g/h	1 270 g/h
émission moyenne de PM10	260 g/h	120 g/h

Tableau 27 : Émissions moyennes horaires en congestion (<70km/h) et fluide

Au global, on a quasiment 2 fois plus d'émissions en période de congestion qu'en temps normal. En s'intéressant à un jour ouvré type, on peut distinguer - toujours par la vitesse moyenne des véhicules -, différentes heures caractéristiques : heures de pointe du matin et du soir entre 8h et 9h et entre 17h et 18h, heure creuse de jour entre 11h et 12h, heure creuse de nuit entre 4h et 5h.

La Figure 22 illustre les ratios entre les quantités d'émissions relatives à ces différentes heures caractéristiques, qu'il convient de mettre en regard avec les volumes de trafics tous véhicules et des poids lourds (Figure 23).

L'heure de pointe du matin (HPM) présente des taux d'émissions (horaires) plus élevés que l'heure de pointe du soir (HPS), en raison d'une baisse du nombre de poids lourds en fin de journée, malgré une augmentation globale du trafic. La comparaison des deux extrêmes (HPM et la nuit) montre qu'au cours de 24h (pour un jour ouvré), il y a un rapport de 13 entre les quantités d'émissions horaires, qui sont la conséquence d'une très grande différence de trafic entre ces 2 périodes.

Pour les week-ends, les extrêmes sont les périodes 5-6h et 18-19h. Les émissions horaires de NOx et PM10 varient respectivement dans des rapports de 8 et 10 entre ces 2 périodes, alors que le volume de trafic est multiplié par 11.

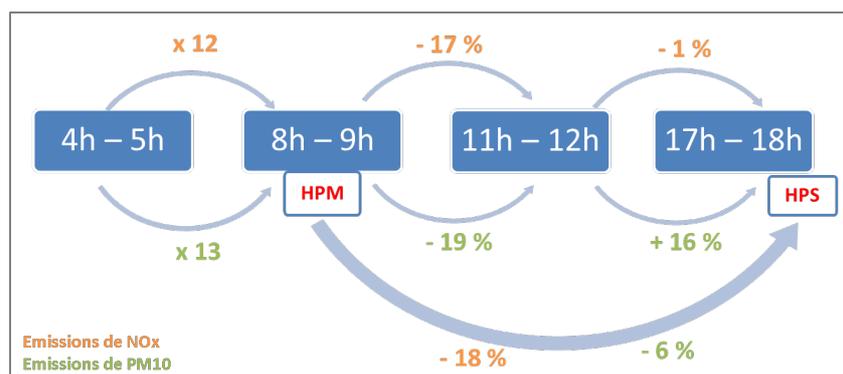


Figure 22 : Ratios d'évolution des émissions NOx et PM10 entre différentes périodes de la journée

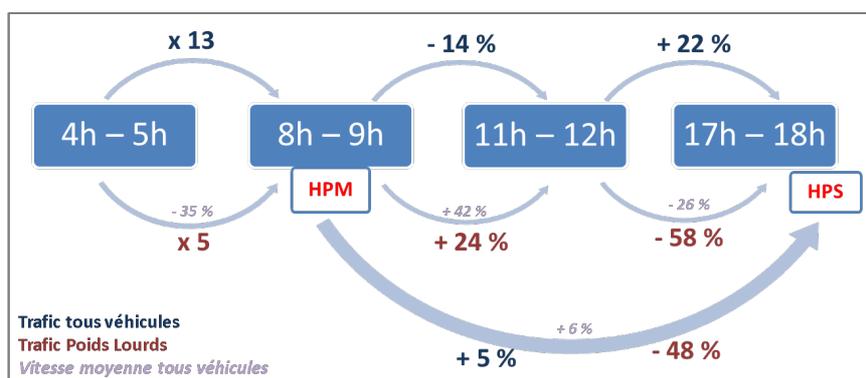


Figure 23 : Ratios d'évolution des trafics TV et PL entre différentes périodes de la journée

5.5.2. Analyse détaillée des émissions liées aux phénomènes de congestion

Dans ce qui suit, nous quantifierons précisément les différentes émissions en et hors congestion lors des 2 semaines d'expérimentation (analysées au pas de 6 minutes), et évaluerons les facteurs d'émissions spécifiques du trafic en analysant également les conditions de circulation et trafics selon les différentes catégories de véhicules. Nous considérerons la congestion définie lorsque la vitesse décroît en-dessous de 70 km/h, puis en prenant un seuil de 40 km/h.

Au total, ces créneaux de vitesses inférieures à 70 km/h représentent 8,4% de l'ensemble des créneaux de 6 min (et donc de la période d'expérimentation). C'est donc relativement peu. Ces créneaux représentent cependant 48% des heures de pointe de semaine (donc quasiment la moitié des heures de pointe peut être considérée comme congestionnée avec ce critère), 1,7% des heures creuses, et 0,8% du week-end (15 observations sur les 2 semaines d'expérimentation).

Les créneaux à moins de 70 km/h représentent 15% du trafic total (Tableau 28), et sont responsables de 15 à 20% des quantités d'émission. On observe ici également que le trafic congestionné ne représente qu'une part relativement limitée des quantités de polluants (les périodes hors congestion représentant 3 à 5 fois plus).

	global	Congestion	Non congestion	Proportions relatives (%)		écart %
				Congestion	Non congestion	
Trafic (véh.km)	1215273	180844	1034429	14,9	85,1	472,0
CO2 (kg)	233332	39158	194174	16,8	83,2	395,9
CO (kg)	979,0	153,0	826,0	15,6	84,4	440,0
NOx (kg)	981,9	156,6	825,3	16,0	84,0	426,9
COV (kg)	94,8	19,0	75,9	20,0	80,0	300,3
Benzène (kg)	3,61	0,72	2,89	20,0	80,0	299,0
PM (kg)	119,3	17,2	102,1	14,4	85,6	494,1
CO2 FE (g/véh.km)	192	217	188			-13,3
CO FE (g/véh.km)	0,806	0,846	0,799			-5,6
NOx FE (g/véh.km)	0,808	0,866	0,798			-7,9
COV FE (g/véh.km)	0,078	0,105	0,073			-30,0
Benzène FE (g/véh.km)	0,003	0,004	0,003			-30,3
PM FE (g/véh.km)	0,098	0,095	0,099			3,9
Trafic %PL + Bus	4,8	4,1	5,0			20,0
Trafic %VP	79,2	78,2	79,4			1,5
Trafic %VUL	15,9	17,6	15,6			-11,4
Trafic %Diesel (VP, VUL, PL)	74,9	75,2	74,9			-0,4
Vitesses Tous véhicules (km/h)	69,5	37,2	81,7			
Véhicules légers	69,6	37,2	82,1			
Camions + bus	66,8	37,3	75,3			

Tableau 28 : Émissions et facteurs d'émission observés selon les épisodes de congestion (seuil de 70 km/h)

La part des camions / bus lors de ces épisodes est légèrement inférieure (4 contre 5%). Les vitesses sont nettement inférieures, en moyenne 37 km/h contre 82 km/h, soit un écart de 45 km/h.

En terme d'émissions spécifiques, le facteur d'émission de CO2 hors congestion est de 13% inférieur à celui observé en congestion (en raison de vitesses plus fluides), mais on observera que cet écart n'est pas à la hauteur de celui entre les vitesses. Ceci s'explique sans doute par la forme assez plate des fonctions d'émissions autour de ces plages de vitesses (40-80 km/h). COV et Benzène sont de 30% inférieurs hors congestion ce qui semble s'expliquer par les plus faibles vitesses et par une plus forte proportion de véhicules légers essence aux heures de pointe. Les émissions de particules sont faiblement plus élevées hors congestion (+4%, par le trafic poids lourd) tandis que les émissions de NOx sont plus faibles (-8%, par des conditions plus fluides et un taux moindre de véhicules Diesel).

Le Tableau 29 reproduit les résultats précédents en prenant un seuil plus sévère à 40 km/h. Les créneaux concernés représentent 5,4% de la période d'expérimentation, 31% des heures de pointe de semaine (1/3 des heures de pointe est congestionné avec ce critère), 1% des heures creuses, et 0,7% du week-end (13 observations). Ces créneaux représentent 9% du trafic et 9 à 13% des quantités de polluants émises.

La part des camions / bus lors de ces épisodes est quasiment équivalente à la normale. Les vitesses sont nettement inférieures, en moyenne 31 km/h contre 79 km/h, soit un écart de 48 km/h.

En terme de facteurs d'émissions, les écarts sont ici plus significatifs. Ainsi les facteurs d'émissions de CO2 sont de 22% plus faibles hors congestion (188 g/km contre 240 g/km en congestion). Les émissions de NOx sont de 19% inférieures hors congestion, les émissions de particules de 5% inférieures seulement.

	global	Congestion	Non congestion	Proportions relatives (%)		écart %
				Congestion	Non congestion	
Trafic (véh.km)	1215273	102924	1112349	8,5	91,5	980,7
CO2 (kg)	233332	24593	208739	10,5	89,5	748,8
CO (kg)	979,0	96,5	882,5	9,9	90,1	814,6
NOx (kg)	981,9	100,3	881,6	10,2	89,8	778,9
COV (kg)	94,8	12,3	82,5	12,9	87,1	572,3
Benzène (kg)	3,61	0,47	3,15	12,9	87,1	575,3
PM (kg)	119,3	10,6	108,7	8,9	91,1	926,1
CO2 FE (g/véh.km)	192	239	188			-21,5
CO FE (g/véh.km)	0,806	0,938	0,793			-15,4
NOx FE (g/véh.km)	0,808	0,975	0,793			-18,7
COV FE (g/véh.km)	0,078	0,119	0,074			-37,8
Benzène FE (g/véh.km)	0,003	0,005	0,003			-37,5
PM FE (g/véh.km)	0,098	0,103	0,098			-5,1
Trafic %PL + Bus	4,8	5,1	4,8			-4,8
Trafic %VP	79,2	77,9	79,4			1,9
Trafic %VUL	15,9	17,1	15,8			-7,3
Trafic %Diesel (VP, VUL, PL)	74,9	75,3	74,9			-0,6
Vitesses Tous véhicules (km/h)	69,5	30,5	78,6			
Véhicules légers	69,6	30,3	78,9			
Camions + bus	66,8	35,0	73,1			

Tableau 29 : Émissions et facteurs d'émission observés selon les épisodes de congestion (seuil de 40 km/h)

Les épisodes de congestion tels qu'analysés précédemment conduisent à des quantités d'émission significatives (15 à 20% dans le premier cas, 10 à 13% dans le second) en lien avec les trafics concernés, mais pas majoritaires.

Malgré des différentiels élevés de vitesse (facteur supérieur à 2), correspondant à des conditions de circulation très contrastées, l'influence reste relativement limitée au niveau des facteurs d'émissions spécifiques (g/veh.km), avec des différences de quelques pourcents à 30-40% selon les polluants). Ceci tient en particulier au fait que les vitesses sont exceptionnellement très basses (en occurrence ou telles qu'elles peuvent être mesurées par les capteurs de trafic), et que sur des plages de vitesses relativement élevées (40-90 km/h) les fonctions d'émission varient assez peu (cf. Figure 6). Ces résultats montrent que le potentiel de réduction globale des émissions par la diminution de la congestion est sans doute assez limité.

L'enjeu de réduction temporaire des émissions (aux heures de pointe) peut cependant être plus conséquent aux heures de pointe. C'est pourquoi nous analysons ci-après le différentiel congestion-non congestion sur les seules heures de pointe de semaine (Tableau 30). Ce sont alors 48% du trafic et 47-57% des quantités émises qui sont concernées par la congestion. Les écarts entre les facteurs d'émission en congestion et hors restent modérés (surémission de 13-14% et CO et CO₂, de 9% en NO_x, 30-32% en COV, 4% en particules) et cependant les conditions non congestionnées sont proches de celles identifiées précédemment (77 km/h en moyenne). Les réductions d'émission qui pourraient être obtenues par résorption partielle ou totale de la congestion au cours des heures de pointe seraient donc à hauteur d'environ 50% des écarts entre les facteurs d'émission, soit de l'ordre de 6-7% pour CO et CO₂, 2-4% en NO_x et particules, 15-16% en COV. Les enjeux de santé publique étant actuellement focalisés sur NO_x et PM, on constate que les gains seraient très limités même à l'heure de pointe.

		Heures de pointe	Congestion	Non congestion	Proportions relatives (%)		écart %
					Congestion	Non congestion	
Volume de trafic	(véh.km)	329655	156651	173004	47,5	52,5	10,4
CO2	(kg)	65975	33798	32177	51,2	48,8	-4,8
CO	(kg)	262,2	133,2	129,0	50,8	49,2	-3,2
NOx	(kg)	267,9	133,5	134,5	49,8	50,2	0,8
COV	(kg)	29,1	16,5	12,6	56,6	43,4	-23,4
Benzène	(kg)	1,11	0,64	0,48	57,2	42,8	-25,2
PM	(kg)	31,4	14,6	16,7	46,6	53,4	14,6
CO2	FE (g/véh.km)	200	216	186			-13,8
CO	FE (g/véh.km)	0,795	0,851	0,745			-12,4
NOx	FE (g/véh.km)	0,813	0,852	0,777			-8,8
COV	FE (g/véh.km)	0,088	0,105	0,073			-30,7
Benzène	FE (g/véh.km)	0,003	0,004	0,003			-32,3
PM	FE (g/véh.km)	0,095	0,093	0,097			3,8
Vitesses	Tous véhicules	51,0	36,6	77,3			
(km/h)	Véhicules légers	51,0	36,6	77,5			
	Camions + bus	52,3	36,8	73,5			

Tableau 30 : Émissions et facteurs d'émission observés selon les épisodes de congestion (seuil de 70 km/h) en heures de pointe seulement

5.5.3. Conclusions

Les épisodes de congestion tels qu'analysés précédemment conduisent à des quantités d'émission significatives mais non majoritaires (15 à 20% dans le premier cas, 10 à 13% dans le second) en lien avec les trafics concernés.

L'analyse des conditions de circulation en et hors congestion montre que, malgré des différentiels élevés de vitesse (facteur supérieur à 2) et des conditions de circulation très contrastées, on obtient des écarts limités au niveau des facteurs d'émissions spécifiques (quantité par véhicule et par km) de l'ordre de quelques pourcents à 30-40% selon les polluants. Ceci tient au fait que les vitesses sont exceptionnellement très basses (en occurrence ou telles qu'elles peuvent être mesurées par les capteurs de trafic), et que sur des plages de vitesses rencontrées (40-90 km/h) les fonctions d'émission varient peu (cf. Figure 6). Ces résultats montrent que le potentiel de réduction globale des émissions par la diminution de la congestion est assez limité.

Rapportée aux seules heures de pointe, la congestion représente alors près de 50% des trafics et des émissions. Les gains escomptés par réduction de la congestion demeurent cependant assez limités (2 à 4% pour NOx et PM, 7% pour CO2, 15% pour les COV) en raison des faibles variations des facteurs d'émissions dans ces plages de vitesse.

Ces résultats peuvent cependant être discutables au regard de 2 aspects :

- la capacité des mesures de trafic au pas de temps de 6 minutes à appréhender la dynamique du trafic et notamment les vitesses les plus faibles. Rappelons qu'un créneau de 6 minutes est équivalent à une distance de 7 km aux vitesses moyennes observées. Ces pas en temps et distance ne permettent pas une observation fine ou microscopique du trafic.
- La capacité des modèles d'émission (approche vitesse moyenne) à appréhender correctement les basses vitesses et la dynamique de la congestion (si les données de trafic le permettaient).

6. Influence du parc automobile

L'analyse des émissions issues de MOCAT selon le parc utilisé montre que le parc local génère des émissions horaires un peu plus élevées, du fait d'un parc local un peu plus âgé des voitures et des poids lourds (Figure 24).

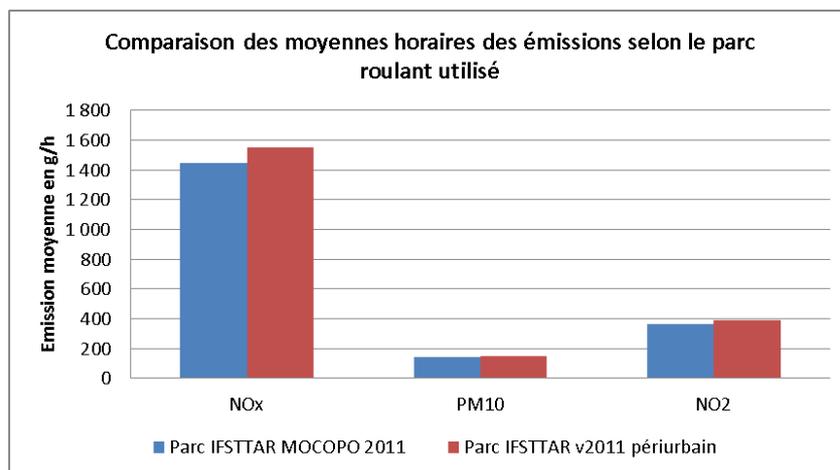


Figure 24 : comparaison des émissions entre le parc national et le parc local issu de l'expérimentation par CLAP

6.1. Émissions selon les catégories de véhicules

On a pu observer dans les analyses précédentes l'influence forte de la composition du parc sur les émissions, influence souvent plus forte que celle liée aux conditions de circulation (vitesses de circulation). En conséquence, on propose ci-après une analyse des émissions selon les différentes catégories de véhicules (Tableau 31 et Tableau 32).

On observe que les voitures particulières Diesel représentent plus de la moitié du trafic (54%) et 44% de l'émission de CO₂, et les voitures essence environ un quart du trafic et 20% de l'émission. Les véhicules utilitaires sont principalement Diesel (16% de VUL, 5% de PL). On notera la forte contribution du trafic PL (et bus) qui ne représente que 5% du trafic mais 18% de l'émission de CO₂. Le facteur d'émission moyen du trafic est de 192 g/km ; il est d'environ 150-160 pour les voitures, de 220-250 pour les VUL, et de 700-800 pour les véhicules lourds.

Le facteur d'émission des voitures augmente de 156 à 191 g/km pour une congestion en dessous de 40 km/h (+22%) et de 694 à 902 g/km pour camions/bus (+30%).

Les heures de pointe se différencient du global par une augmentation de 5% du facteur d'émission des voitures, et de 10% des camions/bus.

	% trafic	facteur d'émission CO2 (g/km)				
		% émission	Global	Heures de pointe	Congestion (70 km/h)	Congestion (40 km/h)
VP Diesel	54,5	43,8	154	162	174	186
VP essence	24,1	20,0	159	169	185	202
VP Hybride	0,1	0,1	107	103	100	101
VP GPL	0,5	0,4	158	159	165	174
VUL Diesel	15,6	17,9	220	222	235	259
VUL Essence	0,4	0,5	248	279	331	373
VUL elec	0,0	0,0	0	0	0	0
PL (Hors TC)	4,7	16,9	691	759	877	900
Bus	0,1	0,6	823	868	945	986
VP	79,2	64,2	156	164	177	191
VUL	15,9	18,3	221	223	237	262
PL+Bus	4,8	17,5	694	762	879	902
Diesel (tous)	74,9	79,1	203	210	226	251
Tous véhicules	100,0	100,0	192	200	217	239

Tableau 31 : Contributions des catégories de véhicules au trafic, aux émissions de CO2 et facteurs d'émissions globaux, heure de pointe et congestion

	% trafic	NOx % émission	facteur d'émission (g/km)		PM % émission	facteur d'émission (g/km)	
			Global	Congestion (40 km/h)		Global	Congestion (40 km/h)
VP Diesel	54,5	38,6	0,572	0,693	41,3	0,074	0,078
VP essence	24,1	14,6	0,489	0,371	11,2	0,046	0,046
VP Hybride	0,1	0,0	0,017	0,008	0,1	0,044	0,044
VP GPL	0,5	0,1	0,142	0,126	0,2	0,045	0,046
VUL Diesel	15,6	15,5	0,804	0,954	14,6	0,092	0,088
VUL Essence	0,4	0,3	0,641	0,565	0,2	0,052	0,052
VUL elec	0,0	0,0	0,000	0,000	0,0	0,050	0,050
PL (Hors TC)	4,7	30,0	5,145	6,944	31,6	0,659	0,695
Bus	0,1	1,0	6,250	8,385	0,9	0,653	0,683
VP	79,2	53,3	0,543	0,591	52,7	0,065	0,068
VUL	15,9	15,8	0,800	0,945	14,8	0,091	0,088
PL+Bus	4,8	31,0	5,175	6,981	32,4	0,659	0,694
Diesel (tous)	74,9	85,0	0,917	1,173	88,3	0,116	0,121
Tous véhicules	100,0	100,0	0,808	0,975	100,0	0,098	0,103

Tableau 32 : Contributions des catégories de véhicules au trafic, aux émissions de CO2 et facteurs d'émissions globaux, heure de pointe et congestion

Concernant les oxydes d'azote NOx et particules (Tableau 32), les véhicules lourds représentent plus de 30% de l'émission (pour seulement 5% du trafic), et les véhicules utilitaires légers en représentent encore 15-16%. Les voitures émettent un peu plus de la moitié des NOx et PM (53%), dont 39-41% par les seules voitures Diesel. On observe donc ici l'influence prédominante des véhicules lourds sur ces polluants, et pour lesquels les facteurs d'émissions spécifiques (5,2 g/km de NOx, 0,7 g/km de PM) sont environ 10 fois supérieurs à ceux des voitures (0,5 et 0,7 g/km respectivement).

La congestion (en dessous de 40km/h) augmente les facteurs d'émission de NOx de l'ensemble du trafic d'environ 20%, mais celui des seuls véhicules lourds de 35% (7 versus 5,2 g/km), tandis que ceux des voitures n'augmentent que de 9%. Les facteurs d'émission de PM (y compris usure) n'augmentent globalement que de 5% avec la congestion, de même que pour les seules voitures ou les camions.

On constate donc ici la faible influence des conditions de circulation sur l'émission de PM (hormis au travers du volume de trafic).

6.2.Sensibilité à différentes compositions du parc automobile

Dans ce qui suit, on a considéré différentes compositions du parc pour les calculs avec l'approche CopCETE :

- la référence est établie avec la composition du parc local moyen observé par vidéo, mais les trafics de chaque catégorie (VP, VUL, PL, bus) varient à chaque créneau selon les observations.
- On considère ensuite l'utilisation du parc national Ifsttar global, de même que sa déclinaison « urbaine » (pondérée par une utilisation différenciée des véhicules)
- On considère enfin une description plus précise du parc local, au travers d'un parc de week-end, et de deux parcs de semaine observés respectivement en heures creuses et heures de pointes. Ces parcs sont affectés aux observations correspondantes, les émissions étant ensuite sommées.

Les autres conditions d'estimation des émissions sont inchangées.

Le Tableau 33 donne les résultats de calcul en utilisant les parcs globaux observés localement et les parcs nationaux Ifsttar. Les résultats sont très proches, mais on note cependant quelques écarts significatifs sur les polluants plus spécifiquement liés à la motorisation Essence (CO, COV, Benzène).

		Parc local observé	Parc national Ifsttar	Parc national urbain Ifsttar	écarts
Trafic et émissions					
Véhicules kilomètres	en milliers	1236	1237	1237	
Consommation	kg	75969	75778	74621	1,8%
CO2	kg	237563	237094	233349	1,8%
CO	kg	994,52	879,18	983,48	13,1%
NOx	kg	1001,3	975,4	963,2	3,9%
COV	kg	96,40	94,20	103,97	10,4%
Benzène	kg	3,666	3,750	4,284	16,9%
PM	kg	121,77	123,49	122,23	1,4%
Facteurs d'émission du trafic					
Consommation	g/km	61	61	60	1,9%
CO2	g/km	192	192	189	1,9%
CO	g/km	0,805	0,711	0,795	13,2%
NOx	g/km	0,810	0,788	0,779	4,1%
COV	g/km	0,078	0,076	0,084	10,4%
Benzène	g/km	0,0030	0,0030	0,0035	16,7%
PM	g/km	0,099	0,100	0,099	1,3%

Tableau 33 : Comparaison des émissions simulées avec la composition du parc local observé et avec celles des parcs nationaux Ifsttar

Globalement, le parc national Ifsttar prévoit un parc voitures plus diésélisé (de +5%) et plus jeune (plus de véhicules des réglementations Euro4 et 5), ce qui explique des émissions systématiquement inférieures (sauf CO2 et consommation). Le parc Ifsttar urbain est plus proche du

parc local, et les écarts sont très faibles. L'utilisation de parcs spécifiques locaux (WE, heures creuses et de pointe) conduit aux estimations du Tableau 34. On note les parts respectives des 3 périodes : 23% du trafic pour le week-end (24h), 49% pour les heures creuses (19h de semaine) et 28% pour les 5 heures de pointes. Ces proportions de même que celles des émissions montrent que la pollution de l'air n'est pas due qu'aux heures de pointe. L'heure de pointe contribue un peu plus fortement aux émissions de COV et benzène (33-34%), tandis que l'heure creuse contribue plus fortement aux émissions de NOx et PM (54-55%, plus fort trafic de poids-lourds et véhicules utilitaires).

Trafic et émissions		Parc WE TOTAL	Parc HC TOTAL	Parc HP TOTAL	SYNTHESE TOTAL	Parc WE poids respectifs	Parc HC	Parc HP
Véhicules x kilomètres	en milliers	288	608	341	1237	23%	49%	28%
Consommation	kg	15235	39045	21973	76252	20%	51%	29%
CO2	kg	47620	122104	68704	238428	20%	51%	29%
CO	kg	231,7	486,3	286,9	1004,9	23%	48%	29%
NOx	kg	179,0	543,3	279,9	1002,2	18%	54%	28%
COV	kg	20,19	45,75	32,20	98,14	21%	47%	33%
Benzène	kg	0,851	1,650	1,265	3,765	23%	44%	34%
PM	kg	21,71	67,51	32,54	121,76	18%	55%	27%
Facteurs d'émission du trafic						écarts		
Consommation	g/km	53	64	64	62	21,8%		
CO2	g/km	165	201	201	193	21,8%		
CO	g/km	0,804	0,800	0,840	0,812	5,0%		
NOx	g/km	0,621	0,894	0,820	0,810	43,9%		
COV	g/km	0,070	0,075	0,094	0,079	34,6%		
Benzène	g/km	0,0030	0,0027	0,0037	0,0030	36,5%		
PM	g/km	0,075	0,111	0,095	0,098	47,4%		

Tableau 34 : Comparaison des émissions simulées avec les compositions du parc local des week-ends, heures creuses et de pointe de semaine

Trafic et émissions		Parc local observé	Synthèse par addition des périodes WE, HP, HC et parcs resp.	écarts
Véhicules kilomètres	en milliers	1236	1237	
Consommation	kg	75969	76252	-0,4%
CO2	kg	237563	238428	-0,4%
CO	kg	994,52	1004,91	-1,0%
NOx	kg	1001,3	1002,2	-0,1%
COV	kg	96,40	98,14	-1,8%
Benzène	kg	3,666	3,765	-2,7%
PM	kg	121,77	121,76	0,0%
Facteurs d'émission du trafic				
Consommation	g/km	61	62	-0,3%
CO2	g/km	192	193	-0,3%
CO	g/km	0,805	0,812	-0,9%
NOx	g/km	0,810	0,810	0,0%
COV	g/km	0,078	0,079	-1,7%
Benzène	g/km	0,0030	0,0030	-2,6%
PM	g/km	0,099	0,098	0,1%

Tableau 35 : Comparaison des émissions simulées en utilisant une composition moyenne du parc local, et avec 3 compositions appliquées aux week-ends, heures creuses et de pointe de semaine

Les écarts sur les facteurs d'émissions du trafic sont très élevés (comme déjà observés précédemment entre semaine et week-end). Ils s'expliquent ici à la fois par les différences de trafic mais aussi par les compositions différenciées de parcs. Les plus forts facteurs d'émissions de NOx

sont observés en heures creuses (+44% par rapport aux week-ends). Les plus faibles facteurs d'émissions sont observés le week-end.

La synthèse des calculs effectués par période (WE, HP, HC) avec les parcs correspondants peut être comparée aux calculs de référence avec une composition unique locale (Tableau 35). Globalement, les écarts sont très faibles (moins de 3%). Ceci est lié à la variation relativement limitée de la composition du parc intra-catégories et à une sensibilité faible des calculs à cette composante.

6.3. Variabilité du parc automobile et des émissions

Dans cette section, on s'intéresse d'une part à la variabilité du parc telle qu'observée par les dispositifs vidéo, et d'autre part à l'influence de cette variabilité sur les estimations d'émissions.

On a déjà observé lors des analyses précédentes la sensibilité des calculs au trafic poids lourds, qui peut varier selon les périodes et qui influence plus fortement les émissions que les conditions de trafic. On analysera en conséquence d'abord la variabilité du parc selon ce paramètre, puis on s'intéressera également à la variabilité concernant la composition du parc de voitures selon les motorisations Essence / Diesel, et enfin selon les réglementations Euro. Après avoir caractérisé ces variabilités (i.e. la capacité de la composition du parc à varier dans le temps selon ces paramètres), on analysera la sensibilité du calcul d'émissions à des variations plausibles. Les calculs d'émissions seront effectués ici en prenant un échantillon aléatoire de 20% des créneaux de 6 minutes (environ 1380 créneaux) dont on a vérifié la représentativité par rapport à l'ensemble des 2 semaines d'expérimentation (environ 6720 créneaux).

6.3.1. Variabilité du trafic poids lourds

La Figure 25 illustre la variabilité dans le temps du trafic poids lourds et véhicules utilitaires (les autobus et autocars restent insignifiants dans le trafic). Cette représentation a été obtenue en analysant les compositions du trafic par créneau horaire, dès lors que ceux-ci comptent un minimum de trafic (au moins 200 véhicules /h) et lorsque les différents matériels d'observations (compteurs trafic, caméra) étaient opérationnels. On observe ainsi que le flux de véhicules lourds varie en permanence entre des taux très faibles et jusqu'à des valeurs de 15% (en moyenne il est de 4,8%). De même le trafic VUL oscille entre de très faibles taux et jusqu'à 25-30% (en moyenne 15,8%).

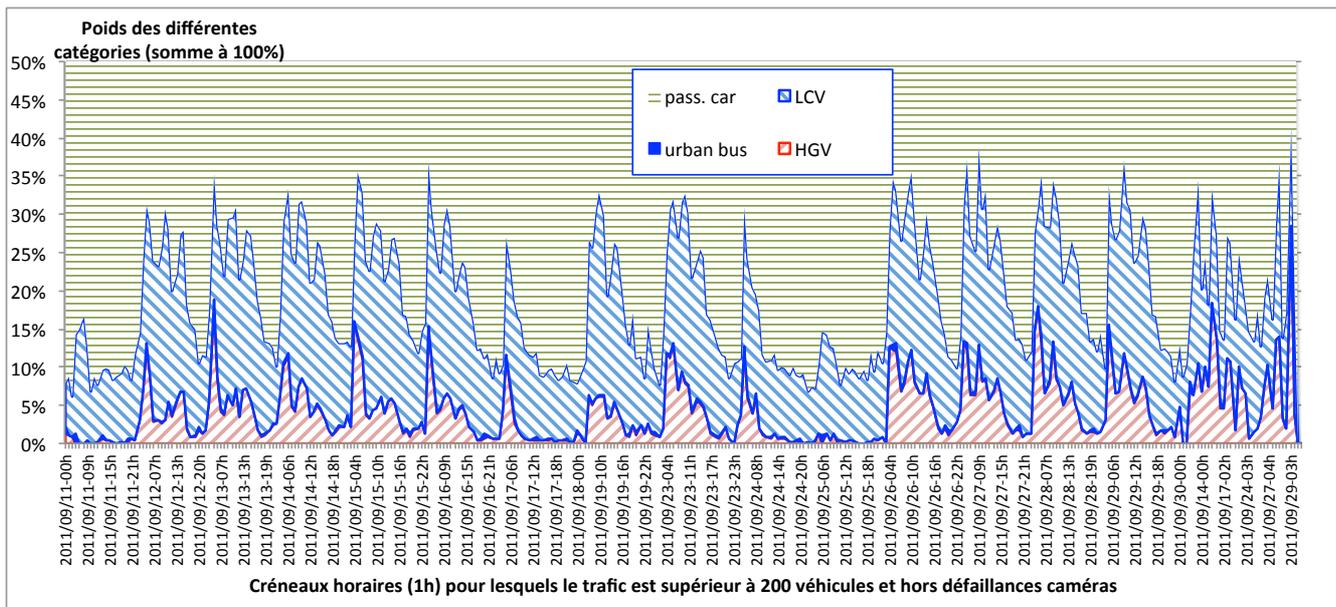


Figure 25 : Part du trafic par les véhicules lourds et véhicules utilitaires légers (le complément à 100% étant représenté par les voitures)

6.3.2. Sensibilité des émissions à la variabilité du trafic poids lourds

Afin d’analyser la sensibilité des émissions à la variabilité du trafic poids lourds (et VUL), nous avons considéré deux parcs contrastés représentant respectivement les 25% du trafic à faible taux PL et LCV, et les 25% à forts taux PL et LCV. Ainsi les créneaux pour lesquels le taux de poids lourds était inférieur à 1% représentent environ 25% des véhicules x km (avec une moyenne de 0,4% de PL), de même que les créneaux à taux supérieurs à 6% de PL (en moyenne 8,1% de PL). Pour les VUL ce sont respectivement des taux 9,2% et 22% qui sont appliqués de la même manière.

% dans le trafic	Camions	Véhicules utilitaires légers
Parcs à faible taux PL / VUL	0,4%	9,2%
Parc moyen	4,8%	15,9%
Parcs à fort taux PL / VU	8,1%	22,0%

Tableau 36 : Parcs contrastés en taux poids-lourds et véhicules utilitaires légers

Les résultats du calcul d’émission en utilisant ces parcs contrastés sont donnés Tableau 37. Malgré les amplitudes relativement limitées données aux taux de PL et VUL (correspondant aux quartiles), on observe une incidence forte sur le bilan d’émissions. Ainsi entre le parc moyen et les parcs à faibles ou forts trafic utilitaires, on observe des variations de -14% à +12% des émissions de CO₂, -26-27% à +23-24% des NO_x et PM (émissions de l’ensemble du trafic, y compris les voitures qui représentent toujours l’essentiel c’est à dire entre 70 et 90% du trafic). Entre les 2 parcs extrêmes, les variations sont de 30% pour le CO₂ (et la consommation) et de 65-69% pour NO_x et PM. C’est dire l’influence très forte de la composition du trafic selon les catégories notamment de poids lourds.

	Parc		Moyen	Fort taux PL et VUL		Écarts mini-maxi
	Faible taux PL et VUL					
CO2 (kg)	42610	-14%	49360	55400	+12%	+30%
CO	211	+2%	208	205	-1%	-3%
COV	20	-3%	20	21	+3%	+6%
NOx	153	-26%	206	253	+23%	+65%
PM	18	-27%	25	31	+24%	+69%

Tableau 37 : Incidence du taux de trafic poids-lourds et utilitaires sur les émissions globales du trafic

6.3.3. Variabilité de l'équilibre Essence - Diesel et émissions

On observe Figure 26 la variabilité temporelle de la composition du trafic de voitures selon les motorisations essence et Diesel. Le taux de Diesel, souvent autour de 70%, peut varier assez rapidement entre 60-65% et 75-80%.

De la même manière que précédemment, il est possible de construire 2 parcs contrastés selon ce taux de Diesel, afin d'en analyser l'incidence sur les calculs d'émissions. Nous retiendrons également une partition selon les 2 quartiles (25%, 75%).

% dans le trafic	% Diesel	% Essence
Parcs à faible Diésélisation	66	34
Parc moyen	68,4	30,6
Parcs à fort Diésélisation	70	29

Tableau 38 : Parcs contrastés en taux de Diesel des voitures particulières

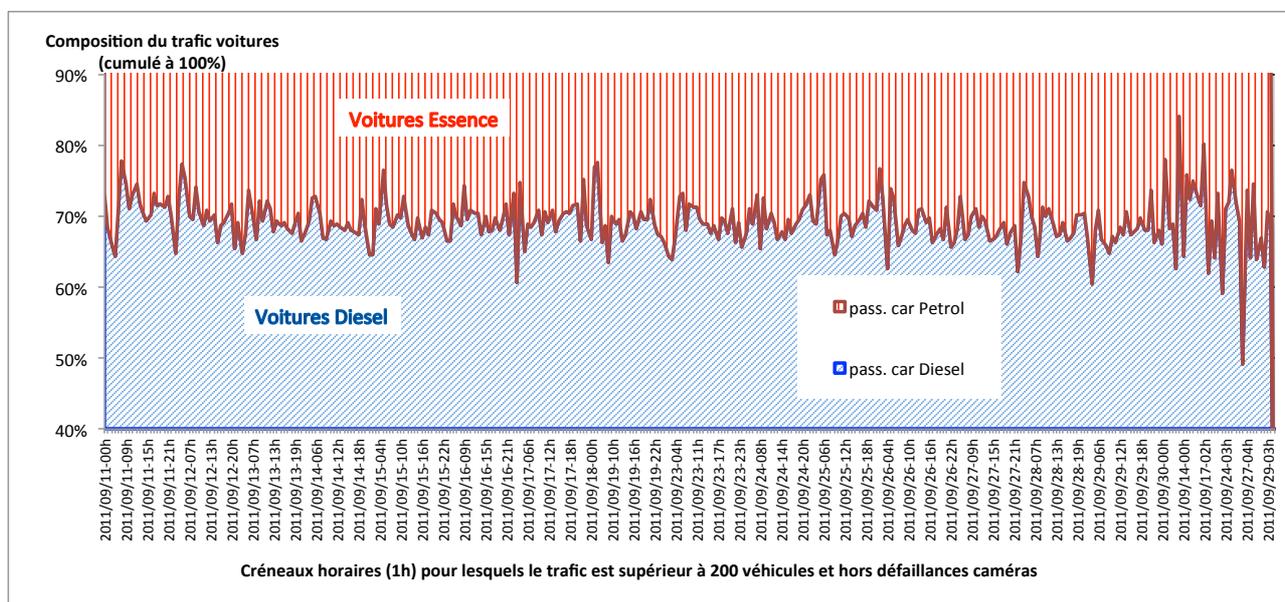


Figure 26 : Composition du trafic de voitures selon la répartition Essence / Diesel et variabilité selon les créneaux horaires

	Faible taux de Diesel VP	Faible taux de Diesel VP	Ecart entre les 2 parcs
CO2 (kg)	49670	49619	-0,1%
CO	227	201	-11,6%
COV	22	20	-9,6%
NOx	207	208	+0,4%
PM	25,0	25,3	+1,2%

Tableau 39 : Incidence du taux de Diesel du trafic des voitures sur les émissions globales du trafic

Les écarts entre les 2 parcs à compositions Diesel différenciées (Tableau 38) sont ici beaucoup plus limités. Ils touchent principalement les polluants essence (CO, COV) qui diminuent de 10-12% avec une plus forte diésélisation des voitures. Les variations sur les polluants plus spécifiquement Diesel (NOx, PM) sont très limitées car d’une part, le parc reste fortement Diesel (faibles variations appliquées) et d’autre part les autres catégories de véhicules (lourds et VUL) contribuent aussi à ces émissions.

On observe donc une faible incidence de la Diésélisation du parc de voitures, qui serait même plutôt favorable à la baisse des polluants non Diesel.

6.3.4. Variabilité des réglementations Euro et émissions

La Figure 27 illustre la variabilité horaire de la composition du parc des seules voitures particulières en ce qui concerne la répartition par réglementation Euro des émissions de polluants. Les technologies les plus anciennes (jusqu’à Euro3) oscillent entre 55% et 65%, dépassant quelquefois 50 et 70%.

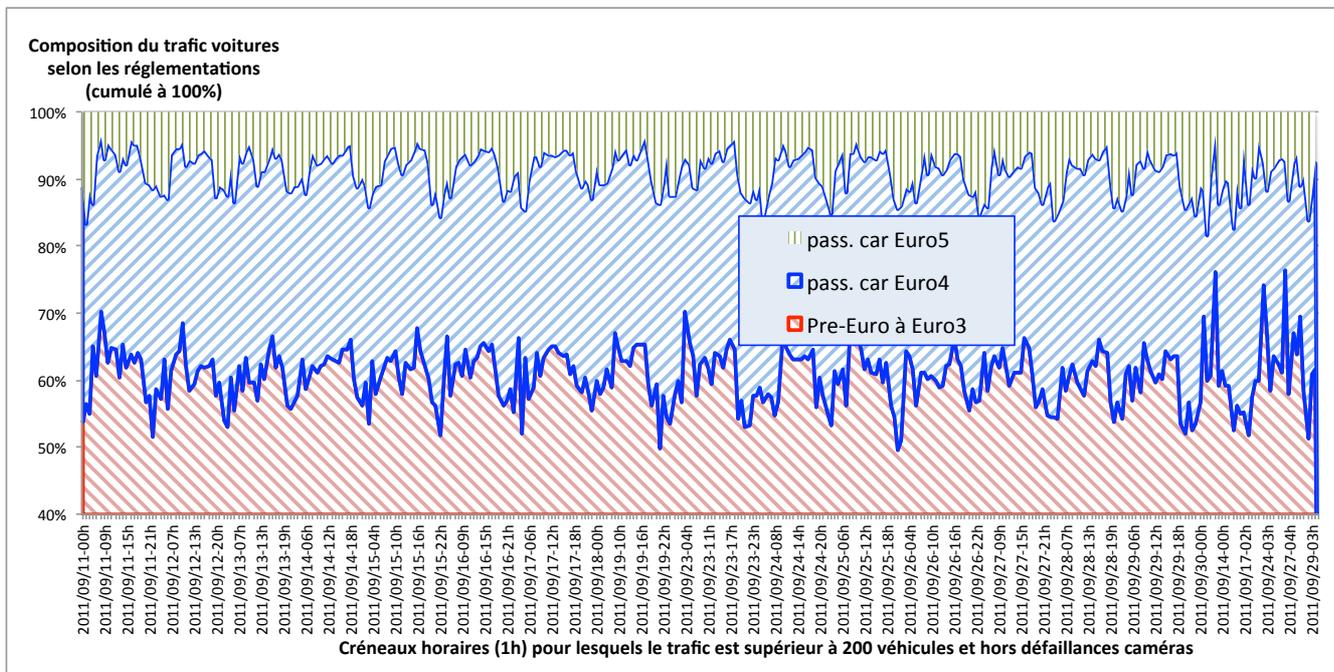


Figure 27 : Composition du trafic de voitures selon les réglementations pollution et variabilité selon les créneaux horaires

Comme précédemment, nous avons construit deux parcs contrastés correspondant cependant à des cas fréquents (quartiles des compositions observées, Tableau 40). Les résultats d'émissions (estimés pour tout le trafic) donnent une diminution de tous les polluants de quelques pourcents entre les 2 parcs contrastés (sauf CO2 et consommation, sans effet).

Les écarts sont faibles, car la variabilité choisie ici a été assez limitée, et aussi parce que on n'a considéré qu'une variation au niveau des voitures, les autres catégories restant identiques. Il conviendrait sans doute d'appliquer également cette approche aux véhicules utilitaires légers et lourds.

% dans le trafic	Parc Voitures « ancien »	Parc moyen observé	Parc Voitures « récent »
Pre-Euro à Euro3	65	60	57
Euro4	29	31	32
Euro5	6	8,2	11

Tableau 40 : Parcs de voitures contrastés selon les réglementations Euro

	Parc Voitures « ancien »	Parc Voitures « récent »	Ecart entre les 2 parcs
CO2 (kg)	49367	49351	0,0%
CO	213	203	-4,6%
COV	21	20	-4,4%
NOx	209	204	-2,5%
PM	25,3	24,9	-1,3%

Tableau 41 : Incidence du taux de véhicules récents dans le trafic des voitures sur les émissions globales du trafic

6.4. Conclusions

Les émissions varient assez significativement entre les catégories de véhicules et avec la composition du parc. Les véhicules lourds (soit moins de 5% du trafic) représentent plus de 30% des quantités de NOx et de particules et exercent en conséquence une influence prédominante sur ces polluants.

Mise à part la répartition entre voitures, véhicules légers et lourds, l'estimation des émissions semble relativement peu sensible à différentes compositions détaillées de parc (parc national Ifsttar ou urbain, versus local, parcs week-end, heures de pointes et creuses), mais cependant les variations envisagées dans ce cadre étaient assez limitées.

Une analyse de la variabilité horaire du parc en ce qui concerne le taux de PL, le taux de voitures Diesel et les réglementations montre que les variations peuvent être assez importantes. Une étude de sensibilité en considérant des parcs contrastés mais représentatifs (quartiles inférieurs et supérieurs) montre des écarts significatifs quant au taux de PL (écarts de 30 à 70%), des écarts beaucoup plus limités quant au taux de voitures Diesel (10-12%) et au taux de voitures récentes (Euro4 et 5, variations de 4-5%). Là également, les variations appliquées étaient de faibles ordres de grandeur.

Il conviendrait d'analyser la composition du parc de manière plus dynamique (i.e. par créneaux de 6 minutes) afin d'identifier des contrastes de parc sans doute plus forts et ensuite d'analyser la sensibilité des calculs d'émissions à ces observations.

7. Autres aspects de l'estimation des émissions de polluants

Dans ce chapitre on examinera successivement différents aspects de l'estimation des émissions de polluants :

- On analyse d'abord l'incidence de paramètres de calcul des émissions (liés notamment à l'estimation des émissions de démarrage à froid, par évaporation de carburant, ou encore l'influence de l'hypothèse prise pour le taux de chargement des camions).
- On examinera ensuite les corrélations entre émissions, pollution et caractéristiques du trafic.
- La dernière section envisagera enfin l'influence du pas de temps avec lequel sont connues les données de trafic et évaluées les émissions.

7.1. Incidence de différents paramètres de calcul des émissions

L'approche CopCETE par sa souplesse d'utilisation nous a permis de tester la sensibilité de plusieurs hypothèses de calcul sur les résultats d'émissions. On rapporte ci-après ces simulations. Les calculs de référence se rapportent aux 2 semaines d'expérimentation, observées au pas de temps de 6 minutes. Les conditions ambiantes sont celle de septembre 2011 à Grenoble. La longueur statistique des trajets qui entre dans le calcul des émissions de démarrage à froid est de 7,4 km (issu de EMD Grenoble). Les évaporations de carburant sont calculées conformément à l'approche COPERT4, mais sans tenir compte d'évaporation de stationnement. Le chargement des camions est pris à uniforme et à 50% comme cela se fait traditionnellement, sachant que le logiciel ne permet que d'envisager 0, 50 et 100%. Ce taux est également appliqué aux bus.

Le parc automobile est celui observé au cours des expérimentations Mocopo. On considère une composition de parc moyenne, mais les différentes catégories (véhicules légers, camions, bus, etc.) sont ajustées au pas de 6 minutes selon les observations vidéo. Les conditions de circulation sont estimées au pas de 6 minutes selon les informations des capteurs de trafic.

7.1.1. Prise en compte du démarrage à froid

7.1.1.1. Importance de l'émission à froid

Le Tableau 42 donne la part respective des émissions à chaud (trafic total) et de la surémission de démarrage (qui ne concerne de fait que les véhicules légers), calculées pour la situation de référence et les 2 semaines d'expérimentations. La dernière colonne estime la surémission pour un mois d'hiver (décembre).

	en kg	Emissions à chaud	Surémissions de démarrage	% Froid /Total	Surémission d'un mois d'hiver
Consommation		72085	3885	5,1%	10,8%
CO2		226052	11511	4,8%	9,2%
CO		576	418	42,1%	83,0%
NOx		937,1	64,2	6,4%	12,3%
COV		57,9	38,5	39,9%	73,5%
Benzène		1,91	1,76	47,9%	80,8%
PM		120,8	1,0	0,8%	14,8%
SO2		1,46	0,08	5,2%	10,9%
CH4		6,33	6,27	49,8%	57,4%
COVNM		51,6	32,2	38,5%	74,6%
N2O		6,15	1,56	20,3%	25,7%
Acroléine		0,81	0,12	13,1%	49,0%
Formaldéhyde		3,20	0,74	18,8%	56,2%
Butadiène		0,68	0,30	30,7%	67,6%
Acétaldéhyde		1,66	0,34	17,2%	54,3%
GES (eqC)		57752	3009	5,0%	9,2%

Tableau 42 : Émission à chaud et surémission liée au démarrage (à froid)

Globalement, l'émission à froid représente 5% de l'émission totale du trafic (en CO2 ou consommation, gaz à effet de serre). Elle est également relativement limitée pour les NOx (6%), PM (1%), SO2 (6%). Par contre l'émission à froid de CO et COV ou COV non méthanique (hors CH4) représente de l'ordre de 40% de l'émission totale, 50% du méthane et du benzène, et de l'ordre de 15 à 30% d'autres composés organiques.

Ces surémissions sont cependant limitées par des températures de septembre 2011 relativement estivales. Une simulation sur des conditions hivernales (moyenne nationale française) renforce considérablement le poids de la surémission à froid : 9-11% des consommation et gaz à effet de serre, 12 et 15% des NOx et PM, plus de 80% du CO, et de l'ordre de 70 à 80% des composés organiques volatiles dont le benzène. On doit donc considérer que pour plusieurs de ces polluants à enjeu sanitaire fort, l'essentiel de l'émission concerne les phases de démarrage (non fonctionnement du catalyseur).

Cette surémission est par ailleurs peu sensible aux conditions locales de circulation et est plutôt répartie aux alentours des lieux de démarrage des véhicules (parkings, résidences) et sur des distances de trajets de quelques kilomètres après les démarrages. Cette problématique du démarrage à froid reste donc complexe à appréhender : traditionnellement, on approche les émissions de démarrage à froid par une contribution uniformément répartie sur le territoire, ce qui limite sans doute la prise en compte correcte de la variabilité des émissions selon les conditions de circulation (notamment la congestion, etc.).

7.1.1.2. Variation de l'émission à froid selon les trajets

Outre les conditions de températures, l'émission à froid dépend des longueurs de trajets et l'approche classique de calcul considère une longueur moyenne statistique (correspondant aux enquêtes de mobilité par exemple) pour évaluer globalement la surémission. On doit cependant considérer que 1- les trajets n'ont pas partout les mêmes longueurs (les trajets urbains sont statistiquement plus courts), 2- sur une voie rapide (autoroute par exemple), il est peu probable que

le véhicule soit encore sous l'influence des conditions de démarrage à froid. On doit alors considérer que les trajets sont plus longs et que l'influence du froid est en conséquence plus faible.

	Longueur de trajet		
	3 km	7,6 km	12 km
CO2	+1,2%		-1,2%
CO	+10%		-11%
COV	+10%		-10%
Benzène	+12%		-12%
NOx	+2%		-2%
PM	+0,2%		-0,2%

Tableau 43 : Incidence de la longueur moyenne des trajets sur la surémission liée au démarrage (à froid)

Deux hypothèses de longueur moyenne de trajet (3 et 12 km) ont été testées en comparaison avec la situation de référence (7,6 km). Les écarts liés à ce paramètre atteignent +/- 10% pour les polluants les plus sensibles au froid (CO, COV), en considérant l'ensemble du trafic. Ils atteignent +/-14% pour les voitures essence qui sont les plus sensibles au démarrage à froid.

On notera que globalement les écarts entre les 2 hypothèses extrêmes seraient de l'ordre de 20 à 25% pour les polluants CO, COV (et benzène) et de quelques pourcents pour CO2 et NOx.

7.1.2. Évaporations de carburant

Le Tableau 44 donne les estimations d'émission par évaporation de carburant telles que déterminées par la méthodologie COPERT sans toutefois tenir compte d'émissions de véhicules en stationnement (ce qui est finalement assez approprié à notre cas d'étude). Les émissions par évaporation ne concernent que les COV ou HC et en particulier le benzène, et de fait uniquement les véhicules légers essence.

	septembre		août	
	COV (kg)		COV (%)	
Émission totale du trafic	125,8	122,2		
Echappement	96,4	92,7	76,6%	75,9%
Evaporation	29,4	29,5	23,4%	24,1%
Echappement VP seuls	74,8	74,8	71,8%	71,7%
Evaporation VP seuls	29,4	29,5	28,2%	28,3%
	septembre		août	
	benzène (kg)		Benzène (%)	
Émission totale du trafic	3,95	3,77		
Echappement	3,67	3,49	92,8%	92,4%
Evaporation	0,29	0,29	7,2%	7,6%
Echappement VP seuls	3,43	3,43	92,3%	92,3%
Evaporation VP seuls	0,29	0,29	7,7%	7,7%

Tableau 44 : Émissions par évaporation de carburant et sensibilité aux hypothèses climatiques

Globalement, sur 2 semaines simulées, les évaporations représentent environ 30 kg de COV et 0,3 kg de benzène, c'est à dire 23 et 7% des émissions totales du trafic. On notera que ces émissions représentent 28 et 8% des émissions des seules voitures, 31 et 8% des émissions des seules voitures essence.

L'utilisation de valeurs de températures d'août (au lieu de septembre) n'augmente que faiblement ces contributions, en raison d'écart faible des températures. Une comparaison été - hiver donnerait cependant des écarts équivalents aux surémissions mentionnées ici : de l'ordre de 20% pour les COV, et de 8% pour le benzène.

7.1.3. Influence du paramètre de chargement des camions

Les calculs d'émissions n'autorisent généralement qu'une approche très grossière des taux de chargement des véhicules lourds (camions) : d'une part par la méconnaissance des chargements réels et statistiques des véhicules en circulation, et d'autre part par le paramétrage des calculs qui autorise 0, 50 ou 100% de manière uniforme pour l'ensemble des véhicules d'une simulation. Ces seuils sont eux-mêmes critiquables car la description du trafic nécessiterait de tenir compte :

- d'une part d'une proportion de kilométrage à vide (0%), proportion de l'ordre de 25% mais variable selon les camions, leur taille, leur âge (Adra et al, 2004),
- et d'autre part de taux moyens de chargement (hors circulation à vide), lesquels varient entre 35 et 80% selon les catégories de véhicules, leur âge, etc.

Malgré ces limites inhérentes aux outils de calcul, nous analysons ici la sensibilité du calcul d'émission au taux de chargement des camions en comparant l'application de taux 0% et 100% à la référence (50%).

Ecarts d'émission par rapport à une simulation avec taux de charge 50%	Sur l'ensemble du trafic		Sur le trafic PL seulement		
	Taux de Charge	0%	100%	0%	100%
CO2		-3,6%	+3,6%	-21,0%	+20,6%
CO		-1,3%	+1,0%	-18,0%	+13,7%
NOx		-4,7%	+4,0%	-15,4%	+13,0%
PM		-0,7%	+0,7%	-2,3%	+2,1%

Tableau 45 : Influence du taux de chargement sur les estimations d'émissions (comparaison aux taux de référence appliqué de 50%)

L'influence du taux de chargement reste assez limitée à l'échelle de l'ensemble du trafic (Tableau 45), mais cependant de l'ordre de 4 à 5% pour les CO2 (et la consommation) et NOx. Cette influence reste étonnamment faible pour les particules (qu'on s'attendait à voir plus sensibles aux conditions de fonctionnement des poids lourds). Ceci peut être lié à la prise en compte des émissions non échappement (abrasion, usure) qui atténue l'influence des camions et de leur taux de chargement.

Rapportées aux seuls camions, on notera que les sur-émissions liées à la charge sont beaucoup plus importantes (15 à 20% pour CO2 et NOx) ce qui signifie des amplitudes maximales de 30 à 50% sans doute.

7.1.4. Conclusions

Des paramètres de simulation étudiés ici, c'est le démarrage à froid qui est le plus sensible et le plus gros enjeu de pollution de l'air pour certains polluants (les surémissions qui ne concernent que

les véhicules légers peuvent en effet représenter 30 à 50% de l'émission du trafic total). C'est cependant un phénomène qui n'est pas appréhendé « précisément » notamment en regard de la localisation des surémissions. La sensibilité aux paramètres de calculs peut être évaluée à environ 10% et s'ajoute à cette incertitude.

Les évaporations de carburant représentent un enjeu moindre mais atteignant quand même 20% des émissions de COV, avec également une problématique de localisation non résolue. L'incertitude liée à l'estimation de la charge des camions est de l'ordre de 4 à 5% des émissions de CO₂ et NO_x, et le simplisme de l'estimation ne permet pas de tenir compte d'une éventuelle variabilité temporelle (les camions ne sont pas tous et en tous instants chargés à 50%).

Ces différentes contributions constituent en conséquence une limitation forte à une estimation précise en temps et en lieu des émissions du trafic.

7.2. Corrélations entre émissions, pollution et trafic

On regarde ci-après les corrélations entre émissions de polluants, pollution de l'air (concentrations en proximité de trafic) et caractéristiques du trafic (flux, vitesses), d'abord du simple point de vue de l'observation, puis au niveau des émissions horaires et concentrations.

7.2.1. Observation des évolutions

On analyse ici l'évolution des émissions selon les données de trafic au cours d'une journée. Les Figures 28 à 35 illustrent l'évolution du trafic et des émissions de 9 polluants types au cours d'une journée type. En première approche, toutes les courbes sont directement affectées par les variations du trafic. On note quelques spécificités :

- CO₂, NO_x et conso. : les courbes sont très analogues à celle du flux, avec une influence de la variation de vitesse ; le CO₂ découle directement de la consommation et est donc rigoureusement proportionnel.
- PM et HAP : ces courbes sont moins influencées par la variation de vitesse et suivent donc plutôt le volume de trafic. Ceci s'explique aisément car la connaissance moindre des émissions de particules ne permet pas de tenir compte finement des paramètres cinématiques dans les modèles.
- N₂O : la courbe caractéristique de ce gaz à effet de serre (principalement imputable aux véhicules équipés de pots catalytiques) présente une forte dépendance à la vitesse. Il est principalement émis à froid (démarrage) ou à faible vitesse. Les émissions sont donc certainement sous-estimées ici (pas de contribution du démarrage à froid).
- NH₃ : le NH₃ a un comportement assez proche des PM et HAP, mais est très fortement influencé par la vitesse qui réduit l'émission.

Ces observations confortent les résultats globaux précédents et notamment le lien fort entre émission et volume de trafic d'abord, puis d'une corrélation avec le niveau de vitesse ensuite.

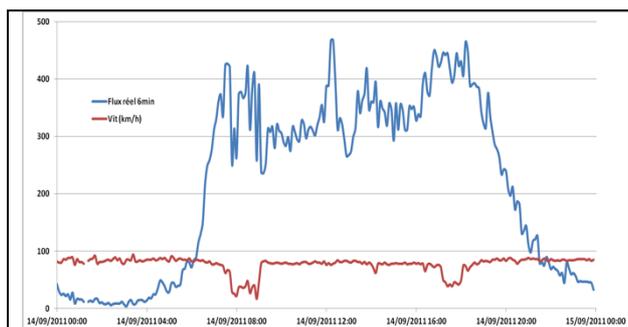


Figure 28 : Données de trafic Mocopo le 14/09/2011 à Echirolles - Sens Est-Ouest

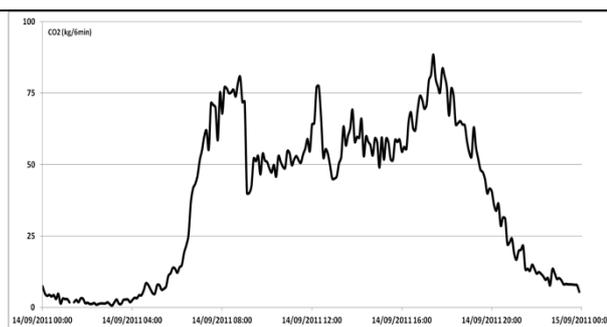


Figure 29 : Données modélisées d'émissions de CO2 le 14/09/2011 à Echirolles - Sens Est-Ouest

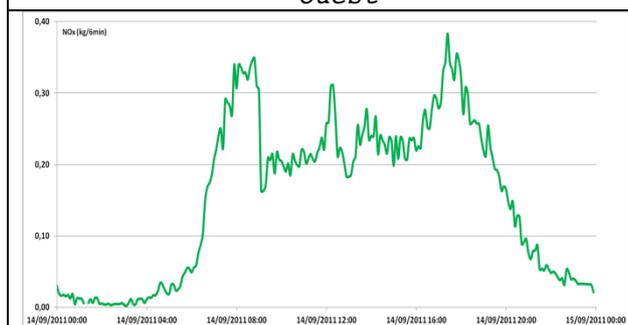


Figure 30 : Données modélisées d'émissions de NOx le 14/09/2011 à Echirolles - Sens Est-Ouest



Figure 31 : Données modélisées de consommation de carburant le 14/09/2011 à Echirolles - Sens Est-Ouest



Figure 32 : Données modélisées d'émissions de PM le 14/09/2011 à Echirolles - Sens Est-Ouest

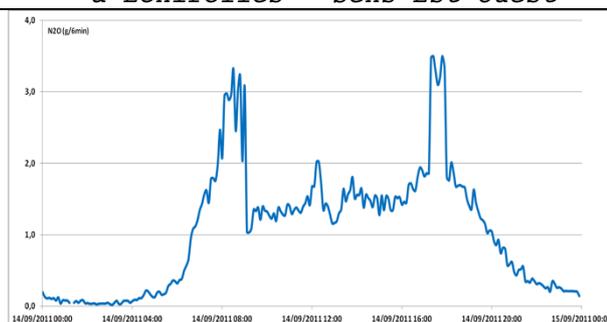


Figure 33 : Données modélisées d'émissions de N2O le 14/09/2011 à Echirolles - Sens Est-Ouest



Figure 34 : Données modélisées d'émissions de HAP le 14/09/2011 à Echirolles - Sens Est-Ouest

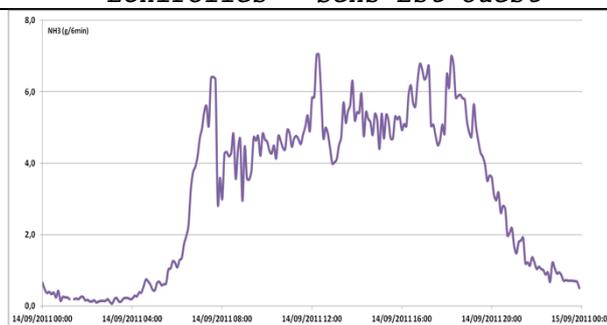


Figure 35 : Données modélisées d'émissions de NH3 le 14/09/2011 à Echirolles - Sens Est-Ouest

7.2.2. Profil horaire par type de jour (approche MOCAT)

Au-delà de l’approche visuelle précédente, on compare ci-après les émissions horaires de polluants en fonction du volume de trafic, en distinguant les jours ouvrés des week-ends. En plus du débit des véhicules légers et des poids lourds, la donnée vitesse moyenne des véhicules est également intégrée dans l’analyse.

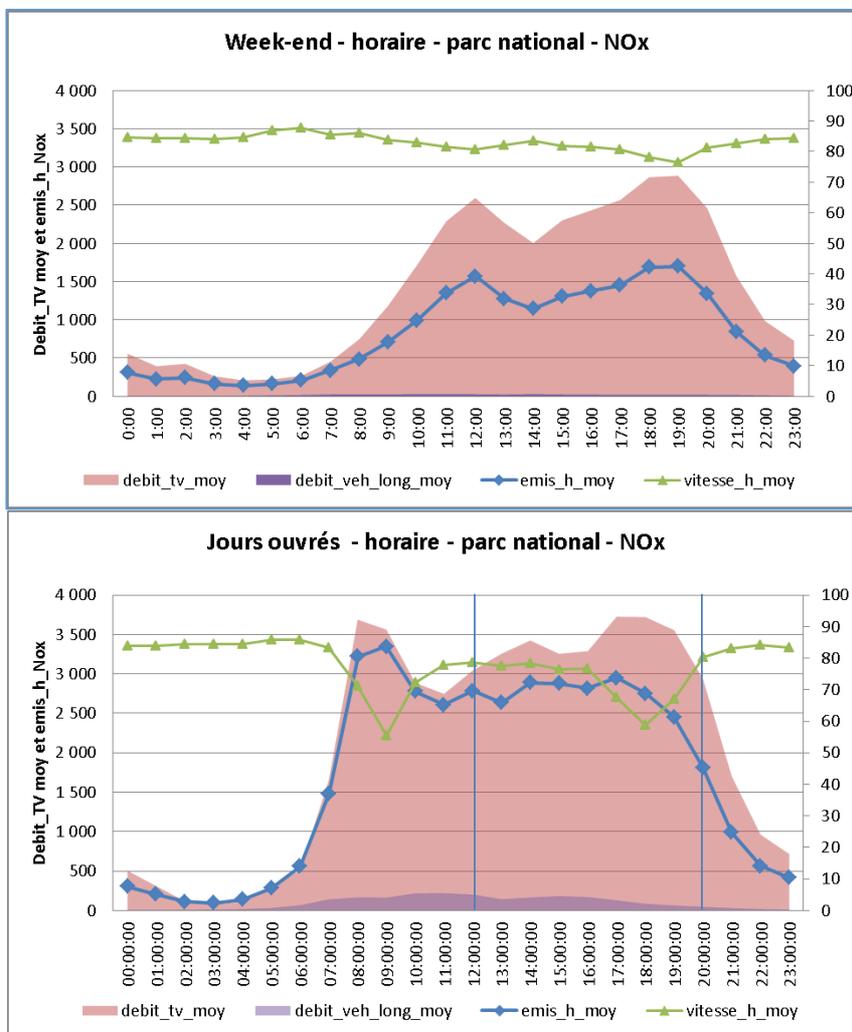


Figure 36 : comparaison des profils horaires d’émissions NOx avec les débits et les vitesses

Les deux graphiques (Figure 36) montrent clairement la corrélation entre les émissions horaires et les données trafic. De plus, sur les jours ouvrés, les périodes de congestion sont facilement repérables par une diminution de la vitesse moyenne des véhicules (courbe verte) et une augmentation du nombre de véhicules (aire rose). Sur les heures de pointe du matin, les émissions de NOx atteignent le maximum de la journée (courbe bleue).

La part de poids lourds dans l’ensemble des véhicules circulants est une donnée importante pour les valeurs d’émissions. Sur le graphique « jours ouvrés », les barres verticales représentent des heures avec à peu près le même nombre de véhicules et quasiment la même vitesse moyenne. Cependant, les émissions de NOx sont significativement différentes, en raison du nombre de

« véhicules longs » : à 12h00, il y a 7% de poids-lourds contre seulement 2% à 20h. Autrement dit à trafics et vitesses moyennes comparables, une plus forte proportion de poids lourds implique une valeur élevée des émissions de NOx. Cette influence semble moindre pour les émissions de PM10.

7.2.3. Profil 6 minutes par type de jour

On analyse ici les émissions par créneau de 6 minutes à partir des données trafic correspondantes et du parc local. Comme pour les résultats horaires, une analyse différenciée est faite selon le type de jour (jours ouvrés ou week-end).

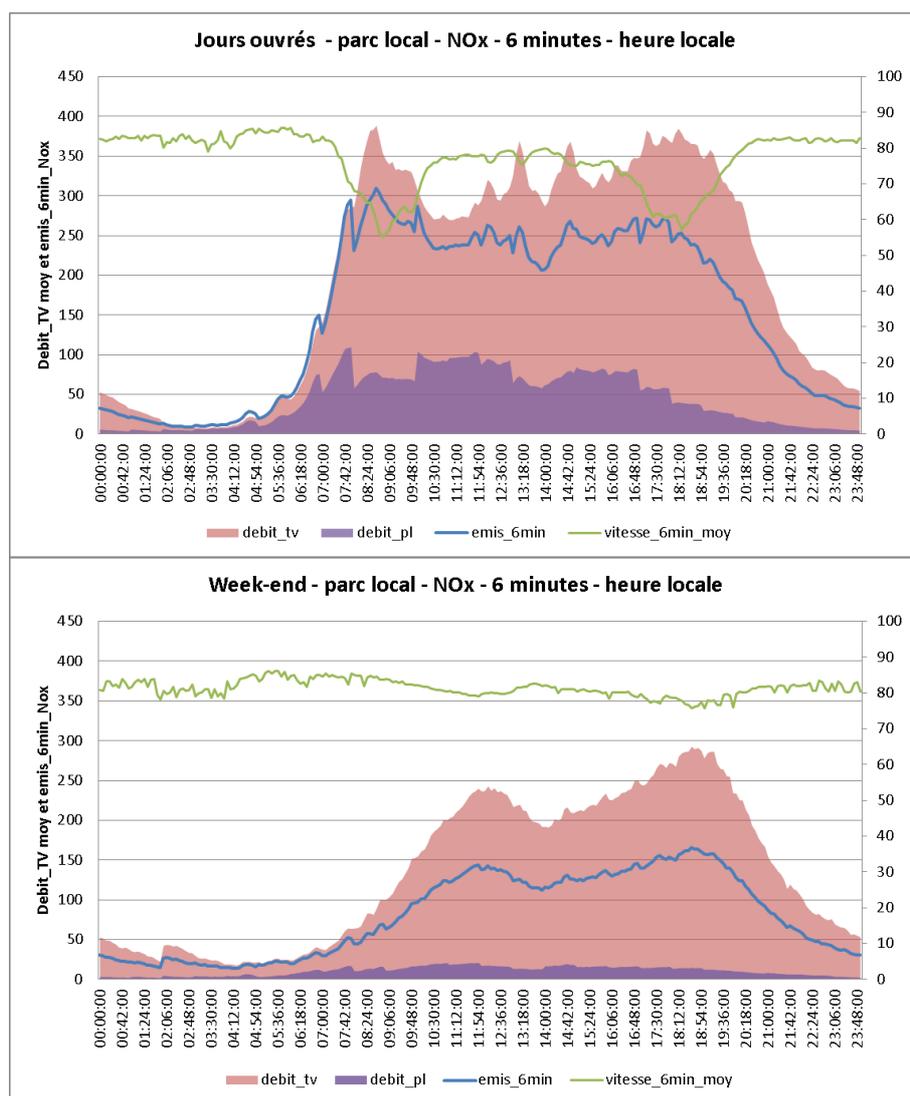


Figure 37 : comparaison des profils 6 mn d'émissions NOx avec les débits et les vitesses

La variabilité des émissions au pas de temps 6 minutes semble principalement due à la variation du nombre de véhicules. De même, la part de poids lourds a un fort impact sur les émissions de NOx. Enfin, la vitesse semble jouer également un rôle dans le calcul des émissions : un fort trafic implique une diminution de la vitesse qui entraîne une augmentation des émissions.

La moyenne des émissions sur l'ensemble des jours ouvrés pourrait « lisser » certains phénomènes. Ainsi, l'examen d'une journée en particulier permet de voir si les remarques à partir des émissions moyennes se retrouvent sur un jour précis.

Focus des émissions 6 minutes sur un jour particulier

Cette observation porte sur le jeudi 15/09/2011 pour le site d'Echirolles. Cette journée est associée à une forte congestion le matin et des conditions météorologiques stables favorables à la stagnation des polluants émis par le trafic.

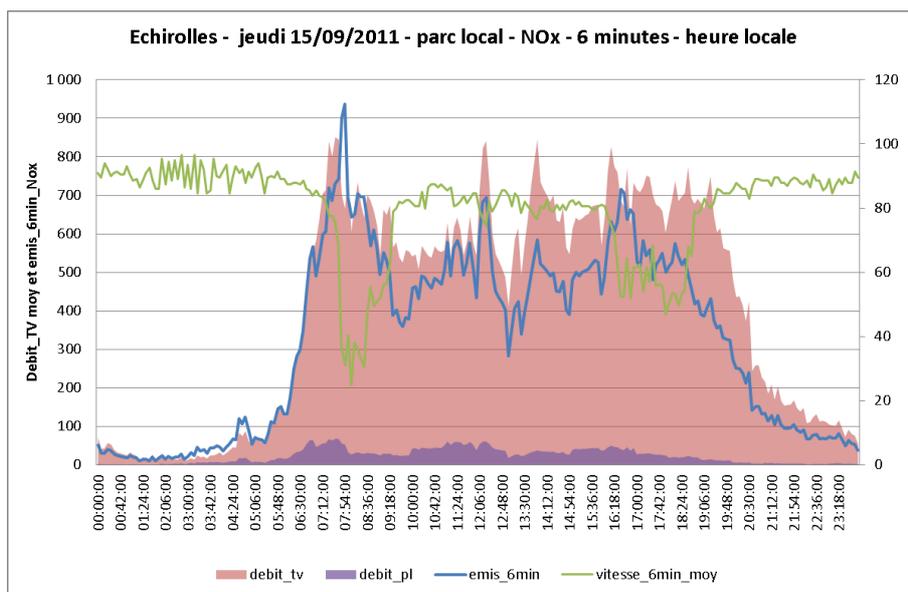


Figure 38 : comparaison des profils 6 mn d'émissions NOX avec les débits et les vitesses pour la journée du 15/09/2011

Sur une seule journée, la variabilité des données est plus importante que lorsqu'on regarde les moyennes. Cependant, les mêmes distributions se retrouvent sur ce graphe, ainsi que les pics d'émissions sur les heures de pointe du matin.

Finalement, on observe que les émissions dépendent principalement du volume de trafic, de la proportion de poids lourds et également de la vitesse des véhicules. Une dernière analyse a été faite pour essayer de caractériser le poids de chacune de ces variables dans le résultat d'émissions.

7.2.4. Relation entre émissions et concentrations mesurées

Deux cas de figure ont été étudiés à Echirolles (figure suivante) :

- en l'absence de congestion (cas du week-end où la vitesse est élevée), on observe une très bonne corrélation entre nombre de véhicules circulant, émissions NO₂ modélisées et concentrations NO₂ mesurées.
- En revanche, les basses vitesses associées à une situation de congestion du matin sont mieux corrélées aux concentrations élevées mesurées sur nos capteurs (en particulier NO₂ et NO_x) qu'aux émissions modélisées : cela peut provenir du fait que les polluants émis par des

véhicules à basse vitesse sont soumis à une moindre turbulence en sortie du pot d'échappement et sont donc plus facilement détectés par les appareils de mesure. Cette observation est souvent vérifiée le matin, lorsque les conditions météorologiques sont stables, ce que l'on ne retrouve pas le soir où la dispersion atmosphérique est généralement meilleure que le matin. Il est à noter également que dans ces conditions stables, les niveaux de pollution semblent mieux corrélés avec le trafic situé à proximité (sens ouest-est). En effet, les niveaux de concentrations de NO₂ diminuent à partir 8h45 tandis que le trafic (d'après les vitesses observées), est encore congestionné sur la bordure intérieure de la rocade (sens est-ouest).

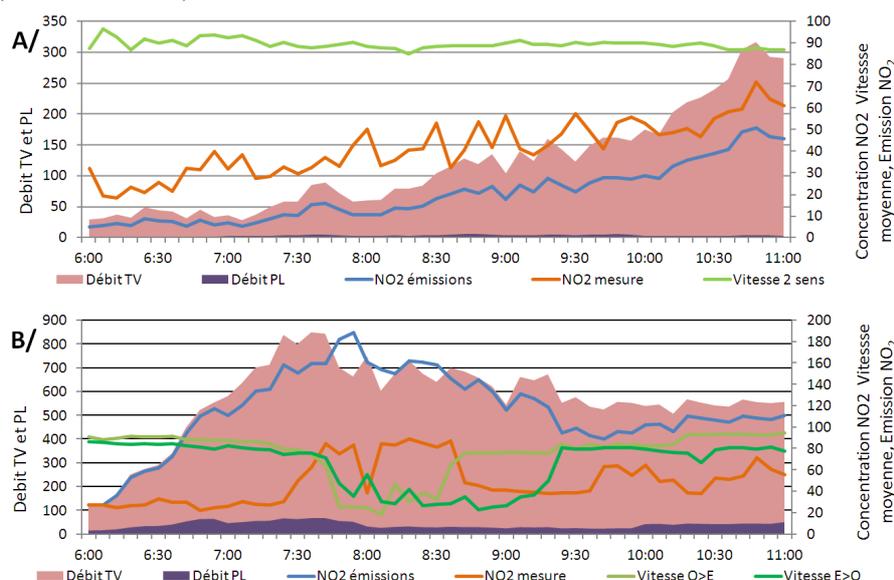


Figure 39 : Evolution du débit tous véhicules et poids lourds, de la vitesse des véhicules et des mesures de NO₂ ainsi que des niveaux de NO₂ émis par le modèle MOCAT (en g/6min/km, sans prise en compte de la dispersion). Sur la figure A, le trafic est fluide (dimanche 23 Janvier 2011) sur la figure B, jeudi 15 septembre 2011 la congestion est observée à la fois dans le sens intérieur et dans le sens extérieur.

7.2.5. Conclusions

Les analyses précédentes confortent les résultats globaux des sections précédentes et montrent le lien fort entre émissions et volume de trafic d'abord, l'importance du trafic poids-lourds ensuite, puis une corrélation pour certains polluants avec le niveau de vitesse. En émissions horaires, c'est clairement le trafic qui construit la quantité d'émission. En concentrations de polluants, les phénomènes sont plus complexes et influencés par la météo et l'accumulation de pollution.

7.3. Incidence du pas de temps sur les émissions

On se propose ici, d'analyser la sensibilité des estimations d'émission selon la « qualité » des données de trafic, en l'occurrence le pas d'observation. En effet, on ne dispose souvent que de données horaires de trafic et la plupart des calculs d'émission est effectué avec ce pas de temps. Dans le cadre du projet Mocopo, on dispose de données plus précises (pas de 6 minutes), et on peut donc observer l'éventuelle dégradation des analyses avec des données quart-horaires, ou horaires.

Les données de trafic sont donc agrégées aux niveaux 15 mn (avec affectation répartie des créneaux 6 minutes à cheval sur 2 quarts d'heure) et 1h. On effectue les calculs d'émissions en comparaison avec ceux obtenus précédemment. Ce travail est effectué avec l'approche CopCETE, sur les 2 semaines pleines d'expérimentations. Les hypothèses sont celles de référence : parc local observé moyen, vitesses différenciées VL/PL selon une fonction de la vitesse, conditions de Grenoble septembre 2011.

7.3.1. Analyse visuelle

Les Figure 40 à Figure 43, illustrent les profils d'émissions de NO_x obtenus, lorsqu'ils sont calculés avec les différents pas d'observation, ainsi que les profils de trafic et vitesse correspondants. La forme des trois courbes est relativement proche, avec cependant des différences importantes au moment de l'heure de pointe du matin, à l'heure de pointe du soir, et lors des périodes de transition ou de forte variation du trafic : à ces moments, les courbes lissées 1heure ne rendent pas compte de variations très importantes des niveaux d'émissions. Ainsi sur la Figure 40, lors de la transition autour de midi, l'estimation horaire ne rend pas compte de variations d'émission de l'ordre de +/-20% autour de la valeur moyenne. On notera que c'est d'abord l'atténuation des flux de trafic et niveaux de vitesse par l'agrégation horaire qui conduit à ce résultat.

A l'inverse, sur des évolutions présentant une plus grande continuité au pas 6 mn (Figure 41), les courbes 15mn et horaires sont plus proches de l'estimation 6 mn. L'incertitude engendrée par l'imprécision du pas de temps concerne donc principalement les périodes de fluctuation importante du trafic ou des vitesses.

Une analyse sur des données fines sera donc nécessaire dès lors que l'on veut rendre compte de phénomènes transitoires, apparition de congestion, augmentation rapide des trafics, et pour caractériser de manière fine l'influence sur la pollution de proximité. Pour des bilans globaux, des situations plus stables, et des pollutions intégrées, des approches plus macroscopiques pourront être suffisantes.

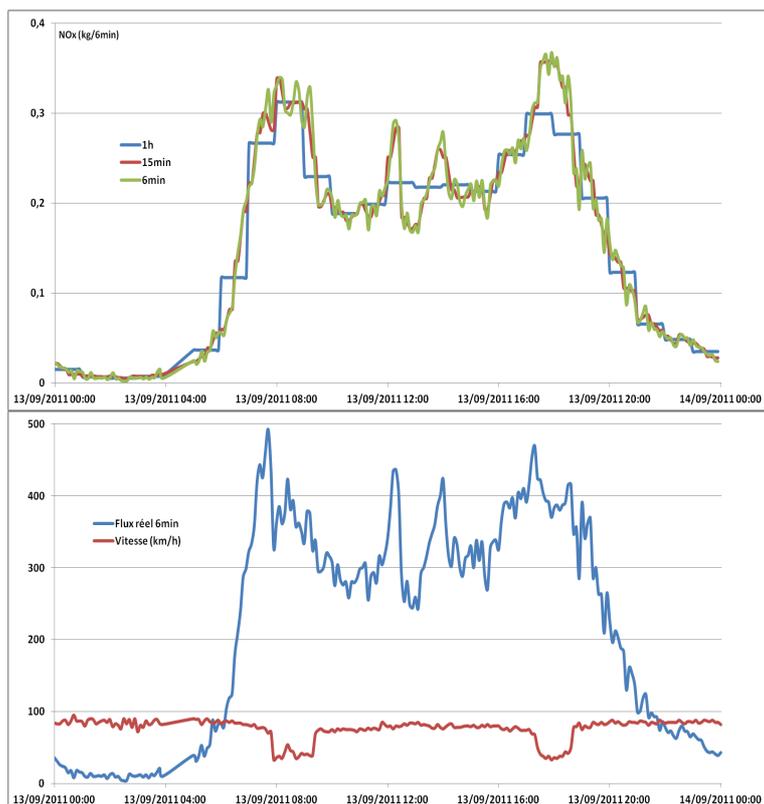


Figure 40 : Profils de trafic, vitesse (en bas) et d'émissions de NOx (en haut) calculées aux pas de 6mn (vert), 15mn (rouge) et 1h (bleu) ; données du 11/09/2011 à Echirolles - Sens Est-Ouest

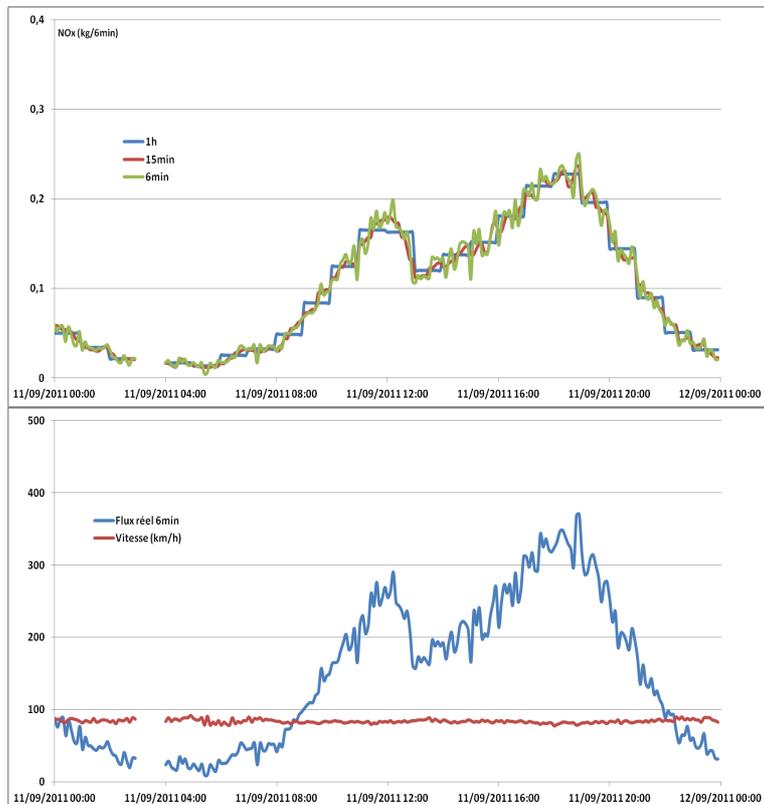


Figure 41 : Profils de trafic, vitesse (en bas) et d'émissions de NOx (en haut) calculées aux pas de 6mn (vert), 15mn (rouge) et 1h (bleu) ; données du 13/09/2011 à Echirolles - Sens Est-Ouest

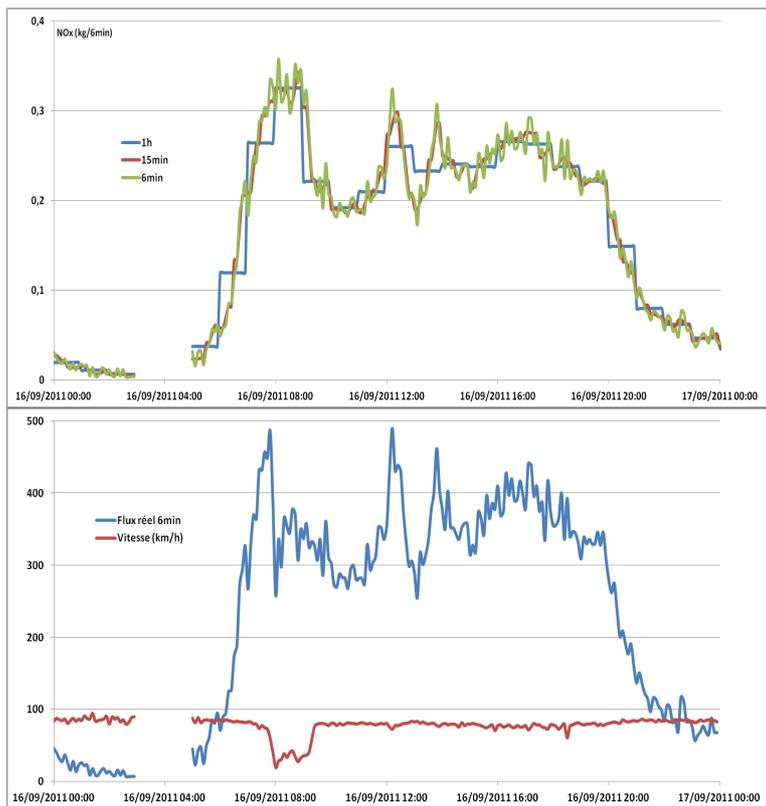


Figure 42 : Profils de trafic, vitesse (en bas) et d'émissions de NOx (en haut) calculées aux pas de 6mn (vert), 15mn (rouge) et 1h (bleu) ; données du 15/09/2011 à Echirolles - Sens Est-Ouest

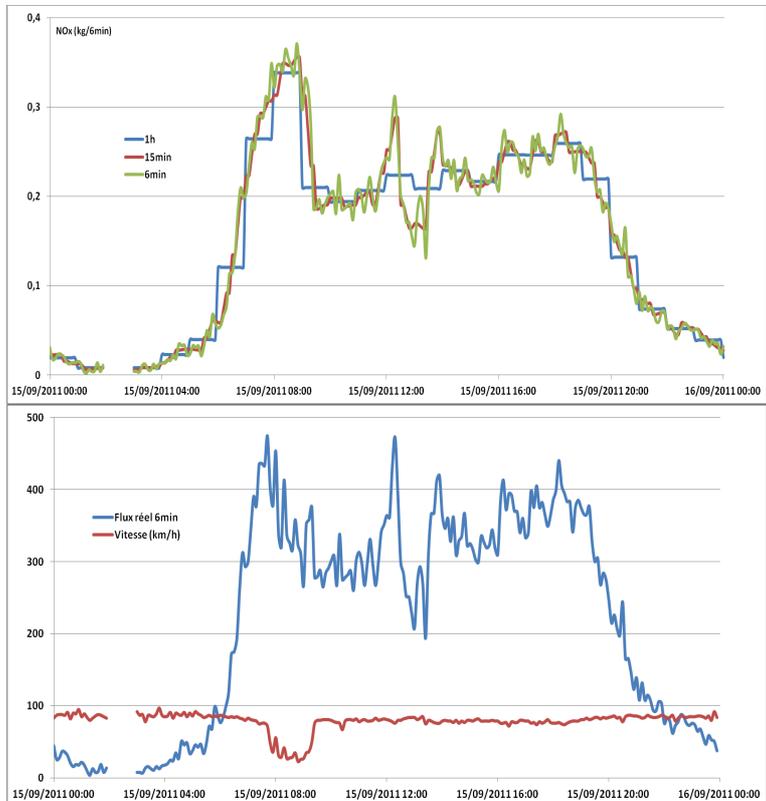


Figure 43 : Profils de trafic, vitesse (en bas) et d'émissions de NOx (en haut) calculées aux pas de 6mn (vert), 15mn (rouge) et 1h (bleu) ; données du 16/09/2011 à Echirolles - Sens Est-Ouest

La Figure 44 montre les profils journaliers d'émissions sur 4 journées et confirme les résultats précédents relatifs à la qualité de la forme des courbes de pollution. Cependant, nous remarquons une réelle divergence (proche de 10% dans le cas ci-dessus) au moment des heures de pointe.

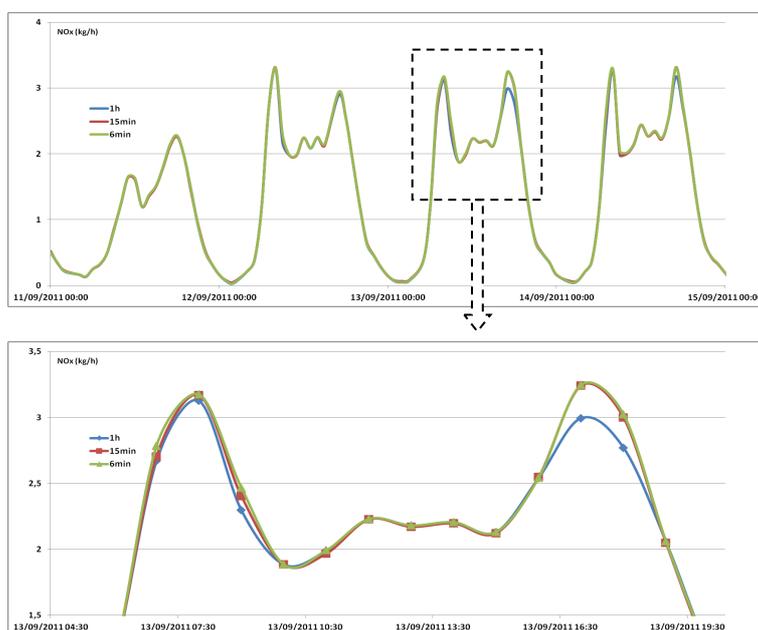


Figure 44 : Données modélisées d'émissions de NOx Du 11 au 14/09/2011 à Echirolles - Sens Est-Ouest

7.3.2. Analyse détaillée de l'influence du pas de temps

7.3.2.1. Bilans intégrés d'émissions

Au global, les estimations intégrées sur 2 semaines d'expérimentations sont très proches quel que soit le pas de temps (Tableau 46).

Trafic et émissions		Pas 6 mn	Pas 15 mn	Pas 1h	Ecart 6mn-15mn	Ecart 6mn-1h
Véhicules kilomètres	en milliers	1215	1224	1236	0,7%	1,7%
Consommation	kg	74617	75943	75570	1,8%	1,3%
CO2	kg	233332	237487	236327	1,8%	1,3%
CO	kg	979,01	983,17	977,99	0,4%	-0,1%
NOx	kg	981,9	1014,6	1003,4	3,3%	2,2%
COV	kg	94,82	96,23	95,61	1,5%	0,8%
Benzène	kg	3,611	3,592	3,597	-0,5%	-0,4%
PM	kg	119,33	121,44	121,37	1,8%	1,7%
Facteurs d'émission du trafic						
Consommation	g/km	61	62	61	1,1%	-0,4%
CO2	g/km	192	194	191	1,1%	-0,4%
CO	g/km	0,806	0,803	0,791	-0,3%	-1,8%
NOx	g/km	0,808	0,829	0,812	2,6%	0,5%
COV	g/km	0,078	0,079	0,077	0,8%	-0,8%
Benzène	g/km	0,0030	0,0029	0,0029	-1,2%	-2,1%
PM	g/km	0,098	0,099	0,098	1,0%	0,0%
Vitesses moyennes	km/h	69,5	69,8	71,6	0,4%	3,0%

Tableau 46 : Incidence du pas de temps sur les estimations globales d'émissions

Paradoxalement, ce sont les estimations à 15 mn qui sont les plus éloignées, mais ceci peut être lié à l'approximation des vitesses lors de l'agrégation des trafics. Les écarts restent cependant

inférieurs à 4% pour l'ensemble des polluants et des estimations. Ceci tient au fait que globalement, en dehors des quelques périodes de transition discutées précédemment, les trafics et vitesses évoluent lentement, et l'agrégation horaire est alors sans conséquence importante. Par ailleurs ces périodes transitoires et de congestion ne représentent que peu dans le bilan global, et l'incertitude sur leur estimation est fortement atténuée à l'échelle des 2 semaines.

Pour des approches intégrées ou agrégées sur des périodes longues, et dès lors que les perturbations de trafic ne sont que ponctuelles, des estimations au pas horaires ne conduiront donc pas à des erreurs importantes.

7.3.2.2. Pas de temps et épisodes de congestion

Comme on l'a vu précédemment, seuls les épisodes de forte variabilité doivent être analysés avec un pas de temps fin. On s'intéressera donc ici aux épisodes de congestion et à leur évaluation selon différents pas de temps.

On remarquera d'abord, que le pas de temps conditionne fortement la capacité d'analyse de la congestion : des phénomènes temporaires de fort ralentissement peuvent être identifiés avec un pas de 6 minutes, mais disparaissent lors d'une agrégation horaire. Le Tableau 47 illustre la capacité à appréhender la congestion et la variation des résultats obtenus selon les pas de temps.

Ainsi en considérant un seuil de vitesse de 70km/h, les observations 6mn donnent une congestion représentant 8,9% de la durée et 15% du trafic avec une vitesse moyenne de 37,6 km/h, tandis que le trafic non-congestionné selon ce critère représente 91% de la durée et 85% du trafic, à 82 km/h. Avec le même seuil de 70 km/h, les observations 15 mn conduisent à une très faible atténuation, avec une congestion représentant 16% du trafic à 39 km/h (contre 84% à 81 km/h). Enfin les observations horaires donnent une congestion de l'ordre de 19% du trafic à 47 km/h. On observe bien ici la perte de précision par l'agrégation des données, et la perte de capacité à identifier des phénomènes de congestion.

	Congestion			Non-congestion			Global Vitesses (km/h)
	Vitesses (km/h)	% durée	%trafic	Vitesses (km/h)	% durée	%trafic	
Pas 6mn, seuil congestion 70km/h	37,6	8,9%	15,2%	81,9	91,1%	84,8%	69,5
Pas 15mn, seuil congestion 70km/h	39,4	8,9%	15,6%	81,4	91,1%	84,4%	69,8
Pas 1h, seuil congestion 70km/h	47,4	10,9%	19,2%	81,5	89,1%	80,8%	71,6
Pas 1h, seuil congestion 64km/h	44,2	8,6%	15,2%	80,6	91,4%	84,8%	71,6
Pas 6mn, seuil congestion 40km/h	30,5	5,4%	8,5%	78,6	94,6%	91,5%	69,5
Pas 15mn, seuil congestion 40km/h	31,5	4,5%	7,3%	77,2	95,5%	92,7%	69,8
Pas 15mn, seuil congestion 43km/h	32,9	5,4%	9,0%	78,6	94,6%	91,0%	69,8
Pas 1h, seuil congestion 52,8km/h	38,4	5,4%	9,3%	78,6	94,6%	90,7%	71,6

Tableau 47 : Capacité d'appréhension de la congestion selon le pas de temps des mesures

Afin de retrouver des « ordres de grandeurs » de trafic congestionné comparables, on doit abaisser les seuils de détermination de la congestion à 64 km/h pour les observations horaires. Cependant, même dans ce cas, les contrastes de vitesses « congestion - non congestion » sont atténués par rapport aux observations 6 minutes.

En considérant un seuil de congestion à 40 km/h, le constat d'atténuation des contrastes de vitesse est tout à fait similaire (Tableau 47). On observera également la nécessité d'élever le seuil de vitesse pour la détermination de la congestion, afin obtenir des volumes de congestion comparables (en %), à 43km/h pour les données 15mn, et à 53 km/h pour les données horaires.

Des pas de temps longs conduisent donc à des situations congestion-non congestion moins contrastées. On compare ci-après les émissions relatives à ces épisodes selon différents pas de temps.

Facteurs d'émission	Seuil de vitesse pour déterminer la congestion	Congestion			Ecart %	
		Pas 6 mn 70km/h	Pas 15 mn 70km/h	Pas 1 h 70km/h	6-15mn	6mn-1h
Consommation	g/km	70	71	66	0,8%	-6,3%
CO2	g/km	219	221	205	0,8%	-6,3%
CO	g/km	0,845	0,831	0,770	-1,6%	-9,0%
NOx	g/km	0,893	0,933	0,861	4,4%	-3,6%
COV	g/km	0,105	0,104	0,093	-0,7%	-11,1%
Benzène	g/km	0,0040	0,0038	0,0034	-5,0%	-13,8%
PM	g/km	0,099	0,099	0,098	0,5%	-1,5%
Vitesses moyenne	km/h	37,6	39,4	47,4	4,8%	26,1%
% durée		8,9%	8,9%	10,9%	0,0%	22,5%
%trafic		15,2%	15,6%	19,2%	2,4%	25,8%
	Seuil de vitesse	64km/h				
Consommation	g/km			67		-5,0%
CO2	g/km			208		-5,0%
CO	g/km			0,787		-6,8%
NOx	g/km			0,866		-3,1%
COV	g/km			0,097		-7,5%
Benzène	g/km			0,0036		-9,7%
PM	g/km			0,096		-2,9%
Vitesses moyenne	km/h			44,2		17,6%
% durée				8,6%		-3,4%
%trafic				15,2%		-0,1%

Tableau 48 : Incidence du pas de temps sur les émissions en congestion (seuil 70km/h)

Facteurs d'émission	Seuil de vitesse pour déterminer la congestion	Congestion			Ecart %	
		Pas 6 mn 40km/h	Pas 15 mn 43km/h	Pas 1 h 53km/h	6-15mn	6mn-1h
Consommation	g/km	76	75	69	-1,6%	-10,0%
CO2	g/km	239	235	215	-1,6%	-10,0%
CO	g/km	0,938	0,905	0,836	-3,5%	-10,9%
NOx	g/km	0,975	0,983	0,876	0,8%	-10,2%
COV	g/km	0,119	0,116	0,105	-2,6%	-12,0%
Benzène	g/km	0,0045	0,0042	0,0039	-6,7%	-13,7%
PM	g/km	0,103	0,099	0,093	-4,2%	-9,7%
Vitesses moyenne	km/h	30,5	32,9	38,4	7,9%	25,9%
% durée		5,4%	5,4%	5,4%	0,0%	0,0%
%trafic		8,5%	9,0%	9,3%	6,8%	9,6%

Tableau 49 : Incidence du pas de temps sur les émissions en congestion (seuil 40km/h)

En considérant un seuil de détermination de la congestion à 70 km/h (Tableau 48), on observe une sous-estimation systématique des facteurs d'émission du trafic en congestion avec les données horaires, pouvant atteindre 10-15% pour des polluants spécifiquement liés aux véhicules essence (CO, COV). Ceci pourrait s'expliquer par une plus forte sensibilité de ces véhicules à la congestion, ou par le fait que c'est le trafic voitures qui est le plus présent aux heures de pointe et affecté par la

congestion et en conséquence sensible à sa détermination. Pour les données 15 minutes, les écarts sont plus limités et moins systématiques.

Le Tableau 49 présente la même analyse, mais en considérant la congestion correspondant à un seuil de vitesse de 40 km/h (observations 6 mn). Dans ce cas, pour des volumes de trafic proches de 9% en congestion, les estimations des vitesses divergent sensiblement (31, 33 et 38 km/h), et les facteurs d'émissions sont systématiquement sous-estimés, de 0 à 7% pour les données 15 mn, de 10 à 14% pour les données horaires.

On en conclut donc que des données de trafic dégradées peuvent entraîner une sous-estimation globale de l'ordre de 5-7% avec des données 15 minutes et plus de 10% avec des données horaires (par rapport à des données plus fines 6 minutes). Des phénomènes plus contrastés et fugitifs seraient sans doute encore plus sous-estimés ou même ignorés par des pas de temps de 15mn ou 1 heure.

7.3.3. Conclusions

En conclusion, pour des calculs d'émission intégrés ou agrégés sur des périodes longues, et dès lors que les perturbations de trafic ne sont que ponctuelles, des estimations à 15 minutes ou au pas horaire ne conduiront donc pas à des erreurs importantes.

En revanche, dans le cas de trafic fortement variable et d'épisodes de congestion, pour appréhender des phénomènes transitoires et caractériser une pollution de proximité de trafic, des données fines au pas de 6 minutes seront nécessaires.

Conclusions

Une campagne expérimentale a été menée dans le cadre du projet MOCOPO pour caractériser le parc automobile et le trafic sur la rocade de Grenoble. Ces travaux constituent d'abord un retour d'expérience sur la technique d'observation vidéo et ses difficultés (dysfonctionnements de matériel, erreurs d'identifications, imprécisions, etc.), ainsi que sur la reconstitution des caractéristiques techniques des véhicules via le fichier central des immatriculations (erreurs ou difficultés d'identification). Quelque 1,7 Millions d'observations vidéo de véhicules et 350,000 immatriculations françaises ont permis d'élaborer une composition locale du parc en circulation, y compris dans sa variabilité temporelle.

L'analyse de ces données par rapport aux estimations nationales montre des spécificités locales de parc, en terme de répartition par catégories de véhicules (voitures, véhicules utilitaires légers et lourds), de diésélisation (moindre à Grenoble), ou de réglementations d'émission (les véhicules récents sont moins fréquents). On observe une forte variabilité de la composition du parc entre semaine et week-end (par la part des véhicules utilitaires lourds mais aussi légers) ainsi qu'entre heures de pointe et heures creuses de semaine. Globalement le parc de voitures heure de pointe est un peu moins diésélisé et plus ancien qu'en heures creuses et week-end.

Les données de composition du parc et de trafic ont ensuite été utilisées pour l'estimation des émissions de polluants et l'analyse de la sensibilité de ces estimations à de multiples paramètres d'observation ou de calcul. La méthodologie européenne COPERT4 est mise en œuvre dans le cadre de 2 approches : MOCAT, l'approche d'inventaire des émissions de la région Rhône-Alpes en vue des calculs de concentrations de polluants et de qualité de l'air ; CopCETE utilisée pour des analyses d'émissions et de facteurs d'émission déclinées par catégories de véhicules et selon différents paramètres de sensibilité.

Des analyses il ressort que les estimations d'émissions sont fortement liées aux volumes de trafic, puis varient significativement avec la composition du trafic notamment la proportion de véhicules lourds. L'influence des vitesses de circulation est moindre.

L'analyse des épisodes de congestion, en considérant différents critères de sévérité (épisodes en dessous de seuils de vitesse de 70 et 40 km/h) montre que ceux-ci ne représentent qu'une part relativement limitée du temps (5 à 8%), du trafic (9 à 15%) et des quantités globales d'émissions (13 à 20%) selon les polluants. Malgré des contrastes très importants entre les situations de congestion et hors congestion (avec des vitesses moyennes de 37 et 80 km/h pour un seuil de 70 km/h, de 30 et 80 km/h pour un seuil de 40 km/h), les facteurs d'émission correspondants (g de polluant émis par veh.km) ne varient que de 4 à 30% (seuil 70 km/h), et de 5 à 38% (seuil 40 km/h). Ces variations « relatives » tiennent au fait que 1- les émissions ne dépendent pas uniquement de la vitesse (et que certaines contributions sont quasi constantes); 2- les vitesses sont exceptionnellement très basses ; 3- sur des plages de vitesses rencontrées (40-90 km/h), les courbes

d'émissions varient assez peu. En conséquence, les gains qui pourraient être attendus d'une diminution de la congestion dans ces conditions de circulation de type rocade, seraient globalement assez faibles. Rapportée aux seules heures de pointe, la congestion représente près de 50% des trafics et des émissions. Les gains escomptés sur cette période par réduction de la congestion demeurent cependant assez limités (2 à 4% pour NO_x et PM, 7% pour CO₂, 15% pour les COV) en raison des faibles variations des facteurs d'émissions dans ces plages de vitesse.

Les émissions varient significativement entre les catégories de véhicules. On observe ainsi que les véhicules lourds (soit moins de 5% du trafic) représentent plus de 30% des quantités de NO_x et de particules et exercent en conséquence une influence prédominante sur ces polluants. Les heures de pointe (et la congestion) ayant des taux de poids lourds plus faibles, verront en conséquence les hausses d'émission dues aux conditions de circulation compensées par le trafic PL plus faible.

Hormis l'impact des trafics des véhicules utilitaires légers et lourds, l'estimation des émissions semble peu sensible à différentes compositions détaillées de parc (national versus local, parcs week-end, heures de pointes et creuses), mais cependant les variations envisagées étaient assez limitées.

Une analyse de la variabilité horaire du parc en ce qui concerne le taux de PL, le taux de voitures Diesel et les réglementations montre que les variations peuvent être assez importantes. Une étude de sensibilité en considérant des parcs contrastés mais représentatifs (quartiles inférieurs et supérieurs) montre des écarts significatifs quant au taux de PL (écarts de 30 à 70%), des écarts plus limités quant au taux de voitures Diesel (10-12%) ou de voitures récentes (Euro4 et 5, variations de 4-5%).

L'analyse d'autres paramètres d'estimation des émissions a montré l'enjeu prédominant des surémissions liées au démarrage à froid pour certains polluants (les surémissions qui ne concernent que les véhicules légers peuvent en effet représenter 30 à 50% de l'émission du trafic total), alors que ce phénomène reste relativement mal appréhendé par les approches de calcul, notamment en regard de la localisation des surémissions. Les évaporations de carburant représentent un enjeu moindre mais atteignant quand même 20% des émissions de COV, avec également une problématique de localisation non résolue. Avec l'incertitude liée à l'estimation de la charge des camions (4 à 5% des émissions de CO₂ et NO_x), ces aspects constituent une limitation forte à une estimation précise en temps et en lieu des émissions du trafic.

Enfin, on a examiné l'influence du pas de temps utilisé pour les mesures de trafic et pour effectuer les analyses d'émissions. Globalement, pour des calculs d'émission intégrés ou agrégés sur des périodes longues, et dès lors que les perturbations de trafic ne sont que ponctuelles, des estimations au pas horaire ne conduiront pas à des erreurs importantes.

En revanche, dans le cas de trafic fortement variable et d'épisodes de congestion, pour appréhender des phénomènes transitoires et caractériser une pollution de proximité de trafic, des données fines au pas de 6 minutes seront nécessaires.

Bibliographie

- Adra N., J.L. Michaux, M. André (2004): Analysis of the load factors and the empty running rate for road transport. INRETS, Bron, France. INRETS-LTE0419 Report. 65 p.
- André M., M. Fallah, C. Berger, A. Montenon, E. Brutti-Mairesse (2012). Évaluation des PDU - problématique du calcul des émissions de polluants du trafic. Eval-PDU L3.4b, Rapport Ifsttar-LTE, Bron (France), 105 p.
- André M., A.L. Roche, L. Bourcier. (2013). Statistiques de parcs et trafic pour le calcul des émissions de polluants des transports routiers pour la France. In French. Rapport IFSTTAR-LTE, Bron (France), 132p.
- Pasquier A., M. André (2013a) : Calcul des émissions des transports : cas du transport ferroviaire. Rapport Ifsttar-LTE du projet MOCOPO. Ifsttar, Bron (France). 128p.
- Pasquier A., M. André, A. Montenon (2013b) : Calcul des émissions de polluants du trafic routier : problématique de la composition du parc automobile et des données de trafic. Rapport Ifsttar-LTE du projet MOCOPO. Ifsttar, Bron (France). 90p.

ANNEXES

Annexe 1. Observations des immatriculations par pays	97
Annexe 2. Variabilité du trafic	99
Annexe 3. Variabilité des émissions au cours d'une semaine (NOx, sens Est-Ouest)	100

Annexe 1. Observations des immatriculations par pays

Pays d'origine	Pourcentage observé
<>	0,24 %
??	10,3 %
AT	1,98 %
BE	10,5 %
CH	0,31 %
CZ	0,02 %
DE	0,65 %
ES	0,30 %
FR	52,9 %
GR	0,01 %
HU	0,02 %
IE	0,02 %
IT	22,1 %
LU	0,08 %
NL	0,03 %
PL	0,04 %
PT	0,21 %
RO	0,02 %
SM	0,01 %
UK	0,26 %

Tableau 1 : Pourcentage d'observations des plaques d'immatriculation par pays d'origine

Signification des symboles et sigles utilisés :

<> : Les plaques ne sont pas lues correctement (un certain nombre de caractères sont manquants)

?? : Plaques dont le pays ne peut être identifié

AT : Autriche

BE : Belgique

CH : Suisse

CZ : République Tchèque

DE : Allemagne

ES : Espagne

FR : France

GR : Grèce

HU : Hongrie

IE : République d'Irlande

IT : Italie

LU : Luxembourg

NL : Pays-Bas

PL : Pologne

PT : Portugal

RO : Roumanie

SM : République de Saint-Marin

UK : Royaume-Uni

Annexe 2. Variabilité du trafic

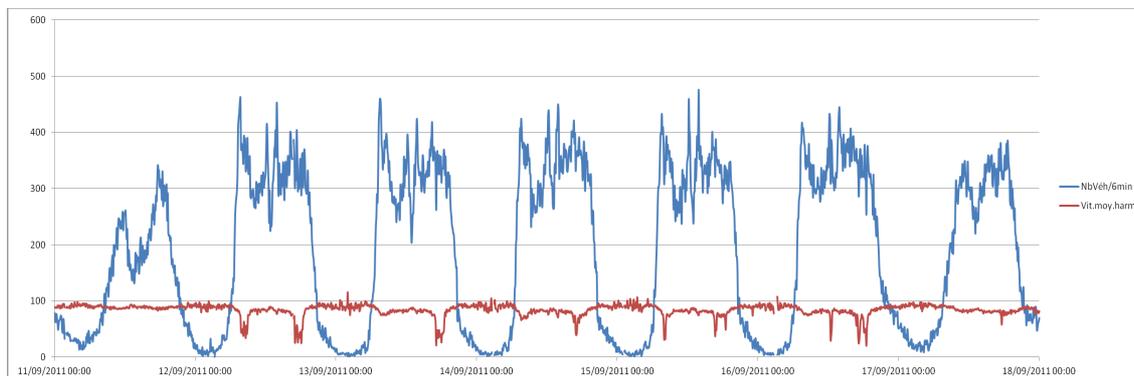


Figure 45 : Relevés de trafic à Eybens - semaine du 11 au 17/09/2011 - direction Ouest-Est

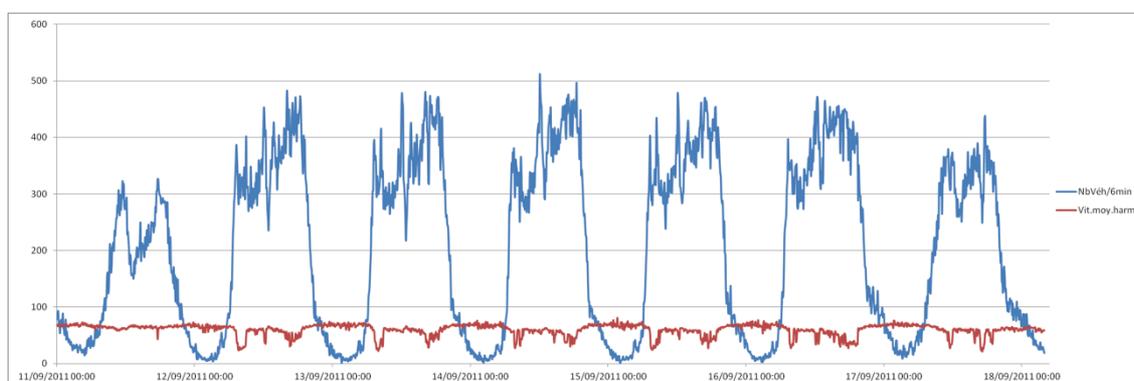


Figure 46 : Relevés de trafic au Rondeau - semaine du 11 au 17/09/2011 - direction Ouest-Est

Annexe 3. Variabilité des émissions au cours d'une semaine (NOx, sens Est-Ouest)

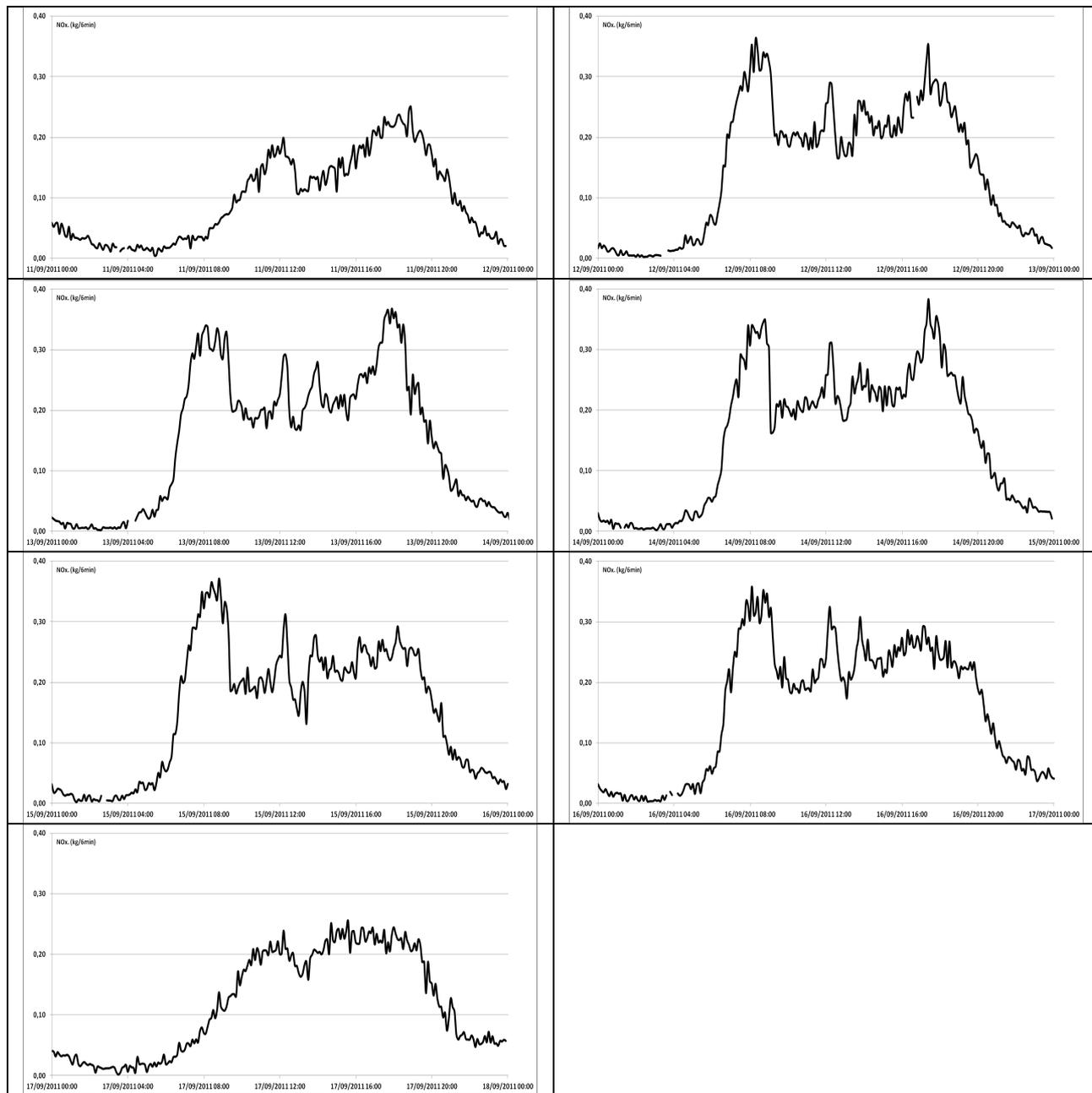


Figure 47 : Modélisation d'émissions de NOx à Echirolles – sens Est-Ouest du dimanche 11 au samedi 17/09/2011