



Mesures des émissions des bus en conditions réelles d'exploitation

COMPARAISONS ET FACTEURS D'INFLUENCE



MESURES DES EMISSIONS DES BUS EN CONDITIONS REELLES D'EXPLOITATION : COMPARAISONS ET FACTEURS D'INFLUENCE

Avril 2021

Sommaire

SOMMAIRE	2
GLOSSAIRE	4
1. RESUME	6
2. INTRODUCTION.....	10
3. CONTEXTE	12
4. PROTOCOLE DE MESURE.....	16
4.1. DISPOSITIF DE MESURE.....	16
Mesure des émissions	16
Les paramètres moteur.....	18
Mesure de la température ambiante extérieure.....	19
Géolocalisation du bus.....	19
4.2. MESURES EN CONDITIONS REELLES D'EXPLOITATION	19
4.3. AUTOMATISATION DU PROCESSUS DE MESURE.....	19
5. CAMPAGNES DE MESURES REALISEES	21
5.1. ORGANISATION D'UNE CAMPAGNE DE MESURE	21
5.2. BUS INSTRUMENTES	21
Echantillonnage des bus instrumentés	21
Système de dépollution selon les bus instrumentés.....	22
5.3. TYPES DE LIGNES INSTRUMENTEES.....	23
6. CARACTERISATION DES DONNEES RECOLTEES	26
6.1. DONNEES DISPONIBLES	26
6.2. CONDITIONS DE CIRCULATION	29
Conditions de trafic	29
Conditions météorologiques.....	31
7. BUS DIESEL : COMPARAISON DES BUS DE DIFFERENTES NORMES EURO	33
7.1. COMPARAISON SELON LA NORME EURO	33
Particules en nombre - PN	33
Oxydes d'azote (NO _x) et dioxyde d'azote (NO ₂).....	34
Monoxyde de carbone - CO	38
Consommation de carburant et dioxyde de carbone - CO ₂	38
7.2. DISPARITE INTRA-NORME DES BUS DIESEL	40
Particules en nombre - PN	40
Oxydes d'azote (NO _x) et dioxyde d'azote (NO ₂).....	41
Monoxyde de carbone - CO	45
Consommation de carburant et dioxyde de carbone - CO ₂	45
8. BUS DIESEL : ETUDES DE CERTAINS FACTEURS D'INFLUENCE	48
HIERARCHISATION DES FACTEURS D'INFLUENCE	48

8.1.	TEMPERATURE D'ECHAPPEMENT.....	50
8.2.	TEMPERATURE AMBIANTE ET DEMARRAGE A FROID	55
8.3.	VITESSE MOYENNE SUR UNE COURSE	65
8.4.	MODE DE CONDUITE	70
8.5.	EVENEMENTS SPECIFIQUES LIES AUX SYSTEMES DE DEPOLLUTION	75
	Dysfonctionnement de l'injection d'urée.....	75
	Dysfonctionnement par manque d'urée	78
	Emissions anormales de PN sur deux bus Euro VI	80
9.	BUS DIESEL : COMPARAISON AUX FACTEURS D'EMISSION UTILISES DANS LES MODELES.....	82
9.1.	FACTEURS D'EMISSION DE NO _x	82
9.2.	FACTEUR D'EMISSIONS DE CO	85
10.	BUS GNC : COMPARAISON AVEC LES BUS DIESEL.....	88
10.1.	BIBLIOGRAPHIE	88
10.2.	RAPPEL SUR LES DONNEES RECOLTEES	89
10.3.	RESULTATS	91
	Illustration de la variabilité d'usage	91
	Comparaison des émissions des bus GNC et diesel	93
	CONCLUSION.....	101
	Comparaison des bus diesel entre les normes Euros IV et Euro VI.....	101
	Comparaison des bus Euro VI Diesel et GNC.....	102
	Quels sont les facteurs d'influence les plus importants ?	103
	Sur quels facteurs les opérateurs peuvent-ils agir ?	103
	Comparaison aux facteurs d'émission COPERT.....	104
	Quelles suites à cette étude ?	104
	ANNEXES	105
	ANNEXE 1 : QU'EST- CE QU'UN TEST D'HOMOLOGATION POUR POIDS LOURDS.....	105
	ANNEXE 2 : TAUX DE VALIDATION DES CAMPAGNES DE MESURE.....	107
	ANNEXE 3 : DEFINITION DES BOITES A MOUSTACHE (BOXPLOTS)	108
	ANNEXE 4 : PRESENTATION DU MODELE STATISTIQUE	109
	ANNEXE 5 : ESTIMATION DU GAIN D'EMISSIONS SUITE AUX CHOIX TECHNOLOGIQUES D'ÎLE-DE-FRANCE MOBILITES	113
	REFERENCES.....	114

Glossaire

CAN (bus CAN) : Control Area Network, Le bus CAN est un moyen de communication série qui supporte des systèmes embarqués temps réel. Dans le cas de cette étude, c'est grâce au bus CAN que sont récupérés les paramètres moteur, via la prise OBD (On-Board Diagnostic) ou la prise FMS (Fleet Management Systems).

CO : polluant atmosphérique, monoxyde de carbone

CO₂ : gaz à effet de serre, dioxyde de carbone

COPERT : modèle de calcul des émissions de polluants atmosphériques du transport routier, élaboré par EMISIA pour l'EEA (European Environment Agency), couvrant différentes catégories de véhicules pour les polluants suivants : CO, NO_x, composés organiques volatiles, particules en masse (PM), NH₃, dioxyde de soufre, métaux lourds, CO₂, protoxyde d'azote, méthane.

EGR : Exhaust Gas Recirculation, système de dépollution des NO_x à l'échappement basé sur la redirection des gaz d'échappement dans le collecteur d'admission afin de réduire la température maximale de combustion (apport de CO₂ donc une capacité calorifique plus importante du mélange dans la chambre de combustion) et limiter l'apport d'oxygène.

(Norme) Euro : Norme européenne d'émission fixant les limites maximales de rejets de polluants pour les véhicules. Les normes Euro numérotées sont de moins en moins polluantes pour aboutir à l'heure actuelle à la norme Euro VI. Cette campagne de mesure a testé trois technologies de bus : des bus Euro IV, Euro VI et Euro VI hybrides. Les bus Euro VI hybrides sont notés dans les figures de cette étude « Euro VI H ».

FAP : Filtre à Particules, système de dépollution des particules à l'échappement, piégeant les particules à la sortie de la chambre de combustion. Les FAP nécessitent des phases de régénération basées sur la combustion des particules à très haute température.

GNV : gaz naturel pour véhicules, composé à plus de 95% de méthane (CH₄). Le terme GNV comprend le gaz naturel liquéfié (GNL) et le gaz naturel comprimé (GNC). Les bus instrumentés dans cette étude utilisent du GNC.

« Haut-le-pied » : phase de la journée d'un bus lors de laquelle le bus sort du dépôt de bus pour aller au départ du premier service, ou y retourne après la fin de son dernier service

« Hors ligne » : lors d'une journée de mesure d'un bus instrumenté, occurrence d'un dysfonctionnement GPS ou d'une erreur sur le trajet prévu initialement.

NH₃ : polluant atmosphérique précurseur de particules, ammoniac

NO_x (NO + NO₂) : polluants atmosphériques, oxydes d'azote (monoxyde d'azote + dioxyde d'azote). Les normes Euro définissent un seuil de NO_x à ne pas dépasser lors du processus d'homologation des véhicules.

Paris 1, Paris 2, Paris 3, Paris 4, PC 1, PC 2, PC 3, GC : notations pour les lignes de bus sur lesquelles les bus instrumentés ont circulé. 4 lignes parisiennes, 3 lignes en petite couronne, 1 ligne en grande couronne.

PEMS : Portable Emission Measurement System. Système permettant de mesurer avec précision la composition des gaz d'échappement en condition réelle de conduite.

PM₁₀ : polluant atmosphérique, particules de diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm

PM_{2.5} : polluant atmosphérique, particules de diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 µm

PN : polluant atmosphérique, particules en nombre (l'instrumentation mesure les particules ayant un diamètre aérodynamique supérieur à 23 nm et inférieur à 2,5 µm)

RPA : Relative Positive Acceleration, indicateur calculé pour estimer le mode de conduite sur un trajet.

SCR : Selective Catalytic Reduction, système de dépollution des NO_x basé sur la réduction des NO_x par réaction avec de l'ammoniac (nécessité d'injection d'une solution à base d'urée et d'eau).

« Temps de battement » : phase de la journée d'un bus lors de laquelle le bus est en attente entre deux courses.

1. Résumé

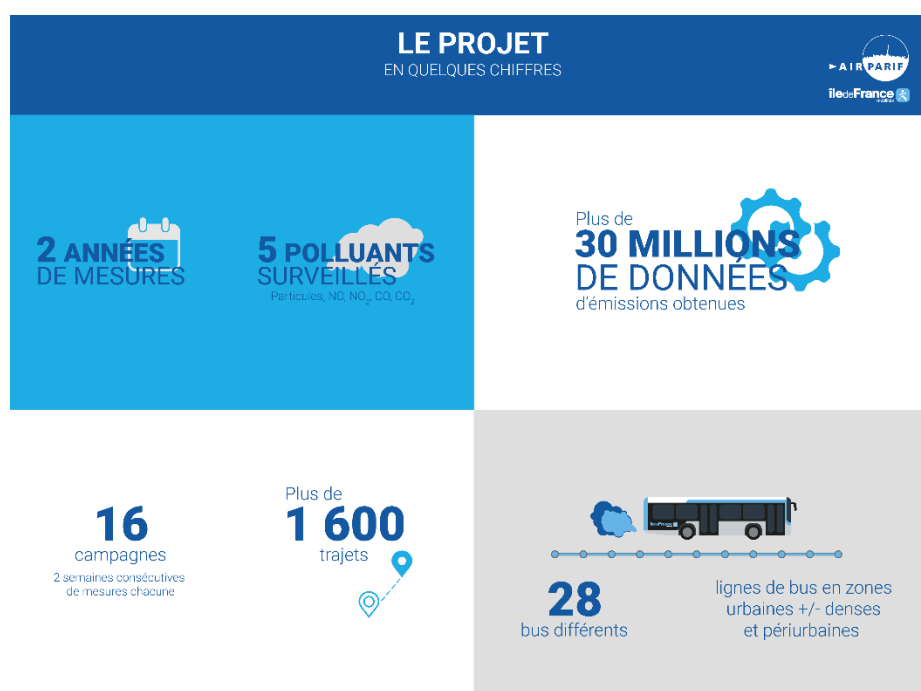
Airparif et Île-de-France Mobilités ont mené une étude de grande ampleur, portant sur la mesure des émissions de polluants de l'air des bus en conditions réelles d'exploitation en Île-de-France.

En Île-de-France, les polluants dont les concentrations dans l'air ambiant dépassent les valeurs réglementaires ou les recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé sont le dioxyde d'azote (NO₂) de la famille des oxydes d'azote (NO_x), les particules (PM₁₀), les particules fines (PM_{2,5}) et l'Ozone (O₃). Les particules ultrafines (PUF) en nombre, surveillés par Airparif, ne sont pas actuellement réglementées dans l'air ambiant. Les émissions à l'échappement des véhicules participent à ces concentrations mesurées dans l'air ambiant.

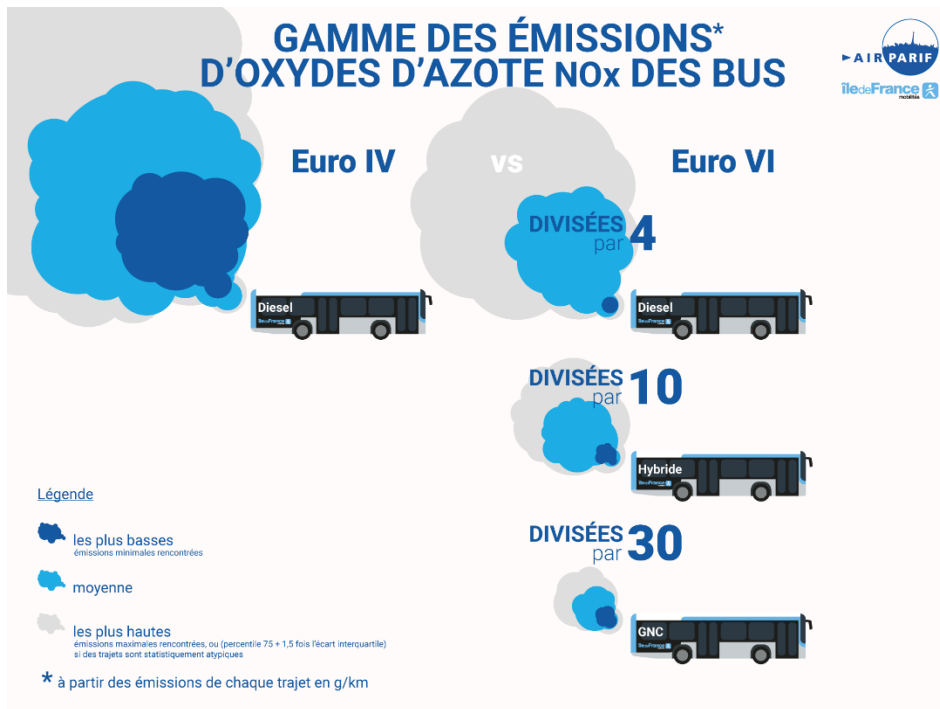
Pour certains véhicules, comme les bus, peu de données d'émissions en conditions réelles sont disponibles. Des tests d'homologation sont réalisés sur banc d'essai et sur cycles de conduite normalisés pour certifier les véhicules vis-à-vis de la réglementation ; ces tests prennent en compte un large panel de conditions de fonctionnement, mais ils ne peuvent s'apparenter à des mesures en conditions réelles.

Les résultats de cette étude en conditions réelles participent ainsi à l'amélioration des connaissances sur les émissions réelles des véhicules en circulation. Elle vise à informer les pouvoirs publics dans le cadre du développement de l'offre de transports en commun. Cette étude a été financée par Île-de-France Mobilités et menée par Airparif.

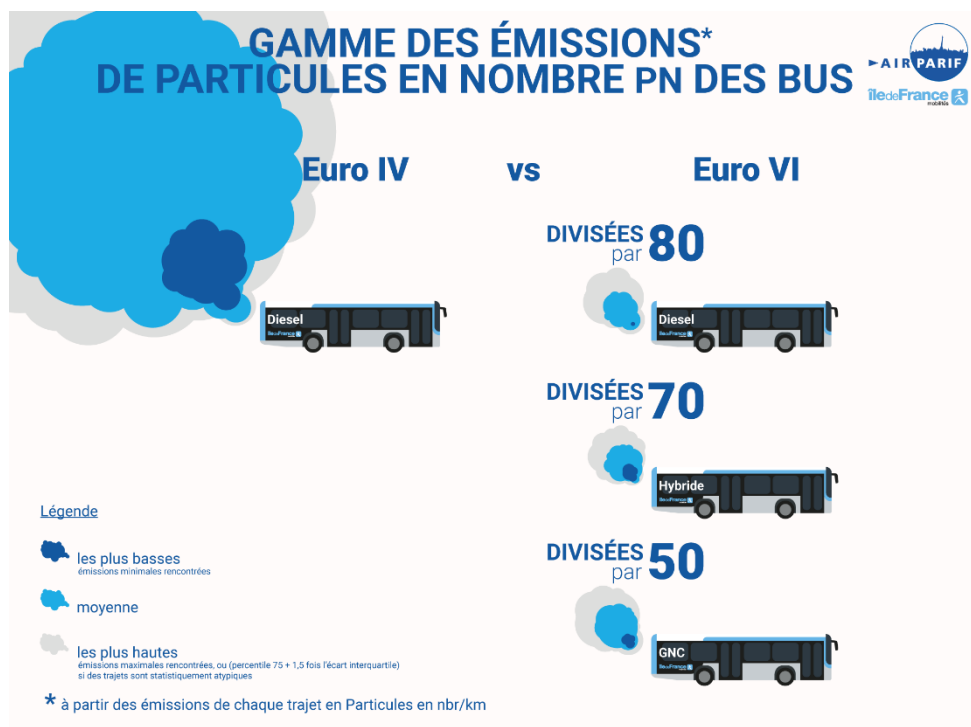
Ces mesures ont donc été effectuées en conditions réelles d'exploitation, avec des passagers, une météorologie variable, sur des lignes parisiennes, de petite et grande couronnes, et en prenant en compte les émissions particulières des démarrages à froid. Quatre polluants de l'air et un polluant du climat ont été mesurés : particules fines et ultrafines de diamètre compris entre 23 nm et 2,5 µm (PN), oxydes d'azote (NO_x, dont NO₂), monoxyde de carbone (CO), et dioxyde de carbone (CO₂, gaz à effet de serre). Les 28 bus ayant été instrumentés sont des bus Euro IV (norme européenne d'émission, véhicules homologués à partir de 2006) diesel, Euro VI (véhicules homologués à partir de 2014) diesel, hybrides et GNC - Gaz Naturel Comprimé, qui est une forme de Gaz Naturel pour Véhicules (GNV).



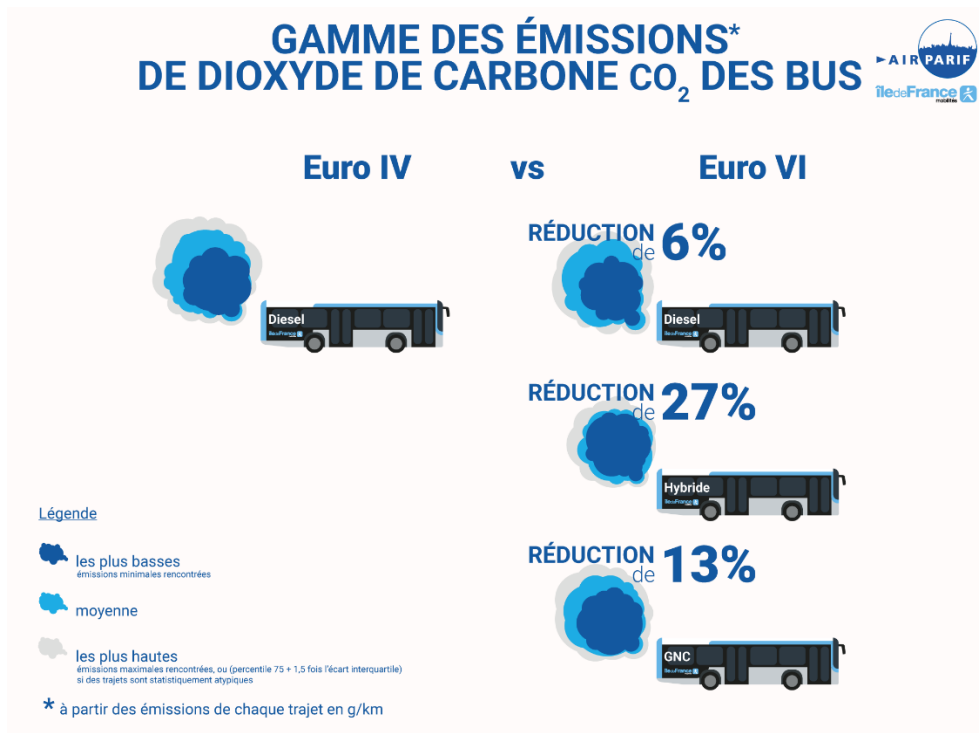
Concernant les émissions d'oxydes d'azote (NO_x), les bus Euro VI diesel divisent par 4 en moyenne les émissions de NO_x par rapport à celles des bus Euro IV diesel. Les véhicules Euro VI hybrides divisent par 10 les émissions par rapport à celles des bus Euro IV diesel, et une division par 30 des émissions des bus GNC Euro VI est mesurée par rapport à celles des bus Euro IV diesel.



Concernant les particules en masse (comme les PM₁₀ et PM_{2,5}), un rapport de l'Ademe [1] précise que pour les bus Euro VI diesel et GNC, les rejets de ces particules sont très faibles et non mesurables. Les mesures réalisées par Airparif ont visé à compléter ces constats en s'intéressant aux particules en nombre à l'échappement (PN), avec la conclusion suivante : quelle que soit la motorisation ou le carburant, le passage des bus à la norme Euro VI représente une réduction conséquente du nombre de particules émises, de 80 à 50 fois moins qu'un bus diesel Euro IV.



Concernant les émissions de dioxyde de carbone (CO₂), les bus Euro VI diesel ont diminué de 6% leur consommation de carburant, et les émissions de CO₂ qui y sont liées, par rapport aux véhicules Euro IV diesel. Les bus Euro VI hybrides réduisent eux de 27% leurs émissions de CO₂ vis-à-vis des Euro IV diesel. Les émissions des bus GNC Euro VI réduisent de 13% leurs émissions de CO₂ vis-à-vis des Euro IV diesel. Pour rappel, au-delà des émissions de CO₂ à l'échappement, les émissions totales de CO₂ du puits à la roue sont déterminées par l'origine du carburant.

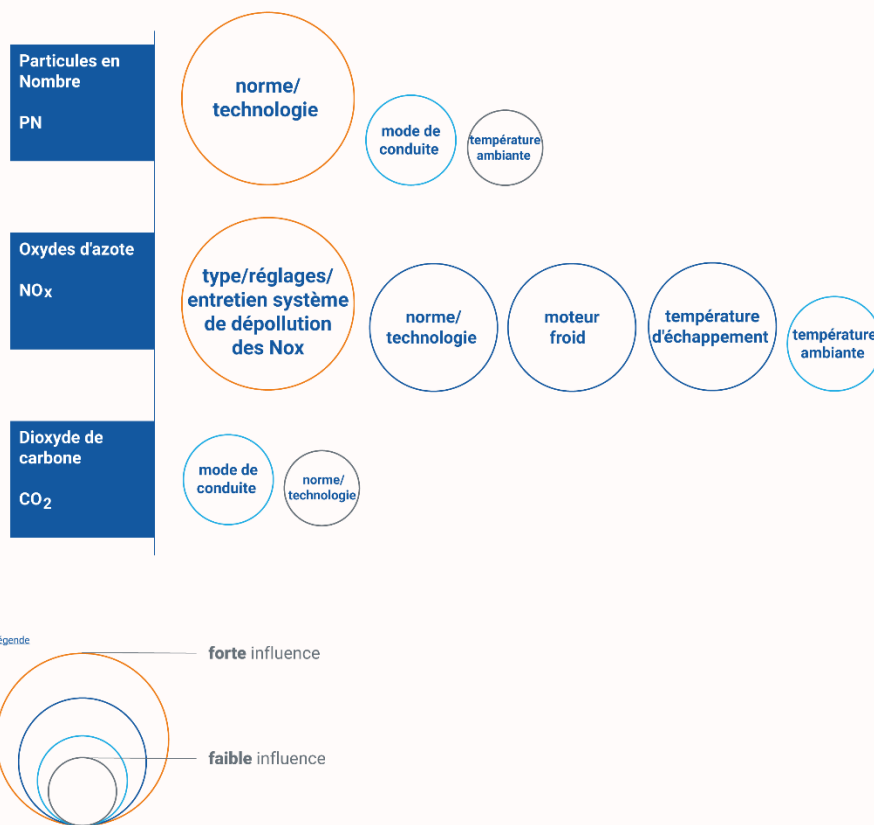


Une analyse de certains facteurs impactant les émissions a aussi été menée. Ces facteurs, bien que dépendant du polluant considéré, sont, en résumé et par ordre d'influence décroissante :

- La technologie de motorisation du véhicule (voir plus haut) ;
- Les différents systèmes de dépollution, leurs réglages et leur entretien : un fonctionnement non optimal des systèmes de dépollution, notamment la Selective Catalytic Reduction (SCR), peut causer des émissions de NO_x ou de NO₂ 10 à 100 fois plus élevées. Cette situation, très rarement rencontrée durant l'étude, peut entraîner une grande variabilité des émissions ;
- La température d'échappement : lorsqu'elle est trop basse, elle peut empêcher le système de dépollution SCR de fonctionner de manière optimale et ainsi augmenter les émissions de NO_x ;
- La température ambiante et le démarrage à froid : à moteur froid, ou à moteur chaud lors d'une température ambiante faible, les conditions de combustion et de fonctionnement des systèmes de dépollution ne sont pas toujours optimales, entraînant une hausse d'émissions de NO_x. Une température ambiante faible peut aussi allonger la durée du démarrage à froid ;
- Le mode de conduite et la vitesse : une conduite moins souple en termes de régime moteur et d'accélération peut provoquer des émissions plus importantes de CO₂ et de particules. Concernant les bus Euro IV seulement, la diminution de la vitesse moyenne de 20 km/h à 8 km/h conduit à un doublement des émissions de particules de NO_x, et une hausse de 40% pour le CO₂, à trajet constant. En revanche, la vitesse moyenne influe très peu sur les émissions des bus Euro VI.

FACTEUR D'INFLUENCE SUR LES ÉMISSIONS DE POLLUANTS

Euro VI diesel



Les évaluations de la pollution de l'air par modélisation se basent sur des facteurs d'émissions des véhicules. Cette étude montre que le modèle théorique COPERT V, qui est l'une des bases de données les plus communément utilisées, a tendance à sous-estimer en moyenne les émissions de NO_x mesurées dans les conditions de cette étude pour les bus diesel Euro IV et Euro VI, tout en restant dans les gammes d'émissions rencontrées.

D'un point de vue scientifique, Airparif souhaite contribuer au perfectionnement des modélisations utilisées pour évaluer la qualité de l'air, en améliorant les facteurs d'émissions utilisés jusqu'à présent. Les données observées lors de cette étude pourront être proposées pour alimenter à terme les bases de données européennes, utilisées dans les inventaires des émissions alimentant les cartographies de qualité de l'air.

2. Introduction

Si la qualité de l'air s'est nettement améliorée ces dernières décennies en Île-de-France, des dépassements importants des valeurs limites réglementaires persistent néanmoins pour le dioxyde d'azote et les particules PM₁₀, deux des quatre polluants les plus problématiques dans l'air ambiant en Île-de-France, pour lesquels la France est en contentieux avec l'Union Européenne. Pour le dioxyde d'azote, ce sont toujours près de 500 000 franciliens (soit 4%) qui sont exposés en 2019 à ces dépassements avec une condamnation par la Commission Européenne pour non-respect de la réglementation. Pour les particules PM₁₀, une action est en cours auprès de la Cour de Justice Européenne pour non-respect systématique des règles de l'Union relatives à ce polluant, sur une durée de 12 ans dans la Capitale. En 2019, 1% des franciliens étaient toujours concernés par un dépassement réglementaire des PM₁₀. En France, le Conseil d'État a constaté que le Gouvernement n'avait pas pris les mesures demandées pour réduire la pollution de l'air dans huit zones en France, dont Paris : après une première décision en juillet 2017, le Conseil d'État a prononcé une astreinte de 10 millions d'euros par semestre de retard.

Au regard des recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé, les ¾ des franciliens sont potentiellement exposés à des niveaux de particules PM₁₀ au-delà de ces seuils, et la quasi-totalité pour les particules fines PM_{2.5}. Au-delà de ces polluants réglementés, l'Anses recommande la mise en place d'une surveillance et d'un renforcement des connaissances pour des polluants dits « émergents », comme pour les particules ultrafines, encore plus petites que les PM₁₀ et les PM_{2.5}.

En tant qu'association indépendante en charge de la surveillance et de l'information sur la qualité de l'air en Île-de-France depuis 40 ans, Airparif a pour mission, entre autres, la compréhension des phénomènes de pollution et l'analyse des tendances, pour lesquels l'évolution du parc roulant est un paramètre majeur. Airparif accompagne également les décideurs dans l'élaboration, l'évaluation et le suivi des plans d'actions visant à poursuivre, voire accélérer, l'amélioration de la qualité de l'air, en particulier sur les secteurs d'activité à enjeux, comme le transport routier qui représente la principale source d'émission d'oxydes d'azote et contribue pour une large part à celles de particules. L'inventaire régional des émissions permet, entre autres, d'évaluer l'impact des plans d'actions et de tester différents scénarii prospectifs. Le Programme Régional de Surveillance de la Qualité de l'air francilien (PRSQA) d'Airparif 2016-2021 prévoit de travailler sur la quantification des incertitudes liées aux calculs d'émissions polluantes, notamment par des mesures en conditions réelles de circulation.

En effet, pour certains véhicules, comme les bus, peu de données d'émissions en conditions réelles sont disponibles. Des tests d'homologation sont réalisés sur banc d'essai et sur cycles de conduite normalisés pour certifier les véhicules vis-à-vis de la réglementation ; ces tests prennent en compte un large panel de conditions de fonctionnement, mais ils ne peuvent s'apparenter à des mesures en conditions réelles.

Île-de-France Mobilités s'est engagée dans la transition écologique des transports en commun de la région Île-de-France pour relever les deux défis majeurs que sont l'amélioration de la qualité de l'air, tout en limitant les émissions de gaz à effet de serre, et l'incitation au développement d'innovations et au progrès technologique.

Afin d'évaluer les performances des bus en conditions réelles d'exploitation (avec des passagers et des conditions variables d'exploitation et sur différentes lignes en Île-de-France) et de s'assurer de la réalité des baisses d'émissions de polluants pour les bus de nouvelles générations, le Conseil d'Île-de-France Mobilités a réaffirmé, dans son vœu du 1^{er} juin 2016, son souhait de réaliser rapidement des mesures d'émissions de polluants sur les bus en fonctionnement, sur des échantillons représentatifs du parc roulant de bus achetés depuis le 1^{er} janvier 2014, chez les opérateurs franciliens.

Les préoccupations des deux organismes se rejoignant, Airparif a proposé à Île-de-France Mobilités de déployer une série de campagnes de mesure des émissions à l'échappement des bus **en conditions réelles d'exploitation**. Cette étude répond à trois objectifs :

- **Objectiver les différences d'émissions rejetées dans l'atmosphère selon les normes Euro¹ et le type de motorisation en conditions réelles d'exploitation**. Ainsi, quatre catégories de bus sont instrumentées dans ce projet : des bus diesel de normes Euro IV et Euro VI, des bus hybrides (diesel / électrique) de norme Euro VI et des bus gaz naturel comprimé (GNC) de norme Euro VI. La technologie GNC formera une grande partie de la flotte d'Île-de-France Mobilités à l'horizon 2029, conjointement aux bus électriques.
- Etudier les **paramètres d'influence** permettant d'expliquer les **fluctuations des émissions** (conditions de circulation telles que vitesse, mode de conduite, température extérieure, ...) ;
- **Comparer pour la première fois les émissions en conditions réelles d'exploitation aux facteurs d'émission actuellement disponibles et utilisés dans les calculs d'émissions** alimentant les systèmes de modélisation des champs de concentrations en tous points de l'Île-de-France (méthodologie COPERT V, qui comporte encore peu d'informations sur les bus).

En revanche, cette étude n'a pas vocation à comparer les résultats avec ceux des procédures d'homologation des véhicules (type « Real Driving Emissions »), les conditions de mesure étant très différentes. Pour illustration, les émissions des bus ne sont pas mesurées en conditions opérationnelles sur une ligne avec des passagers lors des procédures d'homologation « Real Driving Emissions », alors que c'est le cas dans la présente étude. L'Annexe 1 résume ce qu'est un test d'homologation.

Compte-tenu de son ampleur, cette étude de deux ans est une première mondiale. Elle a été menée sur **11 types de bus diesel (Euros IV, Euro VI et Euro VI hybrides) et 3 types de bus GNC (Euro VI), avec deux bus pour chaque type, soit 28 bus instrumentés au total, représentatifs du parc roulant francilien et exploités par trois opérateurs (RATP, TRANSDEV, KEOLIS). 16 campagnes de mesure de deux semaines chacune se sont déroulées sur deux ans (2018/2020) et sur des lignes de la région francilienne (Paris, petite et grande Couronnes). Différents types de polluants de l'air ont été suivis (particules, oxydes d'azote dont le dioxyde d'azote, monoxyde de carbone) et le dioxyde de carbone en tant que gaz à effet de serre**. Ce sont ainsi plus de 6 500 000 données à l'échelle de la seconde qui ont été collectées et traitées, soit plus de 30 000 000 de données d'émissions, ce qui correspond à plus de 1 600 courses (trajets de terminus à terminus).

Cette étude est également inédite puisque les mesures ont été réalisées dans les conditions d'exploitation normales des bus, c'est-à-dire avec des passagers, sur des lignes commerciales. Pour ce faire, un dispositif de mesure et de recueil des données autonome a dû être spécifiquement développé, afin de ne pas perturber le fonctionnement opérationnel des bus. Ce sont les résultats et les enseignements de ce dispositif qui sont présentés dans ce rapport.

¹ Norme Euro : Normes européennes d'émission fixant les limites maximales de rejets de polluants pour les véhicules. Les normes Euro numérotées sont de moins en moins polluantes pour aboutir à l'heure actuelle à la norme Euro VI. Voir Annexe 1 pour plus de détails sur les normes.

3. Contexte

En Île-de-France, malgré des améliorations conséquentes, des dépassements importants des valeurs limites réglementaires sont encore enregistrés pour le dioxyde d'azote et les particules, avec, en 2019, 4% des franciliens (soit 500 000) exposés à ces dépassements pour le dioxyde d'azote et 1% pour les particules PM₁₀. Les recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé sont dépassées pour la quasi-totalité des Franciliens pour les particules fines (PM_{2.5}) et pour les ¾ d'entre eux pour les PM₁₀ [2].

Comme l'illustrent les cartes de Figure 1 et Figure 2, les niveaux les plus élevés sont enregistrés à proximité immédiate des grands axes routiers. Les niveaux en situation de fond diminuent au fur et à mesure de l'éloignement du cœur de l'agglomération parisienne.

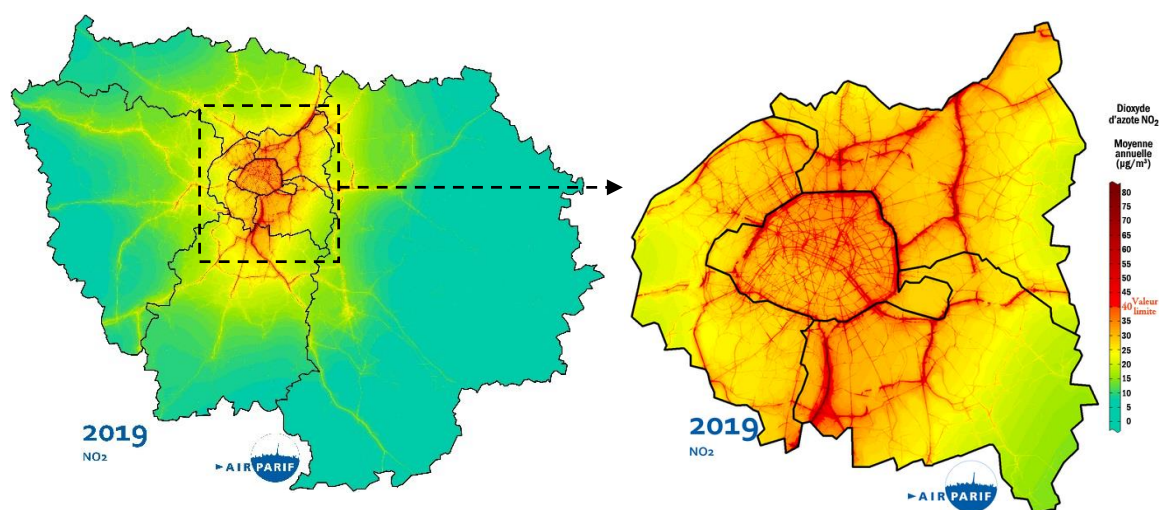


Figure 1 : Concentrations moyennes annuelles de dioxyde d'azote (NO₂) en 2019 en Île-de-France, avec un zoom sur Paris et la petite couronne parisienne

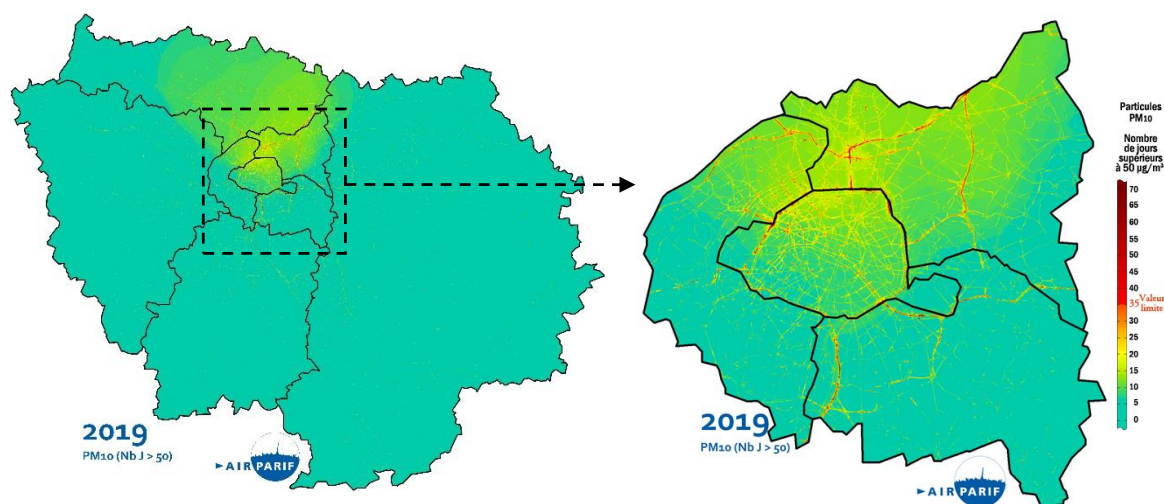


Figure 2 : Nombre de jours de dépassement du seuil journalier de 50 µg/m³ en particules PM₁₀ en Île-de-France, avec un zoom sur Paris et la petite couronne parisienne pour l'année 2019

Les émissions du secteur des transports participent de manière importante à cette pollution locale. La moitié des émissions franciliennes de NO_x (53%) est émise par le transport routier (Figure 3). Ce secteur contribue également pour 17% aux émissions de particules primaires PM₁₀ et 19% à celles de PM_{2.5}. Le trafic routier est responsable également de 29% des émissions de monoxyde de carbone. Les concentrations de ce polluant ne sont plus problématiques dans l'air ambiant en Île-de-France.

Le transport routier contribue également pour 29% aux émissions de GES franciliennes (comprenant celles de CO₂).

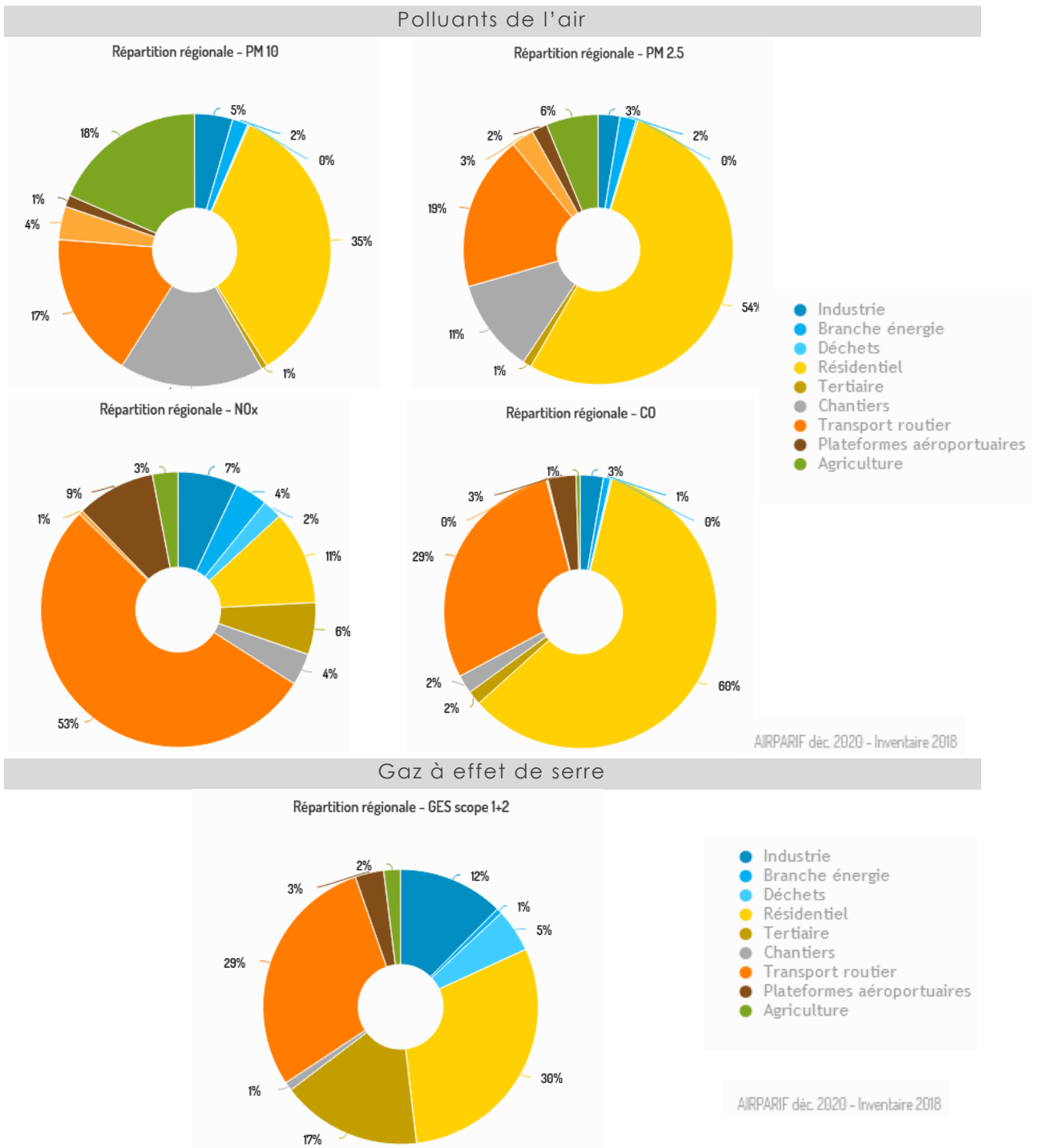


Figure 3 : Répartitions des émissions des polluants étudiés selon les secteurs d'activités en Île-de-France, en 2018, selon l'inventaire des émissions d'Airparif de 2018 (source : Airparif 2020)

Ainsi, les actions visant à limiter les émissions du transport routier sont nécessaires, que ce soit en limitant les émissions unitaires ou l'ampleur du trafic routier. Selon une étude du King's College et

d'Airparif sur Paris et Londres [3], le renouvellement de la flotte a été un levier conséquent d'amélioration de la qualité de l'air, tant à proximité du trafic qu'en pollution de fond. Des normes Euro plus strictes ont nécessité de nouveaux systèmes de dépollution, une évolution des motorisations et des carburants, pour limiter la pollution émise par les nouveaux véhicules. Actuellement, un questionnement sur les particules ultrafines (<100nm) se pose dans l'air ambiant, mais aussi au niveau des émissions des véhicules, avec les particules de tailles inférieures à 23 nm, dont la prise en compte est en discussion pour les normes Euro VII.

Les plans d'action s'appuient sur les leviers identifiés par le recensement des émissions et les évaluations prospectives qui en découlent. C'est pourquoi les études de mesure à l'émission des véhicules en conditions réelles sont importantes, afin d'affiner l'état des lieux de ces émissions et mieux estimer les incertitudes qui y sont associées.

Compte-tenu de leurs niveaux dans l'air ambiant, en lien avec la contribution du trafic, et des méthodes de mesure disponibles au moment de l'étude pour une analyse en embarqué, les polluants mesurés à l'échappement dans cette étude sont :

- Les oxydes d'azote (NO_x, composés du monoxyde et du dioxyde d'azote, NO et NO₂) ;
- Le monoxyde de carbone (CO), compris dans l'appareil de mesure utilisé - même si ses niveaux dans l'atmosphère ne sont pas problématiques au regard de la réglementation ;
- Les particules en nombre (PN) supérieures à 23 nm. La toxicité des particules est liée notamment à leur taille et à leur composition chimique : pour les particules en masse (comme les PM₁₀ et PM_{2,5}), un rapport de l'Ademe [1] précise que les rejets des bus Euro VI sont très faibles et ne sont pas mesurables. Par ailleurs, lors de la conception de cette étude, il n'existait pas de solution de mesure des PM en embarqué. Les mesures réalisées par Airparif viennent donc compléter les connaissances en s'intéressant aux particules en nombre (PN). Les particules contribuant aux PN sont plus petites (ultrafines) que celles contribuant aux PM. Les particules inférieures à 23 nm, non réglementées à l'émission pour la norme Euro VI et techniquement complexes à mesurer, ne sont pas prises en compte dans cette étude ;
- Le CO₂, en tant que gaz à effet de serre.

Quels liens entre ces polluants et les moteurs thermiques ?

Le processus de combustion du diesel, avec un mélange riche en air (par conséquent en oxygène) et de fortes températures dans la chambre de combustion, entraîne des émissions élevées d'oxydes d'azote. La part prépondérante à l'émission des NO_x est le NO, le NO₂ est minoritaire. Toutefois, le ratio entre ces deux composés peut être différent selon les équipements et les conditions d'exploitation. Les émissions d'hydrocarbures (HC) et de CO ne sont pas produites en grande quantité, car ils sont normalement produits par manque d'oxygène lors de la combustion. Les particules fines (de quelques nanomètres à 2,5 µm environ pour les particules issues de la combustion du diesel) sont produites en nombre élevé du fait du processus de combustion par compression, générant de fines particules de carburant imbrulées. La composition et la taille des particules d'échappement de moteurs diesel dépendent en partie de la technologie (moteur et systèmes de dépollution), de l'état du véhicule, la charge, le style de conduite, etc. De manière générale, une particule issue de la combustion du diesel se compose de noyaux de carbone issus de la combustion : les suies formées dans les gaz brûlés s'oxydent, s'accumulent sous forme de sphérules, ces sphérules croissent par collision et agglomération jusqu'à 20-40nm, puis s'associent sous forme d'agrégats. Sur ces agrégats sont adsorbés plusieurs espèces organiques, des molécules condensées pendant ou après la combustion, formant la fraction soluble des particules : hydrocarbures imbrulés (96%), dérivés

oxygénés (cétones, esters, aldéhydes, lactones, éthers, acides organiques), hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP (0,2%), dérivés minéraux (sulfates, 3%) et dérivés métalliques provenant de la combustion du carburant ou du lubrifiant, ou de l'usure du moteur (soufre, chlore, potassium, calcium, chrome, manganèse, fer, nickel, cuivre, zinc, antimoine, argent) [4]. La répartition de ces particules, en nombre, suit une loi log-normale centrée sur 100nm en sortie moteur. Avec un filtre à particules, l'ensemble des classes granulométriques est impactée donc le spectre granulométrique reste proche en sortie d'échappement, et la fraction HAP est quasiment totalement éliminée [4].

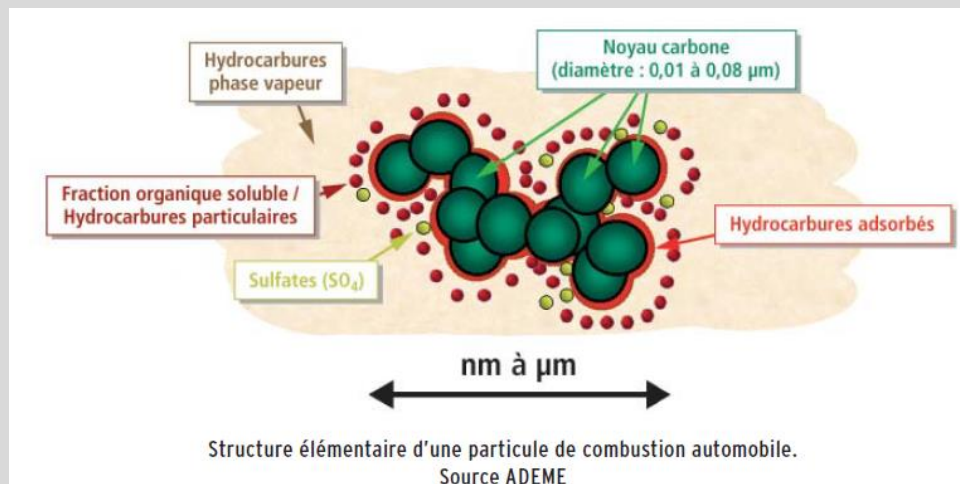


Figure 4 : Structure élémentaire d'une particule de combustion automobile [4]

La saisine de l'ANSES sur les particules de l'air ambiant extérieur [5] permet de préciser la toxicité de ces particules, dépendant de leurs morphologies et de leurs caractéristiques physico-chimiques. L'effet sanitaire de la source de particules « trafic routier », dans son ensemble, est confirmé par de nombreuses études, notamment pour le carbone suie (surtout émis par les véhicules Diesel) : effets respiratoires (lésions ultra structurales, fonction respiratoire, remodelage pulmonaire), cardiovasculaires (fonction vasculaire, coagulation, lésions d'athérosclérose), et mortalité toutes causes. Plus généralement, il est aussi probable que les $PM_{2.5}$ issues du trafic routier aient un effet long terme sur la santé neurologique et sur la santé périnatale. Par ailleurs, l'exposition aux effluents d'échappement des moteurs Diesel et des particules Diesel est classée cancérigène par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC).

Enfin, le CO_2 est un gaz à effet de serre, en grande partie émis par les processus de combustion et donc le trafic routier.

L'ammoniac (NH_3) constitue un enjeu important car il est l'un des précurseurs des particules $PM_{2.5}$ secondaires, dangereuses pour la santé et particulièrement problématiques en zone urbaine. Avec l'utilisation des nouvelles techniques de dépollution, impliquant de l'ammoniac pour la réduction des NO_x , cet ammoniac peut parfois être rejeté en excès dans l'échappement. Ce polluant n'a cependant pas pu être mesuré lors de cette étude, faute de technologie ad hoc à l'époque de la conception de l'étude pour le mesurer en embarqué avec le mode opératoire choisi.

4. Protocole de mesure

4.1. Dispositif de mesure

Mesure des émissions

Les appareils de mesure choisis pour ces campagnes sont le AVL M.O.V.E GAS PEMS 492 iS (PEMS pour Portable Emission Measurement System), mesurant les émissions de polluants gazeux (NO, NO₂, CO, CO₂) et le AVL M.O.V.E PN PEMS 496 iS mesurant les émissions de particules, en nombre (PN). Chaque bus était instrumenté d'un GAS PEMS et d'un PN PEMS. Trois GAS PEMS et trois PN PEMS ont été utilisés alternativement durant les campagnes : la photo Figure 5 représente une installation dans un bus, avec un GAS PEMS au-dessus d'un PN PEMS.



Figure 5 : Appareils de mesure : GAS PEMS au-dessus du PN PEMS

Les méthodes d'analyse des appareils de mesure sont :

- Pour le NO et le NO₂ (NO_x): absorption dans l'UV et mesure simultanée et dissociée du NO et du NO₂ ;
- Pour le CO et le CO₂ : méthode optique dans l'infrarouge.
- Pour les PN : méthode de mesure électrique (effet CORONA) dont l'objet est de charger électriquement les particules et de mesurer l'activité électrique qui correspond au nombre de particules (plage de mesure de 23 nm à 2,5 µm) ;

Les prélèvements d'un échantillon des émissions du bus sont effectués au sein d'une ligne d'échappement spécifique (Figure 6). Celle-ci, intégrée dans le bloc moteur, répond à des contraintes, notamment de longueur, afin que l'échantillon des émissions soit représentatif des rejets du bus. Un débitmètre est piqué sur la ligne d'échappement afin de convertir les concentrations des polluants dans les gaz d'échappement (en %) en valeurs exploitables ensuite (en g/s).



Figure 6 : Illustration de la ligne d'échappement spécifique et de la ligne de prélèvement.

La mesure des émissions des bus en conditions réelles nécessite la mise en œuvre de moyens autonomes d'alimentation électrique des équipements de mesure. Deux caissons spécifiques ont été réalisés, permettant l'installation des appareils de mesure et des batteries au sein même du bus.

La Figure 7 illustre de manière schématique les équipements installés pour la mesure et le recueil des données (émissions, géolocalisation, moteur, météorologie) au sein d'un bus.

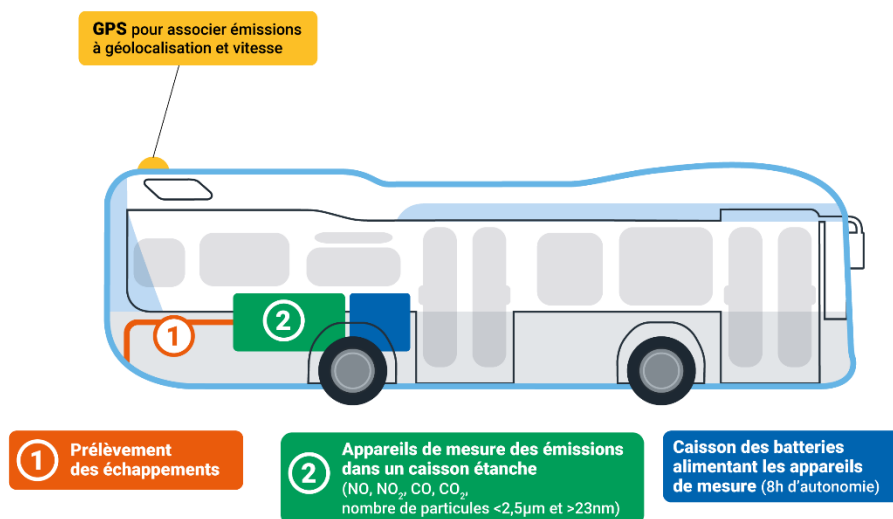
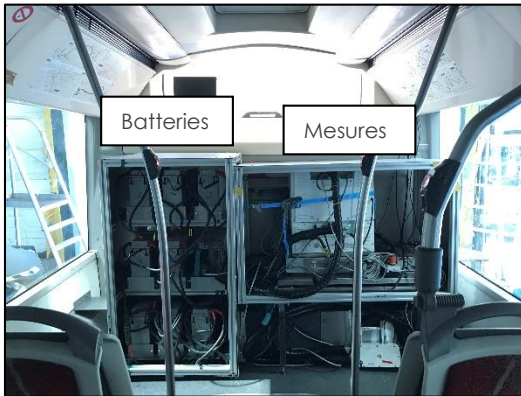


Figure 7 : Illustration des équipements permettant la mesure et le recueil des données (émissions, géolocalisation, moteur, météorologie) au sein d'un bus.

Les deux caissons accueillant les mesures et les batteries sont implantés le plus souvent à l'arrière du bus (cf. Figure 8). Certaines configurations nécessitent cependant une mise en œuvre différente sur un côté du bus. Ces caissons sont installés en lieu et place généralement de 6 à 9 sièges passagers selon la configuration du bus.



a) Caissons batteries et mesures



b) Caissons avec protection et information voyageurs

Figure 8 : Illustration des caissons accueillant les batteries et les mesures au sein d'un bus avant (a) et après (b) finalisation de l'installation.

Les paramètres moteur

Afin de décrire et identifier les paramètres d'influence les plus importants jouant un rôle sur les émissions, de nombreux paramètres moteurs sont recueillis ou mesurés en parallèle et simultanément aux émissions : entre autres, le régime moteur, le taux de consommation de carburant, la température du liquide de refroidissement, la température d'échappement (mesurée par le débitmètre). Les paramètres moteur du bus CAN (Controller Area Network) sont recueillis via une connexion à la prise OBD du bus (On-Board Diagnostic) ou à la prise FMS du bus (Fleet Management Systems Interface).

Le taux de consommation de carburant n'était pas disponible pour tous les bus. Pour le calcul de la consommation de carburant en L/100km, la masse volumique du diesel est établie à 840 g/L (820 à 860 g/L à 15°C).

Le couple moteur (référence, friction et percent), n'était pas accessible via le bus CAN ; la charge moteur et la puissance moteur qui en découlent n'ont pas pu être calculés. Le couple moteur n'étant pas accessible, les résultats d'émission sont exprimés en g/km et non en g/kWh. Les études sur les moteurs mesurent généralement les émissions en g/kWh pour être indépendantes de certaines conditions d'exploitation (caractéristiques de la route, conditions d'usage du bus comme la charge...). La présente étude a pour objectif, entre autres, d'analyser les influences de certains de ces facteurs, donc le calcul en g/km est plus pertinent.

A partir des données de vitesse recueillies par le bus CAN ou le GPS, un indicateur est calculé pour chaque course, la Relative Positive Acceleration (RPA), afin de caractériser le mode de conduite (agressif/dynamique, souple...). Cet indicateur est défini par la réglementation européenne [6] dans le but de fixer des limites physiques aidant à définir un mode de conduite « normal », comme mentionné dans la réglementation. Il se base sur les valeurs de vitesse et d'accélération du véhicule.

Relative Positive Acceleration (RPA) pour la course k :
$$RPA_k = \frac{\sum_j (\Delta t \cdot (v \cdot a_{pos})_{j,k})}{\sum_i d_{i,k}}$$

Δt : pas de temps de 1 seconde

$(v \cdot a_{pos})_{j,k}$: pour le pas de temps j de la course k , produit de la vitesse et de l'accélération positive ($>0,1 \text{ m/s}^2$), en m^2/s^3

j allant de 1 à M_k , nombre de données de la course k avec une accélération positive

$d_{i,k}$: distance parcourue pendant le pas de temps i de la course k , en m.

i allant de 1 à N_k , nombre total de données de la course k .

Mesure de la température ambiante extérieure

La température extérieure pouvant impacter les émissions, notamment lors des premiers kilomètres réalisés par les bus, période appelée « démarrage à froid », elle est mesurée simultanément aux données d'émissions afin d'étudier finement ce paramètre d'influence.

Géolocalisation du bus

Afin d'obtenir les données géographiques en parallèle de celles issues directement des mesures des émissions, la géolocalisation est enregistrée, afin d'associer une donnée d'émission mesurée à un lieu. Cette information est utilisée pour l'analyse des paramètres d'influence, telles que la présence de voies dédiées aux bus (couloirs et voies de bus), et surtout de différencier les phases où le bus réalise une course ou non (phases de haut-le-pied, de battement...). La vitesse calculée par le GPS est aussi utilisée lorsque les données du bus CAN ne sont pas accessibles.

4.2. Mesures en conditions réelles d'exploitation

Le point fort et novateur de ce projet est la mesure en conditions réelles d'exploitation, c'est-à-dire sur des lignes commerciales dans des bus avec des passagers. Pour pouvoir effectuer ces mesures en présence des clients des lignes de bus instrumentées, une validation préalable des services de l'Etat est nécessaire, afin de garantir l'entière sécurité des passagers au sein des bus instrumentés. Celle-ci a été réalisée pour chacun des bus avec l'établissement de dossiers techniques précisant notamment :

- La répartition des charges avec la mise en place du matériel ;
- Les points de fixation des moyens de mesure (répartition et solidité) ;
- L'isolation entre le bloc moteur et l'intérieur des bus afin de prévenir d'éventuelles remontées de gaz d'échappement au sein de l'habitacle ;
- Le nombre d'issues de secours disponibles une fois la mise en œuvre du matériel réalisée ;
- Le nombre de places disponibles pour les usagers ;
- La conformité électrique des moyens mis en œuvre au sein des bus ;
- L'information des passagers.

La délivrance d'une immatriculation « W garage » à titre exceptionnel issue des dossiers techniques et la validation par les services de l'Etat des bus une fois équipés permettent la réalisation des mesures en conditions réelles d'exploitation avec passagers en toute sécurité.

4.3. Automatisation du processus de mesure

Les travaux préalables à la mise en œuvre des mesures ont permis de rendre le processus de mesure le plus autonome possible, c'est-à-dire de mesurer et recueillir des données sur l'ensemble des périodes d'exploitation des bus sans intervention humaine. La Figure 9 illustre ce processus de mesure appliqué lors de chaque campagne de mesure.

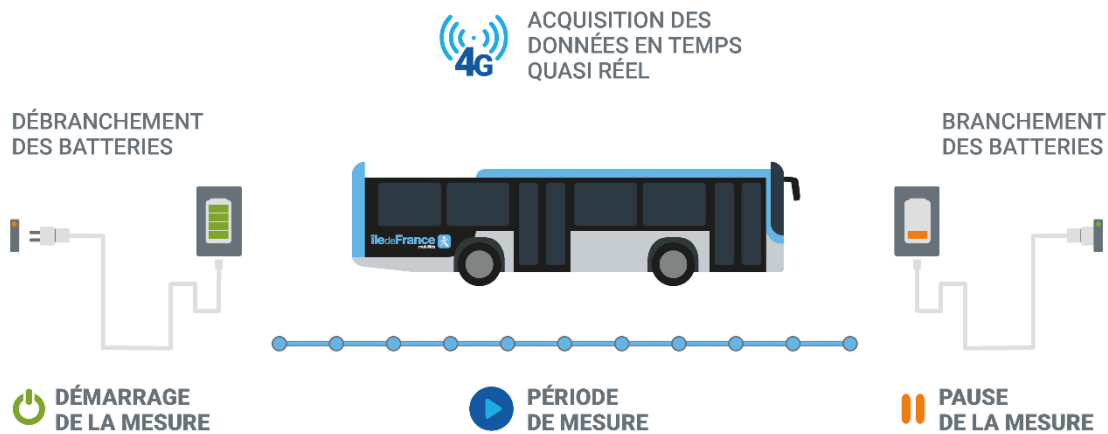


Figure 9 : Schéma présentant le processus de mesure permettant le démarrage des mesures et le recueil de données de manière autonome.

Le système autonome de gestion des mesures permet une mesure opérationnelle des polluants dès le démarrage du bus. Il débute à partir du débranchement des batteries en charge. Cela permet notamment de prendre en compte les périodes dites de « démarrage à froid » pour lesquelles les émissions peuvent être plus importantes. A l'inverse, lorsque le bus est au dépôt, la mise en pause du matériel de mesure est activée lorsque le branchement des batteries est effectué.

Les paramètres moteur, la température extérieure et la géolocalisation sont également recueillis et stockés au sein d'un cloud, de manière automatique et autonome.

Les données sont ensuite validées et mises en base pour permettre leur interprétation (cf. Figure 10).

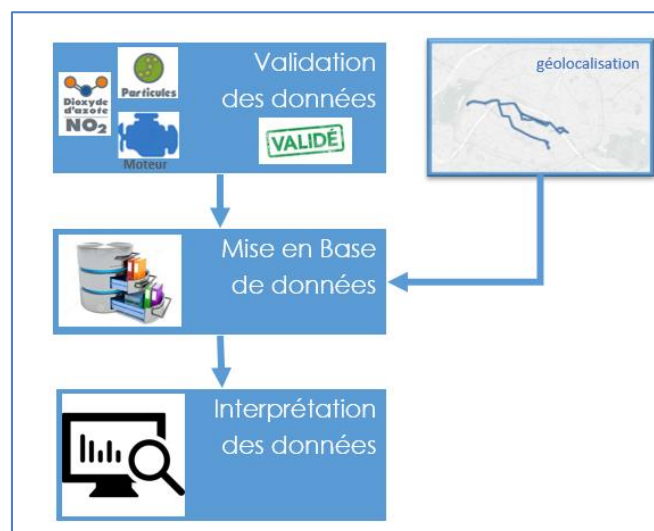


Figure 10 : Schéma illustrant le processus d'intégration des données mesurées lors des campagnes.

La base de données stocke l'ensemble des données mesurées (émissions, paramètres moteur, données météorologiques, géolocalisation) et rend possible une exploitation efficace des données via notamment leur visualisation graphique et leur interprétation statistique.

L'ensemble des données exploitées sont sur le même pas de temps défini à 1 seconde. Ce pas de temps fin permet l'étude des fluctuations des émissions selon de nombreux paramètres à fine échelle.

5. Campagnes de mesures réalisées

5.1. Organisation d'une campagne de mesure

Les campagnes de mesure, au nombre de 16, ont été réalisées entre juin 2018 et février 2020. Une campagne de mesure se déroule sur une durée d'environ 4 semaines, selon l'organisation illustrée Figure 11. Une période de campagne est définie selon trois phases : une phase d'instrumentation du bus avec la mise en place des caissons abritant appareil de mesures et batteries, de la ligne de prélèvement et de la ligne d'échappement, une phase de mesure en conditions réelles et une phase de démontage. Deux bus sont instrumentés pour chaque campagne et réalisent les mesures en parallèle lors des jours ouvrés des deux semaines consacrées aux mesures. Les week-ends ne sont pas dédiés aux mesures mais uniquement au chargement des batteries afin d'optimiser celui-ci.

Instrumentation de deux bus en atelier	Campagne de mesure des deux bus instrumentés en conditions réelles d'exploitation			Désinstallation des deux bus
Une semaine	1 ^{ère} semaine de mesure	Pas de mesure le week-end	2 ^{ème} semaine de mesure	2 à 3 jours

Figure 11 : Déroulement d'une campagne de mesure selon les trois grandes phases d'installation, de mesure et de désinstallation.

Les périodes de mesure, compte-tenu de l'autonomie des batteries, se déroulent sur un cycle d'exploitation quotidien d'une période maximale de 8 heures. Cette période relativement longue, permet à la fois d'obtenir un grand nombre de données par jour et de ne pas aller au-delà des capacités des batteries.

5.2. Bus instrumentés

Echantillonnage des bus instrumentés

Les émissions de quatre types de motorisation de bus sont mesurées, avec des bus diesel de normes Euro IV et Euro VI, des bus hybride (diesel / électrique) de norme Euro VI, et des bus GNC de norme Euro VI. Au total, 14 types de bus sont ainsi instrumentés, représentatifs du parc roulant des bus franciliens (un « type » de bus correspondant ici à l'association d'une marque et d'une norme Euro) :

- 4 types de bus Euro IV diesel ;
- 4 types de bus Euro VI diesel ;
- 3 types de bus Euro VI hybrides électrique/diesel ;
- 3 types de bus Euro VI GNC.

Deux bus différents par type de bus ont été instrumentés (immatriculation, numéro de série, kilométrage... différents), afin d'identifier d'éventuelles différences d'émissions au regard notamment de caractéristiques techniques des véhicules (kilomètres au compteur, derniers entretiens réalisés etc.), et de conditions d'usage différentes (charge, mode de conduite...).

L'influence potentielle de la température extérieure a été étudiée grâce à quatre bus de motorisations différentes (deux Euro IV diesel, un Euro VI diesel et un Euro VI hybride) instrumentés à la fois en période hivernale et estivale.

Ainsi, 28 bus différents ont été instrumentés sur 16 campagnes de mesures de deux semaines chacune (environ 10 jours complets de mesure par campagne et par bus).

Système de dépollution selon les bus instrumentés

De nombreux composés constituent les gaz d'échappement des motorisations diesel (ARB, 2015), qu'ils soient gazeux ou solides.

Les émissions de polluants dues à une combustion incomplète du carburant dans la chambre de combustion peuvent être traitées de différentes manières : à la source en modifiant la combustion pour qu'elle produise moins de polluants, ou en post-traitement des émissions dans la ligne d'échappement, à l'aide de réactions chimiques transformant la composition des gaz d'échappement (comme dans le cas des hydrocarbures – HC, du monoxyde de carbone – CO – ou des oxydes d'azote – NO_x), ou en bloquant certains composants pour les traiter de façon régulière (comme dans le cas des particules fines).

Les **véhicules diesel** sont équipés de technologies spécifiques de contrôle des émissions afin de limiter les émissions de NO_x et de particules fines. Ces systèmes sont décrits ci-après.

Le **système de Selective Catalytic Reduction (SCR)** a fait son apparition dès la fin des années 1990 sur les véhicules lourds avec l'introduction de la norme volontaire « Environmentally-Enhanced Vehicles » (EEV), adoptée par une part élevée de bus urbains.

La SCR nécessite l'usage d'un additif, l'urée, injecté en amont du filtre SCR, se transformant en ammoniac pour réduire le NO et le NO₂, selon les réactions suivantes ;



Il y a deux paramètres critiques pour que la réaction se déroule correctement :

- Il faut une température suffisante à l'injecteur d'urée supérieure à 200°C pour empêcher la cristallisation et la détérioration de l'injecteur, et permettre l'injection d'urée en amont du filtre SCR ;
- Il faut une température suffisante d'environ 150°C dans la SCR pour enclencher la réaction chimique de transformation des NO_x.

En fonction de la composition en métaux et de l'évolution technique de la SCR, de l'injecteur d'urée, ces températures diminuent au fil des générations de véhicules et de systèmes anti-pollution. L'incitation réglementaire de réduire les émissions lors des démarrages à froid y a contribué.

La SCR peut stocker une partie d'ammoniac, et la réaction s'opère dès que la température minimale est atteinte, même si la température d'injection n'est pas atteinte.

La température à l'échappement est donc un critère très important qui va influencer sur la mise en fonction de la SCR et le traitement des NO_x. Généralement, une dizaine de minutes est nécessaire pour atteindre une bonne température de fonctionnement de la SCR. Ce temps dépend cependant des conditions de circulation.

Dans la configuration de cette étude, la mesure de la température d'échappement s'effectue en fin de ligne d'échappement, en aval des systèmes de dépollution, à une distance variable et difficilement mesurable selon le type de bus ; les valeurs mesurées sont donc un indicateur relatif de la température de sortie des systèmes de dépollution et donc de la SCR.

Une autre technologie au niveau du moteur s'est également développée pour réduire les émissions de NO_x : l'**Exhaust Gas Recirculation (EGR)**, dont l'objectif est de (re)mettre une partie des gaz d'échappement dans la chambre de combustion afin de réduire l'oxygène disponible, réduire la température maximale de combustion et ainsi diminuer la production de NO_x durant le processus de combustion.

Le **filtre à particules (FAP)** s'est généralisé pour les poids lourds à la mise en place de la norme Euro VI, en 2013. Les bus urbains ont cependant été équipés massivement en filtre à particules avant cette échéance.

Le filtre à particules est un filtre « mécanique », qui agit comme une éponge pour bloquer les particules provenant de la chambre de combustion. Il fonctionne ainsi dans toutes les conditions de régime moteur et de température des gaz d'échappement. Il nécessite cependant d'être purgé de façon récurrente afin de brûler les particules stockées, lors d'un processus appelé la régénération. La régénération active est provoquée en réalisant des injections de carburant tardives afin de générer une température plus élevée dans l'échappement. Afin de ne gêner en rien l'utilisation du véhicule, les régénérations sont en général réalisées lors de phases de conduite à vitesse stable, afin de pouvoir la réaliser dans son intégralité sans interruption. Réaliser une régénération pour un bus urbain est beaucoup plus difficile, et sera forcée lorsque le filtre atteint sa limite de remplissage.

Les régénérations passives utilisent les phases de fonctionnement du moteur produisant de fortes températures à l'échappement pour brûler les particules stockées dans le filtre, sans intervention particulière du contrôle moteur. Ceci est peu courant dans le cas des motorisations diesel, du fait de l'excès d'air dans la chambre de combustion refroidissant les gaz d'échappement – relativement à d'autres types de motorisation à combustion stœchiométrique, comme les moteurs à essence.

La motorisation GNC (Euro VI) a pour système de dépollution un pot catalytique trois voies (pour convertir NO_x, CO, CH₄ et autres hydrocarbures en CO₂, H₂O et N₂.)

A la demande d'Ile-de-France Mobilités, les caractéristiques précises des modèles de bus, et notamment l'identification du constructeur, ne sont pas mentionnés.

5.3. Types de lignes instrumentées

Les lignes de bus, empruntées par les bus instrumentés, présentent des caractéristiques différentes permettant d'étudier l'évolution des émissions selon des configurations diverses, liées notamment aux conditions de circulation, à la topographie du trajet, etc.

Au total, onze lignes de bus ont été parcourues par des bus instrumentés, certaines par un seul type de bus, d'autres par plusieurs types, selon les bus utilisés couramment sur ces lignes par l'opérateur correspondant (voir Tableau 1).

Ligne de bus globale	Types de bus ayant parcouru la ligne
Paris 1	Euro VI diesel
Paris 2	Euro IV diesel
Paris 3	Euro VI hybride
Paris 4	Euro VI diesel
Paris 5	Euro VI GNC
PC 1	Euro IV diesel Euro VI hybride
PC 2	Euro IV diesel Euro VI diesel Euro VI hybride
PC 3	Euro IV diesel Euro VI diesel
GC 1	Euro VI diesel
GC 2	Euro VI GNC
GC 3	Euro VI GNC

Tableau 1 : Types de bus instrumentés selon les lignes exploitées

Cinq lignes sont situées dans Paris Intramuros (nommées « Paris 1 », « Paris 2 », « Paris 3 », « Paris 4 », « Paris 5 »), trois en petite couronne (« PC 1 », « PC 2 » et « PC 3 ») et trois en grande couronne (« GC 1 », « GC 2 » et « GC 3 »).

Les lignes de bus présentent des configurations différentes en termes d'aménagements dédiés aux bus (couloirs et voies de bus), avec des aménagements plus nombreux au sein de la capitale (voir exemples Figure 12).

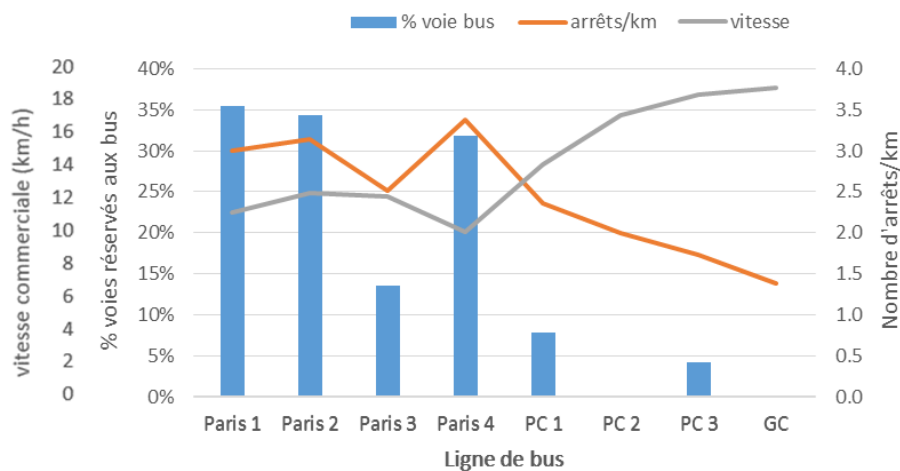


Figure 12 : Caractéristiques des lignes de bus selon le nombre d'arrêts par kilomètre, le pourcentage de voies réservées aux bus et la vitesse commerciale mesurée

Trois lignes parisiennes comprennent des voies réservées sur environ un tiers de la distance de leur parcours. La ligne Paris 5 est, de même que la ligne Paris 3, est moins pourvue que les autres lignes parisiennes en voies réservées aux bus. En-dehors de Paris, cet aménagement dédié est moins représenté, avec en moyenne environ 5% de la distance du trajet en voies réservées sur les lignes de bus considérées (les trois lignes de grande couronne sont similaires sur ce point, indiquées par « GC » sur ce graphique).

Autre spécificité sur les lignes parisiennes, la distance entre chaque arrêt de bus est moins importante. En moyenne, les lignes parisiennes comptent 3 arrêts par kilomètre alors qu'en

s'éloignant de Paris, les bus s'arrêtent près de deux fois moins sur un kilomètre parcouru, comme illustré à la Figure 12. Cette particularité entre les lignes de bus peut également jouer sur les émissions du bus avec des arrêts prolongés plus ou moins fréquents selon les lignes.

6. Caractérisation des données récoltées

Les émissions des bus ont pu être mesurées dans des conditions d'exploitation variées. Les **conditions d'exploitation** sont en effet définies ici comme la combinaison des **conditions d'usage**, comprenant l'état du véhicule, la charge, la conduite, entre autres, et des **conditions de circulation** comprenant le trafic routier, la météorologie, etc.

6.1. Données disponibles

L'ensemble des données disponibles s'élève à plus de 6 500 000 données au pas de temps fin d'une seconde, soit plus de 30 000 000 de données d'émissions. 1 600 courses « valides » ont été réalisées, c'est-à-dire avec au moins des données d'émissions valides (en comptant aussi les sous-lignes mineures parcourues moins de 10 fois).

Le taux de validation (nombre de jours de mesure avec courses valides par rapport au nombre de jours de mesure prévus) pour l'ensemble des campagnes et chaque type de bus est reporté Tableau 2. Le détail des taux de validation pour chaque jeu de paramètres est disponible en Annexe 2.

Campagne	Type de bus	n° bus	Ligne de bus	Nombre de trajets	Taux de validation
1	Euro IV diesel	1	PC 1	15	40%
	Euro VI hybride diesel	5	PC 1	12	30%
2	Euro IV diesel	7	Paris 2	24	50%
	Euro VI diesel	4	Paris 1	51	90%
3	Euro VI diesel	11	Paris 4	39	83%
	Euro VI hybride diesel	10	Paris 3	36	70%
4	Euro IV diesel	2	PC 1	42	100%
	Euro VI hybride diesel	6	PC 1	31	90%
5	Euro IV diesel	3	PC 3	83	100%
	Euro VI diesel	12	GC	70	100%
6	Euro IV diesel	7	Paris 2	30	70%
	Euro VI diesel	4	Paris 1	52	100%
7	Euro IV diesel	17	PC 2	71	91%
	Euro VI hybride diesel	18	PC 2	80	91%
8	Euro IV diesel	8	Paris 2	33	90%
	Euro VI diesel	9	Paris 1	48	80%
9	Euro IV diesel	14	PC 2	66	90%
	Euro VI hybride diesel	13	PC 2	79	100%
10	Euro VI diesel	15	PC 2	58	100%
	Euro VI diesel	16	PC 2	50	100%
11	Euro VI diesel	19	Paris 4	41	89%
	Euro VI hybride diesel	20	Paris 3	31	89%
12	Euro IV diesel	14	PC 2	70	100%
	Euro VI hybride diesel	13	PC 2	55	100%
13	Euro IV diesel	22	PC 3	94	90%
	Euro VI diesel	21	PC 3	59	60%
14	Euro VI GNC	23	Paris 5	39	70%
	Euro VI GNC	24	Paris 5	27	60%
15	Euro VI GNC	25	GC 2	51	80%
	Euro VI GNC	26	GC 2	52	100%
16	Euro VI GNC	27	GC 3	69	100%
	Euro VI GNC	28	GC 3	60	100%

Tableau 2 : Taux de validation global de chaque campagne de mesure

La Figure 13 illustre, par type de bus, le nombre de courses effectuées (l'ensemble des courses, y compris celles sur les sous-lignes avec moins d'enregistrements). Parmi 1618 courses, le nombre de courses par type de bus est important, compris entre 298 et 528 courses respectivement pour les bus Euro VI GNC et Euro IV.

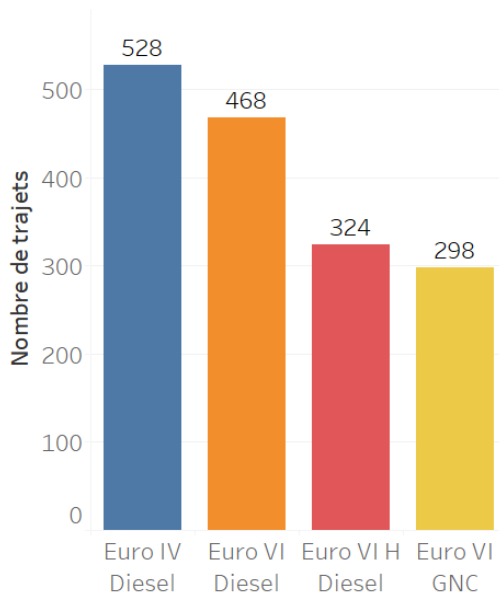


Figure 13 : Nombre de courses effectuées au cours de l'ensemble des campagnes selon les classes de bus

La Figure 14 illustre la répartition de ces courses selon la ligne et le type de bus.

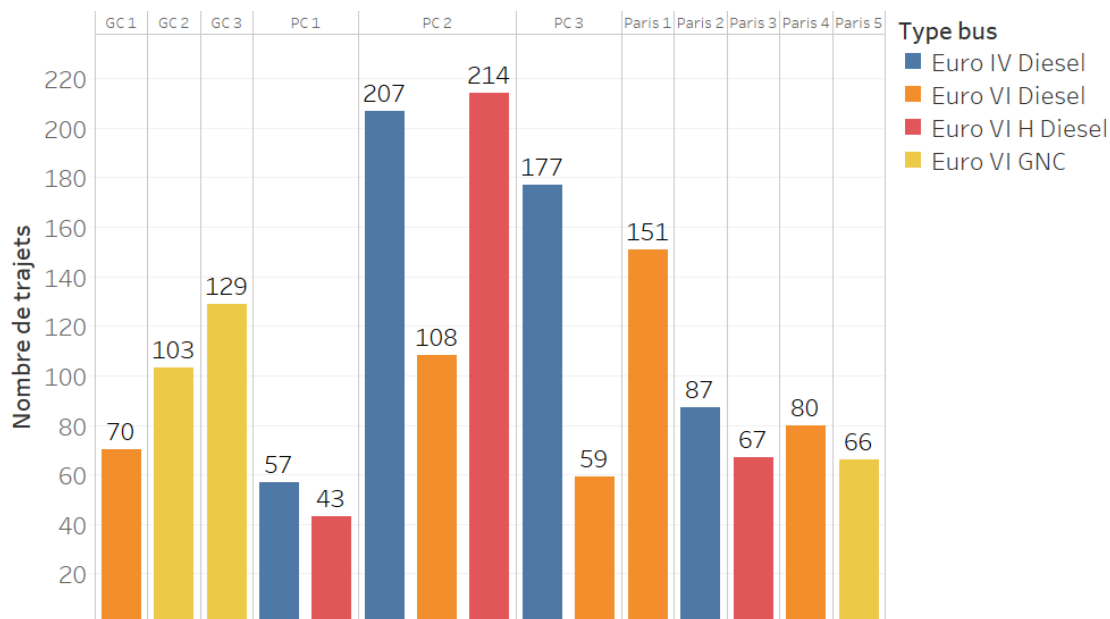


Figure 14 : Nombre de courses effectuées au cours de l'ensemble des campagnes selon les types de bus et la ligne de bus

Pour chaque ligne, toutes sous-lignes confondues, au moins 40 courses par type de bus ont été réalisées.

Afin de rendre compte de la proportion de données récoltées au sein d'une course, la Figure 15 donne la répartition des données seconde, par classe de vitesse et par phase de trajet : lorsque le bus sort du dépôt de bus ou y retourne (« haut-le-pied »), lorsqu'il est en attente entre deux courses (« temps de battement ») ou lorsqu'il n'est pas dans le cycle prévu de sa journée (erreurs de GPS ou problèmes sur la ligne, « hors ligne »).

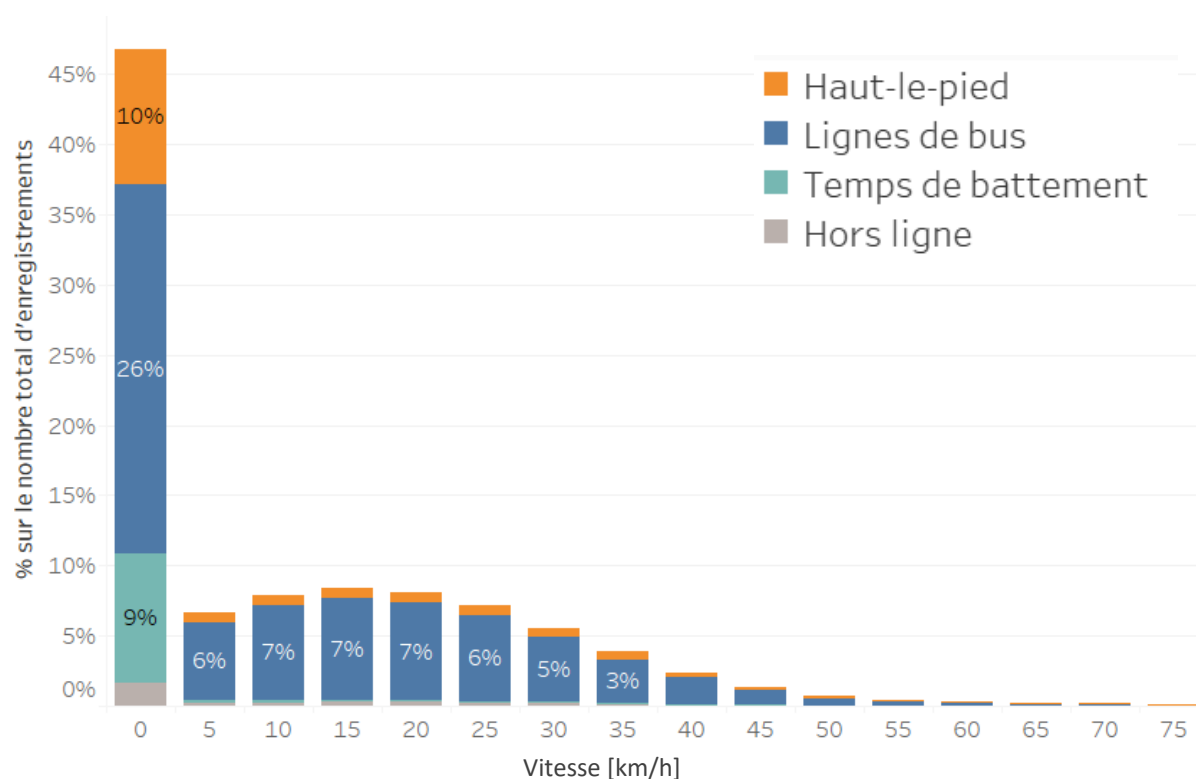


Figure 15 : Nombre de données mesurées selon la phase de circulation du bus : phase d'attente, circulation à partir ou en direction du dépôt et sur la ligne exploitée et en fonction de la vitesse de circulation (en km/h, les étiquettes de l'abscisse représentent les limites inférieures, incluses, des classes de vitesses).

La majeure partie des données mesurées, avec 70% des enregistrements, concerne des données acquises lors d'une course. Le reste des données mesurées se partagent entre les phases de haut-le-pied (15%) et les temps de battement (8%).

L'essentiel des données acquises en période de course est caractérisé par des vitesses faibles, avec 32% des vitesses entre 0 et 5 km/h. Au-delà de 30 km/h, le nombre de données enregistrées est plus rare, avec seulement 7% des données.

Les émissions mesurées au cours des campagnes peuvent être exprimées selon deux unités décrivant, d'une part, une **quantité d'émissions pour un temps donné** (gramme/seconde – g/s - ou nombre/seconde - #/s - dans le cas des particules) et, d'autre part, une **quantité pour une distance parcourue** (gramme/kilomètre – g/km - ou nombre/kilomètre -#/km).

Les quantités d'émissions par seconde présentent un intérêt pour étudier les phénomènes se passant à un pas de temps fin, les changements de température d'échappement par exemple, le démarrage à froid (se déroulant sur les premières minutes d'une journée) ou les phases pendant lesquelles le véhicule est immobile (ralenti, arrêt...). Les quantités d'émissions par kilomètre (calculées sur une course, ou en séquencant le trajet de l'ensemble de la journée de mesure en tranches de 1 kilomètre chacune) sont utilisées pour comparer plus généralement les émissions de différents bus, pour des types de lignes, des températures ambiantes données, etc. Le séquençage

des trajets par tranches de 1 kilomètre pour calculer les émissions a été réalisé dans certaines études publiées, notamment celle de O'Driscoll et al de 2016 [7].

6.2. Conditions de circulation

Conditions de trafic

Les lignes de bus, empruntées par les bus instrumentés, présentent des caractéristiques différentes permettant d'étudier l'évolution des émissions selon des configurations diverses, liées notamment aux conditions de circulation, à la topographie du trajet, etc. Au total, onze lignes de bus ont été parcourues par des bus instrumentés, cinq lignes sont situées dans Paris Intramuros (nommées « Paris 1 », « Paris 2 », « Paris 3 », « Paris 4 », « Paris 5 »), trois en petite couronne (« PC 1 », « PC 2 » et « PC 3 ») et trois en grande couronne (« GC 1 », « GC 2 », « GC 3 ») (voir détails paragraphe 4.3).

La Figure 16 présente, pour l'ensemble des lignes exploitées, leurs distances, le temps passé au sein d'aménagements dédiés au bus et la vitesse moyenne d'exploitation. Ces résultats sont issus de l'ensemble des données des campagnes.

Les lignes de bus étudiées comportent des sous-lignes aux parcours différents, différenciées par une lettre. La ligne PC 2, exploitée en petite couronne, présente de nombreuses sous-lignes, en fonction de l'heure d'exploitation.

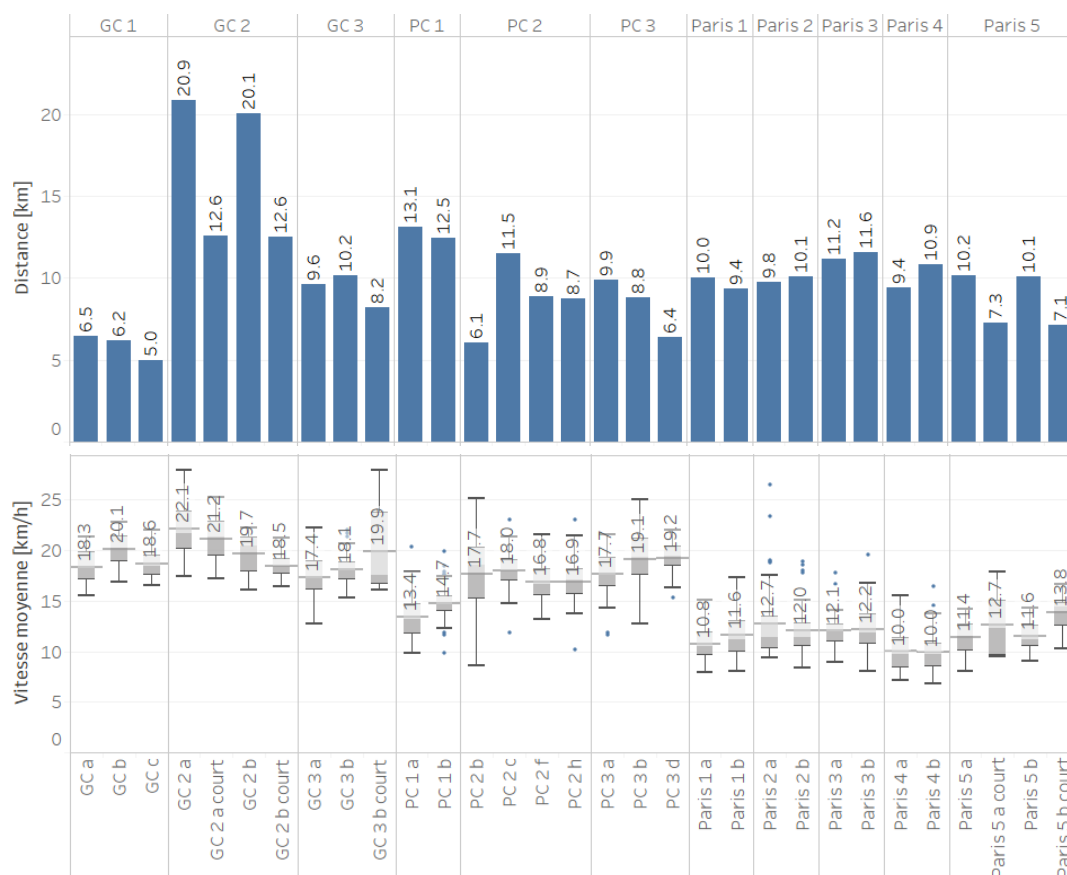


Figure 16 : Données de géolocalisation agrégées de chaque sous-ligne majeure (i.e. répétée au moins 10 fois par l'un des types de bus)

Les lignes de bus exploitées dans le cadre des mesures des émissions présentent des distances variant entre 5 et 20 kilomètres. Les lignes parisiennes présentent des longueurs relativement

homogènes autour de 10 kilomètres pour les cinq lignes exploitées. La ligne GC 1 située en grande couronne est une ligne relativement courte d'environ 5 à 6 km selon les dessertes.

Les conditions de circulation, figurées à l'aide de la vitesse moyenne d'exploitation, sont différentes selon la localisation des lignes. En effet, les vitesses moyennes d'exploitation les plus faibles sont observées à Paris (en moyenne sur les sous-lignes entre 10 et 14 km/h). En s'éloignant de Paris, la circulation des bus est légèrement plus rapide en petite et grande couronne (en moyenne sur les sous-lignes entre 13 et 19 km/h). Cela peut être mis en parallèle du nombre plus important de stations de bus à Paris et de la congestion du trafic routier. La vitesse moyenne commerciale des sous-lignes instrumentées s'échelonne globalement entre 10 km/h (ligne Paris 4 b) et 22 km/h (ligne GC 2 a). Toutefois, les boxplots (définition en Annexe 3) montrent que ces vitesses moyennes d'exploitation sont également très variables sur une même sous-ligne, notamment en fonction de l'état de congestion de la circulation. Lors des campagnes de mesure, l'exploitation des bus s'est faite durant 8 heures d'exploitation maximum (heures de pointe du trafic routier, heures creuses, premières heures du début d'exploitation...) pouvant expliquer la variabilité de vitesses sur une même sous-ligne.

Selon les heures de desserte, les profils de vitesse peuvent être ainsi très différents, même sur une sous-ligne définie : la Figure 17 montre l'exemple de la ligne Paris 4 b, le 5 septembre 2018 pour les deux premiers profils, et le 3 mai 2019 pour les deux derniers profils (séries temporelles des données seconde de la vitesse du bus).

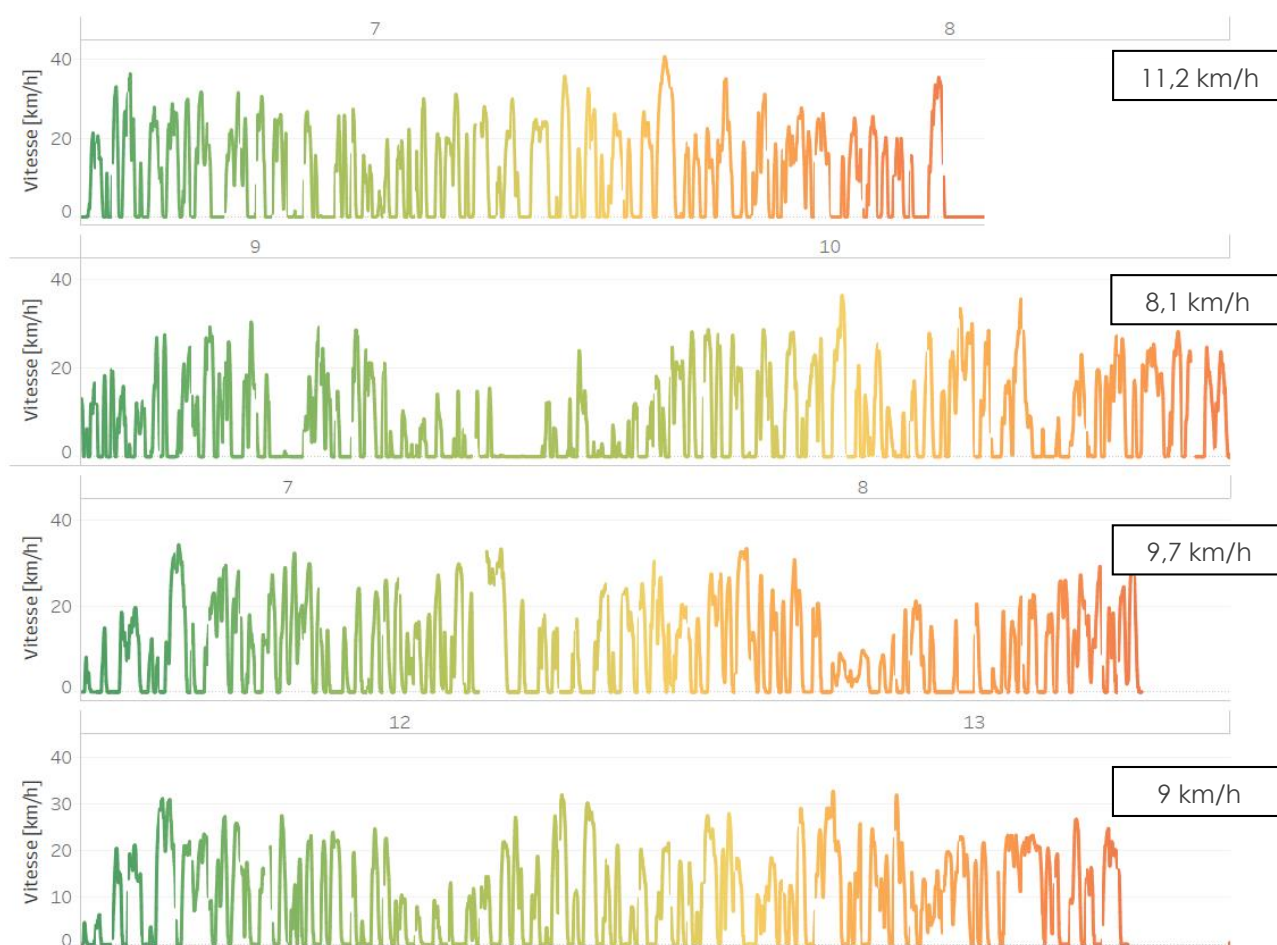


Figure 17 : Exemples de profils de vitesse sur la ligne Paris 4 b, répétée 2 fois le 5 septembre 2018 et 2 fois le 3 mai 2019. Les couleurs représentent la localisation afin (vert=début de ligne, rouge=fin de ligne) de pouvoir comparer les profils entre eux aux mêmes emplacements.

Tôt le matin, avant 8h, la circulation est fluide et le bus atteint une vitesse moyenne plus importante 11,2 km/h) qu'après 9h (8,1 km/h). Ces différences de vitesses des bus sont associées à des conditions de fonctionnement moteur diverses (températures d'échappement, régime moteur).

Des différences entre les lignes de bus sont également visibles au travers du temps passé à l'arrêt (voir Figure 18).

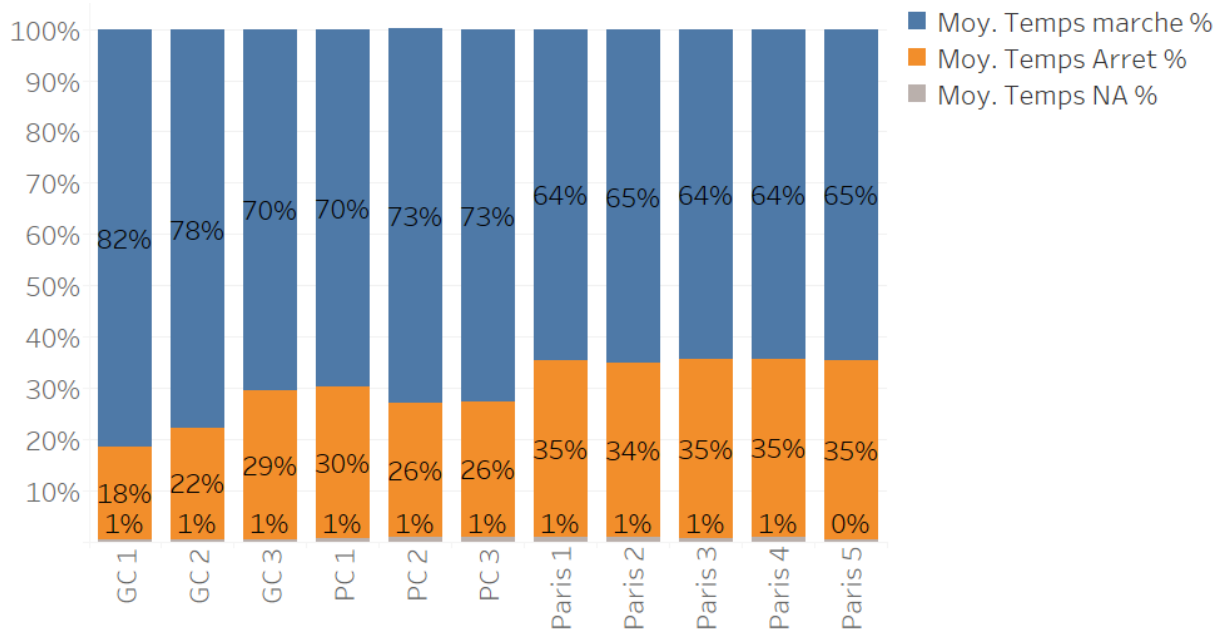


Figure 18 : Comparaison du temps de circulation et du temps d'arrêt des bus selon les lignes empruntées

En effet, les lignes dont les vitesses moyennes sont les plus faibles présentent les temps d'arrêt les plus importants. Le pourcentage de temps d'arrêt peut atteindre près du tiers du temps sur les lignes parisiennes. Ce temps d'immobilisation comprend les arrêts dus à la fois à la circulation (feux tricolores, bouchon...) et les arrêts induits par la montée et la descente des passagers aux stations de bus. A l'inverse, la ligne GC 1 située en grande couronne présente le temps d'arrêt le plus faible (18% du temps) engendrant ainsi une vitesse d'exploitation plus importante (moyenne entre 18 et 20 km/h selon le trajet).

Si de grandes tendances se dessinent entre lignes de localisations différentes (Paris, petite et grande couronne), il reste que, sur une même ligne, les vitesses de circulation et les temps d'arrêt sont très variables : pour un type de bus, ayant circulé sur une voire plusieurs lignes, cela a permis de mesurer ses émissions dans des conditions de circulation suffisamment variables pour en tirer des conclusions générales.

Conditions météorologiques

Les conditions météorologiques rencontrées lors des campagnes de mesure, et plus précisément la température ambiante (paramètre pouvant jouer un rôle sur les conditions de fonctionnement des moteurs) sont illustrées Figure 19 selon la classe de bus.

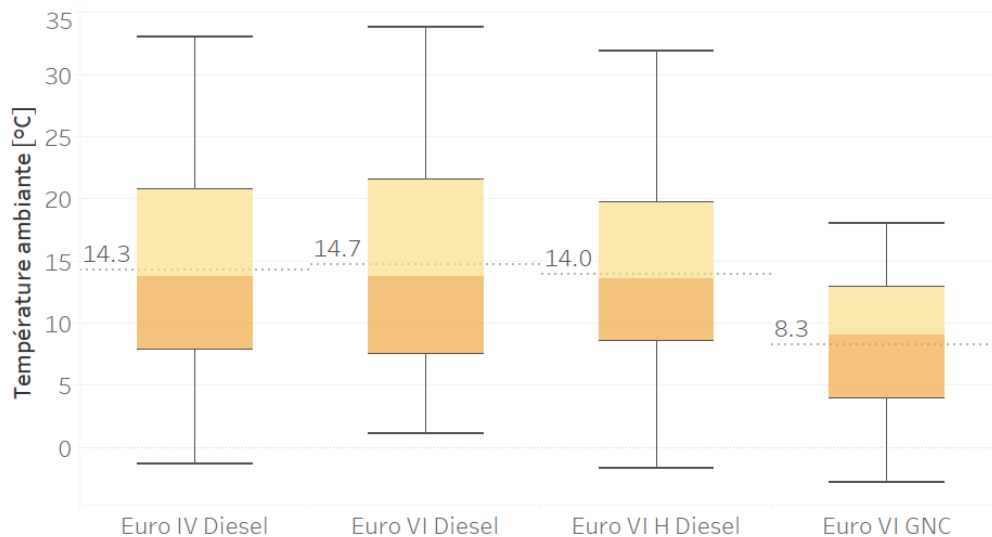


Figure 19 : Températures moyennes rencontrées sur chaque trajet, par classe de bus

Les températures relevées lors des campagnes de mesure ont été très variées, avec un large panel de températures oscillant entre des températures très élevées (supérieures à 30°C) et des températures froides voire négatives (jusqu'à -2,8°C en moyenne sur une course). Cet éventail important de températures a été observé pour l'ensemble des types de bus instrumentés. De plus, les températures moyennes sont également comparables et comprises entre 13°C et 14°C. Les bus Euro VI GNC font exception car les campagnes ont surtout eu lieu l'hiver, avec une température moyenne de 8,3°C. Pour la comparaison entre les bus Euro VI diesel et GNC, seules les courses ayant eu lieu à des températures ambiantes comparables seront prises en compte (voir chapitre 10).

L'analyse des résultats a été réalisée en deux temps : en premier lieu une **analyse complète des émissions des bus diesel** (Euro IV, Euro VI et Euro VI hybrides) avec la comparaison selon la norme Euro, l'analyse de certains facteurs d'influence et la comparaison avec le modèle COPERT (chapitres 7, 8 et 9). Suite aux campagnes menées avec des bus GNC, **une analyse spécifique a été réalisée pour comparer les émissions des bus Euro VI diesel à celles des bus Euro VI GNC** (chapitre 10).

N.B. : La grande variabilité des conditions d'exploitation, décrite au chapitre précédent, et les multiples facteurs d'influence potentiels des émissions incite à se focaliser davantage sur les **variances des résultats**, les gammes d'émissions, plutôt que sur les moyennes, même si les moyennes sont aussi prises en compte à titre indicatif. En effet, pour des bus qui circulent majoritairement en zone urbaine, les émissions de NO_x par exemple peuvent facilement varier d'un facteur cinq pour un même bus sur une même ligne, dans des conditions d'exploitation observables similaires. La variabilité non observable des **conditions d'usage** (état des véhicules, charge, par exemple) et des **conditions de circulation** (aménagement dédiés aux bus comme les couloirs de bus, densité du trafic) n'autorise que des conclusions générales.

7. Bus Diesel : comparaison des bus de différentes normes Euro

7.1. Comparaison selon la norme Euro

Ce chapitre fait un bilan des émissions sur l'ensemble des campagnes des bus diesel, en comparant les bus par leur norme Euro. L'ensemble des polluants mesurés sont présentés : particules en nombre (PN), oxydes d'azote (NO_x et NO₂), dioxyde de carbone (CO₂) et monoxyde de carbone (CO). La consommation de carburant est aussi analysée (par litres de carburant sur 100 km, L/100km). Les émissions sont reportées ici par course, en g/km ou #/km (pour les particules en nombre), et regroupées dans des boîtes à moustaches ou boxplots (voir Annexe 3 pour la définition des boîtes à moustache).

Particules en nombre - PN

La Figure 20 présente les émissions de particules (en #/s) selon les trois types de bus instrumentés (diesel Euro IV, Euro VI et Euro VI hybride, noté Euro VI H) lors de la circulation au sein des lignes exploitées. Un zoom est fait sur les bus Euro VI et Euro VI hybrides.

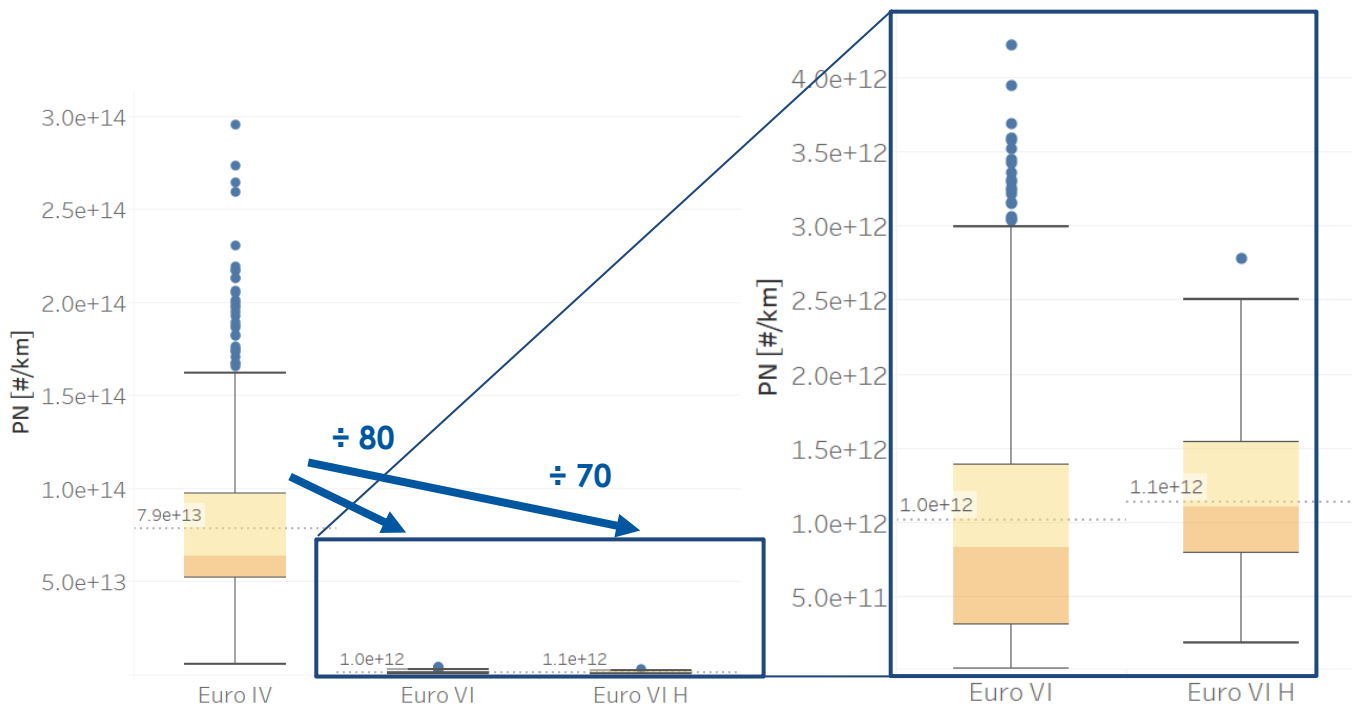


Figure 20 : Nombre de particules émis par km selon les trois types de bus instrumentés lors des courses.

Les émissions de particules sont très différentes entre les bus Euro IV et Euro VI : **les émissions moyennes de particules en nombre des bus Euro VI sont près de 80 fois moins élevées que celles des bus Euro IV. Les émissions moyennes de particules des bus Euro VI hybrides instrumentés sont plus de 70 fois inférieures à celles des bus Euro IV.**

Les émissions de PN des bus Euro VI hybrides, si elles sont 10% supérieures en moyenne à celle des bus Euro VI non hybrides, restent incluses dans la gamme d'émissions des bus Euro VI non hybrides. En effet, la disparité des résultats au sein des bus Euro VI hybrides instrumentés est plus faible que celle des bus Euro VI, avec moins de courses pour lesquelles les émissions de particules sont supérieures à $2,5 \cdot 10^{12}$ #/km.

La valeur minimale d'émission de particules pour les bus Euro IV est de $5,4 \cdot 10^{12}$ #/km tandis que la valeur maximale pour les bus Euro VI et Euro VI hybrides est de $4,2 \cdot 10^{12}$ #/km ; ainsi, **pour toutes les courses, les émissions de particules des bus Euro IV sont supérieures à celles des bus Euro VI.** Par ailleurs, la variabilité des émissions de PN des bus Euro IV est particulièrement importante, avec des émissions maximales atteignant 300 fois les émissions moyennes des bus Euro VI. L'écart-type est de $4,6 \cdot 10^{13}$ #/km pour les bus Euro IV, contre des écarts-types de $8,6 \cdot 10^{11}$ #/km et $5,3 \cdot 10^{11}$ #/km pour les bus Euro VI et Euro VI hybrides.

Oxydes d'azote (NO_x) et dioxyde d'azote (NO₂)

De la même façon que pour les particules, les boxplots de la Figure 21 représentent les répartitions statistiques des émissions de NO_x par norme Euro. Les émissions de NO₂ sont représentées Figure 22, pour toutes les courses.

Si, parmi les NO_x, le NO₂ pose le plus de problème pour la santé, ce sont bien les émissions de NO_x qui sont aujourd'hui réglementées à l'émission. En effet, les NO_x sont composés de NO et de NO₂ et le NO peut se transformer rapidement en NO₂ dans l'atmosphère : il importe donc de réduire l'ensemble des NO_x à l'émission pour limiter globalement les concentrations de NO₂ dans l'atmosphère. L'intérêt d'étudier spécifiquement les émissions de NO₂ à l'échappement se situe dans l'évaluation de l'exposition des populations se trouvant dans le trafic (automobilistes) ou à proximité immédiate du trafic, pour lesquelles l'impact du NO₂ primaire (directement émis par les

véhicules) peut être prépondérant, par rapport à celui provenant de la transformation ultérieure du NO en NO₂.

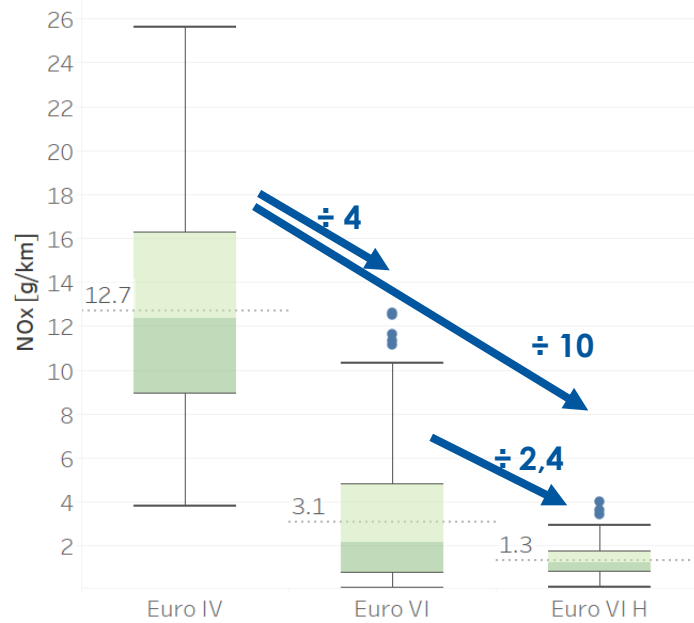


Figure 21 : Quantité de NO_x émise par km selon les trois types de bus instrumentés lors des courses

En première observation, les émissions de NO_x diminuent avec la modernisation des bus, que ce soit en moyenne ou plus globalement sur les gammes d'émissions : sur les bus instrumentés, **les émissions de NO_x des bus Euro VI sont en moyenne plus de 4 fois inférieures à celles des bus Euro IV, et celles des bus Euro VI hybrides sont près de 10 fois inférieures à celles des bus Euro IV. Une différence d'émission de NO_x est ainsi également à noter entre les bus Euro VI et Euro VI hybrides, avec des émissions des bus Euro VI hybrides 2,4 fois inférieures aux bus Euro VI non hybrides.** L'écart-type des bus Euro IV est de 4,4, celui des bus Euro VI de 2,7 et celui des bus Euro VI hybrides de 0,6 g/km.

Cette baisse des émissions de NO_x est à attribuer en grande partie à l'amélioration des systèmes de post-traitement et du système d'injection pour les bus Euro VI.

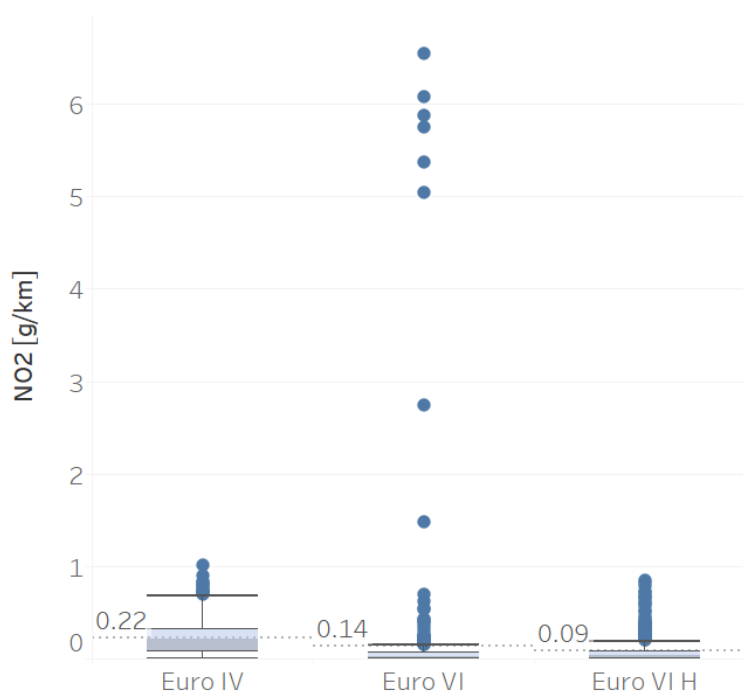


Figure 22 : Quantité de NO₂ émise par km selon les trois types de bus instrumentés lors des courses, avec dysfonctionnements

Les **émissions de NO₂** présentées dans la figure ci-dessus comprennent toutes les courses, y compris celles lors desquelles des dysfonctionnements du système de dépollution de certains bus Euro VI ont été constatés et confirmés par l'opérateur.

Ces dysfonctionnements ont concerné dans un cas l'injection d'urée (trop d'urée dans le système) et a surtout impacté les émissions de NO₂ et non de NO_x, dans l'autre cas un manque d'urée dans le réservoir (ce qui a touché à la fois le NO₂ et les NO_x). Ces dysfonctionnements sont détaillés au chapitre 8.5.

En prenant ces dysfonctionnements en compte, qui peuvent arriver lors de l'exploitation des bus comme constaté durant cette étude, les émissions de NO₂ des bus Euro VI sont en médiane (statistique peu sensible aux valeurs extrêmes) 10 fois plus faibles que celles des bus Euro IV, celles des bus Euro VI hybrides sont 57% supérieures en médiane à celles des bus Euro VI non hybrides.

La Figure 23 reporte ces mêmes courses en écartant les campagnes avec dysfonctionnement avéré du système de dépollution des bus Euro VI.

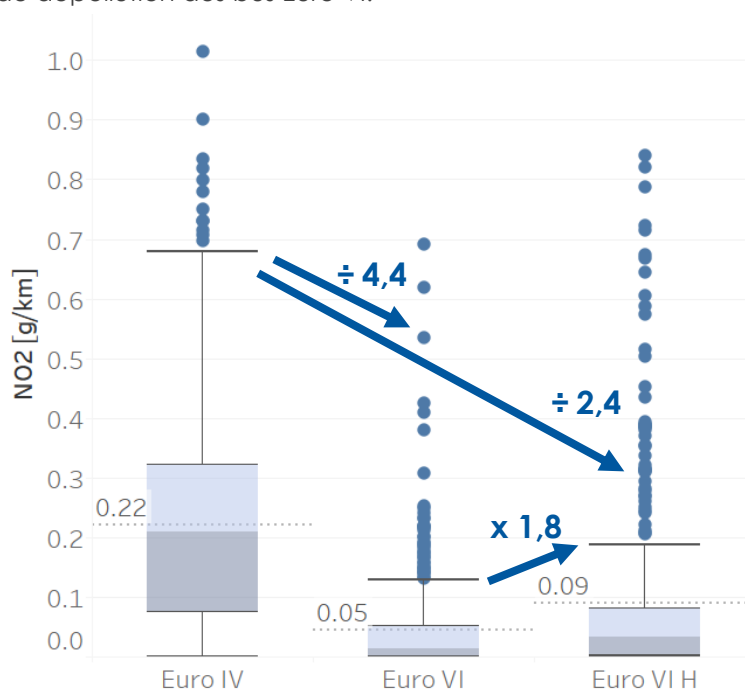


Figure 23 : Quantité de NO₂ émise par km selon les trois types de bus instrumentés lors des courses, hors dysfonctionnement reconnu du système de dépollution des campagnes 6 et 21.

Hors courses avec dysfonctionnement avéré (il n'est pas exclu que d'autres courses aient observé des dysfonctionnements non détectés), les statistiques moyennes diffèrent pour les bus Euro VI. **Les émissions de NO₂ des bus Euro VI sont en moyenne 4,4 fois plus faibles que celles des bus Euro IV (16 fois plus faibles en médiane), celles des bus Euro VI hybrides sont 80% supérieures à celles des Euro VI (2,5 fois supérieures en médiane)**, tout en restant 2,4 fois inférieures à celles des bus Euro IV. L'écart-type des bus Euro IV est de 0,18, celui des bus Euro VI de 0,08 et celui des bus Euro VI hybrides de 0,15 g/km.

Ainsi, les émissions de NO₂ des bus hybrides instrumentés pendant cette étude ont tendance à être plus élevées que celles des bus Euro VI non hybrides, ce qui est illustré par une gamme d'émissions plus large et de nombreuses valeurs statistiquement atypiques (voir le chapitre 7.2 pour plus de détails sur les causes de variabilité, qui est à associer à deux bus hybrides exclusivement). Toutefois, il reste que **les émissions de NO_x sont en moyenne 10 fois plus faibles pour les bus Euro VI hybrides que pour les bus Euro IV et 2,4 fois plus faibles que les bus Euro VI.**

L'analyse du NO₂ à l'échappement peut être complétée avec le ratio NO₂/NO_x présenté Figure 24.

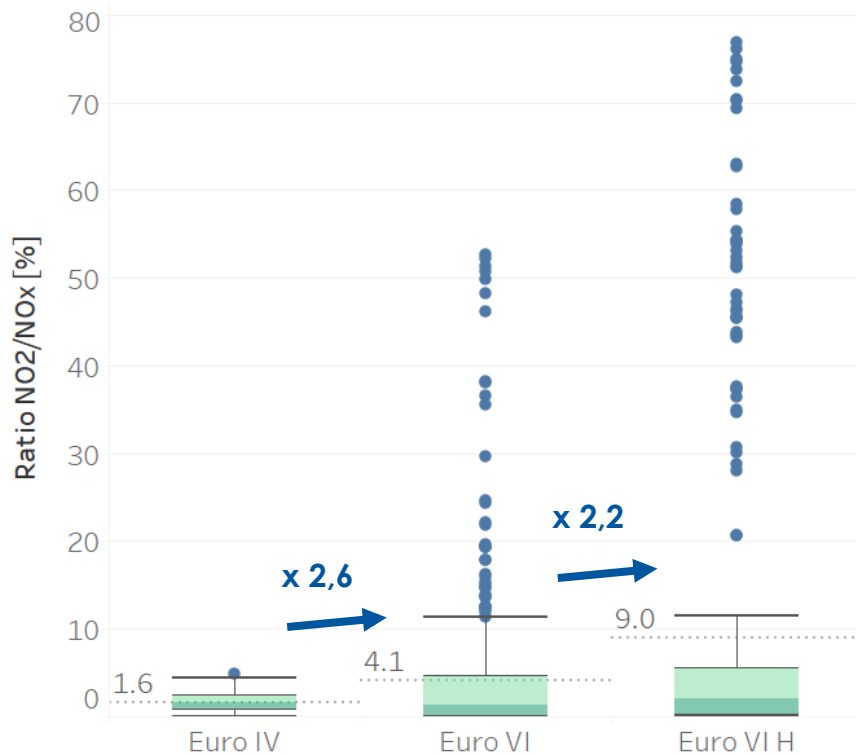


Figure 24 : Ratio NO₂/NO_x selon les trois types de bus instrumentés lors des courses

Le ratio NO₂/NO_x nettement plus important, en moyenne, des bus Euro VI par rapport aux bus Euro IV est causé par une diminution des émissions de NO₂ non proportionnelle à la diminution des émissions de NO_x avec la norme Euro VI, dans un contexte plus général de diminution des émissions des deux polluants. En prenant en compte la médiane qui est peu sensible aux valeurs extrêmes, les bus Euro VI ont un ratio NO₂/NO_x (égal à 1,3%) équivalent aux bus Euro IV (égal à 1,6%), et les bus Euro VI hybrides ont un ratio NO₂/NO_x (égal à 2,1%) 1,6 fois supérieur aux bus Euro VI. **En moyenne, en prenant en compte les valeurs atypiques notamment pour les bus Euro VI hybrides, les bus Euro VI ont un ratio NO₂/NO_x 2,6 fois supérieur aux bus Euro IV et les bus Euro VI hybrides plus de 2 fois supérieur aux bus Euro VI.** Les valeurs extrêmes des bus hybrides sont en fait spécifiques à deux bus sur les six instrumentés (voir chapitre 7.2).

Ces résultats confirment la nécessité de mettre aussi l'accent sur la réduction du NO₂ – ce que l'Anses avait mis en exergue en 2009 déjà, en termes de risques pour la santé du NO₂ primaire [8]. La technologie SCR nécessite un ratio NO₂/NO_x élevé pour la réduction efficace des NO_x. Ce ratio est augmenté dans ce but lors du passage des gaz d'échappement dans le DOC (Diesel Oxidation Catalyst) situé en amont de la SCR dans les poids lourds diesel. Un ratio NO₂/NO_x élevé permet aussi de faciliter la régénération passive de certains FAP, en permettant l'oxydation des particules à des températures d'échappement plus faibles.

Monoxyde de carbone - CO

Les répartitions statistiques des émissions de CO par norme et par course sont présentées Figure 25.

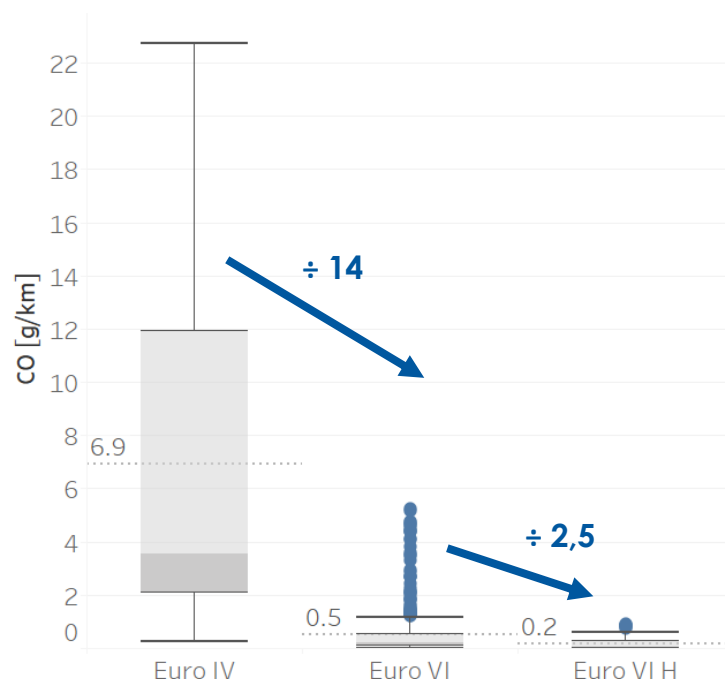


Figure 25 : Quantité de CO émise par km selon les trois types de bus instrumentés lors des courses

Les gammes d'émissions de CO diminuent nettement avec l'amélioration des normes Euro, bien que le seuil réglementaire n'ait pas évolué entre les normes Euro IV et Euro VI (voir Annexe 1).

Les émissions de CO des bus Euro IV au-dessus de la médiane sont très variables, ainsi que celles au-dessus du percentile 75 (entre 12 et 22 g/km) ce qui signifie que moins du quart des courses observent des émissions de CO particulièrement élevées comparées aux autres. Ces émissions sont issues de deux bus en particulier, les bus Euro IV 14 et 17 (cf. chapitre 7.2 sur le CO). Si la médiane est considérée plutôt que la moyenne, les bus Euro VI émettent 18 fois moins de CO que les bus Euro IV.

En moyenne, les bus Euro VI émettent 14 fois moins de CO que les bus Euro IV instrumentés et les bus Euro VI hybrides 2,5 fois moins que les bus Euro VI. L'écart-type des bus Euro IV est de 5,8, celui des bus Euro VI de 0,9 et celui des bus Euro VI hybrides de 0,2 g/km.

Consommation de carburant et dioxyde de carbone - CO₂

Les répartitions statistiques des consommations de carburant (en L/100km) et des émissions de CO₂ (en g/km) de chaque course par norme Euro sont représentées Figure 26 et Figure 27 respectivement.

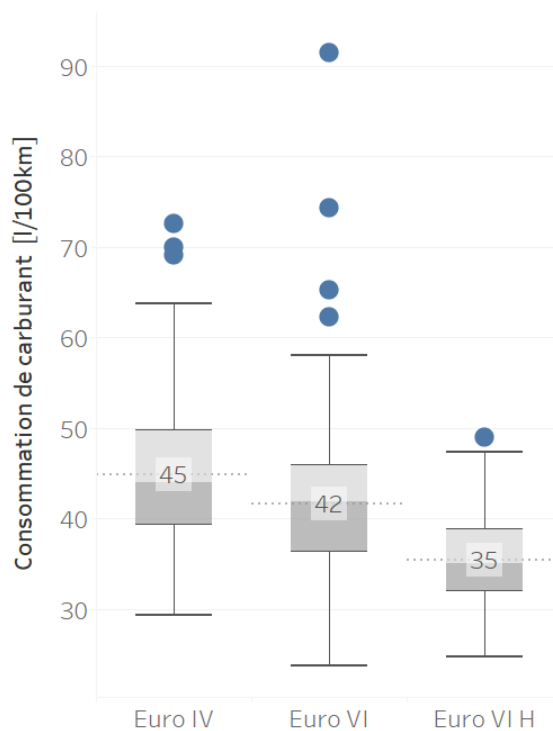


Figure 26 : Consommation de carburant aux 100 km selon les trois types de bus instrumentés lors des courses

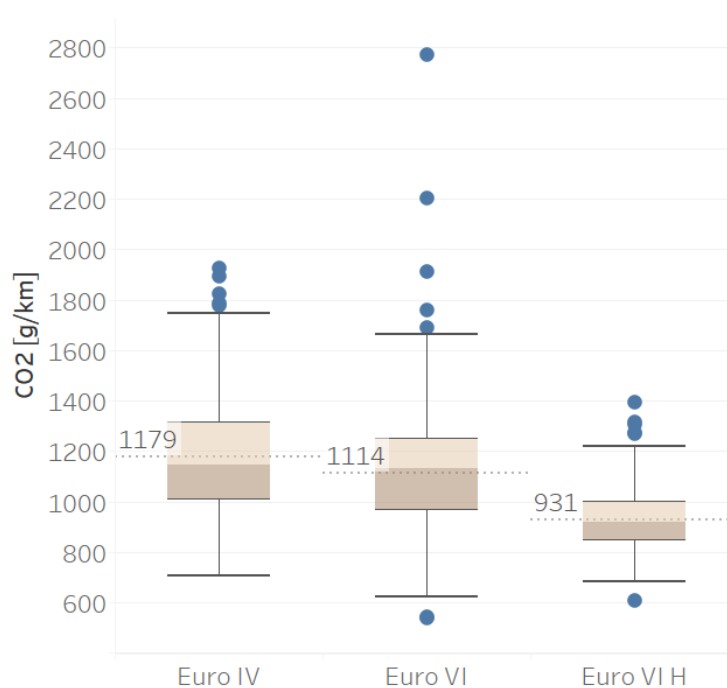


Figure 27 : Quantité de CO₂ émise par km selon les trois types de bus instrumentés lors des courses

Les gammes d'émissions des bus évoluent légèrement à la baisse avec l'évolution des technologies. **La consommation moyenne de carburant des bus Euro VI est 7% inférieure à celle des bus Euro IV. Du fait du fonctionnement même de l'hybride, pour lequel le moteur thermique ne fonctionne pas en continu, celle des bus Euro VI hybrides est 17% inférieure à celle des bus Euro VI non hybrides.**

La variabilité des émissions de CO₂ est moins importante que celle des autres polluants, avec peu de valeurs extrêmes (illustré notamment avec une médiane similaire à la moyenne pour les trois types de bus). Les émissions de CO₂ ne sont pas réglementées par la norme Euro, mais elles baissent grâce à la modernisation des véhicules et à l'enjeu que représente la consommation de carburant pour les opérateurs de flotte, et en parallèle la question du changement climatique. De manière similaire à la consommation de carburant, **les émissions moyennes de CO₂ des bus Euro VI sont 5,5%**

inférieures à celles des bus Euro IV et celles des bus Euro VI hybrides sont en moyenne 16% plus faibles que celles des bus Euro VI non hybrides. L'écart-type des bus Euro IV est de 218, celui des bus Euro VI de 231 et celui des bus Euro Vi hybrides de 119 g/km.

7.2. Disparité intra-norme des bus diesel

Au sein d'une même norme de bus, la variabilité peut être importante. La répartition statistique des courses pour chaque bus instrumenté est représentée pour chaque polluant dans les paragraphes suivants (4 bus ont été instrumentés deux fois, en hiver et en été, et peuvent donc observer une plus grande disparité : les bus 4, 7, 13 et 14).

L'objectif de cette section est tout d'abord d'analyser si tous les bus d'une même norme ont des comportements similaires ou non, en-dehors de toute considération de paramètres autres que l'identification même des bus. L'explication des différences éventuelles entre bus sera abordée plus loin dans ce rapport, lors de l'analyse des paramètres d'influence, chapitre 8 (conditions de circulation, paramètres moteur et météorologiques, etc.).

Particules en nombre - PN

La Figure 28 présente les répartitions statistiques pour les émissions de PN (par course). L'échelle est ici logarithmique.

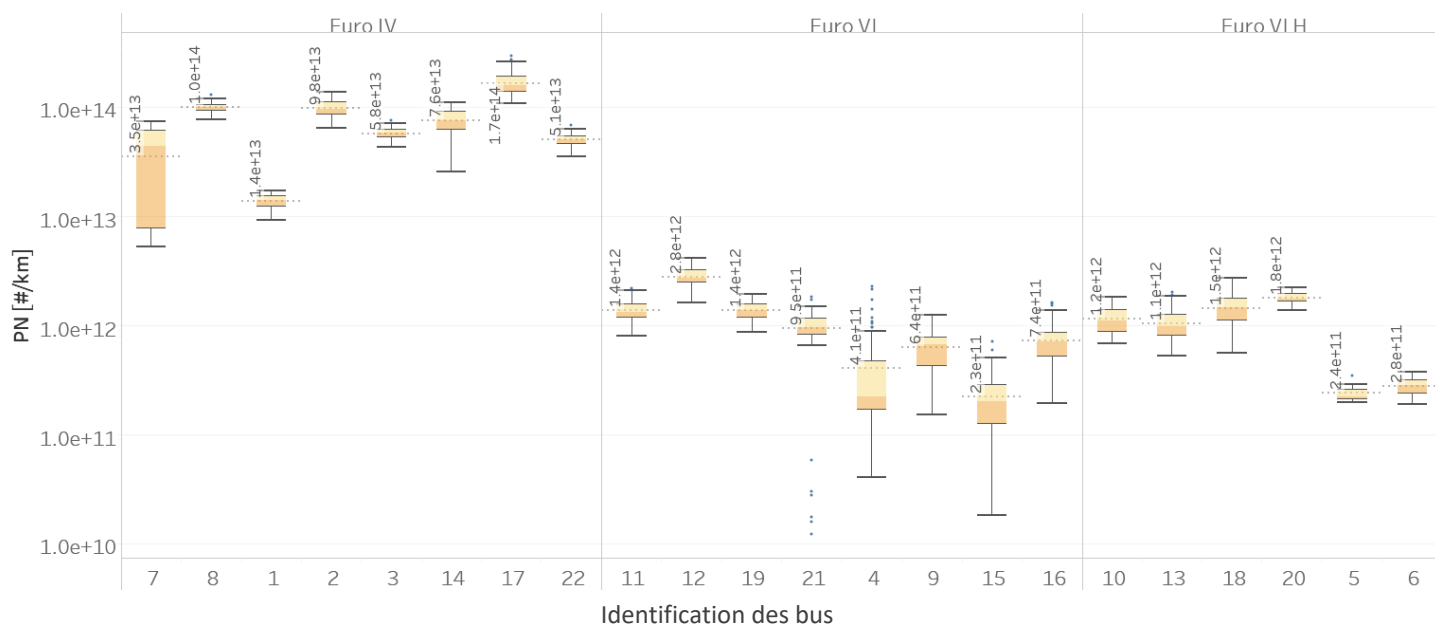


Figure 28 : Nombre de particules émis par km pour différents bus (identifiés par un numéro de 1 à 22) pour toutes les normes Euro avec une échelle logarithmique

De **fortes variations sont observées dans les émissions de particules des différents bus, pour toutes les normes Euro**. Cette variabilité entre bus n'est pas surprenante, car les émissions de PN dépendent non seulement des émissions directement en sortie moteur, mais aussi en grande partie, pour les véhicules équipés d'un FAP, de l'état de ce dernier (d'après la littérature) : selon les kilomètres parcourus depuis la dernière régénération, le FAP sera plus ou moins efficace pour capter les particules.

Pour les bus Euro IV, la variabilité peut être relativement « faible » (pour le bus 1 par exemple, ou les bus 3, 22 et 8, avec des écarts-types de $2,3 \cdot 10^{12}$ à $1,1 \cdot 10^{13}$ #/km) ou très grande (bus 7, 14 et 17 par

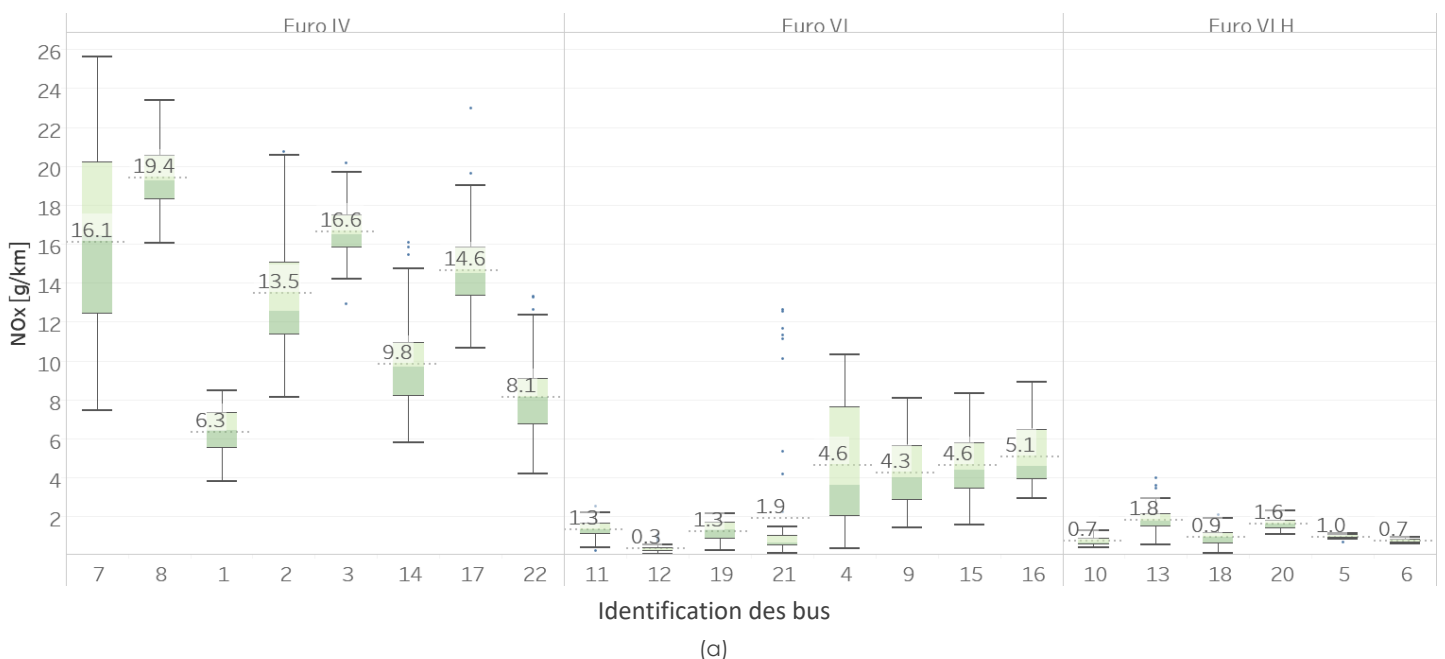
exemple, avec des écarts-types de $1,9 \cdot 10^{13}$ à $4,0 \cdot 10^{13}$ #/km). La différence entre les émissions moyennes de chaque bus Euro IV peut aller d'un facteur 1 à 12 (entre le bus 1 et 17). Les émissions de PN des bus Euro IV sont toujours au moins 22% supérieures à celles de bus Euro VI (en prenant les courses extrêmes des bus Euro VI et Euro IV), avec des émissions maximales des bus Euro VI de $4,2 \cdot 10^{12}$ #/km (pour le bus 12) et des émissions minimales des bus Euro IV de $5,4 \cdot 10^{12}$ #/km (pour le bus 7).

Les bus Euro VI, hybrides ou non, montrent aussi une grande variabilité entre eux, mais dans une gamme d'émissions beaucoup plus faible que celle des bus Euro IV. En moyennes, les bus 11, 12, 19 et 21 ont des émissions plus importantes que les bus 4, 9, 15 et 16, d'un facteur 1,3 à 12, mais certaines courses de ces derniers bus rentrent dans les gammes d'émissions des premiers. Les deux bus Euro VI 15 et 16 ont la même technologie et ont été instrumentés au même moment : il est possible de voir une différence importante entre ces deux bus (le bus 16 émet en moyenne 3,2 fois plus de PN que le bus 15) malgré les similitudes de conditions de mesure. Comme expliqué plus haut, d'après la littérature, ces émissions dépendent fortement de l'état du FAP à l'instant de la mesure. De la même façon que pour les bus Euro VI, certains bus hybrides, les 10, 13, 18 et 20, ont des émissions moyennes de PN 4 à 7,5 fois supérieures à celles des bus 5 et 6. Pour ces deux derniers bus, la gamme d'émissions de PN est très étroite (écart-type d'environ $4,5 \cdot 10^{10}$ #/km) et ne rentre pas dans celles des premiers bus.

Tous les bus Euro VI ont des émissions de PN inférieures à celles des bus Euro IV. Par ailleurs, au sein des bus de norme Euro VI (hybrides et non hybrides), deux groupes de bus se distinguent, ceux émettant en moyenne autour de 10^{12} #/km (bus 11, 12, 19, 21, 10, 13, 18 et 20) et ceux émettant en moyenne autour de $3 \cdot 10^{11}$ #/km voire davantage (bus 4, 9, 15, 16, 5 et 6).

Oxydes d'azote (NO_x) et dioxyde d'azote (NO₂)

La Figure 29 illustre les répartitions statistiques des émissions de NO_x et de NO₂ (par course) de chaque bus instrumenté.



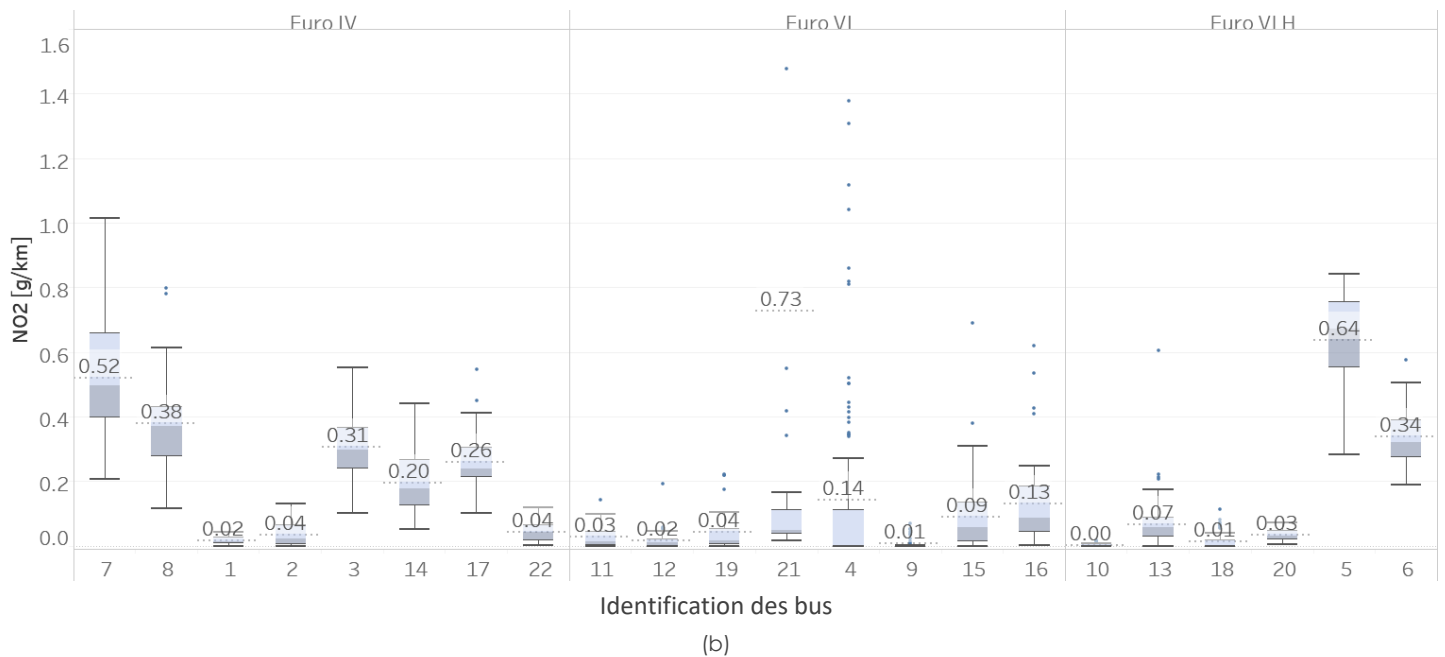


Figure 29 : Quantité de NO_x (a) et de NO₂ (b) émise par km pour différents bus (identifiés par un numéro de 1 à 22)

La variabilité est forte entre bus pour les NO_x, et notamment pour les bus Euro IV, puisque les moyennes d'émissions de NO_x de chaque bus varient d'un facteur 1,2 à 3. La variabilité des émissions d'un même bus reste aussi importante, par exemple pour le bus 7 (instrumenté 2 fois), dont les émissions de NO_x des courses varient entre 7,5 et 25,6 g/km (écart-type de 4,8 g/km). Les grandes variations des émissions de NO_x sont notamment à relier aux variations de températures ambiantes (voir chapitre 8.2).

Les moyennes d'émissions de NO_x des bus Euro VI 4, 9, 15 et 16 sont 2,3 à 17 fois plus importantes que les bus 11, 12, 19 et 21. Le bus 4, ayant été instrumenté 2 fois, observe une grande variabilité d'émissions dans ses courses, de 0,4 à 10,3 g/km (écart-type de 3,0 g/km). Les valeurs atypiques du bus 21 sont dues aux dysfonctionnements temporaires du système de dépollution mentionnés au chapitre 7.1, dans le paragraphe sur les oxydes d'azote (pour plus de détails sur ces dysfonctionnements, voir chapitre 8.5).

Il apparaît aussi sur ce graphique que les bus Euro VI 4, 9, 15 et 16 enregistrent certaines courses avec des émissions de NO_x similaires à celles de certains bus Euro IV. Les émissions de NO_x plus élevées de ces bus semblent liées à des températures d'échappement trop faibles, quelle que soit la température ambiante, qui limitent de fait l'efficacité du système de dépollution des NO_x SCR (voir chapitre 8.1).

La variabilité des émissions de NO_x entre bus hybrides est plus faible, l'ensemble des bus instrumentés observant des émissions moyennes entre 0,7 et 1,8 g/km.

La variabilité des émissions de NO₂ (qui font partie des émissions de NO_x) est très différente de celle des émissions de NO_x.

Pour les bus Euro IV, une moyenne plus élevée des émissions de NO_x s'accompagne d'une moyenne plus élevée des émissions de NO₂ pour la plupart des bus mais pas de manière systématique : de fortes émissions de NO_x ne signifient pas systématiquement de fortes émissions de NO₂ proportionnellement. Les émissions moyennes de NO₂ entre bus Euro IV vont d'un facteur 1 à 26, sachant que certains bus (1, 2 et 22) ont des émissions très faibles, similaires à certains bus Euro VI. Ces remarques s'appliquent aussi aux bus Euro VI, hybrides et non hybrides. Outre les moyennes d'émissions de NO₂ élevées des bus 21 et 4 (attribuées à des dysfonctionnements, l'échelle a été coupée et ne représente pas les valeurs extrêmes, pour plus de lisibilité), les moyennes d'émissions de NO₂ des bus Euro VI varient d'un facteur 1 à 13, et pas forcément de la même façon que pour les NO_x, notamment pour le bus 9.

Si les bus hybrides 5 et 6 observent des émissions de NO_x et de PN très faibles, ils ont des émissions de NO₂ élevées, au niveau de celles des bus Euro IV 7 et 8. Ce sont celles qui rendent le boxplot global des bus Euro VI H particulièrement asymétrique (Figure 23).

La Figure 30 illustre les répartitions statistiques de chaque bus instrumenté pour le ratio NO₂/NO_x, résumant les remarques ci-dessus pour le NO₂ et les NO_x.

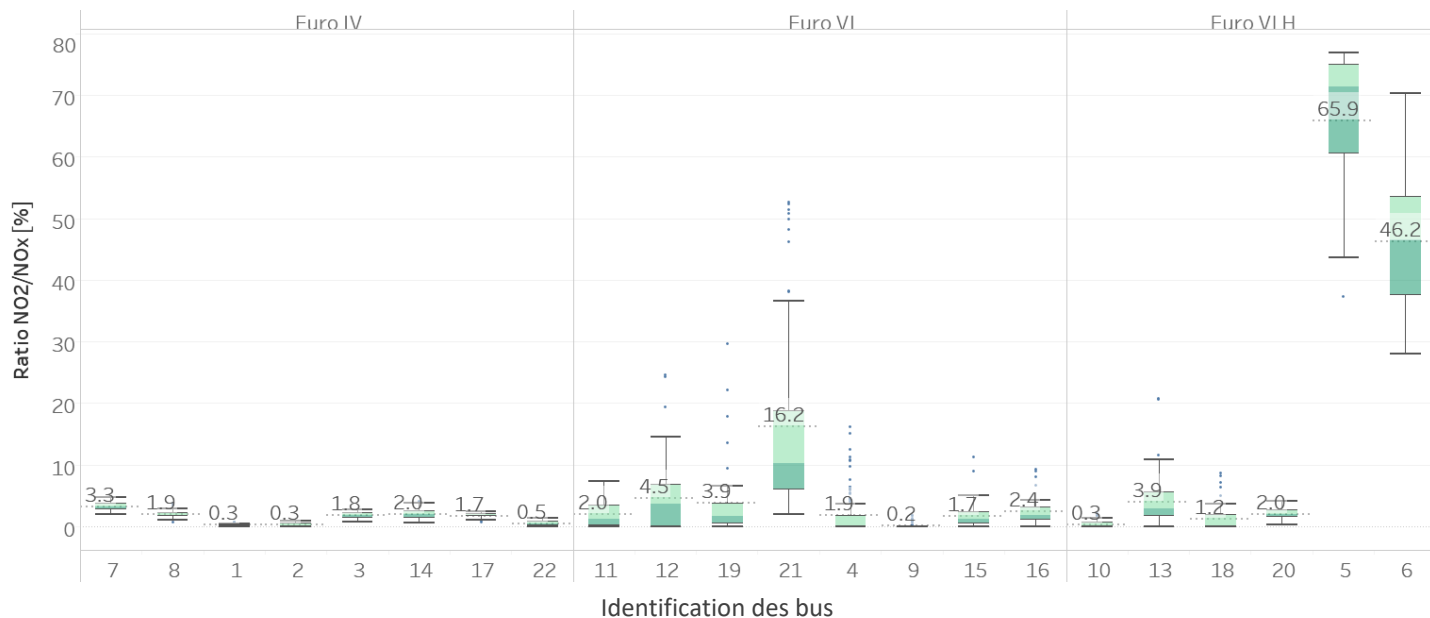


Figure 30 : Ratio NO₂/NO_x pour différents bus (identifiés par un numéro de 1 à 22)

Le ratio NO₂/NO_x par bus permet d'illustrer les points suivants :

- La part du NO₂ dans les NO_x à l'échappement varie fortement d'un bus à l'autre.
- Pour tous les bus Euro IV, la part de NO₂ est faible dans les NO_x à l'échappement, en moyennes de 0,3 à 3,3% - les émissions de NO₂ restant par ailleurs relativement élevées pour certains bus.
- Elle est globalement plus importante pour les bus Euro VI mais surtout pour certains des bus (12, 19 et 21, en prenant en compte les dysfonctionnements pour le bus 21).
- Les valeurs les plus notables sont celles trouvées pour les bus hybrides 5 et 6, avec une gamme de valeurs de 28 à 77% de NO₂ dans les NO_x sur une course.

Il est à noter aussi que **les bus Euro VI dont les émissions de PN sont les plus importantes ne sont pas ceux ayant les plus fortes émissions de NO_x**. C'est d'ailleurs l'inverse, comme le montre la Figure 31, puisque les bus 11, 12, 19 et 21 observent des émissions de NO_x plus faibles que les bus 4, 9, 15 et 16. Dans l'échappement, la présence de davantage de NO_x peut permettre l'oxydation d'une partie des suies et donc paradoxalement limiter les émissions de PN. Cette situation ne se retrouve pas pour les bus Euro IV ou les bus Euro VI hybrides, dont les technologies ou leurs réglages sont probablement différents.

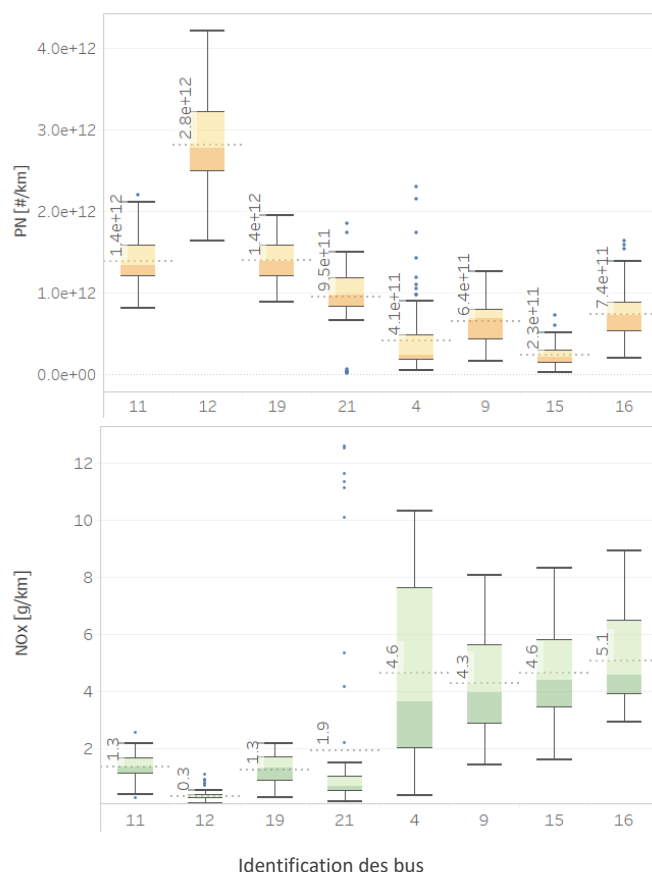


Figure 31 : Zoom sur les émissions de PN et de NO_x des bus Euro VI

Globalement, les émissions de NO_x des bus Euro IV se situent dans l'ordre de grandeur de 4-26 g/km, avec une grande variabilité entre bus. La plupart des bus Euro VI, hybrides et non hybrides, observent des émissions de NO_x autour de 0,1-4 g/km, exceptés certains bus Euro VI émettant plutôt 1 à 10 g/km de NO_x – par ailleurs, ces mêmes bus émettent en parallèle moins de PN.

Les émissions de NO₂ (qui font partie des émissions de NO_x) sont très variables entre bus Euro IV (moyennes de 0,02 à 0,5 g/km) et plus homogènes entre bus Euro VI (moyennes de 0,01 à 0,13 g/km hors dysfonctionnements), avec des niveaux atypiques pour deux bus Euro VI hybrides autour de 0,2-1 g/km, se traduisant par un ratio NO₂/NO_x élevé, autour de 50%.

Ces disparités d'émissions de NO_x et de NO₂ peuvent être attribuées en partie à l'efficacité des systèmes de dépollution, qui peut fluctuer selon les choix technologiques, les réglages moteur, et les conditions de circulation et de température, qui sont étudiées chapitre 8.

Monoxyde de carbone - CO

La Figure 32 illustre les répartitions statistiques des émissions de CO (par course) de chaque bus instrumenté.

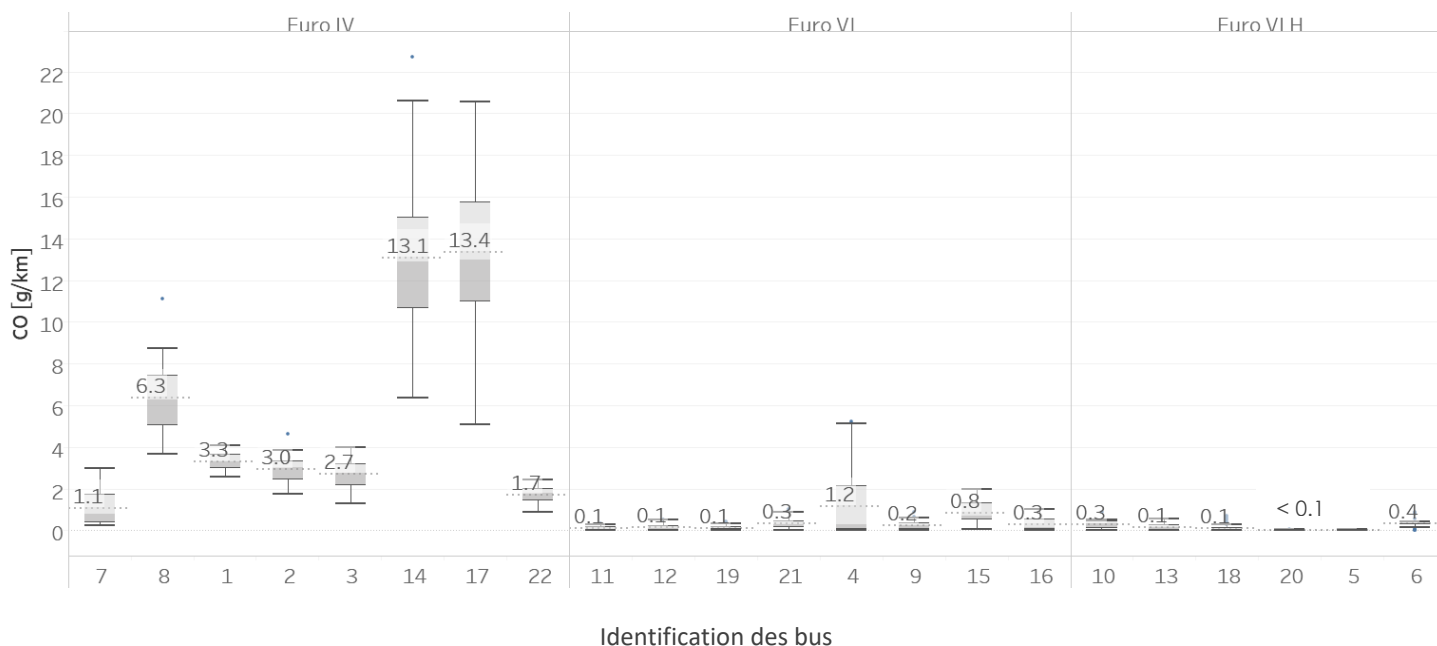


Figure 32 : Quantité de CO émise par km pour différents bus (identifiés par un numéro de 1 à 22)

La variabilité des émissions de CO est surtout importante pour les bus Euro IV. En effet, deux bus enregistrent des émissions particulièrement élevées par rapport aux autres, les bus 14 et 17, avec des moyennes d'émissions 2 à 12 fois supérieures à celles des autres bus Euro IV. Seul le bus 8 enregistre des courses aux émissions de CO (entre 3,7 et 11 g/km) rentrant dans la gamme d'émissions de ces bus 14 et 17, située entre 5 et 21 g/km. Aucun problème mécanique, électronique ou autre n'a été détecté sur les bus 14 et 17. Le bus 14 a également été testé à des températures faibles et élevées (voir chapitre 8.2), pouvant écarter l'effet de la température sur les émissions de CO.

Les émissions moyennes des bus Euro VI varient d'un facteur 1 à 12 aussi mais avec des valeurs nettement plus faibles globalement que celles des bus Euro IV.

Par ailleurs, le boxplot asymétrique du bus 4 montre que la moyenne est biaisée par des valeurs d'émissions temporairement élevées sur certaines courses. Enfin, les bus hybrides émettent très peu de CO sur leurs courses, pour tous les bus.

Consommation de carburant et dioxyde de carbone - CO₂

La Figure 33 illustre les répartitions statistiques des consommations de carburant (par course) de chaque bus instrumenté. Pour certains bus la donnée n'était pas accessible dans les données du bus CAN (bus 17, 11, 9 et 10). La Figure 34 illustre les répartitions statistiques des émissions de CO₂ (par course) de chaque bus instrumenté.

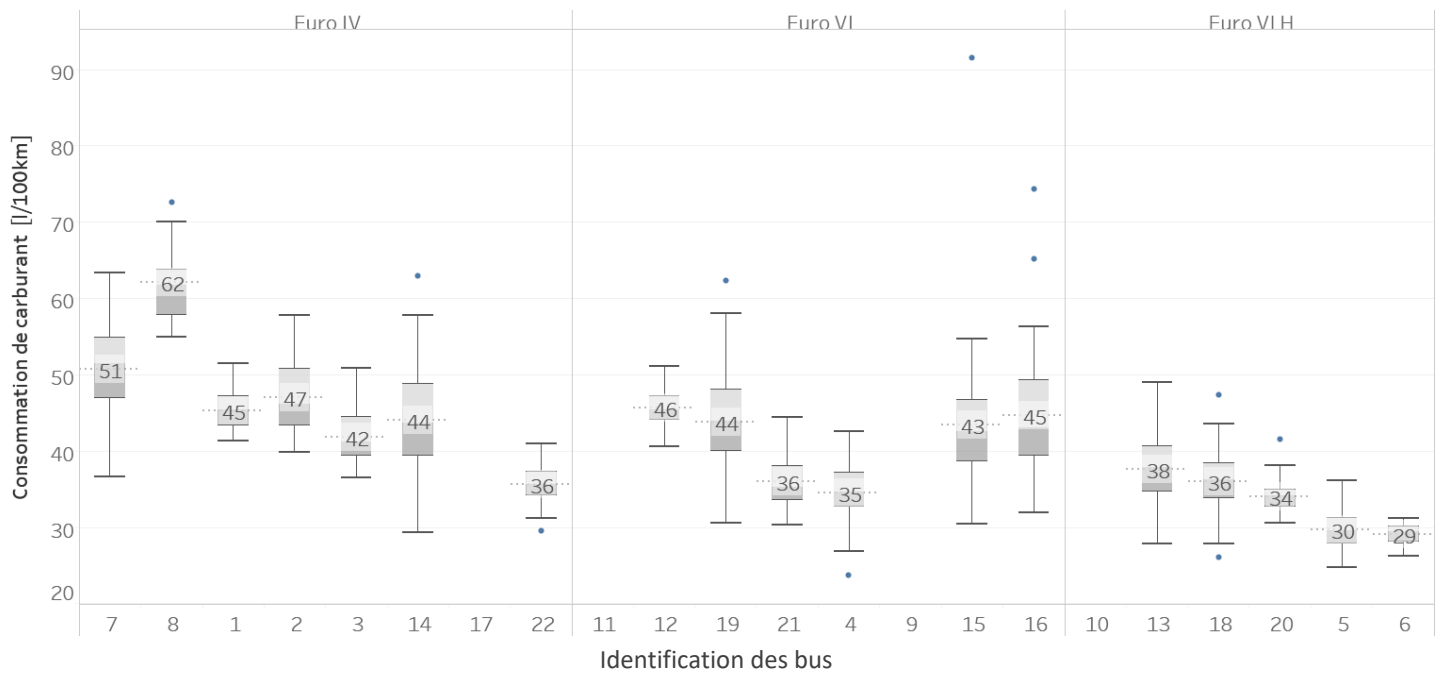


Figure 33 : Consommation de carburant pour différents bus (identifiés par un numéro de 1 à 22)

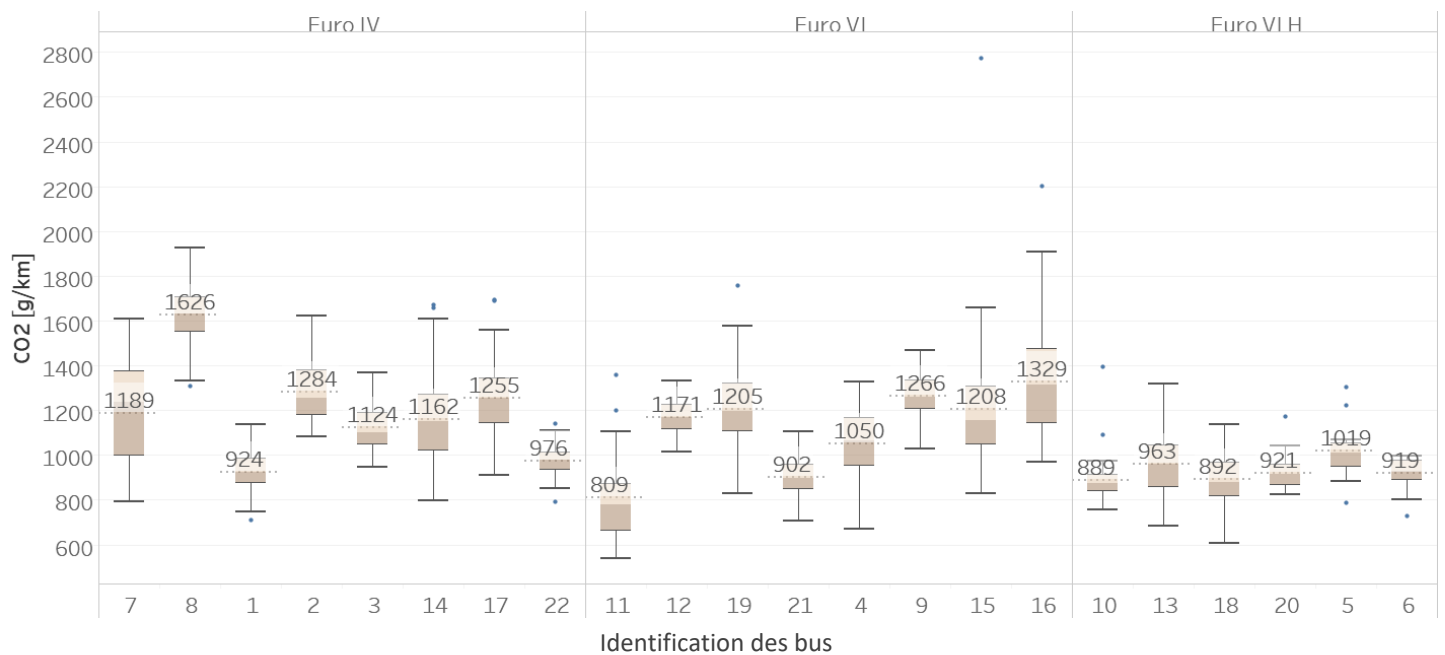


Figure 34 : Quantité de CO₂ émise par km pour différents bus (identifiés par un numéro de 1 à 22)

La consommation de carburant est globalement moins variable que les émissions des polluants (autres que le CO₂). Les moyennes de consommation de carburant entre bus Euro VI hybrides peuvent toutefois varier davantage, de maximum 30%, mais pour des consommations moyennes plus faibles globalement. Il est à noter que certains bus hybrides observent des consommations similaires voire supérieures pour certaines courses à celles de bus Euro VI non hybrides (bus 13 et 18 vs. bus 21 et 4 par exemple), et même à celles de bus Euro IV (le bus 22 notamment), ce qui est le cas lorsque le moteur thermique du bus hybride est en fonctionnement sur toute la course, du fait des conditions de circulation ou des réglages moteur.

De la même façon, les émissions de CO₂ par course sont globalement moins variables que celles des autres polluants. Les moyennes d'émission de CO₂ entre deux bus Euro IV varient de 8 à 80%, de 3 à 60% pour les bus Euro VI et de maximum 16% pour les bus Euro VI hybrides. Certains bus montrent tout de même des gammes d'émissions et de consommation de carburant plus élevées que les autres, comme le bus 8 (Euro IV).

Dans ce chapitre 7.2, les comparaisons entre bus intègrent toutes les conditions de circulation, sur les différentes lignes notamment, et dans différentes conditions météorologiques. Après une analyse précise des résultats de chaque ligne sur laquelle différents types de bus ont été instrumentés (lignes PC 1, PC 2 et PC 3), **l'impact de la ligne ne peut être dissocié des autres paramètres d'influence. Le comportement de chaque type de bus peut varier fortement d'une saison à l'autre, d'un bus à un autre, selon l'état du bus et de nombreux autres paramètres, et chaque polluant n'est pas influencé de la même façon par tel ou tel paramètre.** Le chapitre suivant explore ces influences pour l'ensemble des bus sur l'ensemble des lignes instrumentées.

8. Bus Diesel : études de certains facteurs d'influence

Des analyses ont été effectuées afin d'évaluer le comportement des émissions des différents polluants au sein de chaque norme Euro, selon divers facteurs potentiellement influents.

D'après la littérature, les facteurs suivants impactent les émissions, différemment selon le système de dépollution du véhicule :

- La température d'échappement, pour les véhicules équipés d'un système de réduction des NO_x SCR (définition de la SCR chapitre 5.2) ;
- Le démarrage à froid (lorsque la température du liquide de refroidissement est inférieure à 70°C) : cela cause entre autre des températures d'échappement faibles et une combustion déficiente ;
- La température ambiante pouvant impacter le fonctionnement du moteur, par exemple lors des démarrages à froid ;
- La charge moteur : ce paramètre n'était cependant pas disponible dans les données moteur collectées ;
- La vitesse moyenne : une faible vitesse moyenne peut être liée à des arrêts fréquents et de nombreuses phases transitoires ;
- La pente : l'altitude mesurée par le GPS n'est pas jugée assez fiable pour analyser ce paramètre ;
- Le mode de conduite : ce facteur est évalué via l'indicateur RPA (Relative Positive Acceleration, défini au chapitre 4.1) à l'échelle d'une course ;
- La durabilité du bus : ce facteur peut être évalué via le kilométrage. Cependant, l'effet du kilométrage ne peut pas être analysé à partir de l'étude réalisée : des bus de technologies différentes avec des kilométrages différents ont été instrumentés, mais les kilométrages sont relativement proches si l'on considère les bus d'une même norme Euro. La durabilité du bus sera abordée à partir de certains événements observés lors des campagnes de mesure (dysfonctionnements du système SCR).

Hiérarchisation des facteurs d'influence

Un modèle statistique a été élaboré dans le but de hiérarchiser les facteurs d'influence récoltés dans cette étude. L'objectif de ce modèle est d'analyser les influences d'un ensemble de variables explicatives sur les émissions de différents polluants pour des bus de normes Euro différentes. Le jeu de données pris pour ce modèle est celui au pas de temps seconde, donc un ensemble d'environ 2 300 000 de données (en prenant en compte seulement les secondes pour lesquelles tous les paramètres sont disponibles). L'Annexe 4 explique plus en détails les étapes d'élaboration de ce modèle.

Dans cette introduction, une hiérarchisation de ces paramètres par polluant est présentée, en considérant les paramètres suivants : norme Euro et système de dépollution, accélération, régime moteur, température d'échappement, température du liquide de refroidissement, température ambiante. **Cette hiérarchisation permet une visualisation globale de l'influence de certains paramètres sur l'émission des différents polluants, appuyée par des statistiques robustes sur un grand nombre de données. Les principaux paramètres d'influence de chaque polluant sont listés dans cette introduction, par ordre décroissant d'importance.**

Pour les émissions de PN, le modèle atteint un R^2 de 0,65, c'est-à-dire que les paramètres considérés expliquent 65% de la variabilité des données. Les facteurs d'influence principaux sont :

- La norme du bus majoritairement, ce qui confirme les observations du chapitre 7.1 (si le bus est de norme Euro IV, alors les émissions de PN seront significativement plus élevées).
- Le régime moteur : un régime moteur élevé va causer plus d'émissions de PN.
- L'accélération dans une moindre mesure : une plus forte accélération va causer plus d'émissions de PN.
- La température ambiante dans une moindre mesure : une température supérieure à 20°C va limiter les émissions de PN, pour les bus Euro IV essentiellement (voir chapitre 8.2).

Pour les émissions de NO_x, le modèle atteint un R^2 de 0,79, c'est-à-dire que les paramètres considérés expliquent 79% de la variabilité des données. Les facteurs d'influence principaux sont :

- La norme du bus principalement, ce qui confirme les observations du chapitre 7.1 (si le bus est de norme Euro IV, alors les émissions de NO_x seront significativement plus élevées).
- L'accélération : une plus forte accélération va causer plus d'émissions de NO_x.
- La température du liquide de refroidissement : faible (<70°C), elle influence les émissions de NO_x à la hausse.
- La température d'échappement : faible (<200°C), elle influence les émissions de NO_x à la hausse.
- La vitesse dans une moindre mesure. Une course dont la vitesse moyenne est faible va généralement être source de plus d'émissions de NO_x.
- La température ambiante dans une moindre mesure : faible (<10°C), elle influence les émissions de NO_x à la hausse.

Pour les émissions de NO₂, le modèle atteint un R^2 de 0,30, c'est-à-dire que les paramètres considérés expliquent 30% de la variabilité des données. Les émissions de NO₂ ont donc un comportement moins bien estimé que les autres polluants avec les paramètres récoltés dans cette étude. Les facteurs d'influence principaux sont :

- La température du liquide de refroidissement : faible (<70°C), elle influence les émissions de NO₂ à la hausse.
- La température d'échappement : faible (<150°C), elle influence les émissions de NO₂ à la hausse.

La norme du bus n'est pas un facteur d'influence majeur dans ce modèle pour les émissions de NO₂.

Pour les émissions de CO, le modèle atteint un R^2 de 0,62, c'est-à-dire que les paramètres considérés expliquent 62% de la variabilité des données. Les facteurs d'influence principaux sont :

- La vitesse, essentiellement pour les bus Euro IV. Une course dont la vitesse moyenne est faible va généralement être source de plus d'émissions de CO.
- La norme du bus, ce qui confirme les observations du chapitre 7.1 (si le bus est de norme Euro IV, alors les émissions de CO seront significativement plus élevées).
- La température d'échappement : supérieure à 250°C, elle influence les émissions de CO à la hausse.
- La température du liquide de refroidissement : un moteur moins chaud va causer plus d'émissions de CO (combustion incomplète).
- L'accélération : une plus forte accélération va entraîner plus d'émissions de CO.

Pour les émissions de CO₂, le modèle atteint un R^2 de 0,93, c'est-à-dire que les paramètres considérés expliquent 93% de la variabilité des données (ce qui est essentiellement dû à la prise en

compte du débit de carburant dans les paramètres explicatifs). Les facteurs d'influence principaux, hors débit de carburant, sont :

- Le régime moteur : un régime moteur élevé va engendrer plus d'émissions de CO₂.
- L'accélération : une plus forte accélération va causer plus d'émissions de CO₂.

La norme du bus n'est pas un facteur d'influence majeur dans ce modèle pour les émissions de CO₂.

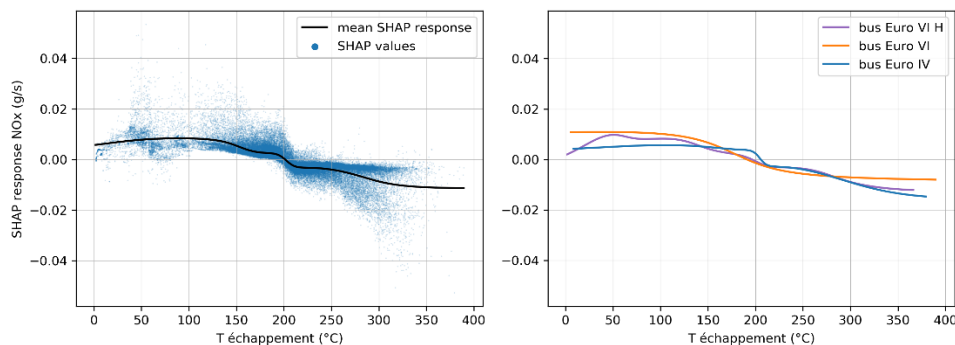
Il résulte de ce modèle que, **en-dehors de la norme Euro, les facteurs les plus influents (selon le polluant) sur les émissions instantanées sont la température d'échappement, la température du liquide de refroidissement, la température ambiante, l'accélération/la vitesse et le régime moteur (ce qui peut être lié à la fois aux conditions de circulation, au mode de conduite et à la charge moteur)**. Par la suite, l'influence de ces facteurs est abordée de plusieurs façons : en examinant leur impact au niveau des courses (émissions exprimées en g/km ou #/km), au niveau d'un kilomètre parcouru (émissions exprimées en g/km ou #/km), voire au niveau des émissions instantanées (émissions exprimées g/s ou #/s). L'impact de la vitesse moyenne d'une course sur les émissions au km est aussi analysé chapitre 8.3.

8.1. Température d'échappement

La température d'échappement est connue pour avoir un impact direct sur l'efficacité du fonctionnement des systèmes de dépollution, notamment lorsque le bus contient un système SCR. La température de fonctionnement est optimale à partir de 200°C pour ce système de dépollution, l'injection d'urée et la réaction de réduction pouvant être réalisées à cette température. La technologie SCR ne fonctionne pas à une température inférieure à 150°C, et partiellement entre 150 et 200°C : ce fonctionnement partiel est dû à l'impossibilité d'injection d'urée à cette température. Mais la réduction des NO_x est toutefois possible entre 150 et 200°C, sur un temps limité, en fonction de l'ammoniac déjà présent dans le bloc SCR.

Dans la configuration de cette étude, la mesure de la température d'échappement s'effectue en fin de ligne d'échappement, en aval des systèmes de dépollution, à une distance variable et difficilement mesurable selon le type de bus ; les valeurs mesurées sont donc un indicateur relatif de la température de sortie des systèmes de dépollution et donc de la SCR.

Le modèle statistique permet dans un premier temps de confirmer que, lors des mesures réalisées, la température seuil de 200°C à l'échappement est un facteur important pour les émissions de NO_x. Les courbes de réponses du modèle sont présentées Figure 35 pour les émissions de NO_x, de NO₂ et de CO.



(a)

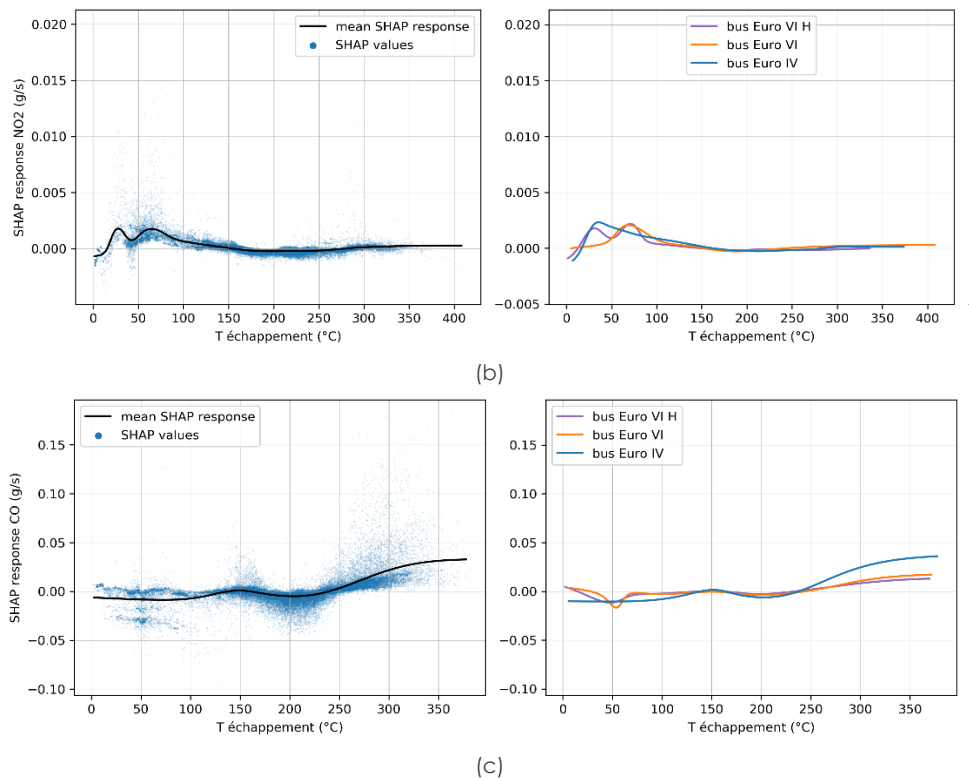


Figure 35 : Courbes de réponse du modèle : émissions de NO_x (g/s) (a), de NO_2 (g/s) (b) et de CO (g/s) (c) par rapport à la température d'échappement

Le point d'inflexion de la réponse des émissions de NO_x à la température d'échappement se situe bien à 200°C globalement pour tous les bus : au-dessus de 200°C , les émissions de NO_x vont avoir tendance à diminuer de $-0,01$ g/s, et les bus Euro VI globalement y sont légèrement plus sensibles (impact des quatre bus ayant de faibles températures d'échappement la majorité du temps). Les émissions de NO_2 observent aussi une tendance à la hausse pour des températures d'échappement inférieures à 150°C surtout. Le modèle montre par ailleurs que les émissions de CO peuvent augmenter de manière non négligeable lorsque la température d'échappement dépasse les 250°C .

Une analyse plus précise de ce facteur d'influence à l'échelle des courses et des données seconde a aussi été réalisée pour observer les différences de comportements entre bus. La Figure 36 permet une analyse au niveau des courses, en illustrant l'influence de la température d'échappement moyenne d'une course sur les émissions de NO_x et de NO_2 .

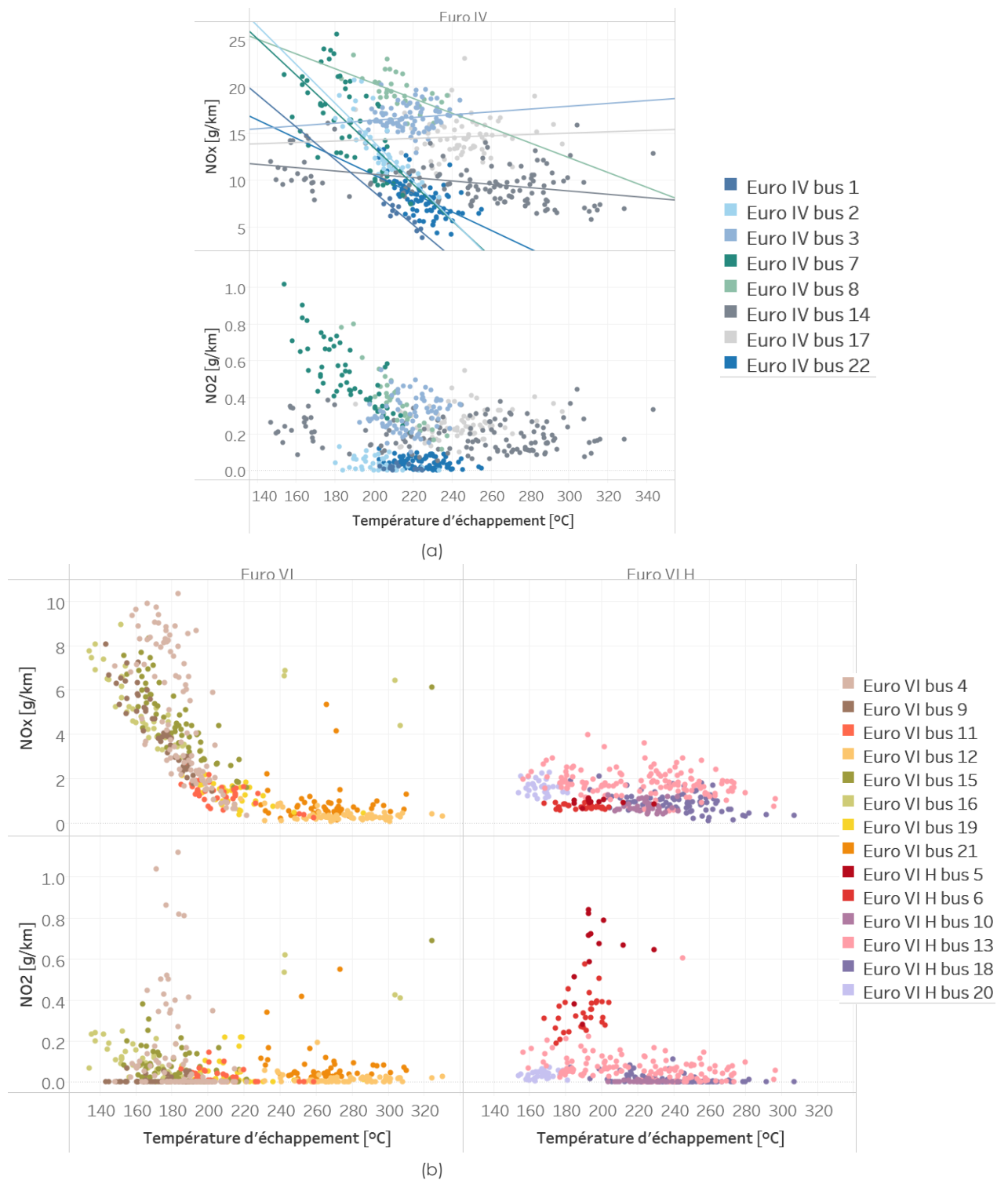


Figure 36 : Influence de la température d'échappement sur les émissions de NO_x, NO₂ (un point=une course), pour les bus Euro IV (a) et les bus Euro VI et Euro VI hybrides (b)

Ces figures montrent que la température d'échappement n'est pas le seul facteur pour différencier les émissions de NO_x de deux bus de même norme (exemple : bus Euro IV 2 et 3 ; pour le premier, les émissions diminuent avec l'augmentation de la température moyenne d'échappement lors des courses réalisées et pour le second, les émissions restent stables quelle que soit la température moyenne d'échappement de la course). Cependant, les émissions ont tendance à diminuer avec l'augmentation de cette température, sauf exceptions.

Pour les bus Euro IV, il est possible de retrouver un impact de la température d'échappement pour certains bus indépendamment des autres : **l'augmentation de la température d'échappement moyenne entraîne une diminution des émissions de NO_x, plus ou moins importante selon le bus.**

Deux bus instrumentés (bus 3 et 17), dont les températures d'échappement moyennes sont au-dessus de 200°C et moins variables que d'autres bus, ne sont pas sensibles à cette variation. Les émissions de NO₂ ne sont globalement pas sensibles à la température d'échappement pour les bus Euro IV, excepté pour deux d'entre eux, le 7 et le 8.

Pour les bus Euro VI, **les émissions de NO_x diminuent fortement avec l'augmentation de la température d'échappement, pour les bus dont les températures moyennes sur une course sont inférieures à 200°C (bus 4, 9, 15 et 16)**. La température d'échappement n'a quasiment plus d'impact à partir du moment où la température moyenne sur la course est supérieure à 200°C, c'est-à-dire lorsque le système SCR peut fonctionner. A noter qu'il se trouve davantage de courses à températures d'échappement moyennes faibles pour les bus Euro VI que les bus Euro IV.

Enfin, les émissions des bus Euro VI hybrides ne sont pas ou peu impactées par la température d'échappement. A noter cependant que les très fortes émissions de NO₂ des bus 5 et 6 ont lieu à des températures d'échappement moyennes inférieures à 200°C.

L'analyse à l'échelle des courses permet une compréhension plus fine de l'influence de ce facteur sur les émissions, mais l'analyse des variations temporelles au cours d'une course est aussi nécessaire afin de montrer que l'atteinte du seuil de température d'échappement (200°C théoriquement dans la SCR) pour le fonctionnement complet du système SCR permet bien une diminution des émissions de NO_x en conditions réelles. La Figure 37, la Figure 38 et la Figure 39 représentent les émissions de NO_x et de NO₂ à l'échelle de la seconde moyennées par classe de température d'échappement, respectivement pour les bus Euro IV, Euro VI et Euro VI hybrides. Les bus sont différenciés par leur numéro d'identification de 1 à 22. Les classes de température d'échappement sont de 20°C, la borne inférieure étant indiquée par l'étiquette en abscisse. La dernière ligne de chaque graphique indique, pour chaque bus, le pourcentage des données récoltées par classe, permettant de relativiser les classes contenant peu d'enregistrements.

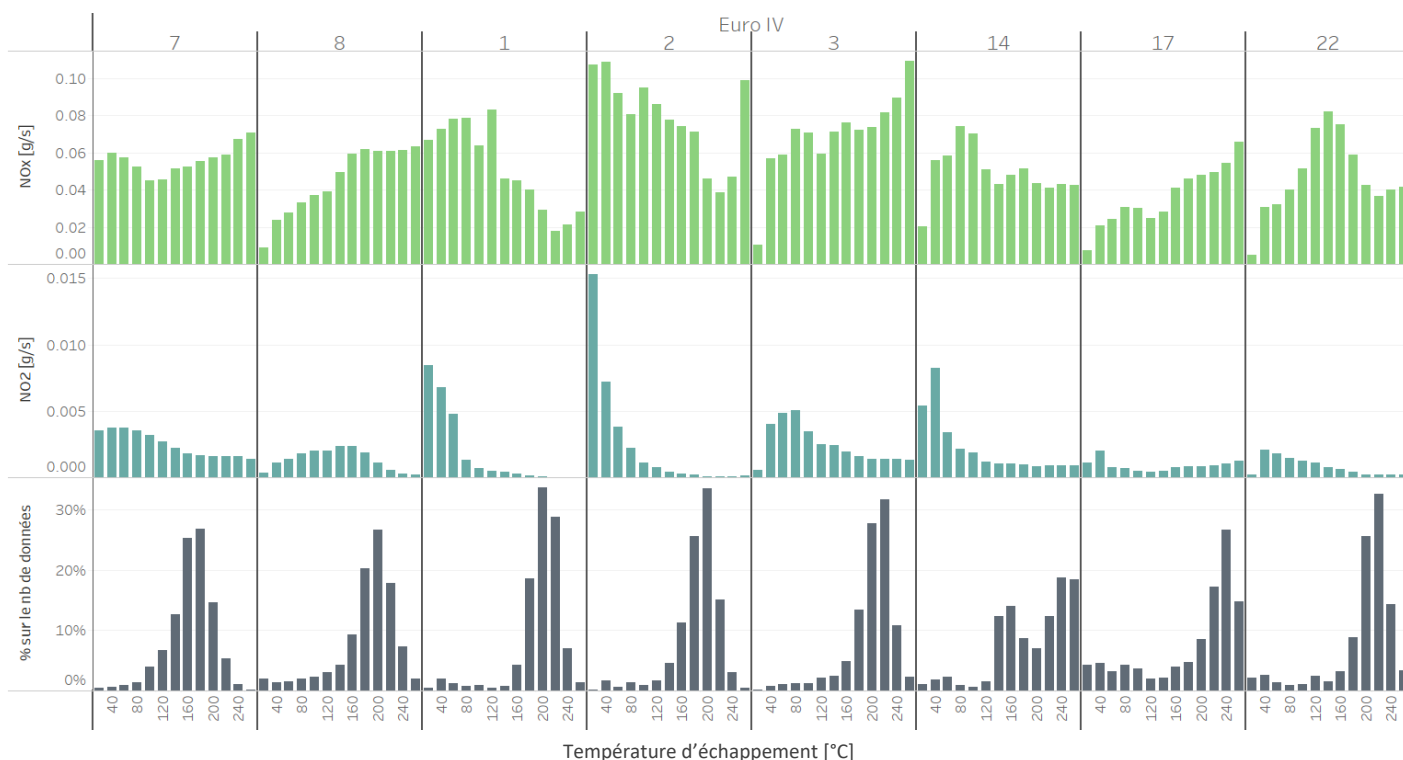


Figure 37 : Variations des émissions au pas de temps seconde de NO_x et NO₂, moyennées par classe de température d'échappement, pour les bus Euro IV

Les bus Euro IV enregistrent des températures d'échappement supérieures à 200°C la majorité du temps, sauf pour les bus 7 et 8.

La baisse des émissions de NO_x pour une température d'échappement supérieure à un certain seuil est visible pour les bus 1, 2, 14 et 22. Les bus 3 et 17 ne montrent pas cette diminution et leurs émissions de NO_x augmentent progressivement avec la température d'échappement, même lorsqu'elle est supérieure à 200°C, atteignant dans ces températures des émissions de NO_x plus élevées que celles des autres bus.

Les émissions de NO₂ ont tendance à baisser avec l'augmentation de la température d'échappement, pour tous les bus instrumentés.

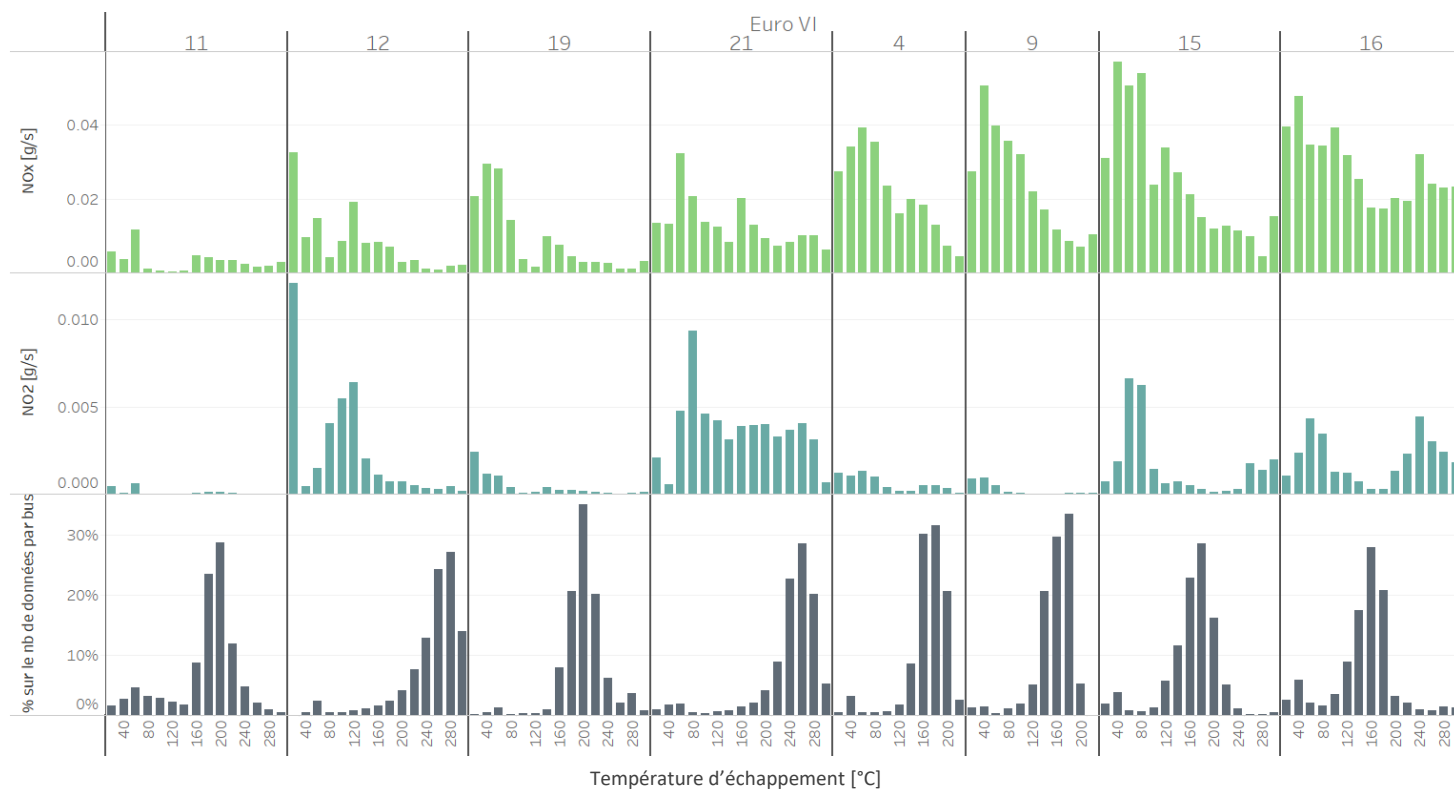


Figure 38 : Variations des émissions au pas de temps seconde de NO_x et NO₂, moyennées par classe de température d'échappement, pour les bus Euro VI

Les bus Euro VI ont deux comportements différents : les bus 11, 12, 19 et 21 voient leurs émissions de NO_x diminuer globalement avec l'augmentation de la température d'échappement, et les températures d'échappement atteintes sont majoritairement supérieures à 180/200°C. Les bus 4, 9, 15 et 16 en revanche n'atteignent que très peu souvent des températures aussi élevées que les autres bus, mais leurs émissions diminuent régulièrement avec l'augmentation de la température d'échappement. Par ailleurs, aux températures les plus élevées, leurs émissions de NO_x restent supérieures à celles des bus 11, 12 et 19.

Pour la majorité des bus, les émissions de NO₂ diminuent avec l'augmentation de la température d'échappement – seuls les bus 15 et 16 montrent une augmentation des émissions de NO₂ pour des températures d'échappement supérieures à 200°C.

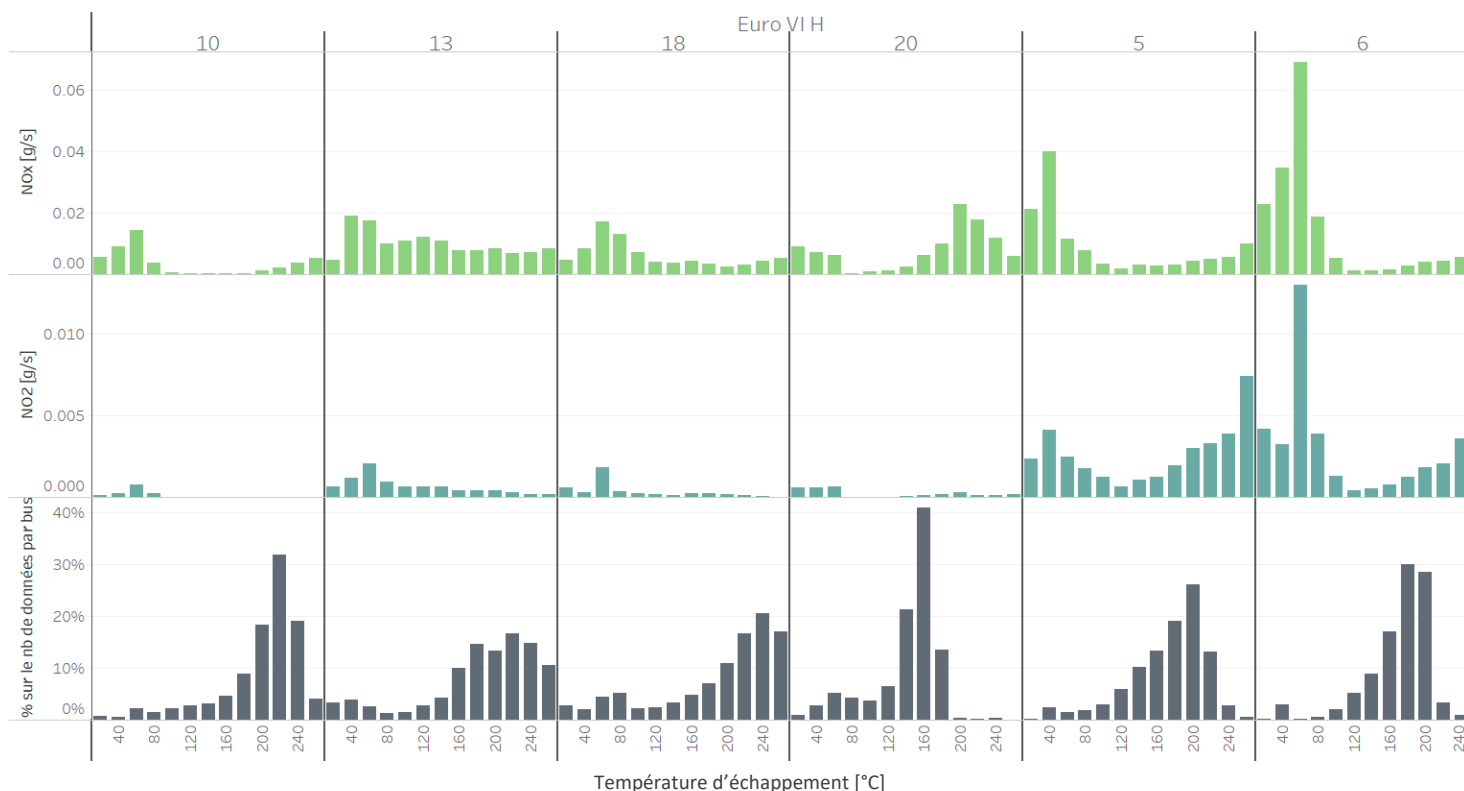


Figure 39 : Variations des émissions au pas de temps seconde de NO_x, NO₂ et PN, moyennées par classe de température d'échappement, pour les bus Euro VI hybrides

Les bus Euro VI hybrides 5 et 6 observent le même comportement pour les 2 polluants considérés que les bus 4, 9, 15 et 16 Euro VI analysés dans le paragraphe précédent, mais la température d'échappement seuil se situe plutôt à 120°C. Les bus 10, 13, 18 et 20 ont des émissions de NO₂ très faibles, et celles de NO_x évoluent très peu avec la température d'échappement (les émissions maximales sont tout de même rencontrées aux plus faibles températures).

Pour le bus 20, le profil atypique peut résulter d'un manque de calibration moteur pour les températures les plus chaudes, ou un besoin de forte puissance (peu souvent atteinte) pour atteindre ces températures.

Globalement donc, la température d'échappement constitue un facteur d'importance pour les émissions de NO_x essentiellement, et de NO₂ dans une moindre mesure. **Si le bus comprend un système SCR (ce qui est le cas pour toutes les technologies récentes pour l'homologation Euro VI), une température d'échappement suffisamment élevée engendre une baisse significative des émissions de NO_x. Un bus avec SCR n'atteignant pas des températures d'échappement suffisantes (à cause d'un problème de calibration moteur par exemple, pour les conditions de circulation spécifiques des bus) émettra davantage de NO_x.**

8.2. Température ambiante et démarrage à froid

Une température ambiante faible peut entraîner théoriquement une augmentation des émissions de polluants et notamment de NO_x, dans un premier temps en augmentant potentiellement la durée du démarrage à froid lors duquel l'injection, la combustion et les systèmes de dépollution ne sont pas à leur état optimal. Dans un deuxième temps lorsque le moteur est chaud, une faible température ambiante peut aussi rendre les conditions de combustion non optimales, tout en réduisant l'efficacité des systèmes de dépollution.

Le modèle statistique a permis de mettre en exergue l'influence, lors des mesures réalisées, d'une température ambiante faible sur les émissions de NO_x. La Figure 40 donne les courbes de réponse du modèle statistique pour les émissions de NO_x et de NO₂ vis-à-vis de la température ambiante – mais aussi de PN pour comprendre dans quelles circonstances ce paramètre a un effet sur ces émissions (cf. introduction du chapitre 8).

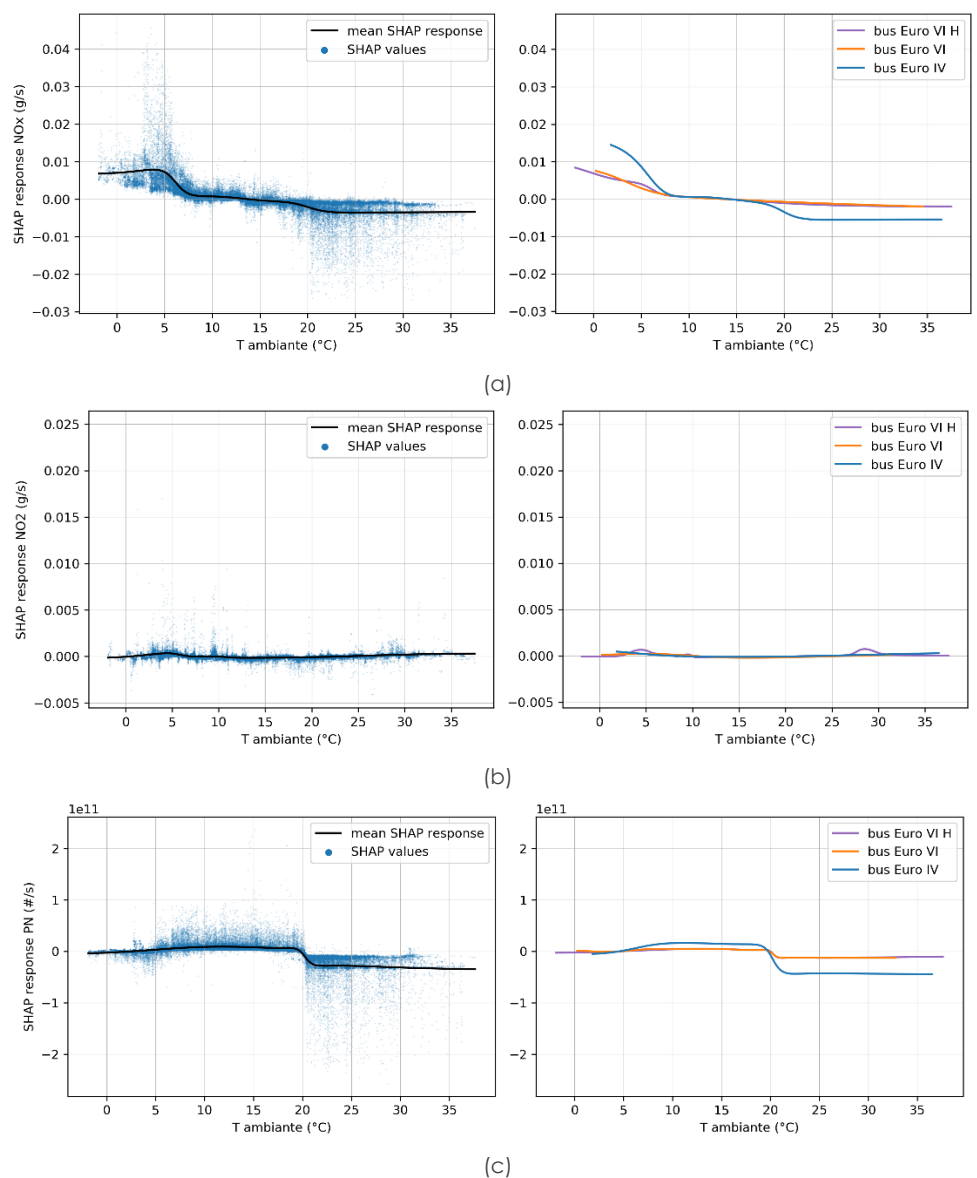


Figure 40 : Courbes de réponse du modèle : émissions de NO_x (g/s) (a), de NO₂ (g/s) (b) et de PN (#/s) (c) par rapport à la température ambiante

Pour les émissions de NO_x, l'influence des températures apparaît nettement avec une augmentation des émissions de +0,01 g/s globalement pour tous les bus, pour des températures ambiantes inférieures à 10°C ; par ailleurs, les graphiques par type de bus montrent la plus forte influence des températures ambiantes faibles sur les émissions des bus Euro IV. Les émissions de NO₂ ne sont globalement pas influencées par la température ambiante. Les fortes émissions de NO₂ des bus Euro VI hybrides 5 et 6, surtout instrumentés à des températures ambiantes élevées, se retrouvent sur la courbe de réponse des bus Euro VI hybrides. Enfin, le modèle fait apparaître que les bus Euro IV ont tendance à voir leurs émissions de PN réduites lors de températures ambiantes supérieures à 20°C.

Ainsi, **les bus Euro IV et les bus Euro VI** sont sensibles à la température ambiante pour leurs émissions de NO_x. Les graphiques suivants montrent aussi que **les bus Euro VI hybrides** semblent moins

influencés par ce paramètre, malgré le nombre moins important de campagnes réalisées pour ce type de bus. Une visualisation de cet effet est présentée Figure 41 pour les bus Euro IV, et Figure 42 pour les bus Euro VI et Euro VI hybrides.

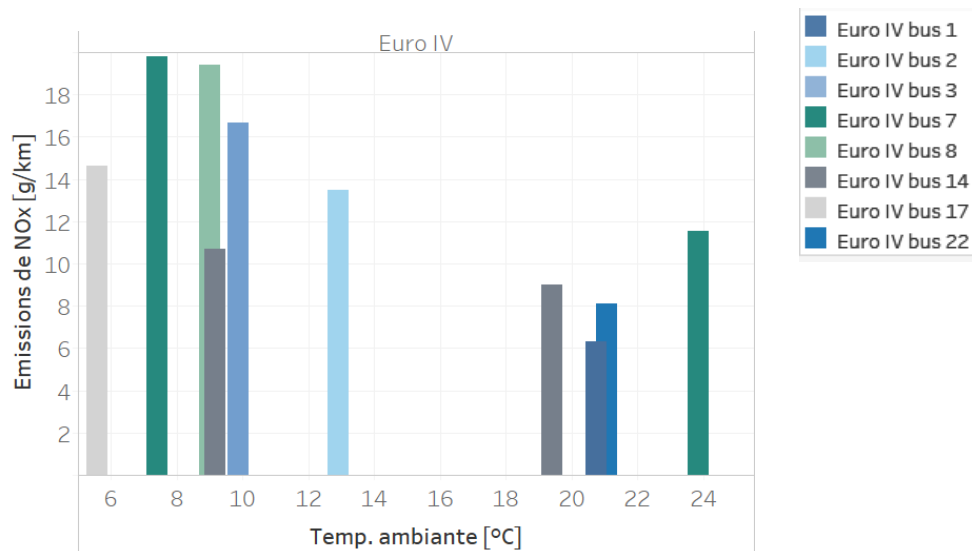


Figure 41 : Effet de la température ambiante sur les émissions de NO_x des bus Euro IV (moyennes des courses par campagne)

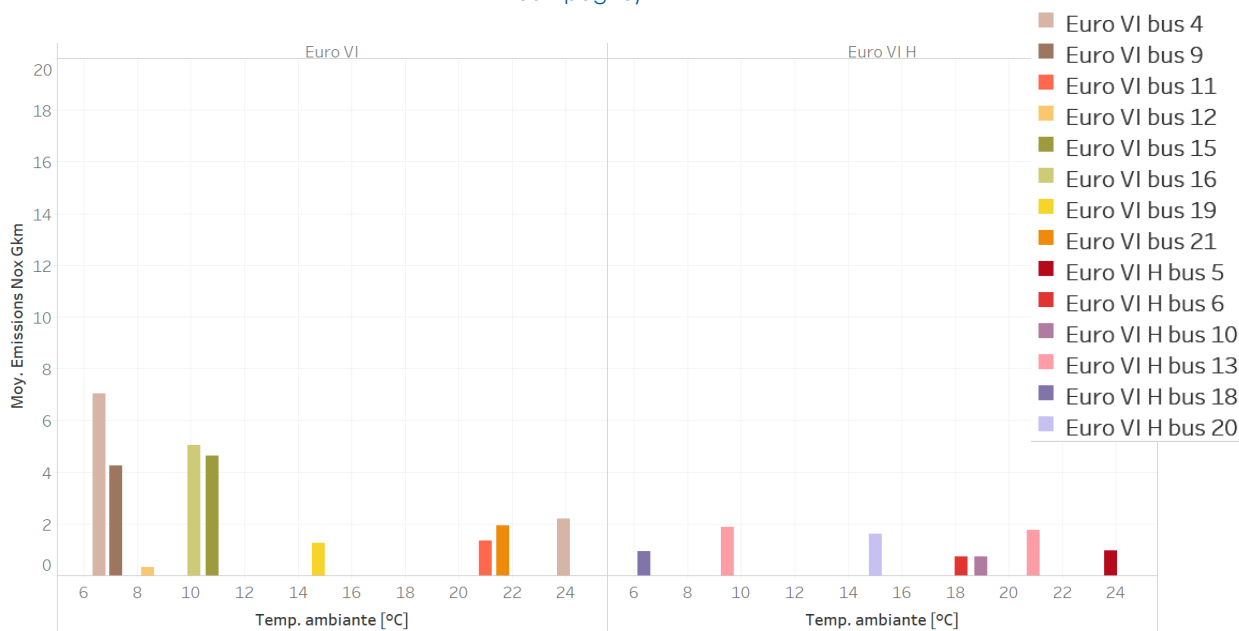


Figure 42 : Effet de la température ambiante sur les émissions de NO_x des bus Euro IV (moyennes des courses par campagne)

En moyenne pour chaque campagne, l'effet de la température ambiante sur les émissions de NO_x des bus Euro IV est visible aussi à l'échelle des courses, sans considération d'autres paramètres : les émissions de NO_x ont tendance à augmenter avec la diminution de la température ambiante. A cette échelle, cela est aussi visible pour les bus Euro VI, mais moins pour les bus Euro VI hybrides (Figure 42).

Afin de préciser l'analyse, les bus ayant été instrumentés à deux saisons différentes - pour disposer de températures ambiantes froides et chaudes pour un même bus - sont abordés ici. Etant donné que la variabilité des émissions est importante entre bus de même type, il est important d'isoler ce facteur pour ne se focaliser que sur l'influence de la température ambiante. Le bus 7 (Euro IV) et le bus 4 (Euro VI) ont été instrumentés à des températures moyennes de 7°C (campagne 6) et de 24°C (campagne 2). Le bus 14 (Euro IV) et le bus 13 (Euro VI hybride) ont été instrumentés à des températures moyennes de 10°C (campagne 9) et de 21°C (campagne 12). La Figure 43 représente

l'ensemble des émissions par course pour les campagnes des bus 7 et 4, la Figure 44 de même pour les bus 14 et 13.

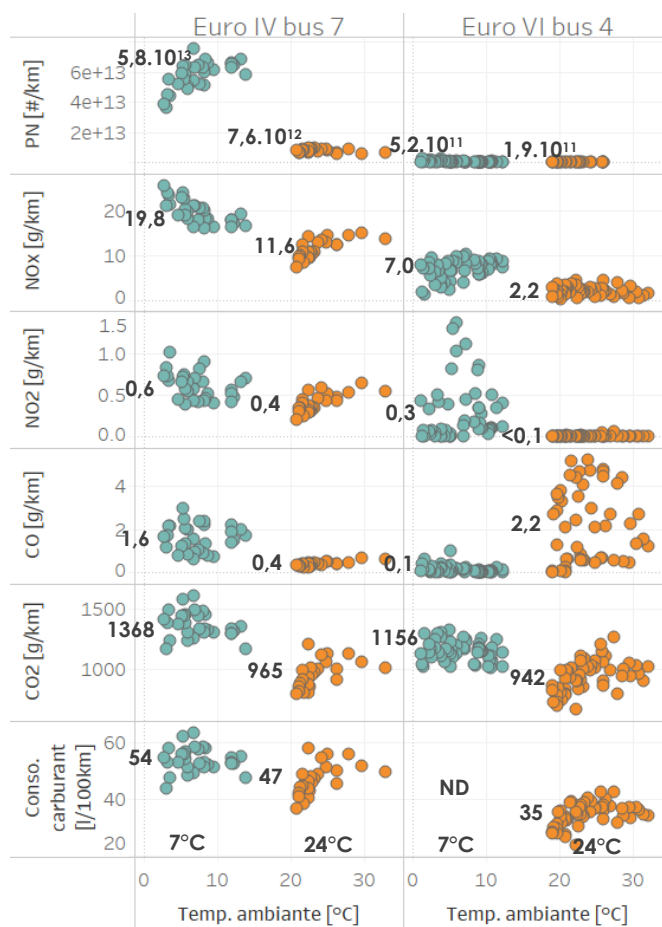


Figure 43 : Comparaison des émissions et de la consommation de carburant des bus instrumentés deux fois, selon la température ambiante (un point = une course, couleurs des points = différenciation des deux campagnes, étiquettes=moyennes des campagnes)

Pour rappel, le bus 4 a observé un dysfonctionnement de son système SCR pendant la campagne 6 (hiver), qui a causé des émissions de NO₂ importantes sur certaines courses. Les deux bus avaient à peu près les mêmes conditions de circulation durant les deux campagnes, en termes de vitesse moyenne et de mode de conduite.

Cette comparaison permet de noter que, pour ces deux bus, la température ambiante a une influence sur les émissions de tous les polluants. On observe en effet que, en moyenne :

- Le bus Euro IV n°7 émet, à faible température ambiante (inférieure à 15°C en moyenne sur une course), 7,6 fois plus de PN, 70% de NO_x en plus, 50% de NO₂ en plus, 4 fois plus de CO, 40% de CO₂ en plus et consomme 15% de carburant en plus par rapport à des températures supérieures à 20°C.
- Le bus Euro VI n°4 émet, à faible température ambiante (inférieure à 15°C en moyenne sur une course), 2,7 fois plus de PN, 3 fois plus de NO_x et 23% de CO₂ en plus par rapport à des températures supérieures à 18°C (la consommation de carburant n'était pas disponible pour ce bus pendant la campagne 6). Par ailleurs, du fait du dysfonctionnement du système de dépollution, et non de la température, près de 100 fois plus de NO₂ a été mesuré lors de la campagne 6 et près 22 fois moins de CO (ce qui n'est pas expliqué).

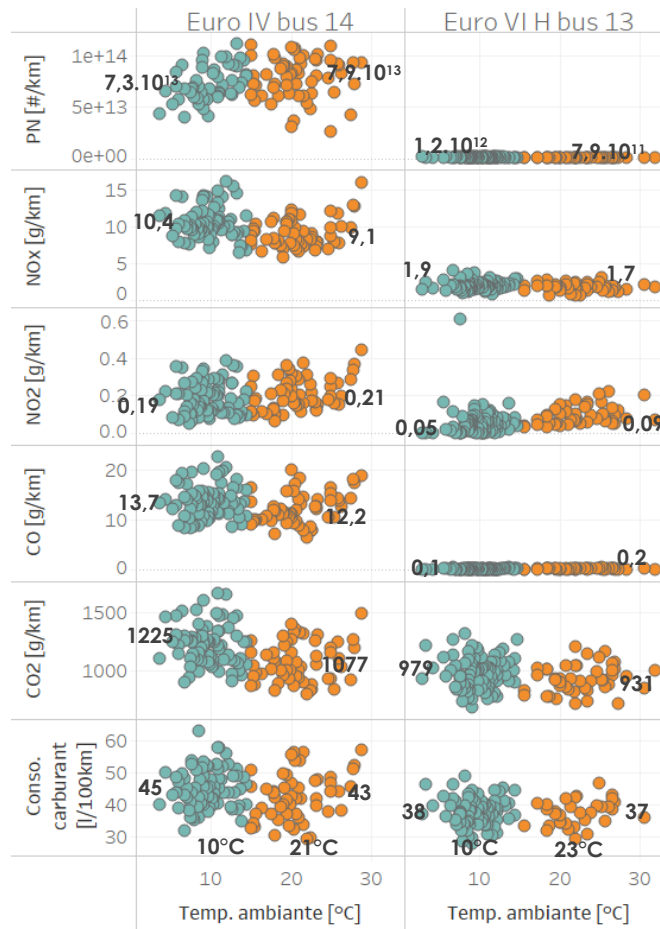


Figure 44 : Comparaison des émissions et de la consommation de carburant des bus instrumentés deux fois selon la température ambiante (un point = une course, couleurs des points = différenciation des deux campagnes, étiquettes=moyennes des campagne)

Les résultats pour les deux autres bus sont différents, peut-être en partie du fait que l'écart de température entre les deux campagnes était moins important.

- En moyenne, le bus Euro IV n°14 montre des émissions presque similaires entre les deux groupes de températures : pour des températures plus faibles, il a émis en moyenne 14% de NO_x en plus, 12% de CO en plus, 14% de CO₂ en plus et a consommé 5% de carburant en plus par rapport à des températures plus élevées. Mais il a émis 8% de PN en moins et 10% de NO₂ en moins.
- De la même façon, le bus Euro VI hybride n°13 montre des émissions très similaires entre les groupes de températures, sauf pour les PN avec en moyenne 50% de PN en plus à faible température.

Après cette analyse à plus fine échelle, il s'avère donc que, selon le type de bus, l'influence de la température ambiante sur les émissions soit très différente.

En restant sur l'analyse de l'influence globale de la température ambiante sur les émissions, afin de mieux comprendre les différences de comportement des bus à un pas de temps plus fin, la Figure 45 présente les boxplots des NO_x par classes de températures ambiantes. Les émissions sont calculées ici à partir des données de l'ensemble de la journée de mesure, et en séquençant cette journée par kilomètres. Par exemple, une journée pendant laquelle un bus aurait parcouru 60 km aurait 60 données d'émissions en g/km. Cela permet de disposer d'une variabilité plus importante de températures ambiantes et d'émissions. Seuls les NO_x et le NO₂ sont présentés dans cette analyse car l'évolution des émissions des autres polluants est davantage dépendante d'autres paramètres, comme l'a confirmé le modèle statistique.

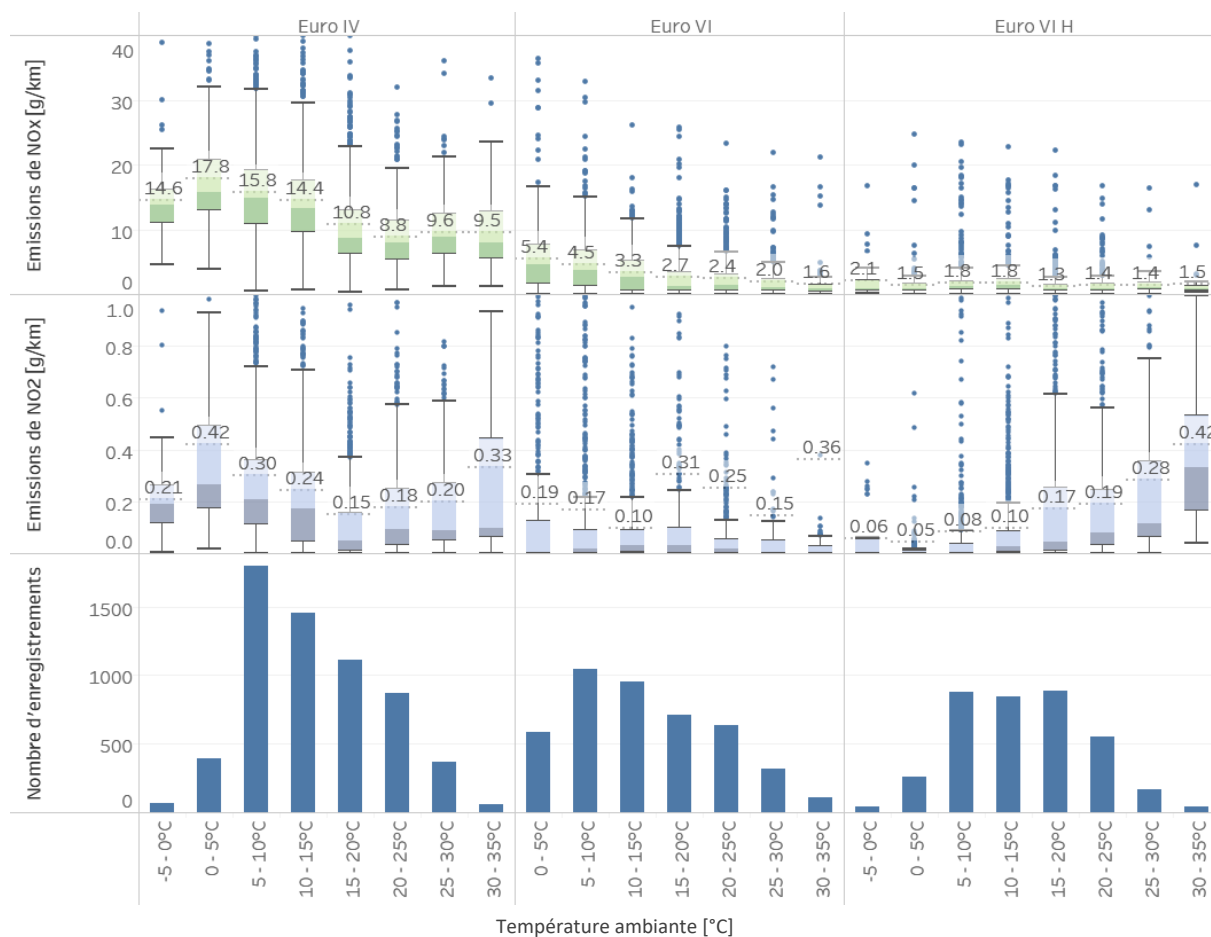


Figure 45 : Emissions de NO_x (g/km) par classes de températures ambiantes et par norme Euro, et nombre de données par classes de températures

En considérant les émissions des bus au kilomètre, il est possible une nouvelle fois de voir une influence non négligeable de la température ambiante sur les NO_x. Pour les bus Euro IV, les émissions de NO_x en-dessous de 10°C sont globalement 40% supérieures à celles au-dessus de 10°C, 60% supérieures pour le NO₂. Pour les bus Euro VI, cela augmente progressivement avec la diminution de la température, pour globalement atteindre des émissions de NO_x 80% plus importantes à des températures inférieures à 10°C par rapport à des températures supérieures à 10°C – le NO₂ est en revanche beaucoup plus variable à l'échelle de la norme. Pour les bus hybrides, les émissions de NO_x en-dessous de 10°C sont globalement 13% supérieures à celles au-dessus de 10°C. Les variations des émissions de NO₂ de ces bus sont en revanche essentiellement dues à un type de bus fortement émetteur de NO₂ ayant été instrumenté à des températures ambiantes plus élevées en moyenne. Par ailleurs, les émissions de NO_x des bus Euro VI et Euro VI hybrides, à des conditions de températures ambiantes faibles, restent en moyenne nettement inférieures aux émissions des bus Euro IV quelle que soit la température ambiante.

Il est à noter qu'aucune influence significative d'une température ambiante élevée sur les émissions de NO_x n'est repérée dans cette étude, sachant aussi que moins de données ont été récoltées à des températures supérieures à 30°C.

La température ambiante a donc un impact sur les émissions de NO_x surtout lorsqu'elle est faible, en-dessous de 10°C. L'une des causes de ces surémissions est approfondie ci-après en zoomant sur le démarrage à froid.

Comme expliqué en introduction, la température ambiante agit sur les émissions de NO_x en impactant la température moteur (évaluée via la température du liquide de refroidissement). Le moteur est considéré comme étant « froid » lorsque cette température est inférieure à 70°C. Pour chaque course, le temps pendant lequel ce moteur est froid a été calculé, et reporté par classes de températures ambiantes Figure 46.

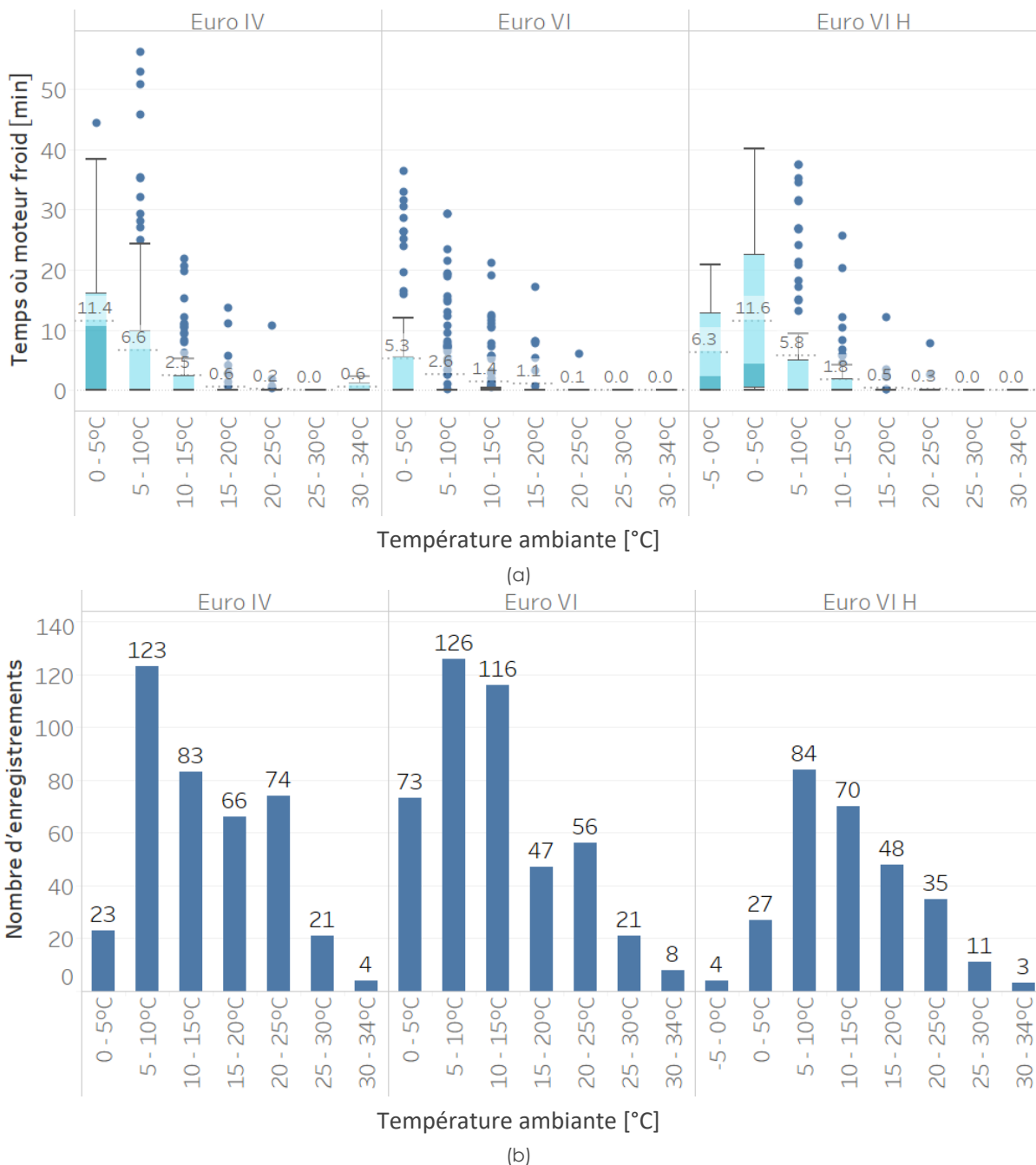


Figure 46 : Temps de moteur froid par course, par classes de températures ambiantes (a), et nombre de courses par classe (b)

Cette figure permet de voir simplement que, lorsque la température ambiante est faible, ce qui commence à partir de températures en-dessous de 10°C, le moteur reste froid plus longtemps, autour de 5 à 12 minutes (sur la course), jusqu'à parfois plus de 30 minutes ponctuellement pour certains bus. **Le temps de démarrage à froid ne dépend pas de la norme du bus considéré.** Pour toutes les catégories de bus, en considérant les données depuis le démarrage du bus au dépôt (ce qui amène des variations notables sur le temps de démarrage à froid car le bus peut rester plus ou moins longtemps à l'arrêt dans le dépôt) et en incluant les périodes de haut-le-pied, le démarrage à froid durait entre 14 et 35 minutes (ou entre 3 et 10 km), avec une médiane autour de 20 minutes (ou 6 km). Quelques valeurs atypiques sont observées lors de températures sous 10°C, avec un temps de moteur froid pouvant dépasser 1 heure (ou plus de 20 km).

Les émissions de NO_x en fonction de la température ambiante et de la température du liquide de refroidissement, selon la norme Euro, sont représentées Figure 47 (couleurs vertes lorsque le moteur est considéré comme froid, oranges et rouges quand il est chaud). Les surémissions causées par ce moteur froid sont représentées Figure 48, en g/km pour les NO_x et le NO₂, selon que la température du liquide de refroidissement soit plus (>70°C) ou moins (<70°C) chaude. Comme le démarrage à froid se fait surtout en-dehors des courses, dans les phases de haut-le-pied (du dépôt au départ de la première ligne de la journée), les émissions sont calculées ici à partir des données de l'ensemble de la journée de mesure, et en séquençant cette journée par kilomètres. Par exemple, une journée pendant laquelle un bus aurait parcouru 60 km aurait 60 données d'émissions en g/km.

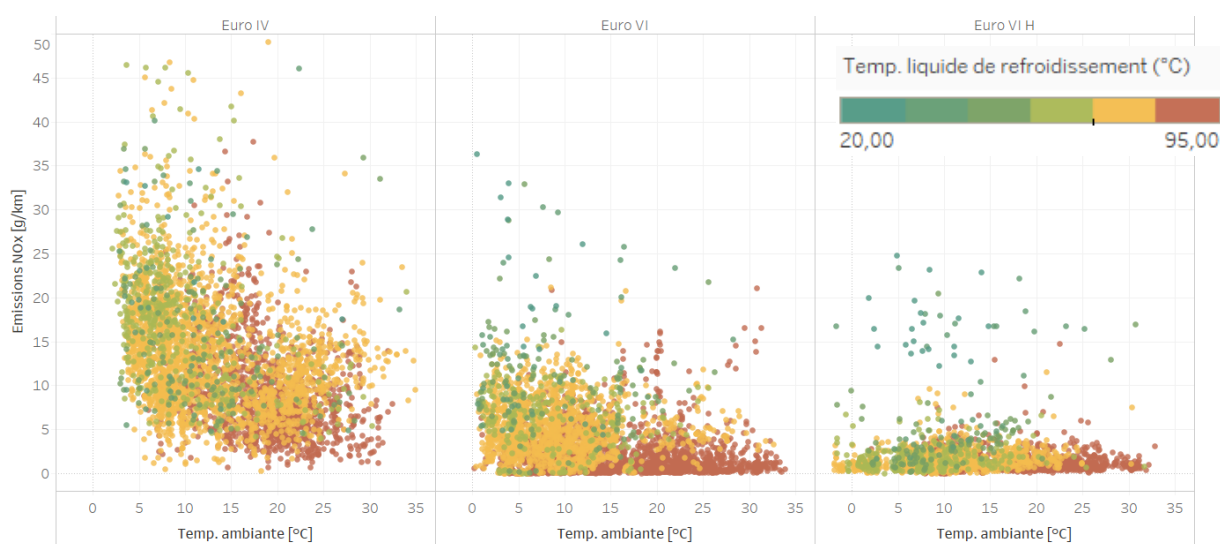


Figure 47 : Emissions de NO_x (trajets fractionnés au kilomètre) en fonction de la température ambiante et de la température du liquide de refroidissement

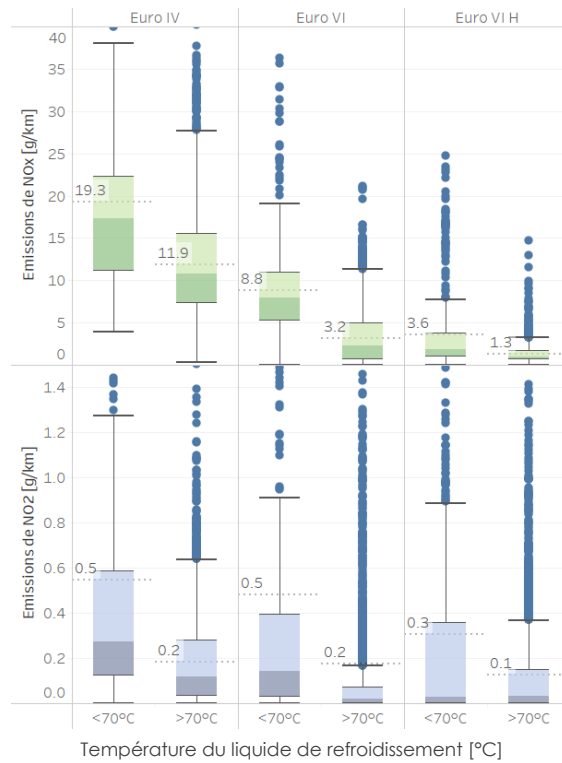
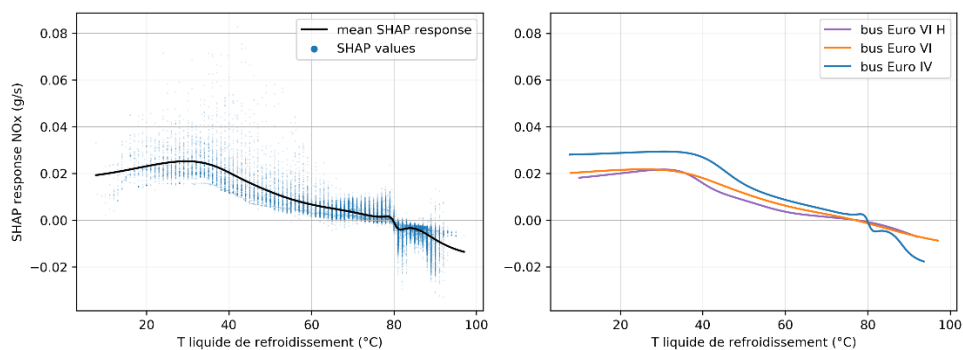


Figure 48 : Emissions de NO_x et de NO₂ à moteur froid : émissions pour une température de liquide de refroidissement <70°C et >70°C (émissions à l'échelle du km)

En moyenne pour les bus Euro IV, un moteur froid cause des surémissions de NO_x de 60% et 2,5 fois plus d'émissions de NO₂. Pour les bus Euro VI, c'est 2,8 et 2,5 fois plus de NO_x et de NO₂. Pour les bus Euro VI hybrides, c'est 2,8 et 3 fois plus de NO_x et de NO₂. Par ailleurs, les émissions de NO_x des bus Euro VI hybrides et non hybrides restent plus faibles en moyenne à moteur froid que celles des bus Euro IV, moteur froid ou chaud.

La Figure 49, regroupant les courbes de réponse du modèle statistique pour les émissions de NO_x et de NO₂ vis-à-vis de la variation de la température du liquide de refroidissement, permettent de conforter ces résultats. Il est à noter que de fortes surémissions de NO₂ sont visibles pour certains types de bus lorsque le moteur est très froid en-dessous de 40°C. Les émissions de CO sont aussi impactées par de faibles températures moteur (du fait de la combustion incomplète incidente).



(a)

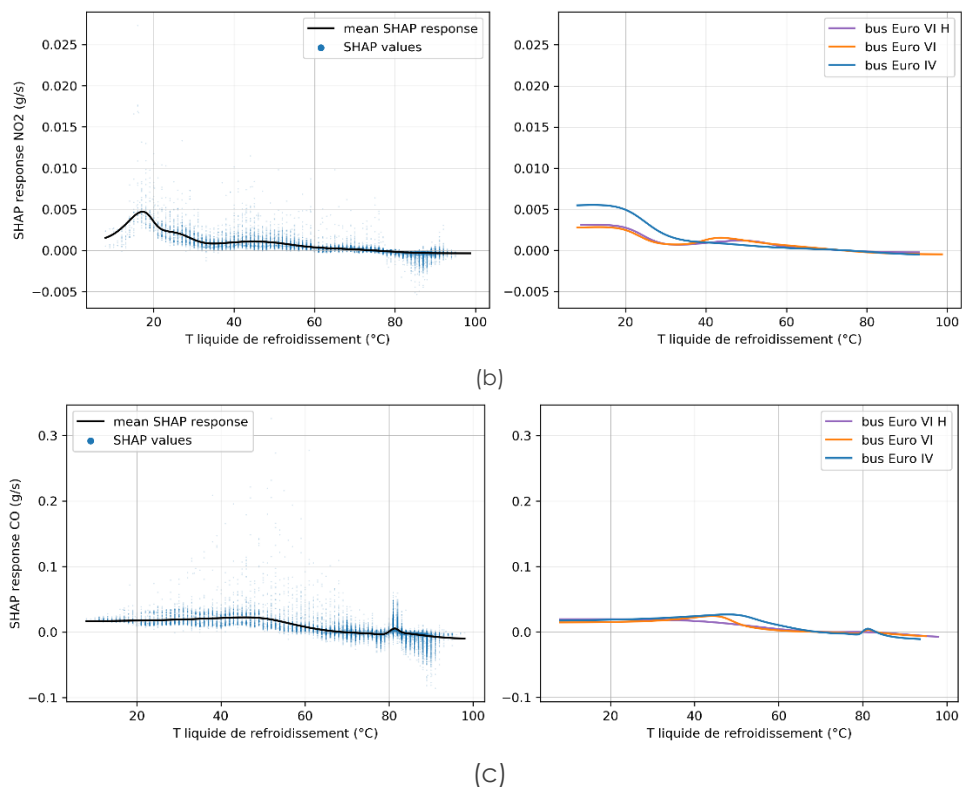


Figure 49 : Courbes de réponse du modèle : émissions de NO_x (g/s) (a), de NO₂ (g/s) (b) et de CO (c) par rapport à la température du liquide de refroidissement

Cependant, la part d'une journée de mesure où le moteur est froid varie fortement d'un bus à l'autre. La question est la suivante : **sur la journée d'un bus, à quelle proportion le démarrage à froid contribue-t-il aux émissions totales du bus ?** La Figure 50 permet de répondre en partie à cette question.

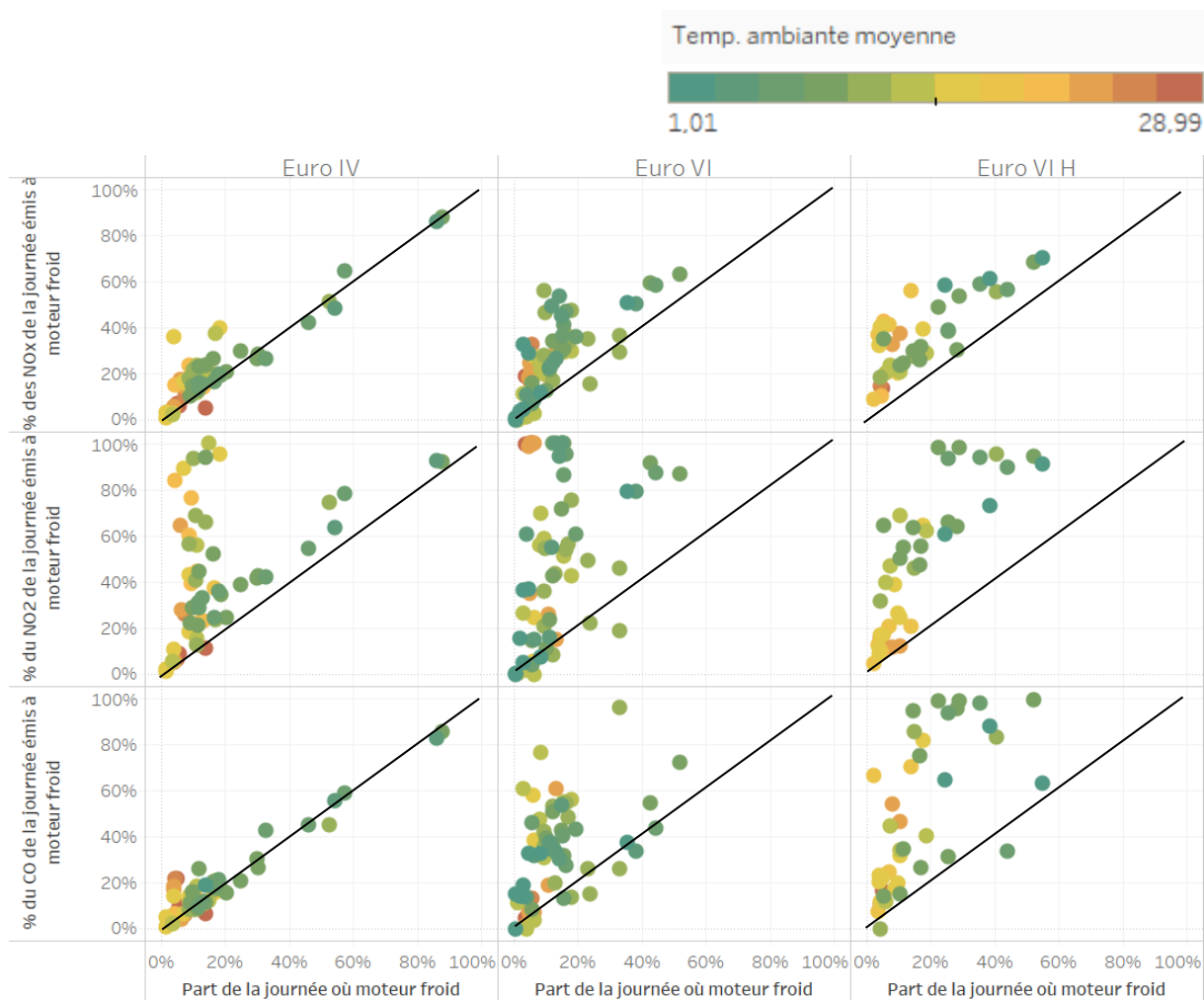


Figure 50 : Part des émissions de NO_x, NO₂ et CO émises lors du démarrage à froid dans les émissions d'une journée de mesure, pour les trois types de bus, selon le pourcentage de temps de la journée où le moteur était froid

La lecture de cette figure revient à regarder la contribution des émissions à moteur froid aux émissions totales de la journée du bus. Des points (un point = une journée de mesure) situés au-dessus de la diagonale du graphique représentent une situation de forte surémission au démarrage à froid. C'est le cas pour les bus Euro VI hybrides et non hybrides notamment en NO_x, et pour tous les bus surtout en NO₂. C'est aussi le cas pour le CO pour les bus Euro VI hybrides et non hybrides, comme le montre aussi le modèle statistique. Ce graphique montre notamment que **l'évolution des technologies avec les bus Euro VI a permis d'abattre fortement les émissions dès lors que le moteur est chaud, ce qui a pour conséquence de placer le démarrage à froid comme un moment de plus fortes émissions comparé au fonctionnement à chaud du bus.**

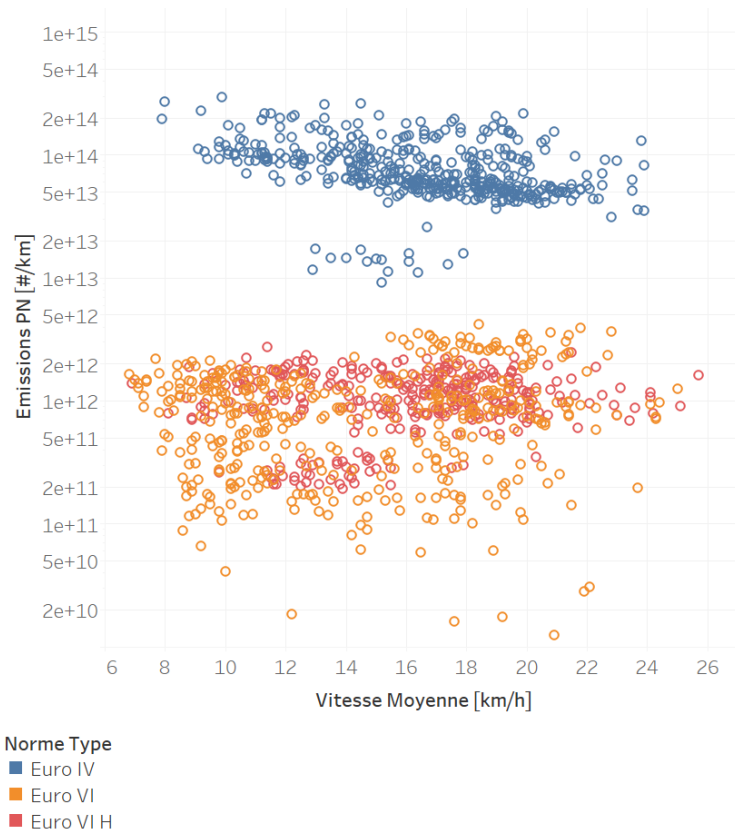
8.3. Vitesse moyenne sur une course

Les vitesses moyennes sur les courses effectuées ont été calculées, ainsi que les émissions en g/km associées (ou #/km pour les particules). L'influence de ce paramètre est très variable selon le type de bus et le polluant, comme sera montré dans ce chapitre.

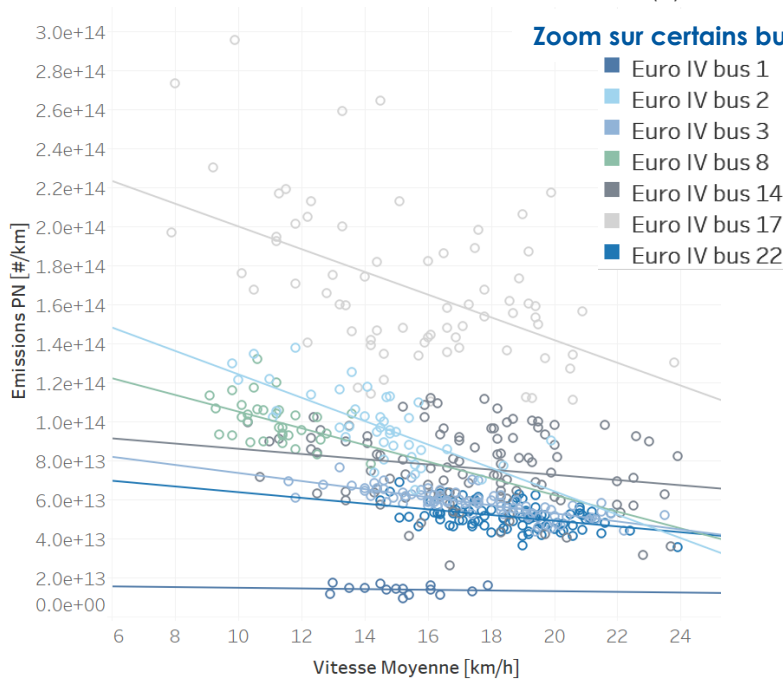
Il est à noter que **la variation de la vitesse moyenne d'un bus pour une course est relativement faible, entre 8 et 25 km/h pour la majorité des trajets (les vitesses les plus élevées étant atteintes sur les lignes de petite couronne et de grande couronne).** Les variations de vitesses moyennes sont cependant suffisantes pour observer des tendances et un lien avec les émissions des bus. Derrière la vitesse moyenne d'une course se cache des conditions de trafic, des arrêts et des accélérations

différentes ; une vitesse moyenne plus faible est souvent représentative d'arrêts plus longs et/ou plus nombreux, provoquant davantage d'émissions sur la durée totale de la course.

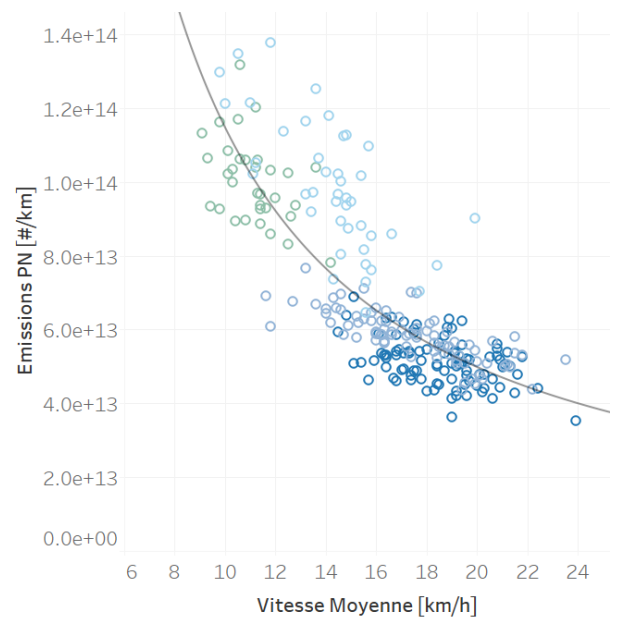
La Figure 51 représente les émissions de PN des courses en fonction de la vitesse moyenne. La Figure 52, la Figure 53, la Figure 54 et la Figure 55 font de même pour les émissions de NO_x, de NO₂, de CO et de CO₂ respectivement.



(a)



(b)



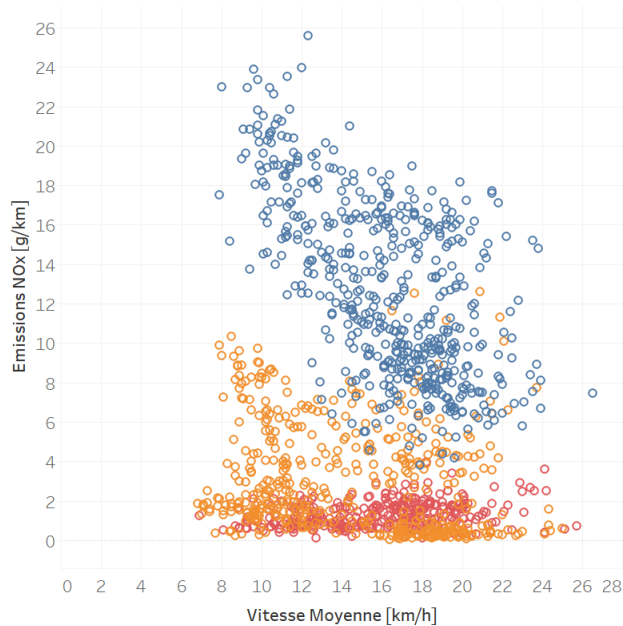
(c)

Figure 51 : Émissions de PN des courses en fonction de la vitesse moyenne pour toutes les normes avec échelle logarithmique (a), zoom sur certains bus Euro IV (b), zoom plus précis sur certains bus Euro IV (c)

La grande différence entre les émissions de particules des bus Euro IV et des Euro VI est mise en exergue à nouveau sur ce graphique (a). L'influence de la vitesse moyenne du trajet est bien plus

marquée pour certains bus de norme Euro IV que pour les bus Euro VI (hybrides ou non). Ce paramètre joue un rôle secondaire pour les bus Euro VI avec une diminution des émissions selon la vitesse moyenne faible voire nulle.

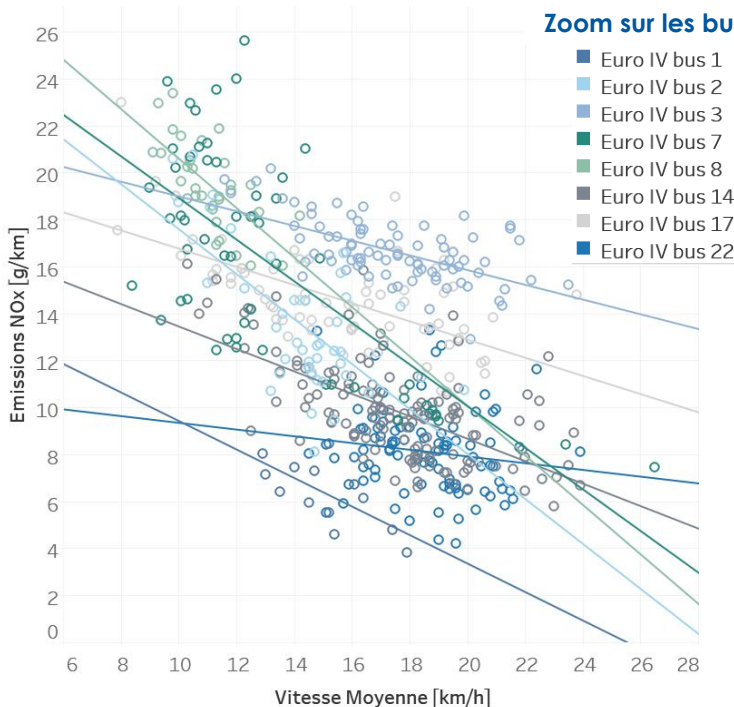
Dans la gamme des vitesses moyennes atteintes par les bus instrumentés lors de cette étude, c'est-à-dire entre 8 et 25 km/h, plus la vitesse moyenne est importante, moins la plupart des bus Euro IV émettent de PN au kilomètre, donc moins le bus émet sur le total du trajet défini. Les émissions peuvent diminuer par exemple de 40% entre 9 et 24 km/h pour le bus 17. **Une diminution moyenne de 38% des émissions de PN est observée pour les bus Euro IV, entre des trajets à 8 km/h et des trajets à 20 km/h. Les bus Euro VI (hybrides ou non) ne sont pas aussi sensibles à ce paramètre que les bus Euro IV.**



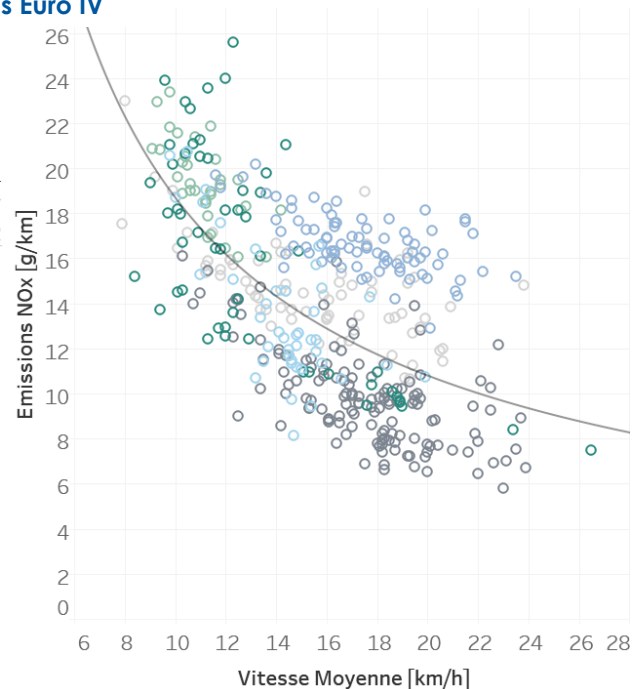
Norme Type
 ■ Euro IV
 ■ Euro VI
 ■ Euro VI H

(a)

Zoom sur les bus Euro IV



(b)

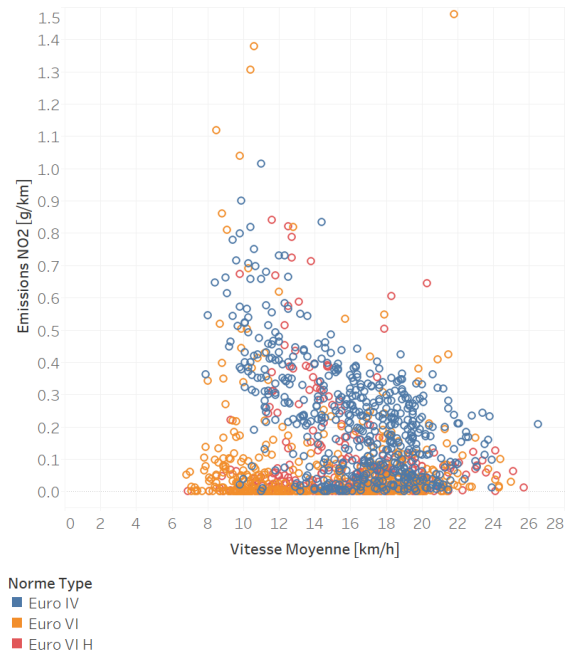


(c)

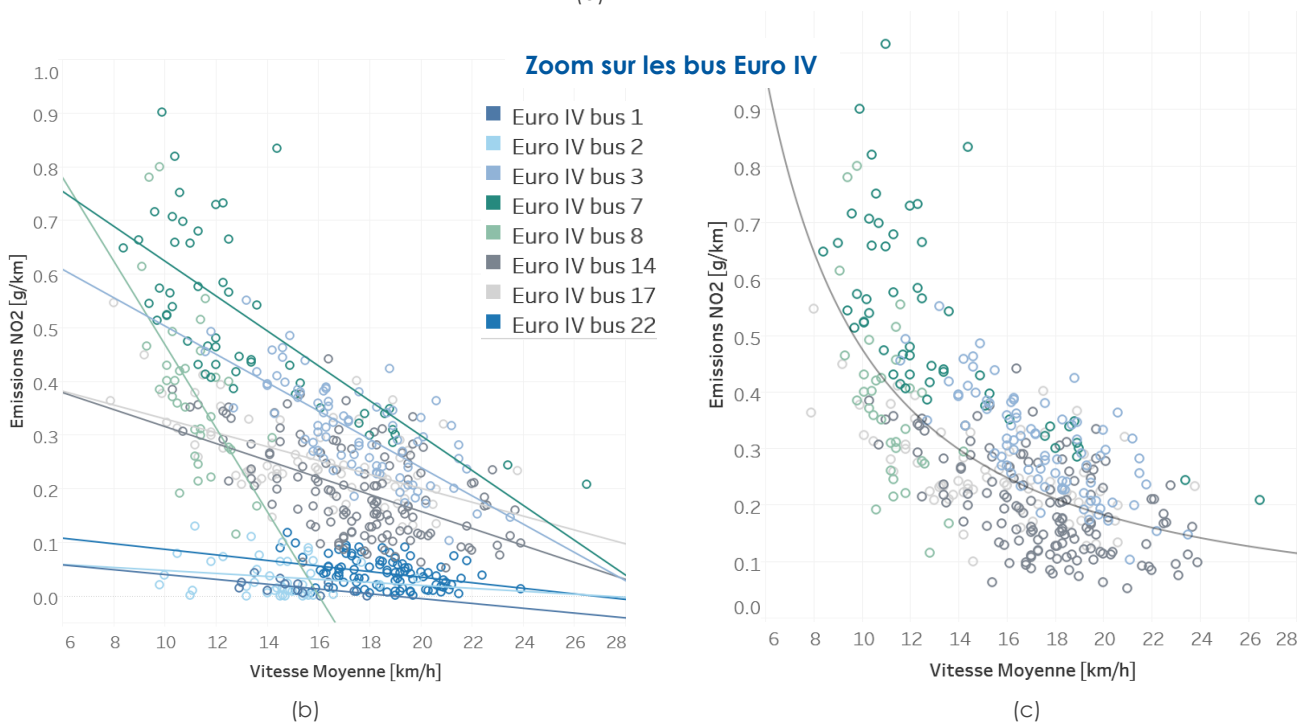
Figure 52 : Emissions de NO_x des courses en fonction de la vitesse moyenne pour toutes les normes (a), zoom sur les bus Euro IV (b), zoom sur certains bus Euro IV

La même observation peut être faite pour les NO_x, avec cependant des différences d'émissions selon les normes Euro moins marquées que ce qui est constaté pour les PN. Les émissions de NO_x de bus Euro VI les plus élevées (>8g/km) correspondent au dysfonctionnement d'un bus lors d'une campagne estivale.

De la même façon que pour les émissions de PN, il s'avère que **les émissions de NO_x des bus Euro IV sont sensibles à la vitesse moyenne, mais pas ou très peu les bus Euro VI et Euro VI hybrides – les bus hybrides semblent par ailleurs moins sensibles aux variations de vitesse. Une diminution moyenne de 42% des émissions de NO_x est observée pour les bus Euro IV, entre des trajets à 8 km/h et des trajets à 20 km/h.**



(a)

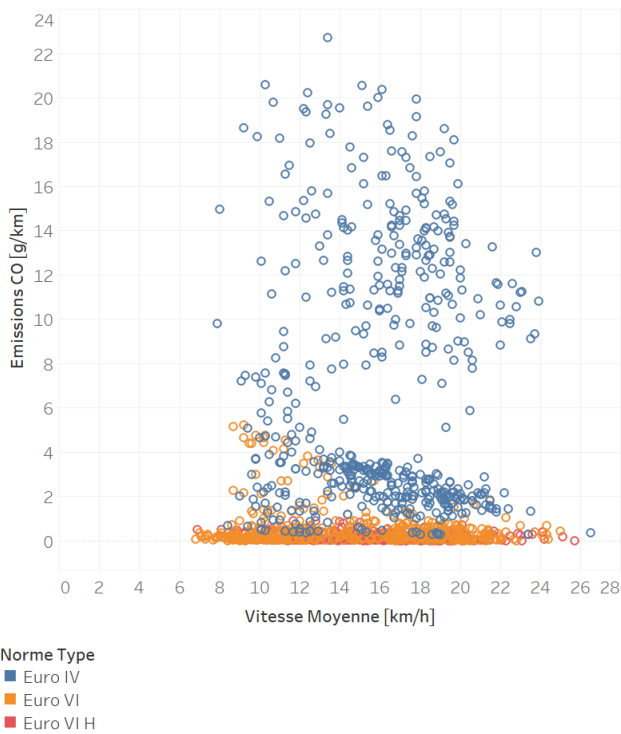


(b)

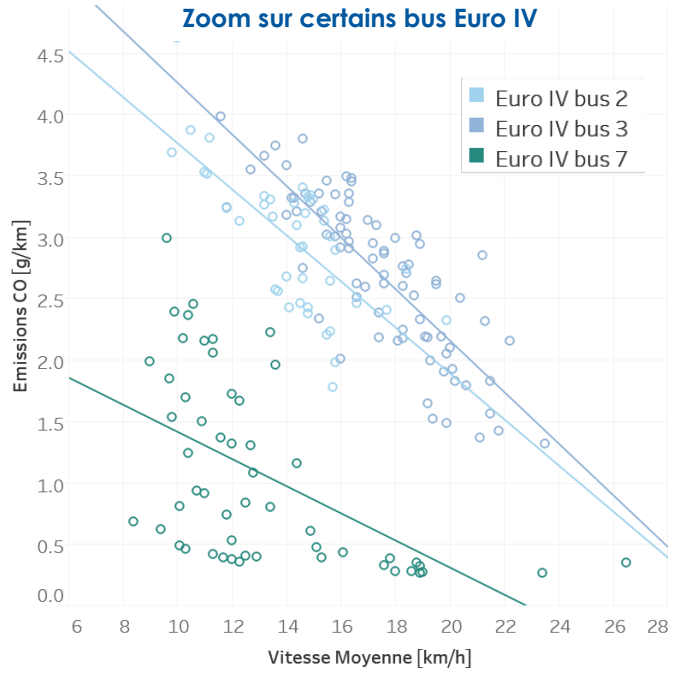
(c)

Figure 53 : Emissions de NO₂ des courses en fonction de la vitesse moyenne pour toutes les normes (a) avec échelle fixe ne comprenant pas les valeurs extrêmes (entre 2,5 et 6,5 g/km) rencontrées sur les bus Euro VI lors de dysfonctionnements, zoom sur les bus Euro IV (b), zoom sur certains bus Euro IV (c)

Les mêmes remarques valent pour les émissions de NO₂ : ce sont les émissions des bus Euro IV qui sont davantage sensibles à la vitesse que celles des bus Euro VI et Euro VI hybrides. Pour exemple, le bus Euro IV n°7 peut voir ses émissions de NO₂ divisées par 3,4 de 9 à 26 km/h, et le bus n°22 peut les voir divisées par 7,4 entre 14 et 24 km/h.



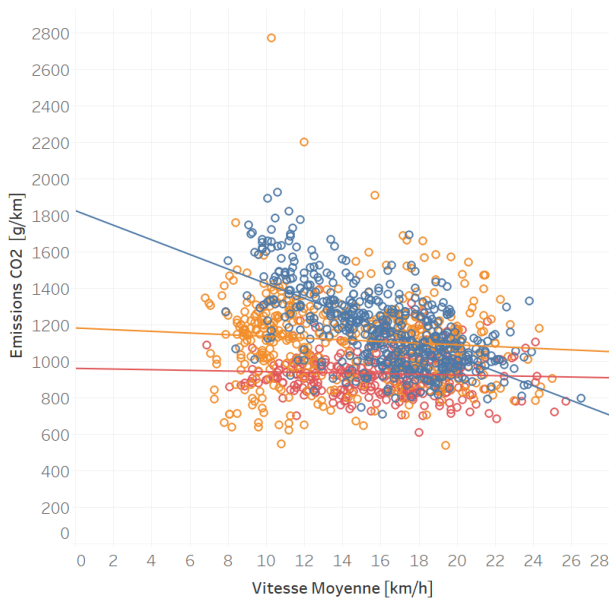
(a)



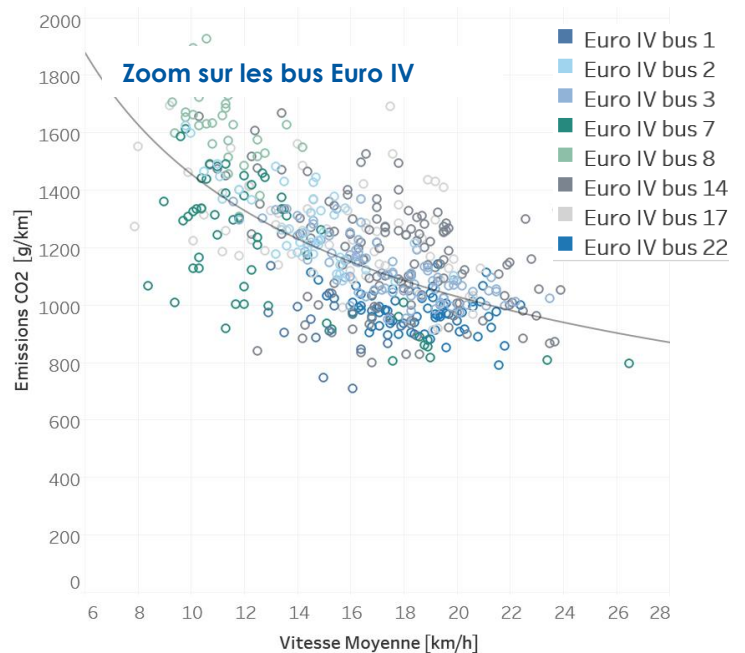
(b)

Figure 54 : Emissions de CO des courses en fonction de la vitesse moyenne pour toutes les normes (a) et zoom sur certains bus Euro IV (b)

L'influence de la vitesse moyenne sur les émissions de CO n'est pas aussi visible pour la majorité des bus, sauf trois des bus Euro IV instrumentés.



(a)



(b)

Figure 55 : Emissions de CO₂ des courses en fonction de la vitesse moyenne pour toutes les normes (a) et zoom sur les bus Euro IV (b)

La différence de comportement selon la vitesse moyenne entre normes Euro est également présente pour les émissions de CO₂. Les émissions de CO₂ des bus Euro IV ont tendance à diminuer avec l'augmentation de la vitesse moyenne : elles peuvent ainsi être 44% plus faibles à une vitesse moyenne de 24 km/h, qu'à 9 km/h. **Une diminution moyenne de 27% des émissions de CO₂ est observée pour les bus Euro IV, entre des trajets à 8 km/h et des trajets à 20 km/h. Les émissions de CO₂ des bus Euro VI (hybrides ou non) sont nettement moins sensibles à la vitesse que les bus Euro IV.**

La vitesse moyenne d'une course est donc un paramètre d'influence important pour les émissions de la plupart des polluants (les émissions de CO étant moins influencées), essentiellement pour les bus Euro IV. Ce paramètre est en revanche peu ou non impactant pour les bus Euro VI et Euro VI hybrides. L'évolution des technologies a permis de limiter l'impact d'une faible vitesse moyenne sur les émissions, ce qui est particulièrement pertinent pour des bus urbains.

8.4. Mode de conduite

Le mode de conduite peut être plus ou moins régulier en termes de vitesse, avec des accélérations plus ou moins fréquentes, selon les caractéristiques de la ligne (pente, arrêts), l'état du trafic routier lors de la course, et le style de conduite du conducteur.

L'indicateur RPA, défini chapitre 4.1, a été calculé pour évaluer l'effet du mode de conduite sur les émissions des bus. Cet indicateur est calculé à l'échelle de la course en prenant en compte la vitesse et l'accélération positive du véhicule.

La Figure 56 présente les boxplots de la RPA (calculée pour chaque course) par norme Euro.

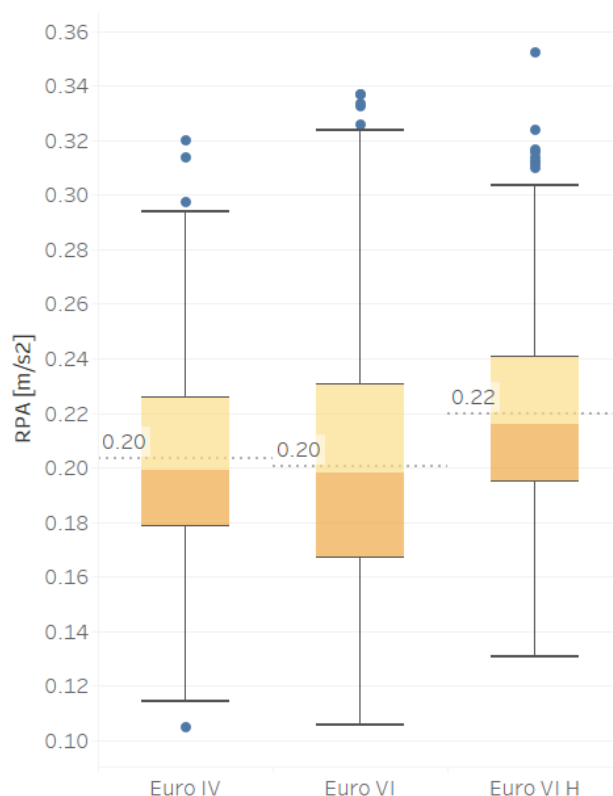


Figure 56 : Répartitions statistiques des RPA calculées sur chaque course, par norme Euro

La RPA pour cette campagne de mesure varie entre 0,106 et 0,352 m/s². Si les répartitions statistiques sont globalement les mêmes entre les trois types de bus instrumentés, la moyenne des RPA des bus Euro VI hybrides est plus élevée, à 0,22 m/s² comparé à 0,20 m/s² pour les bus Euro IV et Euro VI.

Cette analyse est affinée par ligne de bus, les conditions de circulation y étant différentes. La Figure 57 montre les RPA pour chaque ligne, selon les bus instrumentés. Chaque boxplot correspond aux courses d'un bus lors d'une campagne de mesure de deux semaines.

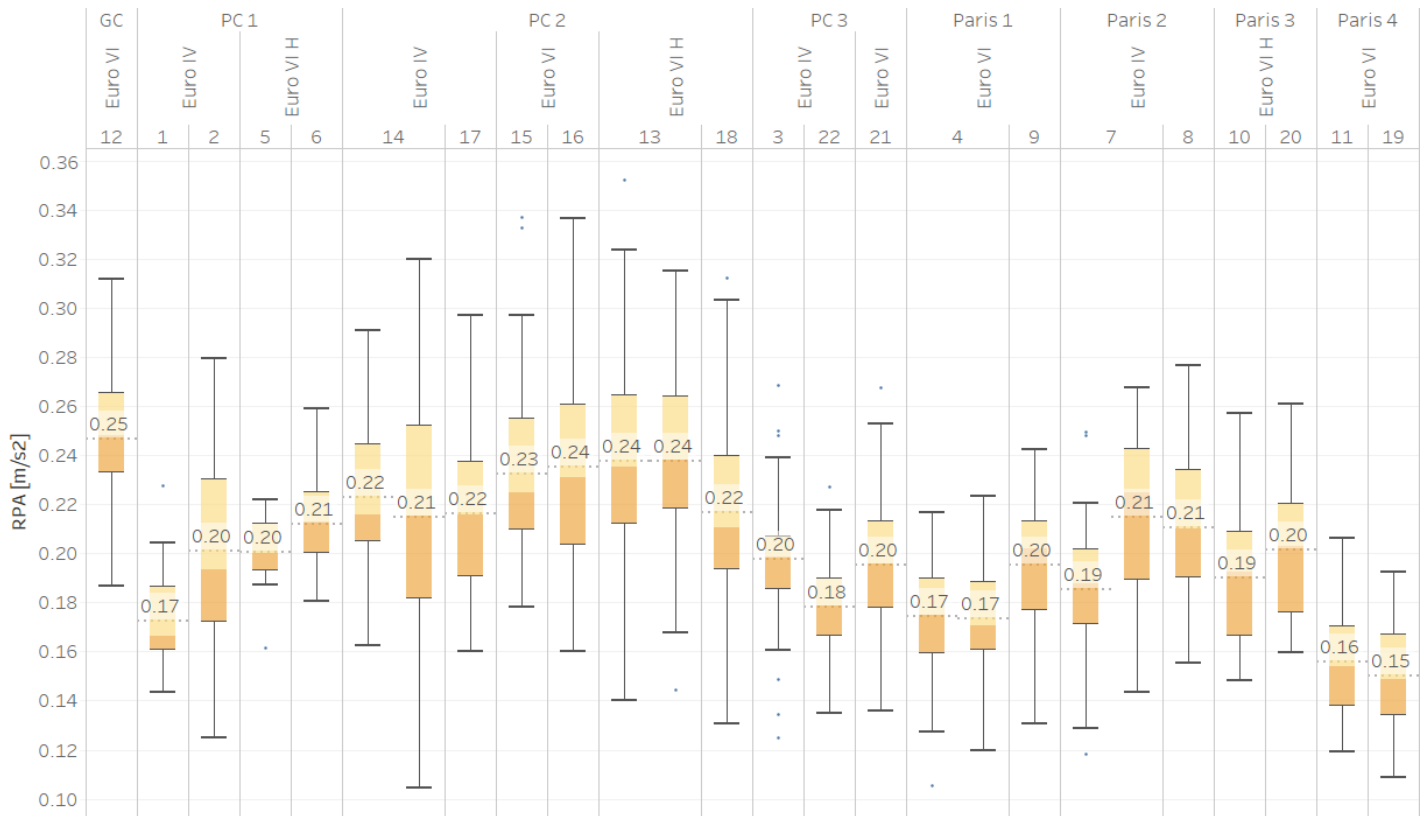


Figure 57 : Boxplots des RPA pour chaque ligne selon le bus circulant. Un boxplot = un bus pendant une campagne de deux semaines

La ligne semble avoir un effet sur la RPA. Les RPA sur les lignes GC et PC 2 et, dans une moindre mesure, PC 1, étant plus élevées que pour les autres lignes (dus probablement au dénivelé plus important sur la ligne située en grande couronne). Mais la ligne n'apparaît pas comme le seul facteur ni le type de bus, puisqu'un même type de bus sur une même ligne peut observer des RPA très variables (bus 1 et 2 sur la ligne PC 1, bus 3 et 22 sur la ligne PC 3, bus 7 sur la ligne Paris 2).

Pour exemple, des véhicules légers testés sur les cycles NEDC et WLTC (comprenant des phases en mode rural, urbain et autoroutier) peuvent obtenir une RPA entre 0,100 et 0,350 m/s² [9]. En cycle CADC urbain, la RPA peut monter jusqu'à près de 0,7 m/s².

Une première analyse de l'effet de la RPA sur la consommation de carburant et les émissions de CO₂ est présentée Figure 58.

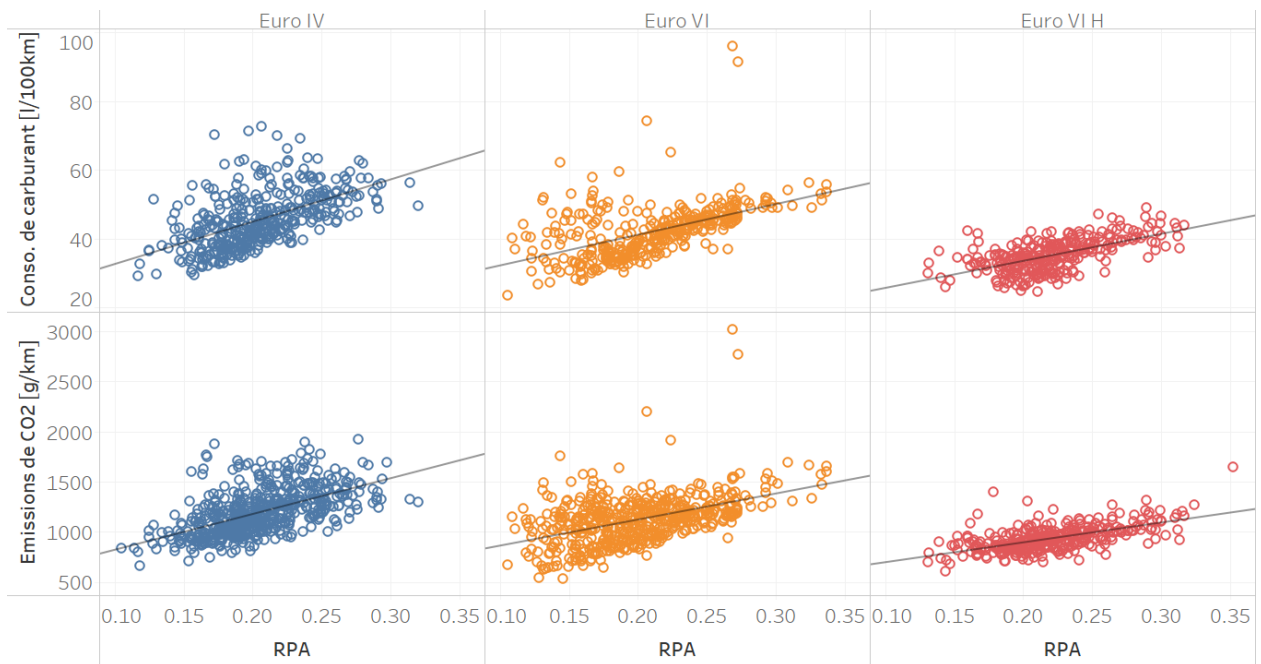


Figure 58 : Evolutions de la consommation de carburant et des émissions de CO₂ (calculés sur chaque course) en fonction de la RPA

En prenant en compte l'ensemble des bus, il s'avère que **la RPA, donc le mode de conduite (en lien avec la configuration de la ligne et/ou le style de conduite), a un effet majeur sur la consommation de carburant et conjointement sur les émissions de CO₂ d'une course, et ce pour tous les types de bus. Une conduite moins régulière (avec de nombreuses accélérations) cause systématiquement davantage d'émissions de CO₂.**

L'effet de la RPA sur la consommation de carburant et les émissions de CO₂ est étudié de manière plus quantitative Figure 59. Pour une RPA > 0,2 m/s², la conduite du bus (qui a une vitesse faible de manière générale) peut être rapportée à de faibles vitesses et de fortes accélérations, donc une conduite moins régulière qu'à une RPA < 0,2 m/s². Le bus 19 a été retiré de cette évaluation car aucune course n'a été réalisée avec une RPA supérieure à 0,2 m/s² pour ce bus. Les bus 1, 22, 11 et 12 ont aussi été écartés de l'analyse du fait que l'une des deux catégories était largement sous-représentée par rapport à l'autre.

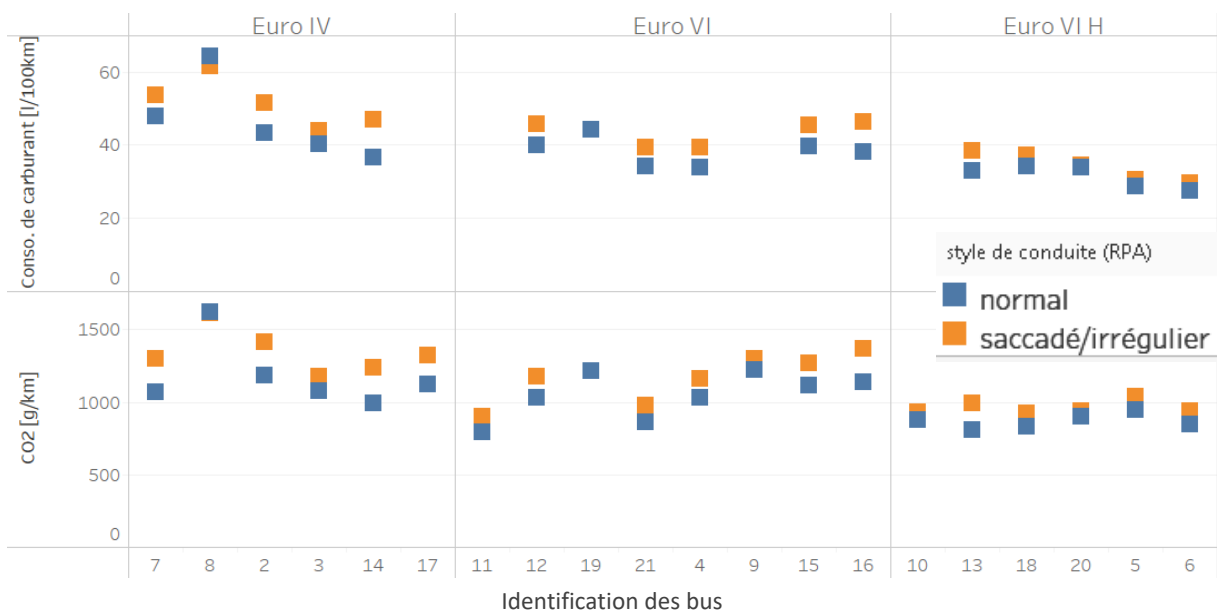


Figure 59 : Influence du mode de conduite sur la consommation de carburant et les émissions de CO₂, par bus. Un mode de conduite normal est défini ici par une RPA < 0,20 m/s², irrégulier pour une RPA > 0,20 m/s²

La consommation de carburant et les émissions de CO₂ sont toujours plus élevées, pour tous les bus, avec une conduite moins régulière. Pour les bus Euro IV, les consommations de carburant sont plus élevées de 9% à 29% (10% à 24% pour les émissions de CO₂). Le bus 8 présente cependant une exception, du fait que la majeure partie des RPA en conduite « régulière » est proche de 0,20 m/s². Pour les bus Euro VI, les consommations de carburant sont 2 à 22% plus élevées (5% à 23% pour les émissions de CO₂) en conduite moins régulière. Pour les bus Euro VI hybrides plus particulièrement, la consommation et les émissions de CO₂ restent plus faibles que celles des autres bus, même avec une conduite moins régulière.

L'effet du mode de conduite sur les émissions des autres polluants mesurés est étudiée Figure 60, par bus.

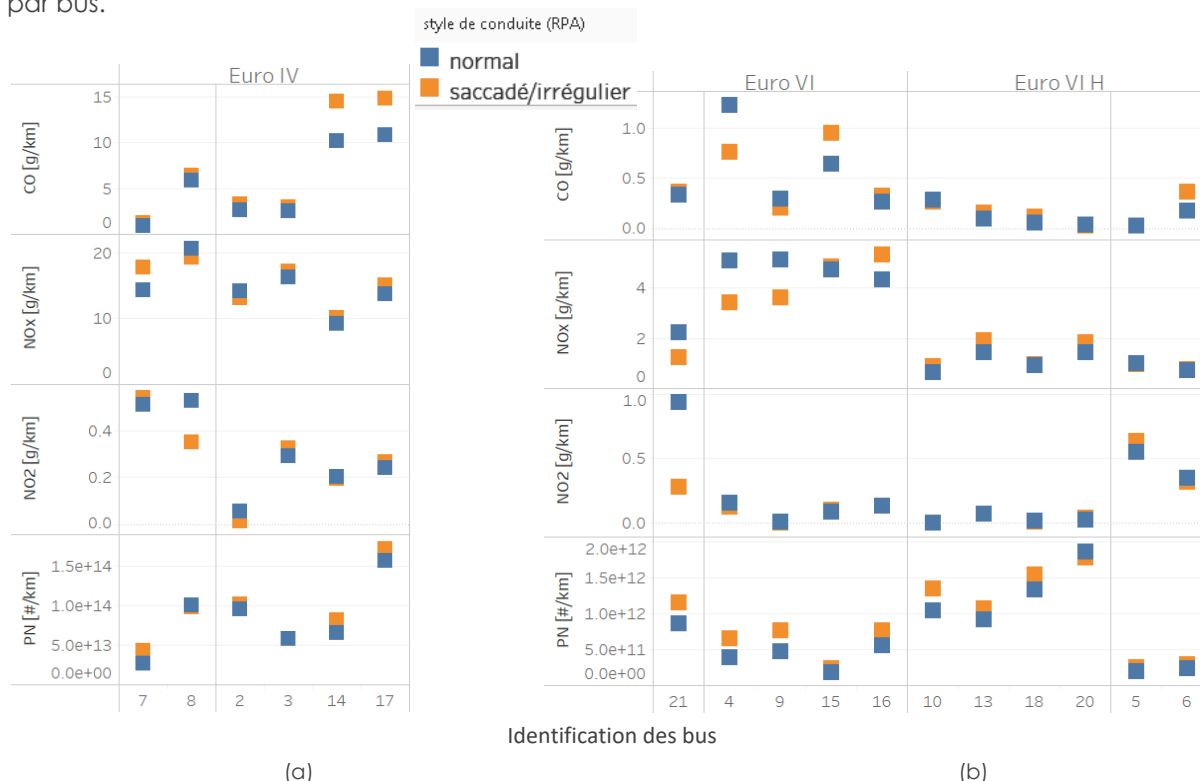


Figure 60 : Evaluation de l'influence du mode de conduite sur les émissions des bus Euro IV (a) et Euro VI (b). Un mode de conduite normal est défini ici par une RPA < 0,20 m/s², irrégulier pour une RPA > 0,20 m/s²

L'impact d'une conduite moins régulière varie selon les polluants :

- Les émissions de NO_x et de NO₂ ne semblent pas dépendre fortement du mode de conduite.
- Les émissions de CO sont influencées par le mode de conduite pour les bus Euro IV mais pas pour les autres bus. Pour les premiers, les émissions de CO peuvent être 8 à 42% plus élevées en moyenne avec une conduite moins régulière.
- Les émissions de PN observent une tendance à la hausse, variable selon le bus, avec un mode de conduite moins régulier. Pour les bus Euro IV, les émissions de PN peuvent augmenter de 7 à 64% avec le mode de conduite. Pour les bus Euro VI hybrides et non hybrides, les émissions de PN peuvent augmenter de 16 à 70%. Si les bus 8, 3 et 20 n'observent pas une tendance inverse, leurs émissions entre les deux catégories sont très proches.

Ainsi, les émissions de PN, la consommation de carburant et les émissions de CO₂ peuvent être réduites avec une conduite plus régulière, sur des lignes le permettant.

Ces considérations peuvent être complétées par les courbes de réponse du modèle statistique pour le paramètre accélération, avec les émissions de CO₂ et de PN, mais aussi de NO_x et de CO. L'accélération (à l'échelle seconde) et la RPA (à l'échelle de la course) ne sont en effet pas des paramètres tout à fait comparables : une RPA élevée sur une course peut être liée à une conduite plutôt agressive (vitesse et accélération élevées) ou une conduite saccadée (nombreuses accélérations à vitesse normale voire faible), ce qui est plus probable pour des courses de bus. L'intérêt de ces graphiques est surtout de voir que les bus Euro IV ont des émissions plus sensibles à l'accélération que les autres bus.

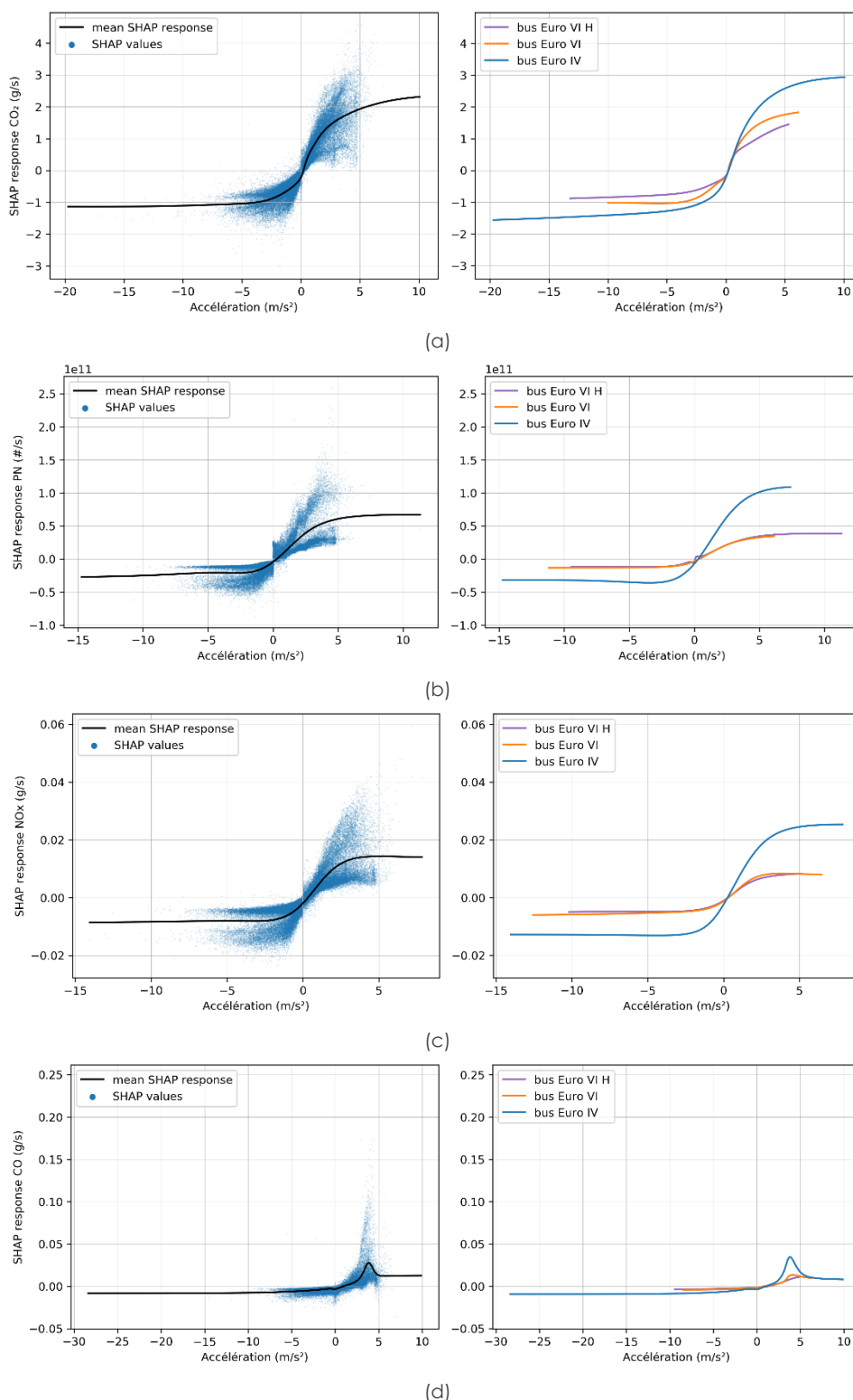


Figure 61 : Courbes de réponse du modèle : émissions de CO₂ (g/s) (a), de PN (#/s) (b), de NO_x (g/s) (c) et de CO (g/s) (d) par rapport à l'accélération

8.5. Événements spécifiques liés aux systèmes de dépollution

L'impact de deux dysfonctionnements du système de dépollution SCR est développé dans ce chapitre, ainsi que des émissions anormales de PN rencontrées sur deux bus.

Un dysfonctionnement du système SCR (injection d'urée) a eu lieu sur un bus Euro VI en hiver lors de la campagne 6 (bus 4), et un bus Euro VI en été lors de la campagne 13 (bus 21).

Dysfonctionnement de l'injection d'urée

Pour le bus 4 Euro VI, il est possible de comparer les résultats des deux campagnes où ce bus a été instrumenté, l'une en été (campagne 2) et l'autre en hiver (campagne 6).

D'après l'opérateur, compte-tenu de l'aspect de l'échappement en fin de campagne, il semble que le système de dépollution ait eu un dysfonctionnement d'injection d'urée, amenant un dépôt de sels d'ammonium dans les canules d'échappement (voir Figure 62). Un dépôt blanc à l'intérieur de la canule est ainsi observé ; aucun message d'erreur n'est apparu sur le tableau de bord du conducteur et les campagnes d'essai ont été poursuivies normalement jusqu'à leur terme. Les émissions ont été observées dans les heures suivant les mesures : des anomalies ont alors été notées et transmises à l'opérateur, qui, connaissant ce défaut et travaillant pour le corriger, a pu fournir des explications a posteriori.



Figure 62 : Ligne d'échappement en fin de campagne pour un bus sans dysfonctionnement (a) et avec un dysfonctionnement (b)

Les séries temporelles (données moyennées à la minute, chaque cellule représente un jour de mesure), pour les deux bus instrumentés lors de ces campagnes, sont représentées Figure 63. Pour rappel, une température ambiante faible (en-dessous de 15°C) impacte les émissions de NO_x à la hausse, surtout pour les bus Euro IV mais aussi pour les bus Euro VI.

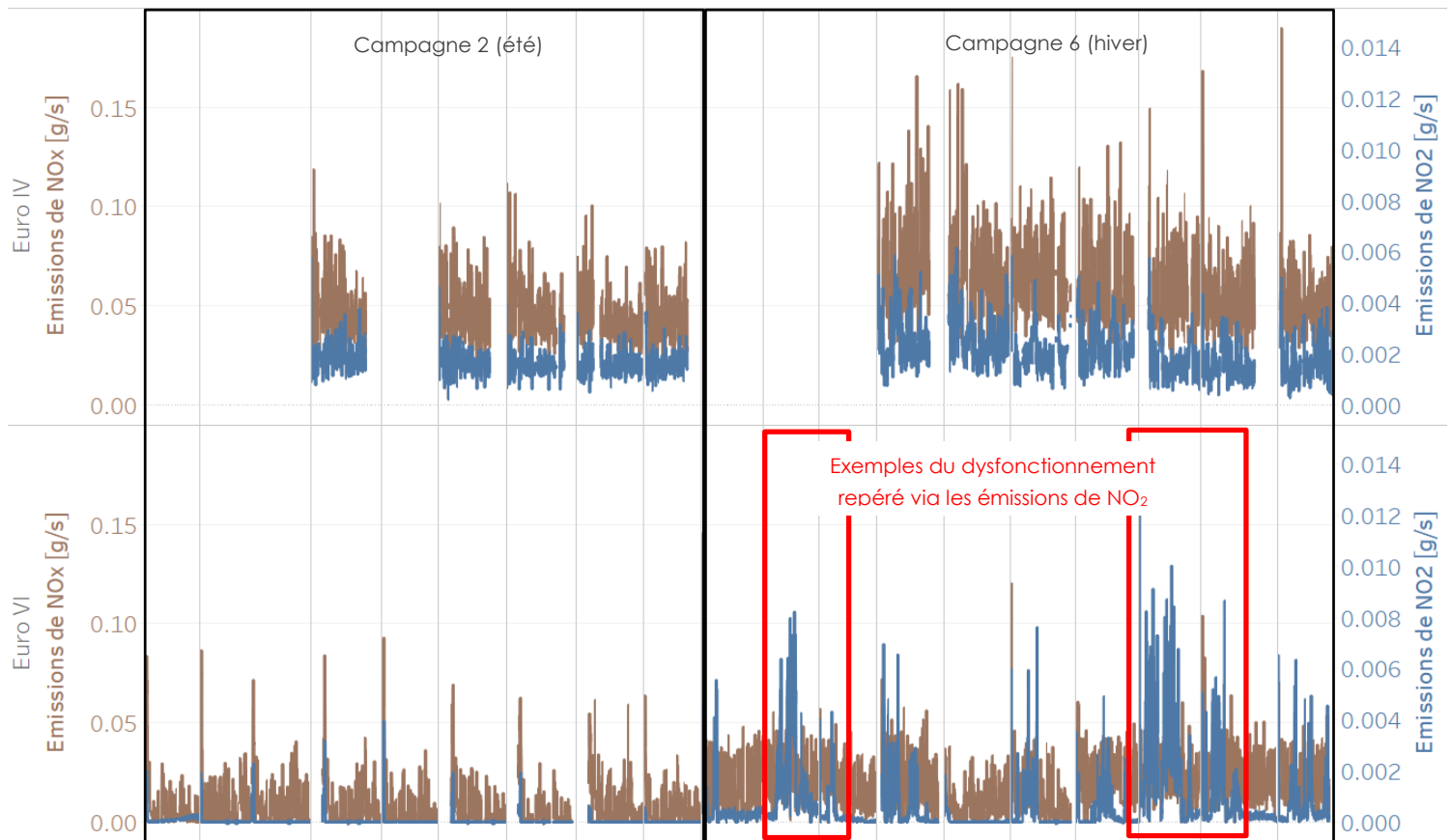


Figure 63 : Séries temporelles des émissions de NO_x et de NO₂ (données moyennées à la minute) pour les campagnes du bus 4 et du bus 7 (Euro IV en haut, Euro VI en bas)

Les émissions de NO_x et de NO₂ du bus Euro IV ont augmenté entre les deux campagnes en grande partie du fait de la température ambiante. En revanche, l'augmentation très nette des émissions de NO₂ du bus Euro VI en hiver ne s'explique pas par les différences de température ambiante entre les deux campagnes. De plus, ces niveaux ont été très variables selon la journée et l'heure lors de la campagne d'hiver. A contrario, les émissions de NO_x du bus Euro VI augmentent aussi en hiver mais de manière homogène et comparable à celle du bus Euro IV.

Plus précisément, les données d'émissions de chaque course lors de ces campagnes, en g/km, sont reportées Figure 64.

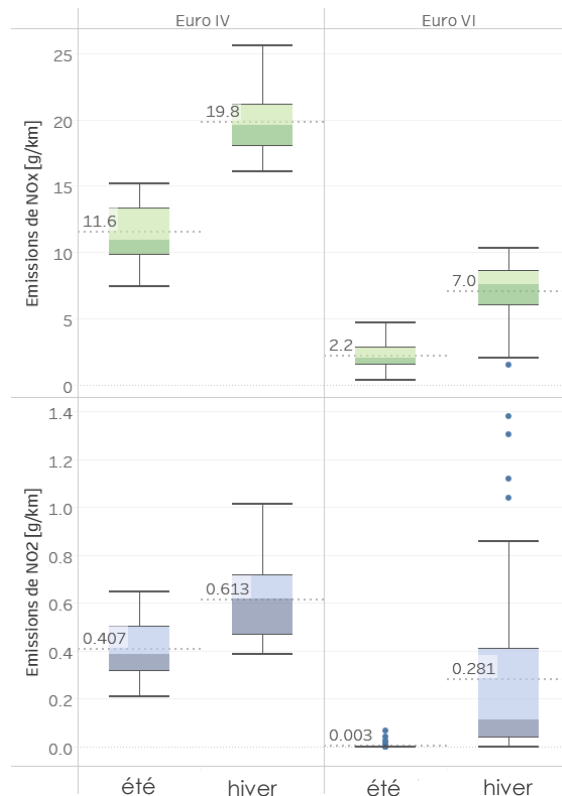


Figure 64 : Emissions par course (g/km) des deux campagnes des bus 4 et 7

La température ambiante était bien plus faible en hiver qu'en été (6°C contre 25°C). La température d'échappement était légèrement plus faible en moyenne aussi, le temps de démarrage à froid plus long et la vitesse moyenne légèrement plus faible, cela pour les deux bus de manière similaire. L'évolution de ces paramètres amène à une augmentation des émissions de NO_x, comme déjà montré précédemment.

Pour le bus Euro IV, les émissions moyennes de NO_x et NO₂ des courses sont respectivement 1,7 et 1,5 fois plus élevées en hiver qu'en été.

Pour le bus Euro VI, les émissions moyennes de NO_x et NO₂ des courses sont respectivement 3,2 et 94 fois plus élevées en hiver qu'en été. L'augmentation des émissions de NO₂ est bien plus importante pour le bus Euro VI que pour le bus Euro IV, deux bus instrumentés au même moment.

Ce type de dysfonctionnement, connu par les services de maintenance, semble donc impacter les émissions de NO₂ principalement.

Cette particularité, le dysfonctionnement de la SCR impactant les émissions de NO₂ mais peu celles de NO_x, peut être expliquée par le raisonnement suivant, dans le cas où le véhicule comprend un Ammonia Slip Catalyst ou ASC (ce qui est le cas pour la majorité des poids lourds) : l'ASC est un catalyseur trifonctionnel qui peut stocker du NH₃, oxyder le NH₃ résiduel en NO_x, et faire ensuite office de SCR – en faisant réagir le NH₃ et les NO_x pour former de l'azote. Les forts excès de NH₃ rencontrés dans la situation décrite dans ce chapitre sont donc probablement en partie oxydés dans l'ASC en NO_x (principalement en NO₂) qui réagissent ensuite avec le reste du NH₃. Si une bonne conversion globale des NO_x et de l'ammoniac peut être atteinte, un résidu plus élevé de NO₂ est possible.

Dysfonctionnement par manque d'urée

Une autre situation de dysfonctionnement a été détectée lors de la campagne 13 avec un autre bus Euro VI ; ce dysfonctionnement était plus ponctuel sur la campagne, et a priori le résultat d'un manque d'urée dans le réservoir. La Figure 65 montre les séries temporelles (données moyennées à la minute, chaque cellule représente un jour de mesure) des émissions de NO_x, NO₂ et PN, pour 7 jours de campagne.

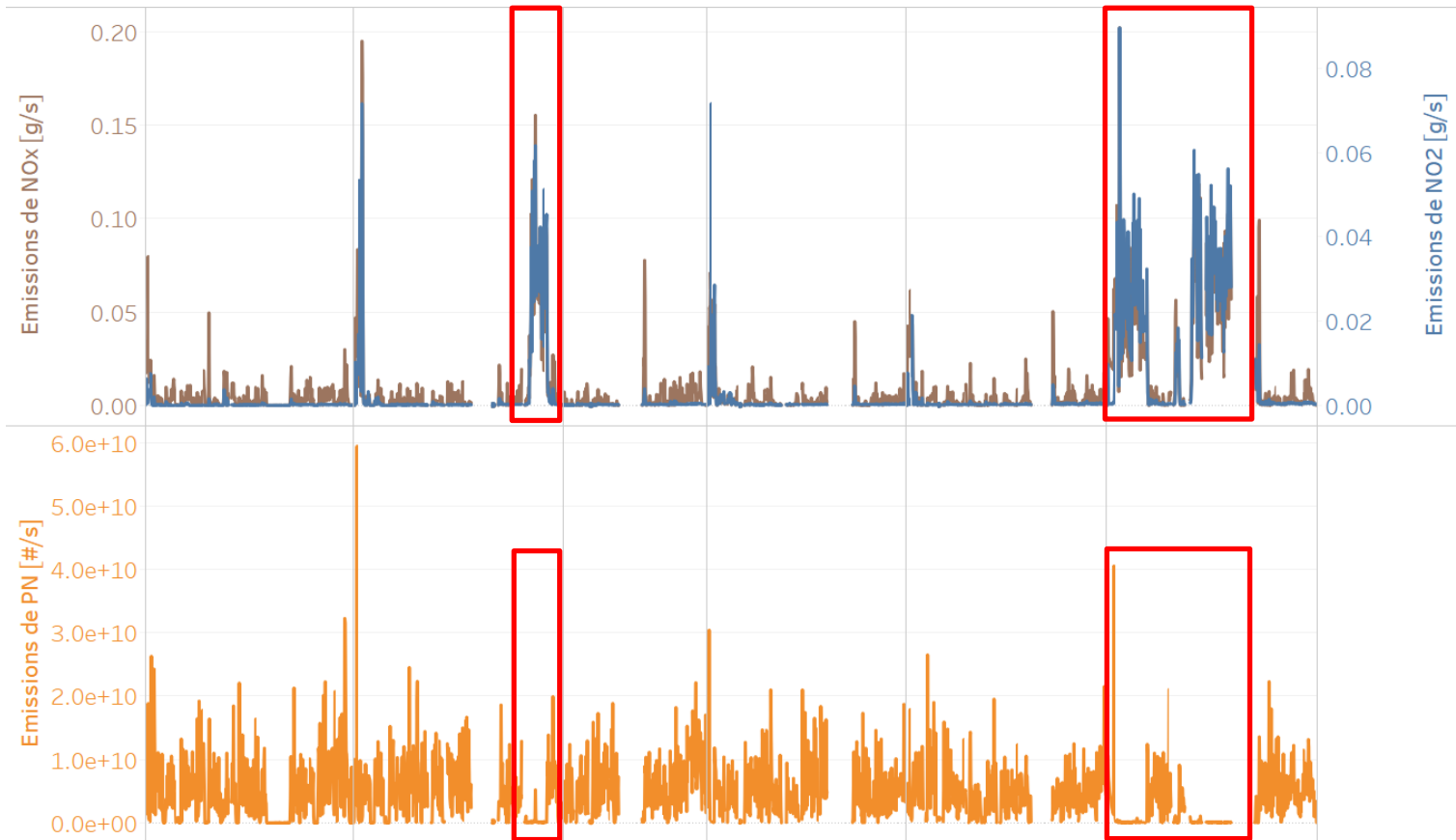


Figure 65 : Séries temporelles des émissions de NO_x, NO₂ et PN (données moyennées à la minute) pour la campagne 13 du bus 21

Dans ce cas, les émissions de NO_x et de NO₂ atteignent des niveaux atypiques. Il apparaît aussi que, lorsque les niveaux de NO_x sont plus élevés, les niveaux de PN sont particulièrement faibles. La Figure 66 permet de chiffrer ces augmentations/diminutions d'émissions.

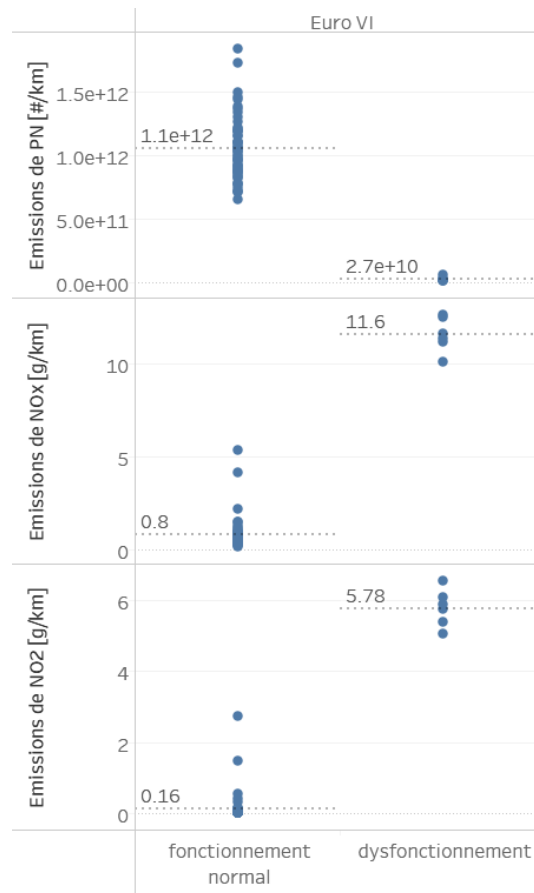


Figure 66 : Emissions par course (g/km) de la campagne 13 du bus 21, en différenciant les périodes de dysfonctionnement de la SCR

Lors de périodes de dysfonctionnement identifiées (a priori manque d'urée), les émissions de NO_x, de NO₂ sont respectivement 15 et 36 fois plus élevées, alors que pour les PN elles sont 41 fois plus faibles. Si l'augmentation des émissions de NO_x est facilement explicable lors d'un dysfonctionnement du système de dépollution des NO_x, la diminution des émissions de PN est plus complexe : s'il n'y a plus d'urée, le milieu réactif (les gaz d'échappement) devient riche en NO₂, réactif susceptible d'oxyder les suies et donc de réduire les émissions de PN à l'échappement.

Ces deux exemples illustrent l'importance des systèmes de dépollution et de leur bon fonctionnement pour limiter au maximum les émissions de NO_x.

Emissions anormales de PN sur deux bus Euro VI

Comme expliqué au chapitre 5.2, le filtre à particules (FAP) est un filtre « mécanique », qui agit comme une éponge pour bloquer les particules provenant de la chambre de combustion. Il fonctionne ainsi dans toutes les conditions de régime moteur et de température des gaz d'échappement. Il nécessite cependant d'être purgé de façon récurrente afin de brûler les particules stockées, lors d'un processus appelé la régénération. La régénération active est provoquée en réalisant des injections de carburant tardives afin de générer une température plus élevée dans l'échappement. Afin de ne gêner en rien l'utilisation du véhicule, les régénérations sont en général réalisées lors de phases de conduite à vitesse stable, afin de pouvoir la réaliser dans son intégralité sans interruption. La régénération d'un FAP nécessite une température à l'échappement importante, habituellement supérieure à 550°C (voire supérieure à 350°C si des catalyseurs sont utilisés), afin de brûler complètement les particules présentes dans le FAP et ainsi ne pas provoquer d'éventuelles surémissions de particules lors du processus. La température à l'échappement d'un bus diesel tourne surtout autour des 220°C en moyenne sur une course, donc la régénération active est généralement privilégiée sur la régénération passive. Elle peut aussi être effectuée en atelier si nécessaire.

Pendant les 13 campagnes de mesure réalisées, aucune température d'échappement supérieure à 350°C ou surémission de PN potentiellement liée à une régénération de FAP n'ont été mesurées.

Cependant, une situation particulière a été observée pour les bus 15 et 16 pendant la campagne 10 : pendant trois des journées de mesure, des émissions anormales de PN ont été mesurées, représentées Figure 67 (une cellule représente un jour de mesure, données à l'échelle de la seconde).

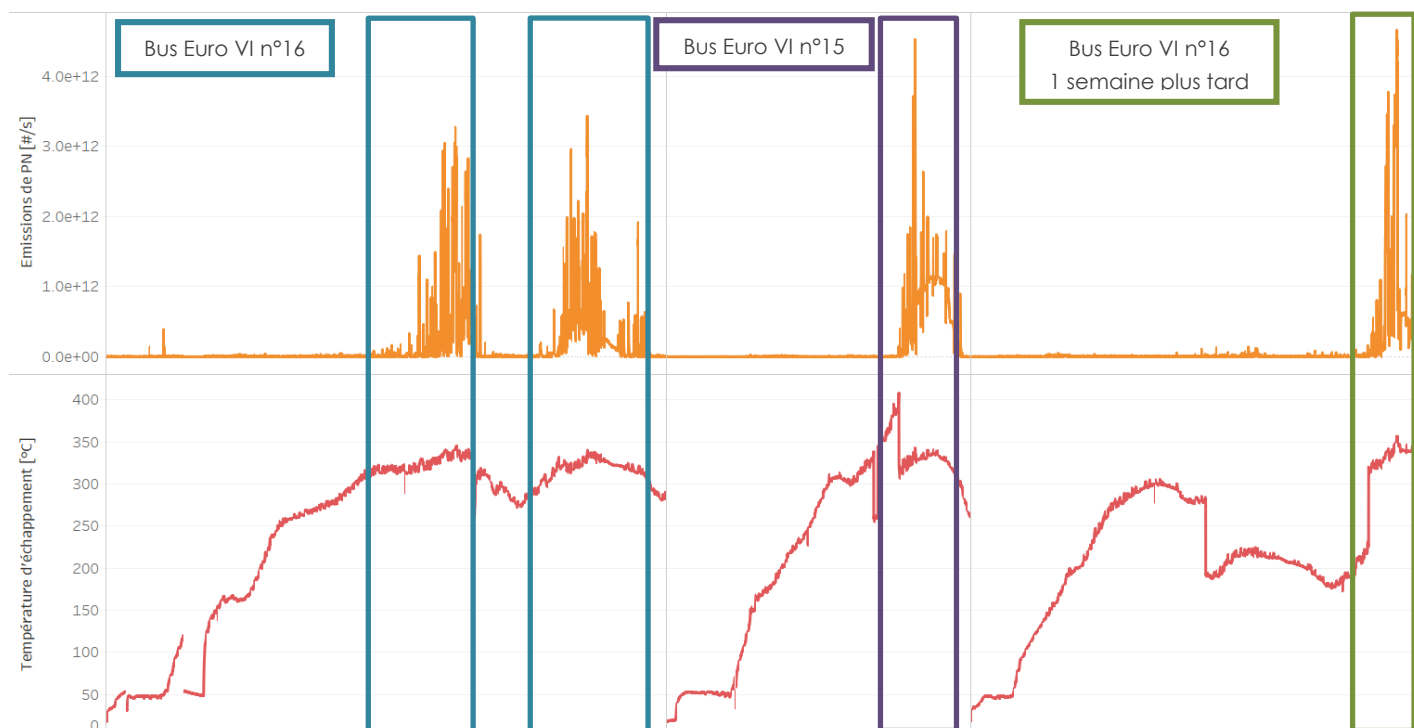


Figure 67 : Séries temporelles (données seconde) des émissions de PN atypiques et de la température d'échappement

Les situations rencontrées pendant ces trois jours de mesure sont a priori des débuts de régénération active, mais il semble que les températures ne soient pas montées assez haut pour aboutir à une régénération complète du FAP.

Pour le trajet du bus 16, le 1^{er} jour, 55 min d'émissions anormales ont été équivalentes, en termes d'émission de PN, à environ 58h d'émissions en fonctionnement normal.

Pour le trajet du bus 15, 16 min d'émissions anormales ont été équivalentes, en termes d'émission de PN, à environ 123h d'émissions en fonctionnement normal.

Pour le trajet du bus 16, une semaine après le 1^{er} jour, 15 min d'émissions anormales ont été équivalentes, en termes d'émission de PN, à environ 30h d'émissions en fonctionnement normal.

Plus globalement pour ces bus, lors de ces « débuts » de régénération à trop faible température d'échappement, les émissions instantanées (en #/s) de PN sont 100 fois plus importantes en moyenne comparées aux émissions en temps normal, comme le montre la Figure 68 ci-dessous (attention, les émissions sont exprimées en #/s et non en #/km, elles ne sont donc pas comparables à celles du chapitre 7).

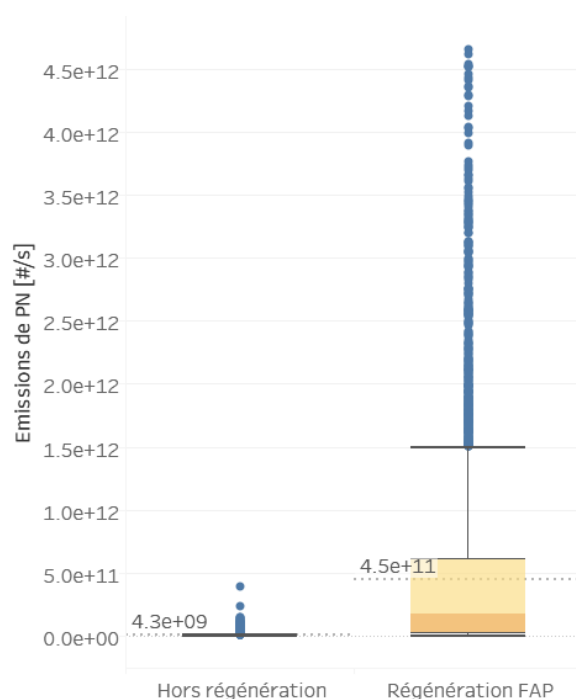


Figure 68 : Emissions instantanées de PN lors d'une régénération active, comparées à une situation normale, pour les deux bus Euro VI considérés

D'après les nombreuses campagnes réalisées, cette anomalie est exceptionnelle et ne peut être associée à une régénération normale d'un FAP : elle n'a été rencontrée que trois fois sur deux bus similaires, et elle semble être liée à un échec de régénération dans des conditions dégradées.

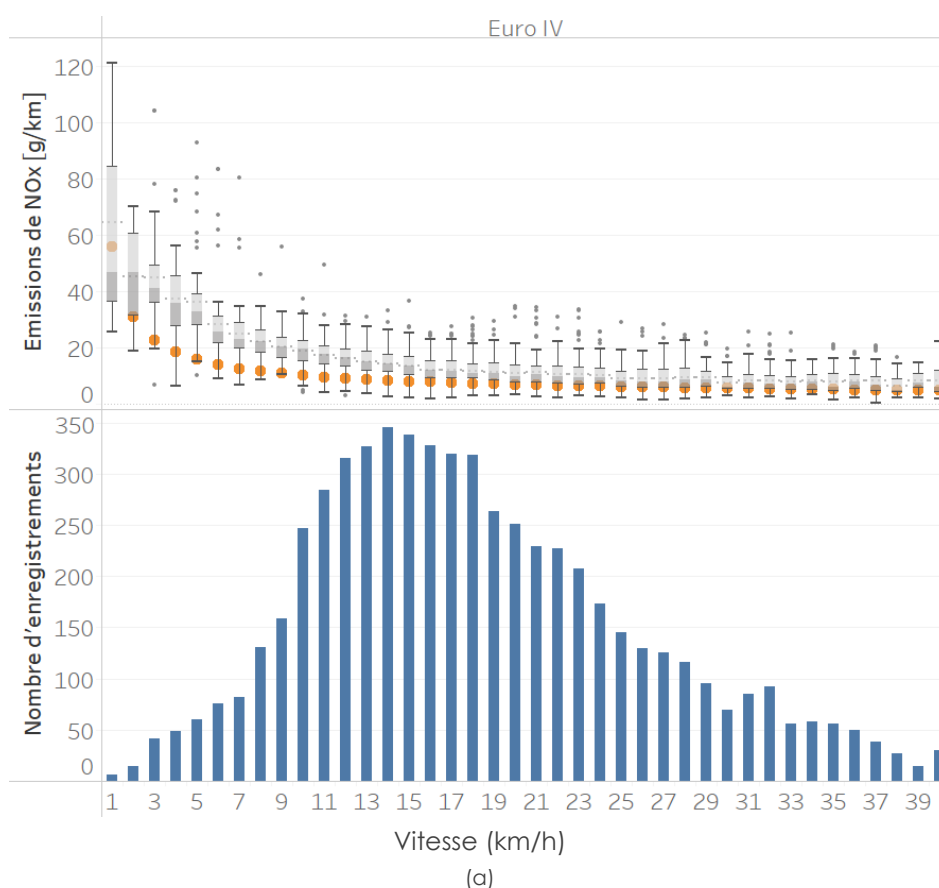
9. Bus Diesel : comparaison aux facteurs d'émission utilisés dans les modèles

L'un des intérêts de cette étude est de comparer les facteurs d'émission européens COPERT V (en g/km), utilisés dans les modèles de calcul des émissions du trafic routier, aux facteurs d'émission mesurés en conditions réelles. A ce jour, peu de données expérimentales sont disponibles pour construire le modèle COPERT pour les bus, cette étude pourra donc apporter des données complémentaires pour ce modèle. Les bus GNC par exemple ne sont compris que jusqu'à la norme EEV dans COPERT V, il n'est donc pas possible de comparer les données expérimentales de cette étude pour les GNC.

Les données ont été agrégées au km pour cette analyse, comme cela a été réalisé par une étude de O'Driscoll et al publié en 2016 [7]. Les émissions des deux polluants NO_x et CO peuvent être comparés ici avec les facteurs COPERT, pour les bus de normes Euro IV et Euro VI pris dans leur globalité, sans considération des différences entre bus.

9.1. Facteurs d'émission de NO_x

Pour les émissions de NO_x , les facteurs d'émission COPERT par vitesses sont comparés aux émissions mesurées au km dans la présente étude à la Figure 69 et à la Figure 70 respectivement pour les bus Euro IV et Euro VI.



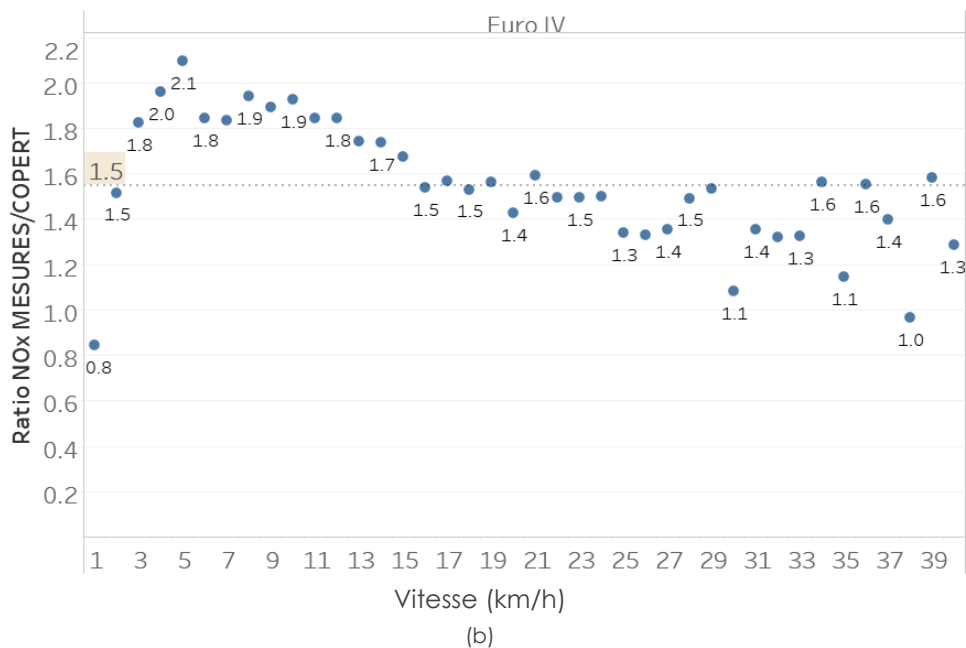
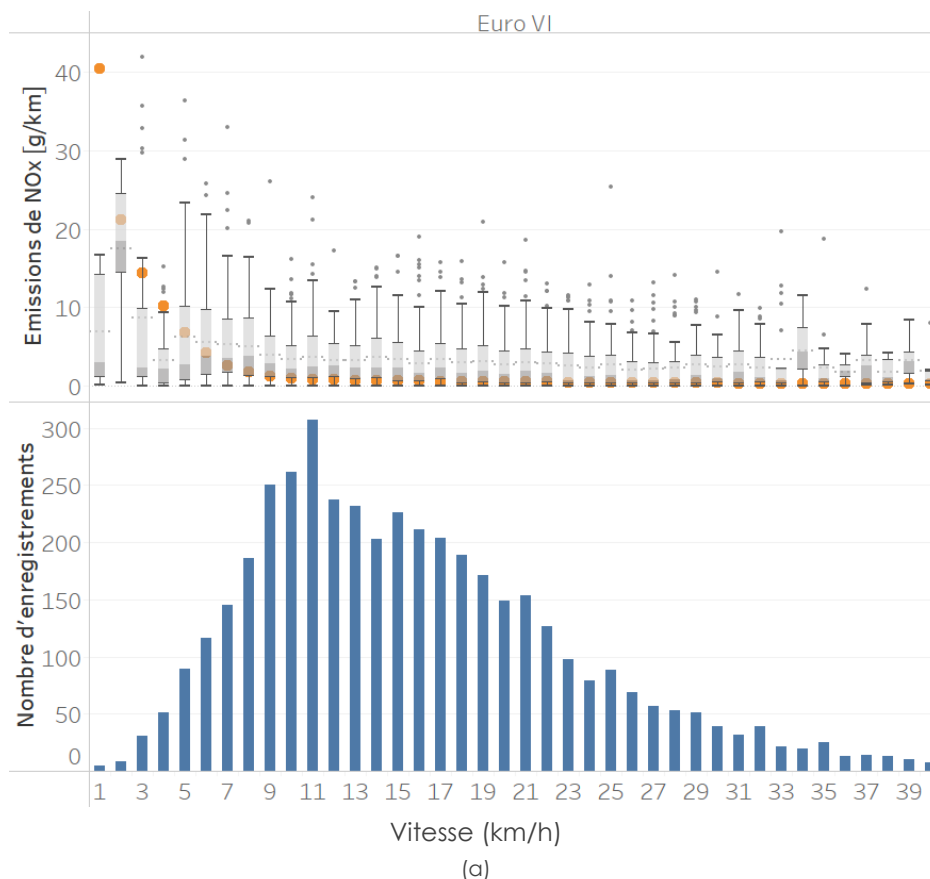
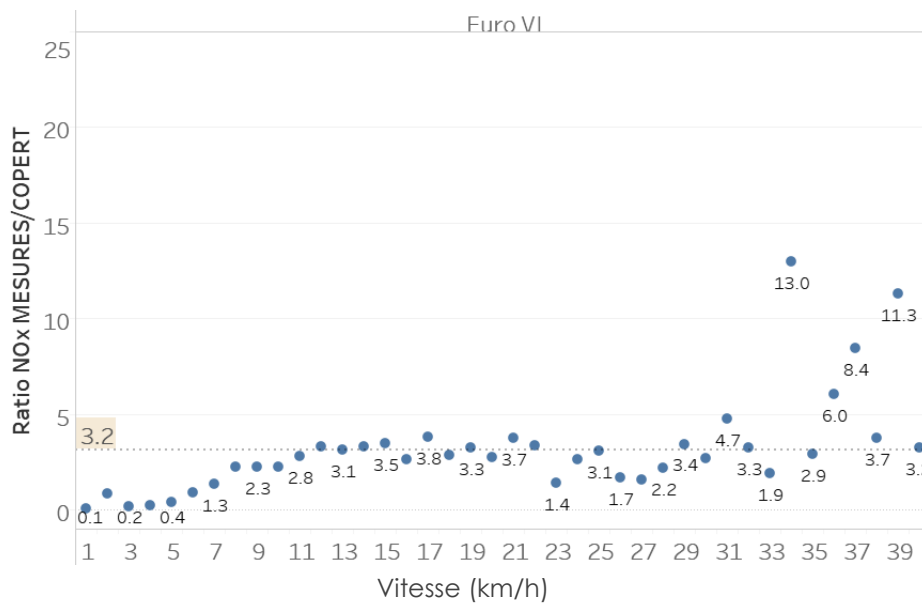


Figure 69 : Comparaison des facteurs d'émission de NO_x COPERT aux émissions mesurées, par vitesse (étiquette des abscisses), pour les bus Euro IV. Médianes des mesures (points gris), facteurs COPERT (points oranges) et nombre d'enregistrements par vitesse (a), ratio de la médiane des mesures sur le facteur COPERT (b)

Les émissions de NO_x mesurées pour les bus Euro IV sont, globalement, 1,5 fois plus élevées que les facteurs COPERT pour l'ensemble des vitesses de 1 à 40 km/h, cela variant entre 20% plus faibles (à la vitesse la plus faible) et 2,1 fois plus élevées (à 5 km/h). Les facteurs COPERT se situent dans les gammes d'émissions mesurées lors de cette étude, dans le quart inférieur.

En ne prenant en compte que les vitesses pour lesquelles plus de 100 données ont été enregistrées, soit entre 8 et 28 km/h, **les émissions de NO_x mesurées pour les bus Euro IV sont en moyenne 1,6 fois plus élevées que les facteurs COPERT, cela variant entre 1,3 et 1,9 fois plus élevées, avec une diminution de l'écart avec l'augmentation de la vitesse.**





(b)

Figure 70 : Comparaison des facteurs d'émission de NO_x COPERT aux émissions mesurées, par vitesse (étiquette des abscisses), pour les bus Euro VI. Médianes des mesures (points gris), facteurs COPERT (points oranges) et nombre d'enregistrements par vitesse (a), ratio de la médiane des mesures sur le facteur COPERT (b)

Les émissions de NO_x mesurées pour les bus Euro VI sont, globalement, 3,2 fois plus élevées que les facteurs COPERT pour l'ensemble des vitesses de 1 à 40 km/h, cela variant entre 90% plus faibles (à la vitesse la plus faible) et 13 fois plus élevées (ratio ponctuellement élevé dû surtout à un manque de données à cette vitesse). Malgré cette différence, les facteurs COPERT se situent dans les gammes d'émissions mesurées lors de cette étude, dans le quart inférieur.

En ne prenant en compte que les vitesses pour lesquelles plus de 100 données ont été enregistrées, entre 6 et 22 km/h, **les émissions de NO_x mesurées pour les bus Euro VI sont en moyenne 2,8 fois plus élevées que les facteurs COPERT, cela variant entre 10% plus faibles et 3,8 fois plus élevées, avec une augmentation de l'écart avec l'augmentation de la vitesse.**

Ratio NO₂/NO_x

L'inventaire des émissions européen EMEP/EEA [10] fixe le ratio NO₂/NO_x à 14% pour les poids lourds Euro IV et à 10% pour les poids lourds Euro VI. A titre de comparaison, les mesures réalisées lors de cette étude ont établi un ratio NO₂/NO_x moyen de 1,6% pour les bus Euro IV instrumentés, et de 4% et 9% respectivement pour les bus Euro VI et Euro VI hybrides instrumentés. Les ratios de l'inventaire sont donc plutôt surestimés avec une tendance à la baisse avec l'évolution de la norme, inverse de celle trouvée dans le cadre de cette étude.

9.2. Facteur d'émissions de CO

Pour les émissions de CO, les facteurs d'émission COPERT par vitesse sont comparés aux émissions mesurées au km dans la présente étude à la Figure 71 et à la Figure 72 respectivement pour les bus Euro IV et Euro VI.

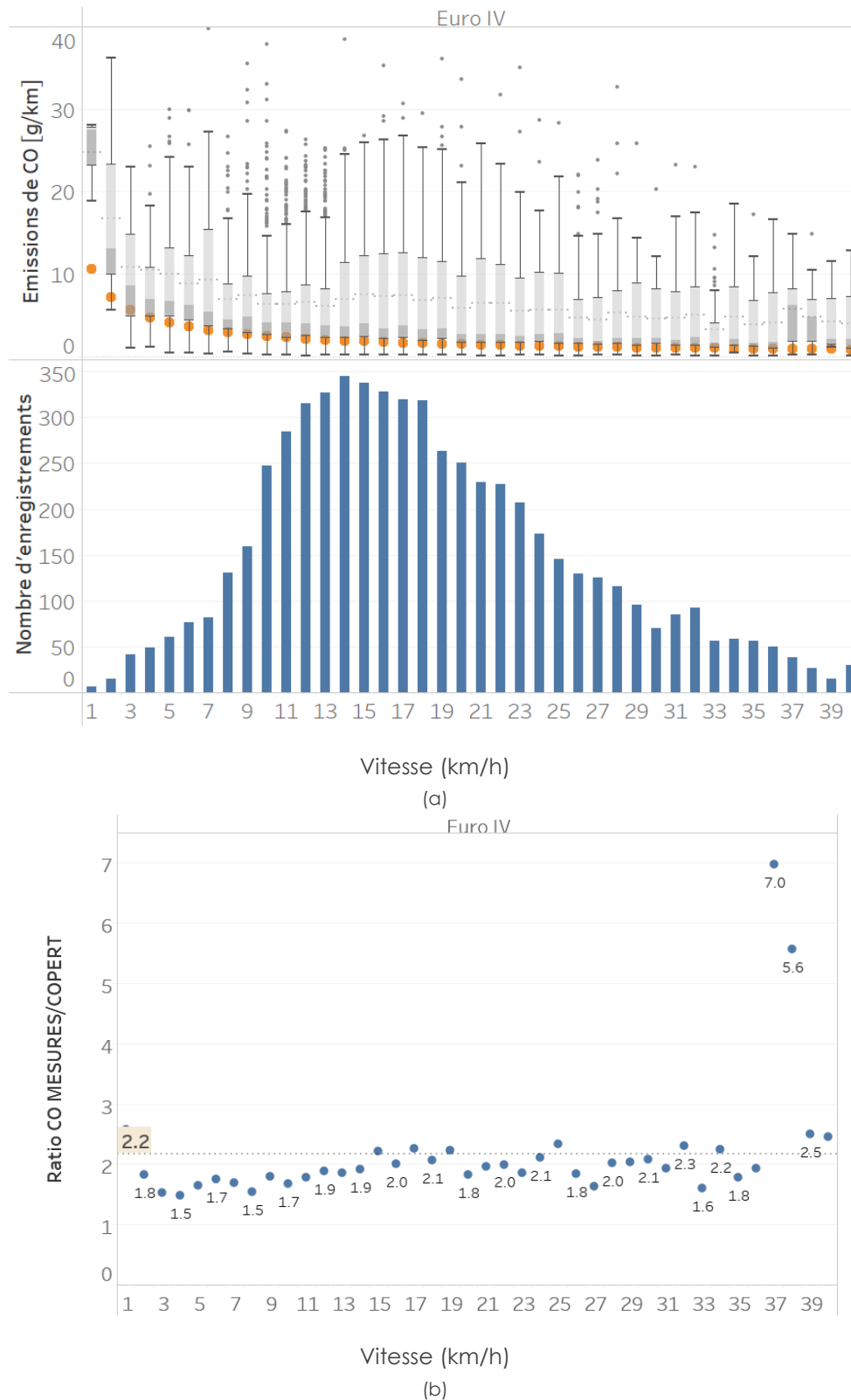


Figure 71 : Comparaison des facteurs d'émission de CO COPERT aux émissions mesurées, par vitesse (étiquette des abscisses), pour les bus Euro IV. Médianes des mesures (points gris), facteurs COPERT (points oranges) et nombre d'enregistrements par vitesse (a) et ratio de la médiane des mesures sur le facteur COPERT (b)

Les émissions de CO mesurées pour les bus Euro IV sont, globalement, 2,2 fois plus élevées que les facteurs COPERT pour l'ensemble des vitesses de 1 à 40 km/h, cela variant entre 1,5 (à 4 km/h) et 7 fois plus élevées (ratio ponctuellement élevé dû surtout à un manque de données à cette vitesse). De la même façon que pour les NO_x, les facteurs COPERT se situent dans les gammes d'émissions mesurées lors de cette étude, dans le quart inférieur.

En ne prenant en compte que les vitesses pour lesquelles plus de 100 données ont été enregistrées, entre 8 et 28 km/h, **les émissions de CO mesurées pour les bus Euro IV sont 1,9 fois plus élevées que les facteurs COPERT, cela variant entre 1,5 et 2,3 fois plus élevées, avec une légère augmentation de l'écart avec l'augmentation de la vitesse.**

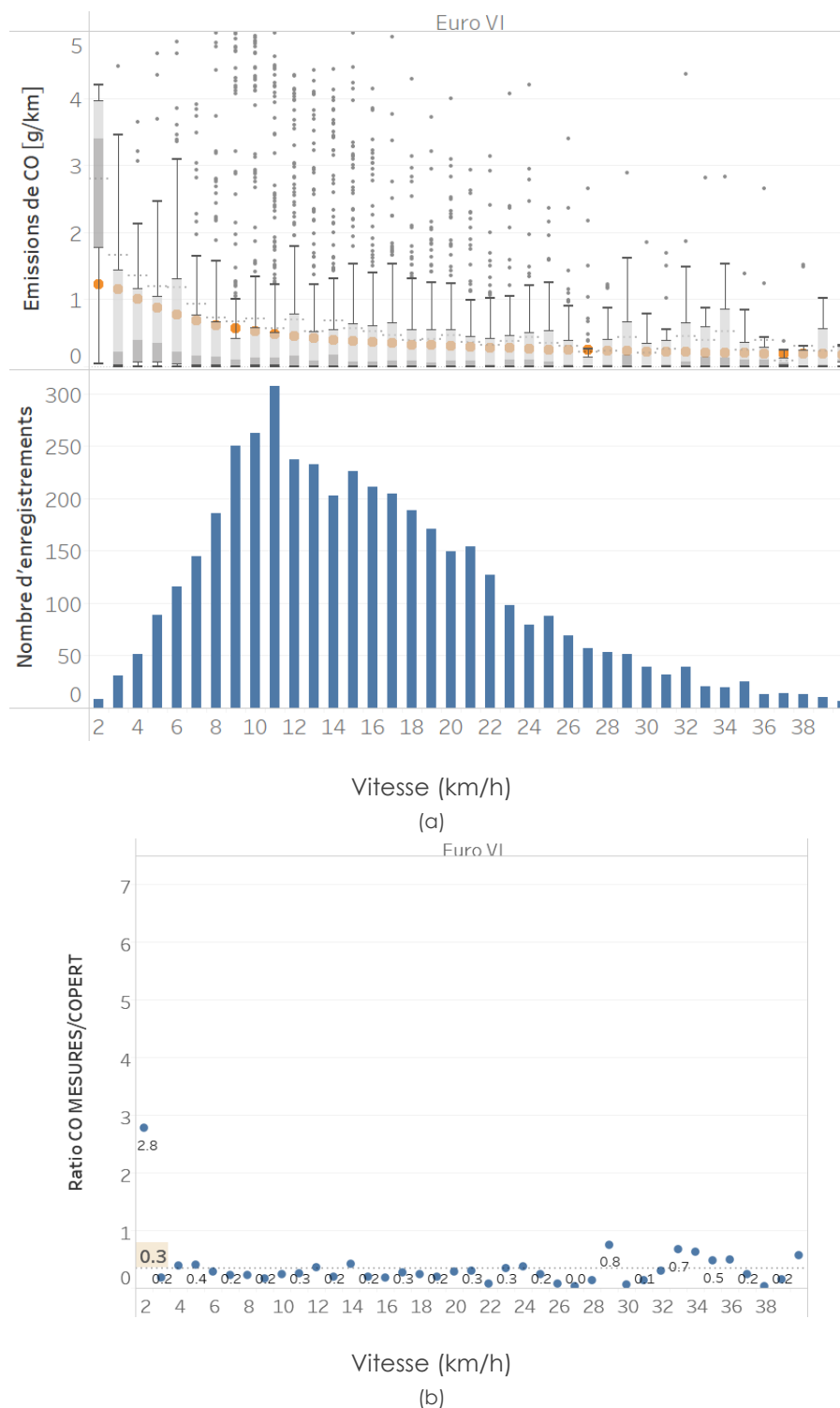


Figure 72 : Comparaison des facteurs d'émission de CO COPERT aux émissions mesurées, par vitesse (étiquette des abscisses), pour les bus Euro IV. Médianes des mesures (points gris), facteurs COPERT (points oranges) et nombre d'enregistrements par vitesse (a) et ratio de la médiane des mesures sur le facteur COPERT (b)

Les émissions de CO mesurées pour les bus Euro VI sont, globalement, 70% plus faibles que les facteurs COPERT pour l'ensemble des vitesses de 1 à 40 km/h, cela variant entre 90% plus faibles et 2,8 fois plus élevées (ratio ponctuellement élevé dû surtout à un manque de données à cette vitesse). Pour ce cas, les facteurs COPERT se situent dans la moitié supérieure des gammes d'émissions mesurées lors de cette étude.

En ne prenant en compte que les vitesses pour lesquelles plus de 100 données ont été enregistrées, entre 6 et 22 km/h, **les émissions de CO mesurées pour les bus Euro VI sont en moyenne 80% plus faibles que les facteurs COPERT, cela variant entre 60% et 90% plus faibles, avec un écart stable quelle que soit la vitesse.**

En définitive, les facteurs d'émission COPERT, dans les configurations des mesures réalisées lors de cette étude (qui peuvent varier d'une région à l'autre en termes de climat, de conditions de roulage etc.) tendent à sous-estimer les émissions réelles des bus Euro IV et Euro VI en NO_x, et en CO pour les bus Euro IV, tandis que les émissions de CO des bus Euro VI sont surestimées. Ces écarts peuvent provenir d'un jeu de données encore limité pour les bus dans le modèle COPERT. Pour rappel cependant, les facteurs d'émission COPERT restent dans les gammes d'émissions mesurées dans cette étude.

10. Bus GNC : comparaison avec les bus Diesel

10.1. Bibliographie

Malgré les améliorations importantes du point de vue des émissions, le diesel reste un carburant fossile, faisant polémique aujourd'hui sur la pertinence de son utilisation en zone urbaine, et qui demande l'utilisation de technologies poussées pour limiter ses émissions de NO_x et de PN (réduction catalytique, filtre à particules...). D'autres technologies sont donc envisagées par Ile-de-France Mobilités pour remplacer les bus urbains diesel, dont le bus électrique et le bus fonctionnant au Gaz Naturel Comprimé (GNC) composé à plus de 95% de méthane (CH₄). L'intérêt du gaz naturel est de limiter les émissions de gaz à effet de serre en considérant le cycle de vie du carburant, du puits à la roue, lorsque le GNV (gaz naturel pour véhicules, comprenant le gaz naturel liquéfié GNL et comprimé GNC) provient des processus de méthanisation (bioGNV). Pour l'heure, le GNV est surtout composé, sur le réseau français, de gaz naturel fossile².

La motorisation GNC, avec pour système de dépollution un pot catalytique trois voies (pour convertir NO_x, CO, CH₄ et autres hydrocarbures en CO₂, H₂O et N₂), est connue pour émettre moins de NO_x et de particules en masse (PM) que le diesel.

En effet, d'après le rapport de l'ADEME de 2018 [11], rapportant des émissions en conditions réelles selon un cycle In-Service Conformity (ISC) et uniquement pour la partie urbaine, les émissions de NO_x entre un bus Euro VI diesel et un bus Euro VI GNC sont diminuées de 20 à 40%, variant selon les études et les conditions de circulation. En condition de démarrage à froid, lors duquel les systèmes de dépollution des bus diesel ne fonctionnent pas de manière optimale, ce gain peut monter jusqu'à 50% sur l'ensemble du test. Les émissions de PM (particules en masse) sont suffisamment faibles pour ne pas avoir été détectées par un Portable Emission Measurement System (PEMS), pour les deux technologies, et les émissions de CO₂ du réservoir à la roue (i.e. à l'échappement sans prendre en compte l'origine du carburant) sont similaires. Sur banc à rouleau sur cycle ADEME/RATP (représentatif d'un roulage en milieu urbain embouteillé), les facteurs d'émission des bus Euro VI diesel et GNC sont reportés Tableau 3. Il apparaît que les bus GNC émettent davantage de CO, de CH₄ et d'hydrocarbures totaux (HC), et là aussi, nettement moins de NO_x (émissions divisées par 17).

Technologie	Facteurs d'émission sur cycle ADEME/RATP				
	CO (g/km)	CH ₄ (g/km)	HC totaux (g/km)	PM (g/km)	NO _x (g/km)
Bus diesel Euro VI	0,02	-	0,01	0,01	4,17
Bus GNC Euro VI	0,52	0,02	0,04	Non mesurable	0,24

Tableau 3 : Facteurs d'émission ADEME des bus diesel et GNC Euro VI sur cycle ADEME/RATP [11]

La plupart des études s'accordent sur ce point [12-16] : les émissions de CO₂ sont sensiblement similaires, en légère augmentation parfois pour le GNC car la composition chimique favorable du GNC compense la moindre efficacité du moteur ; les émissions de CH₄ (et d'hydrocarbures totaux) sont plus élevées que pour les bus diesel mais restent faibles - plus spécifiquement, une étude rapporte des émissions de CH₄ sur route autour de 18-45 mg/km, soit inférieures à 1 g/km de CO₂-équivalent [17] ; **les émissions de PM (particules en masse) sont très faibles, sans ajout de système de dépollution spécifique : selon l'étude considérée, elles sont négligeables voire parfois similaires**

² <https://www.connaissancedesenergies.org/le-biomethane-en-france-en-chiffres-cles-180410>

aux bus Diesel récents [18] (dont les émissions ont été très fortement réduites ces dernières années) ;

les émissions de CO peuvent être plus importantes (ratio air/carburant plus faible que pour le diesel) ; les émissions de NO_x sont 2 à 30 fois plus faibles ; il est important de noter que, selon l'étude Équilibre [14], les émissions de NO_x des véhicules GNC sont nettement plus faibles par rapport aux véhicules diesel lorsque les conditions de circulation sont sévères (urbain dense, congestion), alors qu'en trafic fluide, elles peuvent être similaires. Par ailleurs, les émissions de NO_x peuvent varier énormément (parfois d'un facteur 4) entre deux véhicules GNC, ce qui est attribué à la jeunesse de la technologie.

Les particules en nombre (PN) sont moins étudiées à ce jour. Les résultats d'une étude danoise, reportés dans le rapport du COMVEC [12] sur des poids lourds Euro VI en cycle WHVC, signalent une augmentation d'un facteur 4 des émissions de PN du GNC par rapport au diesel, et plus généralement d'un facteur 10 à 100 selon une étude d'Eisazadeh [19]. Giechaskiel [20] estime les émissions de PN (>23nm) de poids lourds diesel autour de 2.10^{10} - 7.10^{11} #/km, celles de poids lourds GNC autour de 8.10^{11} - $4.5.10^{12}$ #/km, selon le véhicule et la méthode de mesure. Ces particules proviendraient majoritairement du brûlage de l'huile lubrifiante [13, 20-22], et se situent dans la gamme 1-30 nm (mode nucléation) [16, 23]. Par ailleurs, la toxicité des particules émises par les véhicules GNC pourrait être plus faible que celle des véhicules diesel [19], ce qui reste à confirmer par plus d'études.

10.2. Rappel sur les données récoltées

Pour rappel (voir chapitres 5 et 6), deux bus Euro VI GNC de même modèle ont été instrumentés à chacune des trois campagnes, et ont circulé sur une même ligne, afin d'évaluer la variabilité des émissions due aux conditions d'usage (état, âge du véhicule, conduite, charge, etc.) : au total, six bus Euro VI GNC ont donc été instrumentés, de trois modèles différents.

Les émissions de ces bus GNC sont comparées dans ce chapitre à celles des bus Euro VI diesel mesurées lors des campagnes menées de juin 2018 à août 2019 : cela comprend 8 campagnes, pour 9 bus, dont l'un instrumenté deux fois (été/hiver), donc 8 bus Euro VI différents. Ils ont circulé sur différentes lignes, donc dans différentes conditions de circulation, conditions variant aussi au sein d'une même ligne selon le service, et dans des conditions météorologiques différentes.

Le nombre de courses (trajets de terminus à terminus) réalisées par bus est représenté Figure 14 (voir chapitre 6). En prenant en compte toutes les courses réalisées par les bus diesel Euro VI (non hybride) et GNC Euro VI depuis juin 2018, **436 courses sont comptabilisées pour les bus diesel et 298 pour les bus GNC.**

Les conditions de circulation des bus lors des différentes campagnes sont analysées en fonction de la température ambiante (Figure 73), la vitesse moyenne des bus sur une course et la distance parcourue par course (Figure 16).

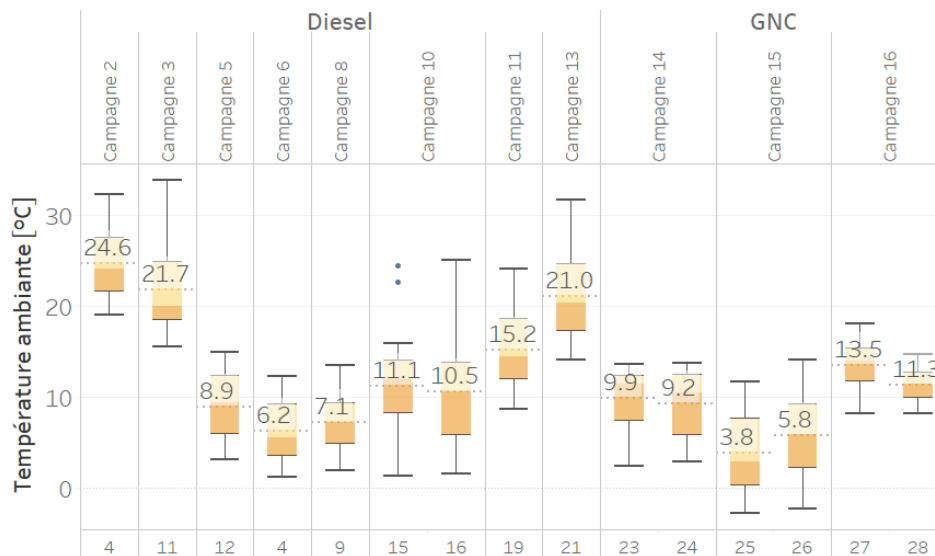


Figure 73 : Gammes des températures ambiantes lors des courses des campagnes de mesure des émissions des bus Euro VI diesel et GNC (identifiés de 1 à 28)

Les campagnes des bus GNC ont eu lieu en automne-hiver, donc les températures moyennes sont relativement faibles : entre 2 et 14°C pour la campagne 14, entre -3 et 14°C pour la campagne 15 (conditions les plus froides) et entre 8 et 18°C pour la campagne 16. Ces conditions météorologiques se retrouvent dans certaines campagnes diesel hivernales, les campagnes 5 à 10. Comme évalué au chapitre 8.2, les émissions des bus diesel, de NO_x surtout, ont tendance à augmenter en-dessous d'une température ambiante de 10°C (notamment du fait d'un temps plus long de circulation à moteur froid, lorsque les systèmes de dépollution ne fonctionnent pas de manière optimale, mais aussi plus généralement à moteur chaud). C'est pourquoi la température ambiante est prise en considération pour une comparaison fine entre les bus diesel et GNC. Certaines études montrent aussi que la température ambiante a une influence sur les émissions de CO et de NO_x des bus GNC [12].

Les vitesses moyennes des courses sont très variables sur une même sous-ligne, selon les heures de circulation, entre autres (voir Figure 16).

Pour la ligne Paris 5, la plage de vitesses correspond à celle rencontrées sur les autres lignes parisiennes : entre 8 et 18 km/h, avec une moyenne globale de 11 à 14 km/h, légèrement plus élevée que pour les lignes Paris 1 et Paris 4 parcourues lors des campagnes des bus diesel (moyenne autour de 10 et 11 km/h). La gamme de vitesses commerciales des lignes de grande couronne GC 2 et GC 3 se situe entre 12 et 28 km/h, avec une moyenne selon la sous-ligne de 17 à 22 km/h. Ces vitesses sont majoritairement toutes supérieures à celles des lignes parisiennes, et similaires à celles des autres lignes de petite et grande couronne des campagnes des bus diesel.

Cependant, si la vitesse commerciale a un effet important sur les émissions polluantes des bus diesel Euro IV, cet effet est très faible voire non observable sur celles des bus plus récents Euro VI. A priori donc, ces différences n'empêcheront pas la comparaison globale des bus diesel et GNC Euro VI.

Pour rappel : la grande variabilité des conditions d'exploitation et des multiples facteurs explicatifs des émissions, montrée dans les analyses précédentes, a mis en exergue l'importance de se focaliser surtout sur les **variances des résultats**, les gammes d'émissions, et non sur les moyennes, même si celles-ci sont prises en compte à titre indicatif. En effet, pour des bus qui circulent majoritairement en zone urbaine, les émissions de NO_x par exemple peuvent facilement varier d'un facteur cinq pour un même bus sur une même ligne, dans des conditions d'exploitation observables similaires. La variabilité non observable des **conditions d'usage** (état des véhicules, charge, par exemple) et des **conditions de circulation** (aménagement dédiés aux bus comme les couloirs de bus, densité du trafic) n'autorise que des conclusions générales. Lors des campagnes des bus GNC par exemple, la variabilité des conditions de circulation pour deux bus de même modèle est limitée (même ligne, souvent services proches), mais pas celle des conditions d'usage (passagers à bord, conduite, état du véhicule...). Ces éléments sont à garder en tête comme limites des comparaisons de bus de même modèle, et d'autant plus pour des bus de modèles différents.

10.3. Résultats

Les résultats sont exprimés en g/s (nombre de particules/s noté #/s pour les particules en nombre) lorsque les émissions instantanées sont utilisées (données au pas de temps seconde), en g/km (ou #/km) lorsque les émissions sont calculées à l'échelle d'une course, ou à l'échelle du kilomètre parcouru. Le couple moteur n'étant pas disponible dans les paramètres « moteur » récoltés, les résultats ne sont pas exprimés en g/kWh.

Pour précision, une partie des mesures d'émission de PN des bus GNC ont été invalidées (données des deux bus de la campagne 16) : l'humidité importante à l'échappement des bus GNC peut être à l'origine d'une condensation et interférer avec la mesure des PN (du fait des particules d'eau condensée). Lors de la campagne 16, l'humidité mesurée dans l'appareil de mesure des PN était fréquemment trop élevée (>30/40%) pour ne pas interférer avec la mesure.

Illustration de la variabilité d'usage

La variabilité d'usage correspond aux différences d'état des bus, de conduite, de charge, paramètres non observables dans cette étude, hormis le style de conduite qui peut être estimé à partir de données de vitesse et accélération. Il est intéressant d'observer cette variabilité dans la présente étude qui a permis d'instrumenter deux bus similaires au même moment sur une même ligne pour les trois campagnes, limitant ainsi la variabilité de circulation entre ces deux bus. La Figure 74 montre les résultats d'émissions pour tous les bus GNC instrumentés, couplés par modèles.

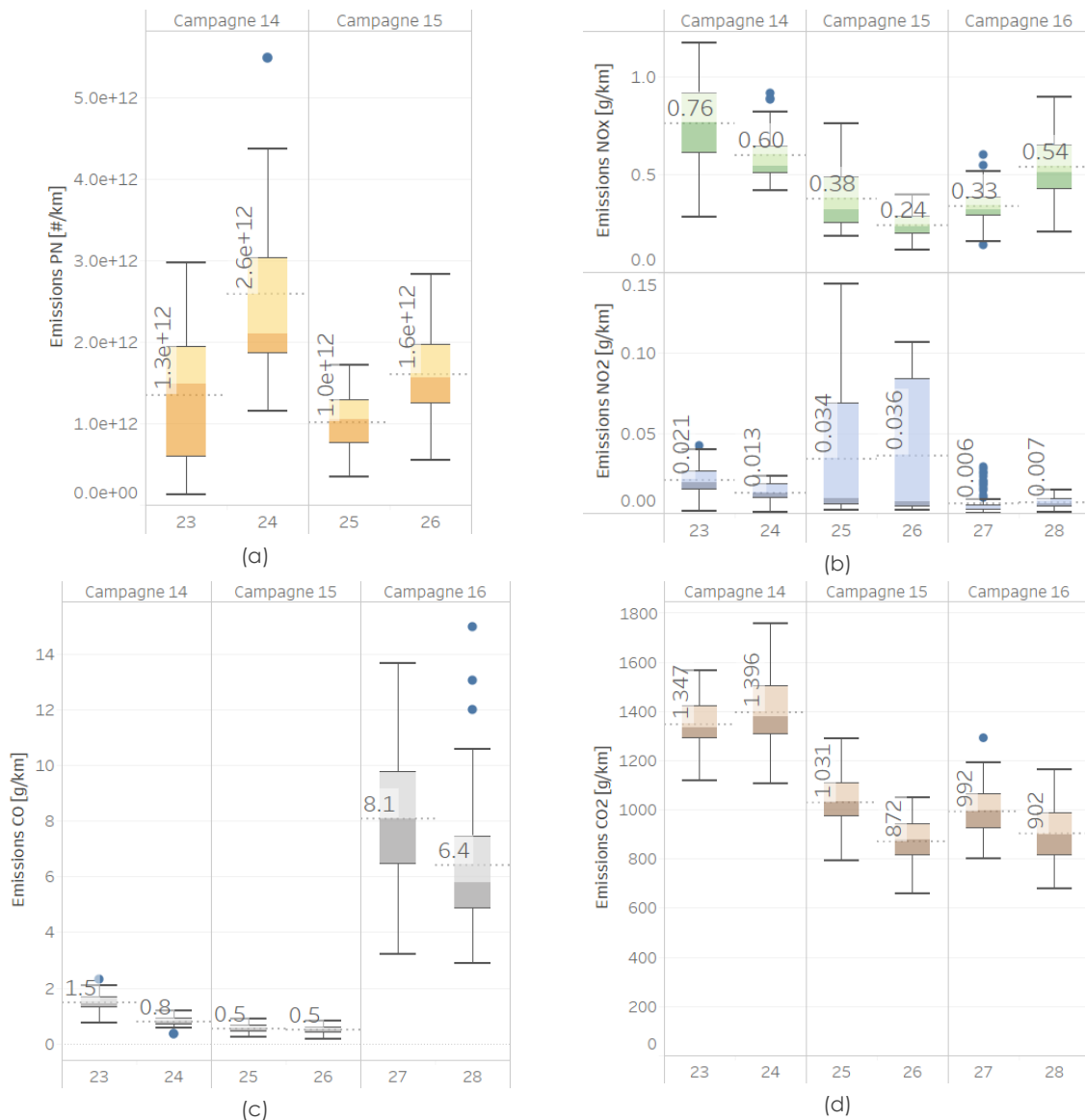


Figure 74 : Comparaison des émissions des bus Euro VI GNC de mêmes modèles : PN (a), NO_x/NO₂ (b), CO (c), CO₂ (d)

Pour chaque campagne, deux bus de même modèle ont été instrumentés : bus 23 et 24 pour la campagne 14, bus 25 et 26 pour la campagne 15 et bus 27 et 28 pour la campagne 16.

- Pour les émissions de PN, les gammes d'émission varient nettement d'un bus à l'autre : [1,3.10¹¹ ; 3,0.10¹² #/km] et [1,2.10¹² ; 4,4.10¹² #/km] pour les bus 23 et 24. L'écart-type de chaque bus est moins important pour les bus 25 et 26, [3,5.10¹¹ ; 1,7.10¹² #/km] et [5,5.10¹¹ ; 2,8.10¹² #/km]. Pour chaque campagne, l'un des bus se distingue de l'autre par des émissions plus élevées au global, 75% des courses de l'un toujours plus élevées que 75% des courses de l'autre.
- Pour deux mêmes modèles de bus, le bus ayant globalement des émissions de PN plus élevées a des émissions de NO_x plus faibles, et inversement, ce qui s'explique en partie par le compromis PN/NO_x classique en combustion.
- Les émissions de CO sont différentes entre les bus 23 et 24 (75% des émissions du bus 23 plus élevées que l'ensemble de celles du bus 24), et moins différentes entre deux bus similaires pour les bus 25/26, et pour les bus 27/28. Pour les émissions de CO₂, ce sont les bus 25 et 26 qui diffèrent notablement l'un de l'autre (75% des émissions de l'un plus élevées que 75% des émissions de l'autre).

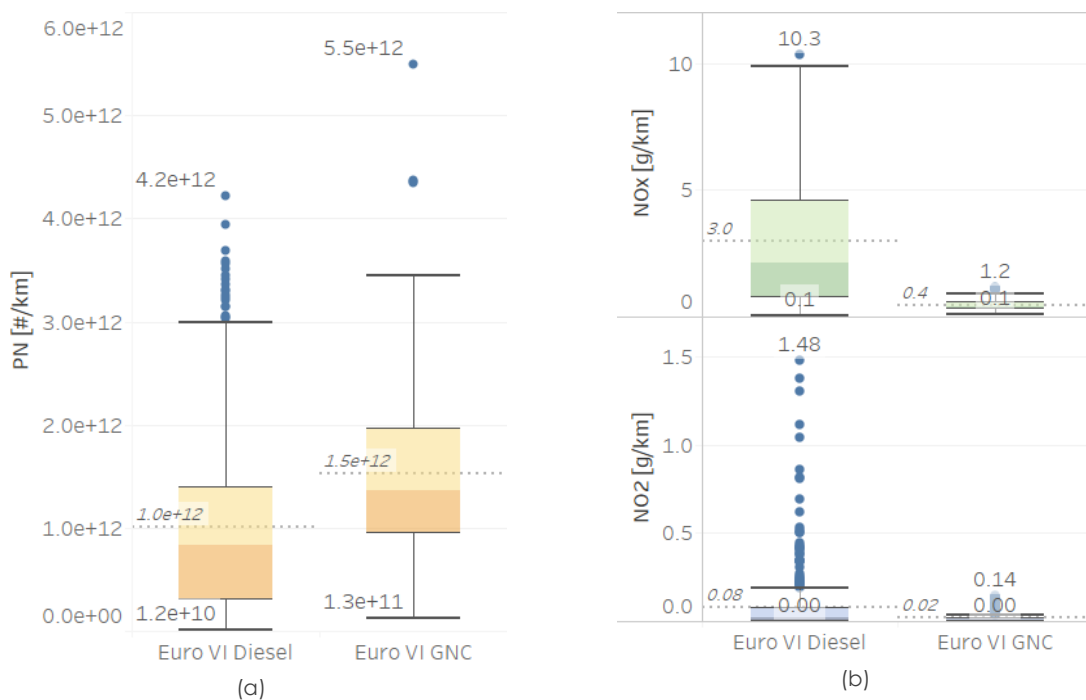
Les bus de la campagne 14 ont circulé sur une ligne parisienne, en zone urbaine dense et à faible vitesse commerciale, ce qui peut expliquer en partie des émissions de PN, de NO_x et de CO₂ parfois plus élevées (+50% environ pour les émissions de CO₂) et plus variables que pour les bus des autres campagnes. Cela ne se retrouve pas pour les émissions de CO de la campagne 16 qui semblent ici dépendre plus fortement des réglages et de la technologie (modalités d'injection du carburant par exemple).

Cette première analyse permet de confirmer l'influence importante de conditions d'usage sur les émissions, et donc l'intérêt de disposer d'une variété suffisante de bus et de mesures afin d'avoir un panel se rapprochant au mieux des gammes d'émissions réelles de la flotte.

Comparaison des émissions des bus GNC et diesel

Comparaison générale toutes conditions d'exploitation confondues

En prenant en compte l'ensemble des courses réalisées par tous les bus Euro VI instrumentés depuis juin 2018, une grande variabilité des technologies et des conditions d'exploitation (usage et circulation) est présente dans les données, ce qui donne les gammes d'émissions par polluant et par technologie (GNC vs. diesel) présentées Figure 75.



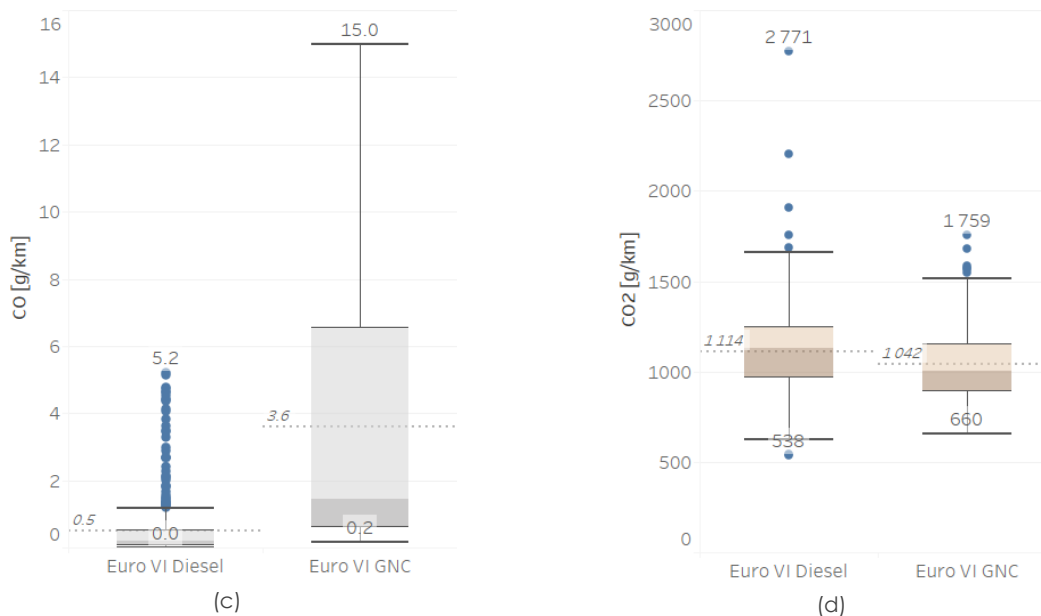


Figure 75 : Répartitions statistiques des émissions de PN (a), NO_x et NO₂ (b), CO (c), CO₂ (d), des courses par technologie, pour l'ensemble des bus Euro VI instrumentés

Les émissions de PN enregistrées sur l'ensemble des bus instrumentés varient d'un niveau très faible (autour de 10^{10} - 10^{11} #/km) à $4\text{-}5 \cdot 10^{12}$ #/km pour les bus diesel comme pour les bus GNC : une grande variabilité est donc observée pour les deux technologies. Pour rappel, les émissions des bus diesel plus anciens (Euro IV) se situent entre 10^{13} et 10^{14} #/km, soit 50 fois plus élevées que la moyenne des bus Euro VI GNC.

Les moyennes des émissions de PN sont statistiquement différentes, avec une augmentation de 50% pour les bus GNC par rapport aux bus diesel. 75% des trajets des bus Euro VI GNC ont des émissions de PN supérieures à la moyenne des émissions des bus Euro VI GNC. Étant donnée la proximité des gammes d'émissions des deux technologies, il convient de s'appuyer sur une analyse plus précise, au chapitre suivant (Comparaison avec limitation de la variabilité des conditions de circulation).

Les émissions de NO_x des bus GNC sont visiblement plus faibles que celles de bus diesel d'un facteur 1 à 100, et peu variables : entre 0,1 et 1,2 g/km, contre une gamme entre 0,1 et 10,3 g/km pour les bus diesel avec 75% des courses présentant des émissions plus élevées que l'ensemble des courses des bus GNC. Les émissions de NO₂ sont nettement moins variables aussi, du fait de l'absence de dysfonctionnements liés au système SCR comme pour les bus diesel, et du moindre impact du démarrage à froid sur les bus GNC. Ces résultats sont d'autant plus positifs pour les bus GNC que les campagnes GNC ont été réalisées dans des conditions hivernales, donc dans des conditions moins favorables pour les émissions de NO_x.

Les émissions de CO sont très variables au sein des bus GNC testés, avec un impact fort de l'un des modèles amenant la gamme d'émissions jusqu'à 15 g/km, contre des valeurs allant jusqu'à 1 voire 5 g/km de manière exceptionnelle pour les bus diesel. 50% des courses présentent cependant des émissions similaires à celles des bus diesel. Pour rappel, les émissions de CO des bus diesel Euro IV se situent, pour les bus instrumentés lors de la première phase du projet, entre 0,5 et 10 g/km. Les bus GNC de la campagne 16 présentent donc un comportement atypique en termes d'émissions de CO.

Les émissions de CO₂ ne présentent pas de différence notable entre les deux technologies, même si les moyennes sont statistiquement différentes (en faveur du GNC). La gamme d'émissions des bus GNC instrumentés, entre 660 et 1515 g/km (maximum atypique 1760 g/km), est comprise dans celles des bus diesel instrumentés, entre 540 et 1660 g/km (maximum atypique 2770 g/km).

Comparaison avec limitation de la variabilité des conditions de circulation

Comme indiqué plus haut, les conditions de circulation peuvent fortement impacter les émissions, notamment la température ambiante sur les émissions de NO_x des bus diesel, la vitesse commerciale aussi mais globalement moins pour les bus Euro VI. Ainsi, certaines campagnes des bus diesel sont sélectionnées pour comparer les émissions des deux technologies, dans des conditions plus proches. Pour rappel, cette analyse est bien entendu limitée du fait que tous les modèles de bus n'ont pas été testés dans les exactes mêmes conditions, il n'est ainsi pas possible de conclure de manière absolue que les bus GNC émettent plus ou moins que les bus diesel dans certaines conditions spécifiques de circulation puisque cela peut varier selon le modèle et les conditions d'usage. L'idée ici est de comparer le comportement de certains types de bus, diesel et GNC, dans des conditions de circulation proches.

Comme montré Figure 76, la campagne GNC 14 est comparée aux campagnes diesel 6 et 8, ayant lieu sur des lignes parisiennes avec des vitesses commerciales entre 9 et 15 km/h, à des températures entre 1 et 13°C. Les campagnes GNC 15 et 16 sont comparées aux campagnes diesel 5 et 10, avec des vitesses commerciales autour de 15-25 km/h et des températures autour de 5-15°C – la campagne 15 a lieu dans des conditions dégradées, c'est-à-dire à des températures en moyenne plus faibles et parfois négatives. Ceci est à prendre en compte lors de la comparaison.

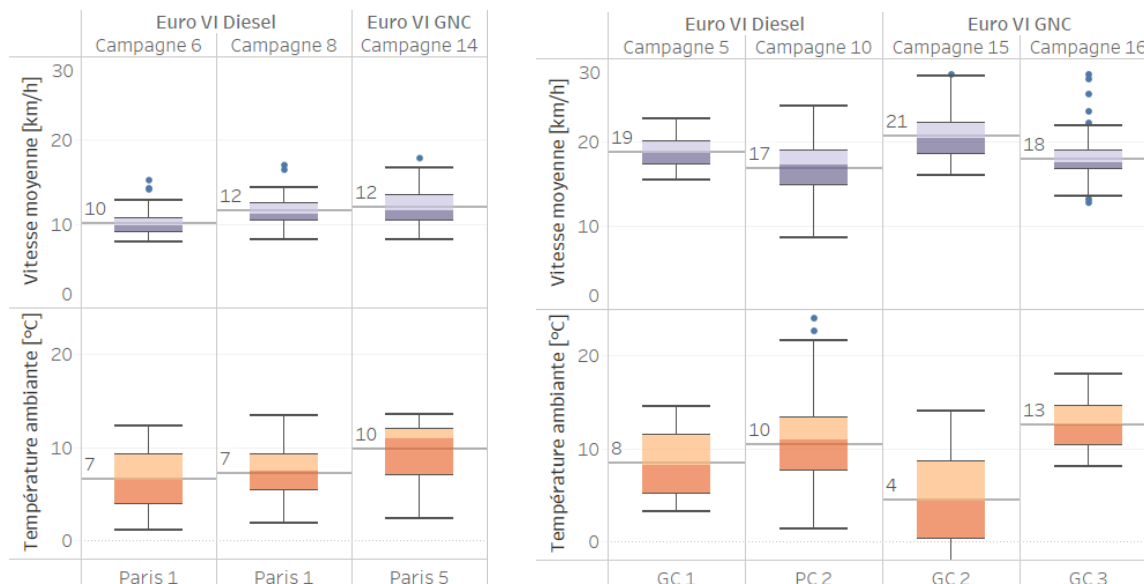


Figure 76 : Gammes de vitesses commerciales et de températures ambiantes rencontrées pour les bus Euro VI instrumentés : campagnes s'apparentant à la campagne 14 à gauche, campagnes s'apparentant aux campagnes 15 et 16 à droite

Les figures suivantes présentent pour chaque groupe de campagnes, les gammes d'émissions pour les bus diesel et GNC correspondants : émissions de PN Figure 77, émissions de NO_x Figure 78, émissions de CO Figure 79 et émissions de CO₂ Figure 80.

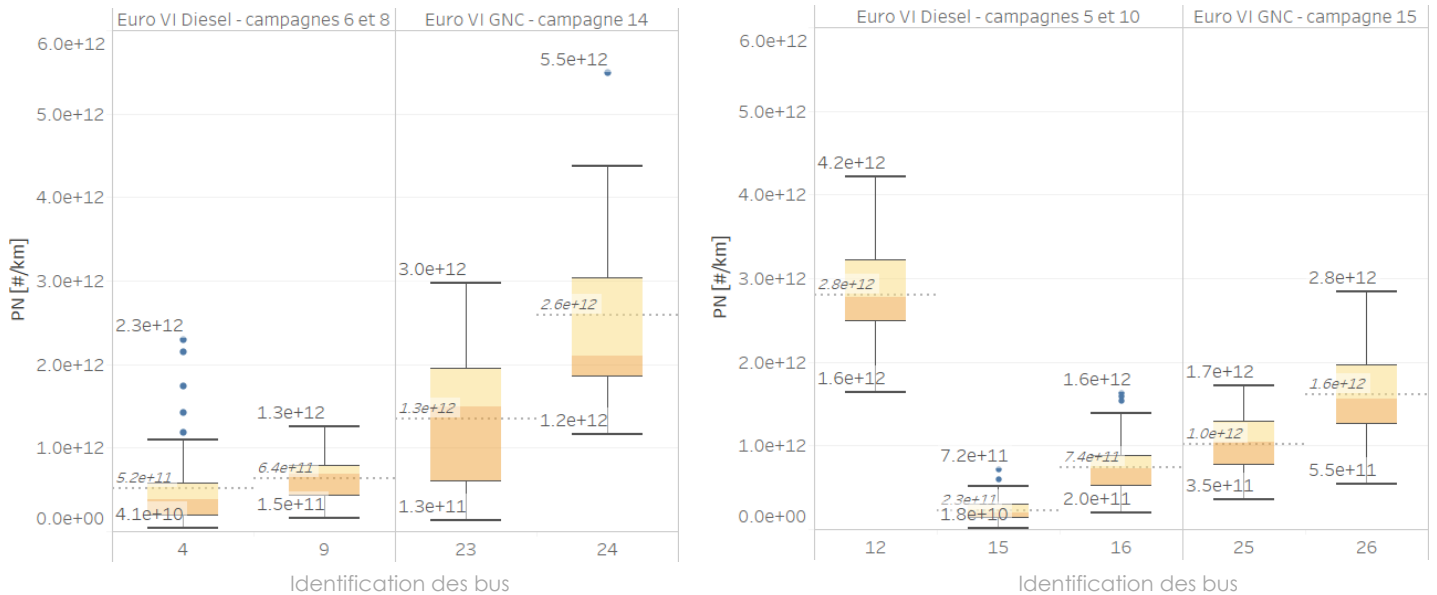


Figure 77 : Gammes d'émissions de PN des bus Euro VI diesel et GNC, pour une variabilité de circulation réduite (vitesses commerciales et températures ambiantes) : pour la campagne 14 à gauche, pour la campagne 15 à droite

La comparaison de campagnes, choisies sur des critères des conditions de circulation similaires, montre à nouveau **la variabilité des résultats sur les émissions de PN, que ce soit pour les bus Euro VI diesel ou GNC.**

Pour la campagne 14 comparée aux campagnes 6 et 8, les émissions de PN des bus GNC (entre $1,3 \cdot 10^{11}$ et $5,5 \cdot 10^{12}$ #/km) sont nettement plus élevées que celles des bus diesel (entre $4,1 \cdot 10^{10}$ et $2,3 \cdot 10^{12}$). Les moyennes des émissions de PN des bus Euro VI GNC dans ce cas de figure sont 2 à 5 fois plus élevées que celles des bus Euro VI diesel, selon les bus considérés.

Dans le deuxième cas de figure (campagne 15 comparée aux campagnes 5 et 10), les bus Euro VI GNC ont des émissions de PN 1,4 à 7 fois supérieures en moyennes à celles de deux des trois bus Euro VI diesel, avec des gammes d'émissions proches pour les bus 16 et 25. L'un des trois bus diesel en revanche présente une gamme d'émissions entre $1,6 \cdot 10^{12}$ et $4,2 \cdot 10^{12}$, donc des émissions de PN toujours supérieures à la moyenne de celles du bus 26 GNC (plus émetteur que le bus 25 GNC).

D'après cette analyse, il apparaît que les émissions de PN des bus Euro VI GNC sont plus élevées, dans des conditions de circulation proches, que celles de leurs homologues diesel, tout en restant dans la gamme d'émissions des bus Euro VI diesel du fait de la grande variabilité des émissions des bus de cette catégorie.

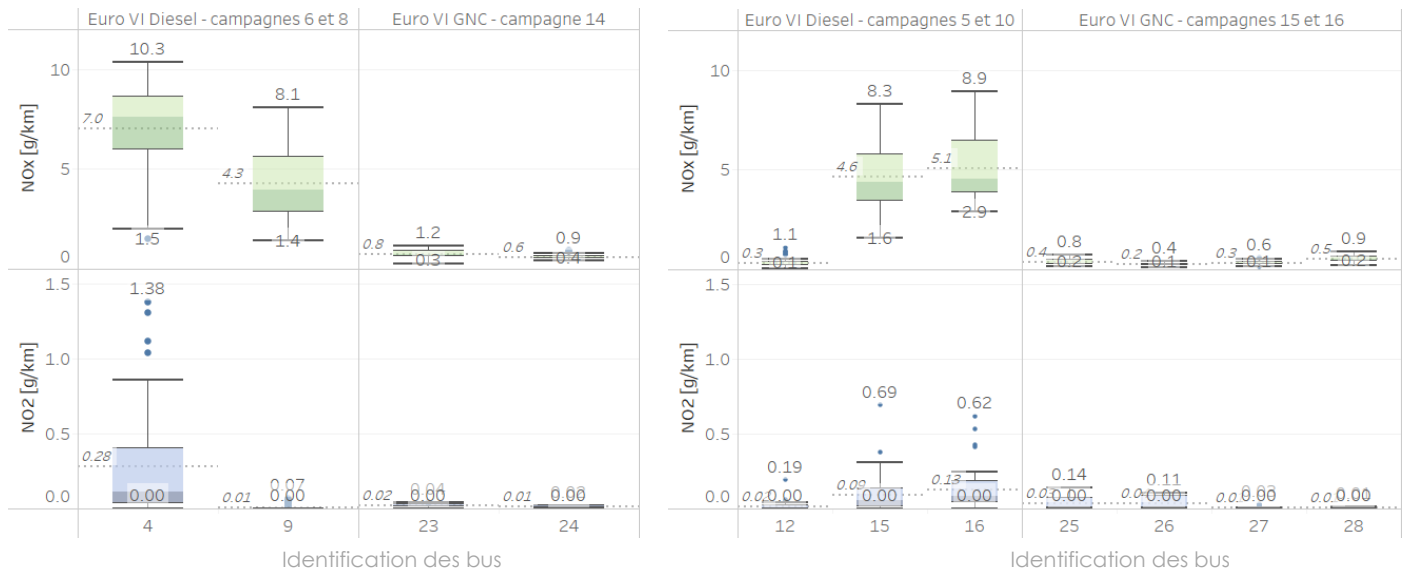


Figure 78 : Gammes d'émissions de NO_x et NO₂ des bus Euro VI diesel et GNC, pour une variabilité de circulation réduite (vitesses commerciales et températures ambiantes) : pour la campagne 14 à gauche, pour les campagnes 15 et 16 à droite

La situation pour les émissions de NO_x est moins équivoque : pour les deux groupes de comparaison, les émissions de NO_x des bus GNC sont nettement plus faibles que celles des bus diesel, d'autant plus en prenant en compte la situation dégradée en termes de températures pour la campagne 15. Les courses des bus GNC enregistrent des émissions de NO_x plus faibles pour la campagne 14 (de 0,3 à 1,2 g/km, vs. de 1,4 à 10,3 g/km pour le diesel), et situées dans les valeurs les plus faibles des bus diesel pour les campagnes 15 et 16 (de 0,1 à 0,9 g/km, vs. de 0,1 à 8,9 g/km pour le diesel). Les émissions de NO_x sont dans ces cas de figure plus faibles d'un facteur 1 à 89 avec les bus GNC. **Cela montre la performance de cette technologie en termes d'émissions de NO_x dans des conditions hivernales, dans lesquelles la technologie diesel Euro VI peut être plus sensible.**

Il apparaît par ailleurs que le compromis entre les émissions de PN et NO_x, particulièrement marqué pour certains bus comme le bus 12 Euro VI diesel (voir paragraphe précédent sur les PN), n'est pas visible au même degré pour les bus Euro VI GNC, qui sont relativement constants dans leurs émissions de NO_x. Le bus 12 Euro VI diesel est particulièrement atypique car il est le seul des bus Euro VI diesel à émettre aussi peu de NO_x et autant de PN. Les autres bus Euro VI diesel ayant un comportement similaire (voir Figure 28 et Figure 29), les bus 11, 19 et 21, présentent des émissions de NO_x plus élevées que celles des bus Euro VI GNC (autour de 1,5 g/km) et des émissions de PN du même ordre de grandeur que celles des bus Euro VI GNC.

Les mêmes remarques sont valables pour les émissions de NO₂.

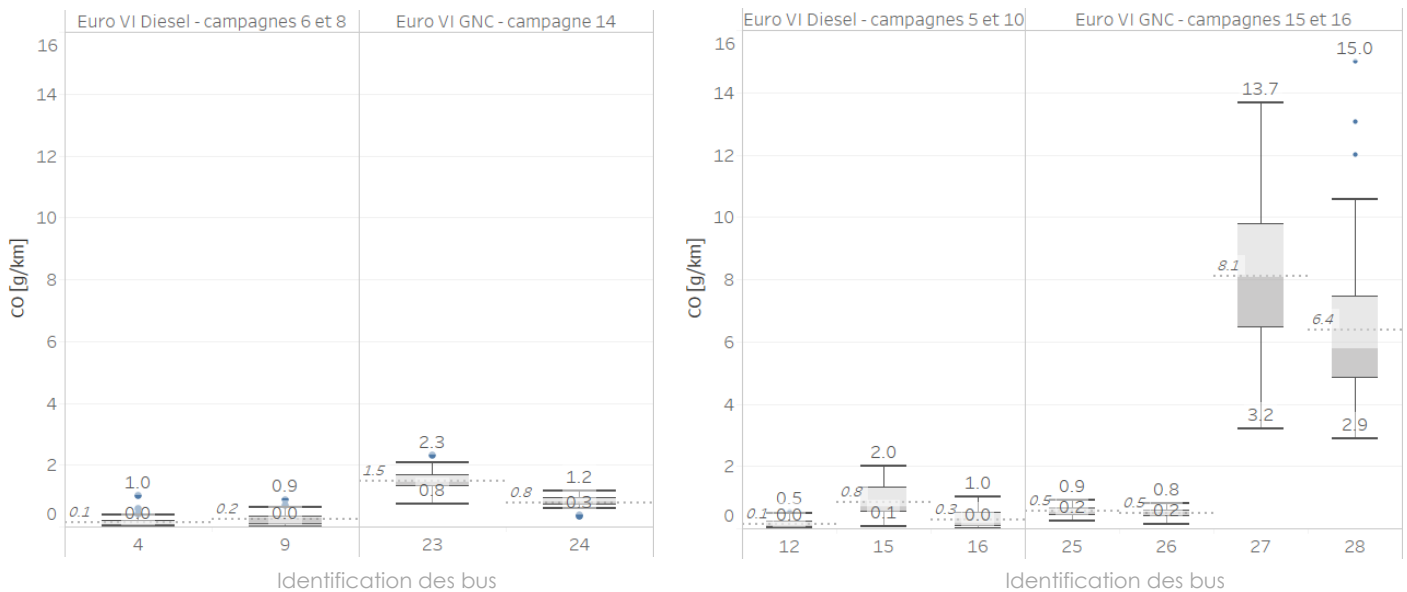


Figure 79 : Gammes d'émissions de CO des bus Euro VI diesel et GNC, pour une variabilité de circulation réduite (vitesses commerciales et températures ambiantes) : pour la campagne 14 à gauche, pour les campagnes 15 et 16 à droite

Les émissions de CO des bus GNC sont dans les deux cas de figure plus élevées que celles de bus diesel, mais pas dans les mêmes proportions.

Dans le premier cas avec la campagne 14, les émissions de CO sont en moyenne multipliées par 4 à 15 avec une variabilité entre 0,3 et 2,3 g/km (entre <0,1 et 1,0 g/km pour les bus diesel), tandis que dans le deuxième cas, avec les campagnes 15 et 16, les bus 27 et 28 Euro VI GNC ont des gammes d'émissions nettement supérieures : entre 2,9 et 15,0 g/km (entre <0,1 et 2,0 g/km pour les bus diesel).

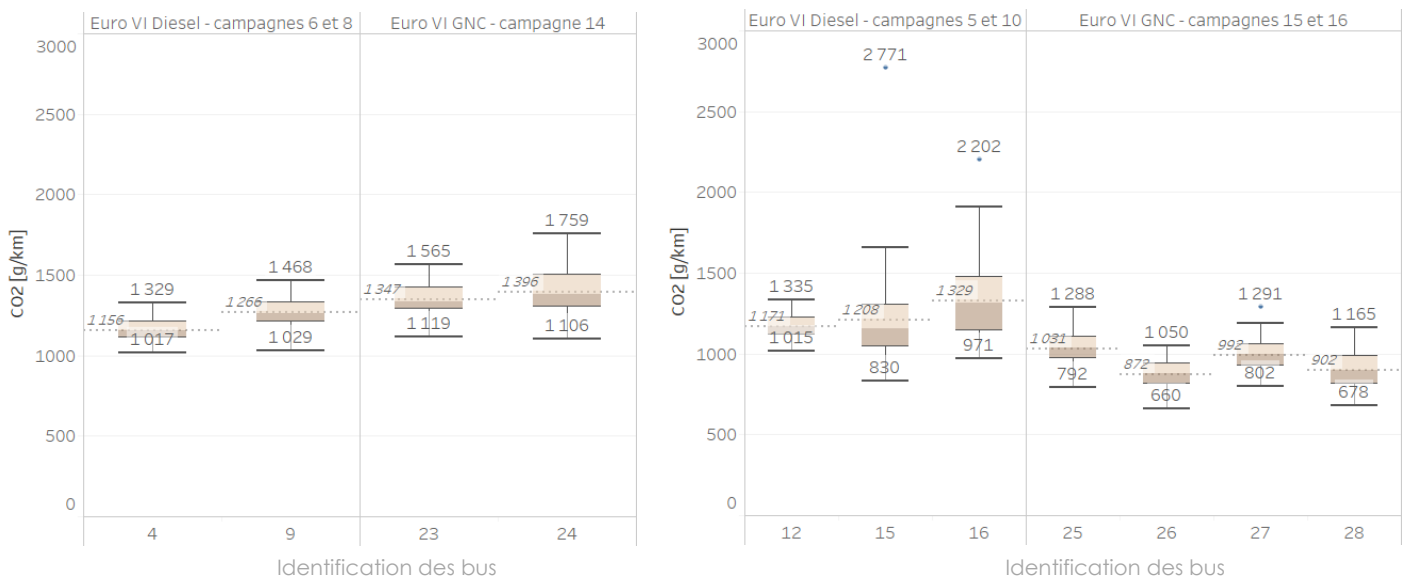


Figure 80 : Gammes d'émissions de CO₂ des bus Euro VI diesel et GNC, pour une variabilité de circulation réduite (vitesses commerciales et températures ambiantes) : pour la campagne 14 à gauche, pour les campagnes 15 et 16 à droite

Enfin pour les émissions de CO₂, le résultat est différent selon le cas de figure mais globalement les émissions restent proches.

Dans le premier cas, 75% des courses des bus GNC observent des émissions de CO₂ supérieures à 75% de celles des bus diesel, tendance qui s'inverse dans le deuxième cas.

Ainsi, dans des conditions de circulations proches et pour certains types de bus instrumentés, les émissions de NO_x et NO₂ des bus Euro VI GNC sont plus faibles que celles de bus Euro VI diesel, les émissions de PN sont plus élevées au global tout en restant dans la gamme des émissions des diesel, les émissions de CO sont plus élevées voire largement plus élevées pour deux bus s'apparentant dans ce cas à des bus type diesel Euro IV (ces bus présentent des émissions de CO atypiques), et les émissions de CO₂ sont plutôt similaires.

Zoom sur l'effet de la température ambiante et du démarrage à froid

Étant donné l'impact de la température ambiante sur les émissions de NO_x des bus diesel, analysé chapitre 8.2, un zoom est fait ici sur son impact pour les bus GNC. Un autre zoom est fait sur les démarrages à froid qui peuvent représenter des moments d'émissions importantes pour les bus diesel Euro VI par rapport au reste du service à moteur chaud.

La Figure 81 montre l'ensemble des émissions de NO_x des courses des bus diesel et GNC Euro VI instrumentés depuis juin 2018.

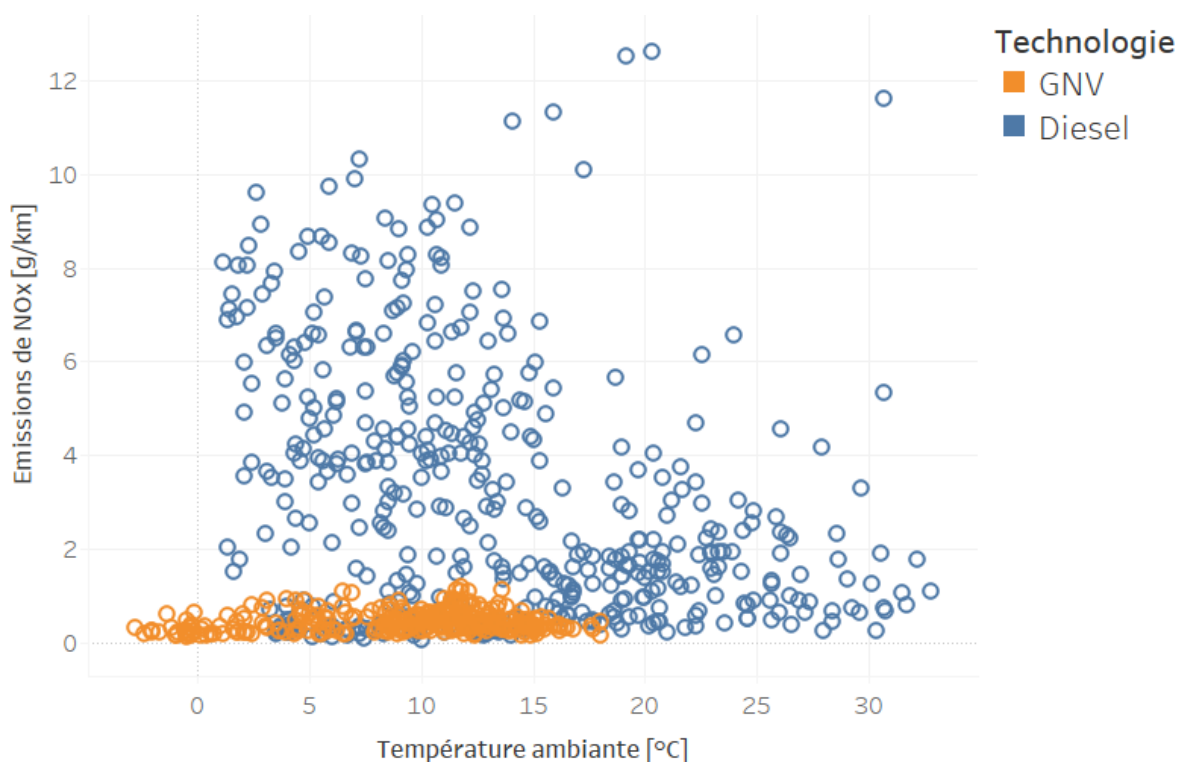


Figure 81 : Variations des émissions de NO_x des bus Euro VI diesel et GNC en fonction de la température ambiante

Si tous les bus diesel ne sont pas impactés de la même façon par la température ambiante, en dénote les points bleus restant bas en-dessous de 10°C, **aucun bus GNC ne semble impacté par ce facteur de façon visible, en termes d'émissions de NO_x**. Les bus GNC sont donc moins sensibles à la température ambiante en termes d'émissions de NO_x, ou tout du moins dans la gamme ayant fait l'objet de mesures entre -3 et 18 °C.

La Figure 82 complète cette analyse en se focalisant sur les périodes de démarrage à froid (souvent en phase de haut-le-pied avant le temps de service sur ligne). Le moteur froid se définit par une température de liquide de refroidissement inférieure à 70°C.

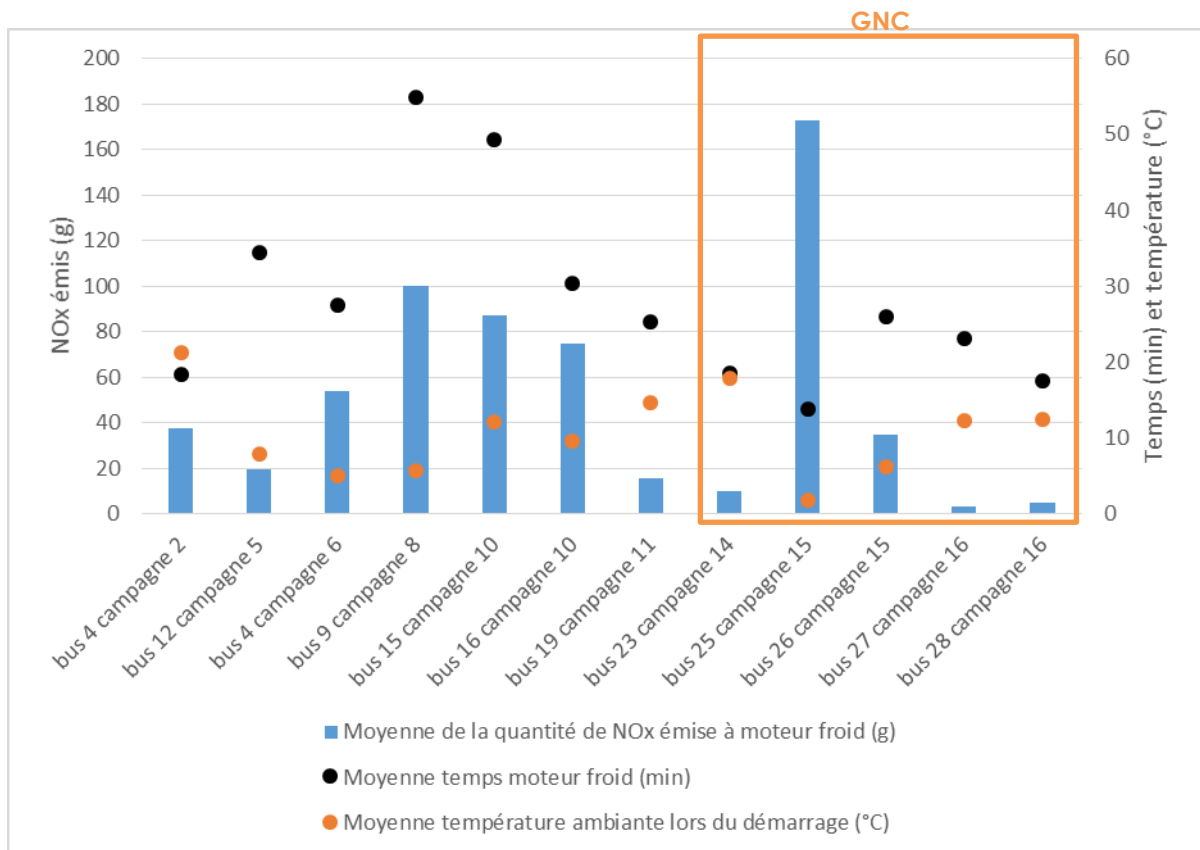


Figure 82 : Quantité de NO_x émise au démarrage à froid, temps de démarrage à froid et température ambiante lors du démarrage à froid, moyennes pour chaque bus Euro VI instrumenté

Ce graphique permet d'observer plusieurs choses :

- Les temps de démarrage à froid se situent entre 10 et 25 minutes pour les bus GNC, contre 20 à 50 minutes pour les bus diesel instrumentés.
- Lorsque le bus démarre à une température ambiante supérieure à 10°C, les quantités de NO_x émises lors de ces démarrages à froid sont plus faibles (bus 23, 27 et 28), que pour les bus diesel (bus 4 campagne 2, bus 15, 16 et 19) et sur des temps généralement plus courts.
- A des températures ambiantes plus faibles (<8°C, campagne 15), les quantités de NO_x émises au démarrage augmentent pour les bus GNC.
 - o Pour le bus 26 elles restent plus faibles que, voire comparables à (bus 12), celles des bus diesel.
 - o Le bus 25 a un comportement atypique, avec des démarrages à de très faibles températures ambiantes associés à de très forts pics de NO_x, très courts. Cela se traduit par une quantité de NO_x émise en démarrage à froid plus importante que pour les bus diesel, ce qui est compensé par la suite par les faibles émissions à moteur chaud. En effet, les émissions de NO_x à moteur froid de ce bus représentent 70 à 90% des émissions sur la totalité de la sortie du bus, alors que le temps associé ne dépasse pas 5% du temps de la sortie.

Conclusion

Une grande étude de mesure à l'émission de bus en Île-de-France a été menée. Elle a concerné 28 bus de normes et technologies différentes : des bus diesel Euro IV et Euro VI, des bus hybrides Euro VI, des bus GNC Euro VI. Leurs émissions de particules en nombre (PN), d'oxydes d'azote (NO_x, comprenant le NO₂), de monoxyde de carbone (CO) et de dioxyde de carbone (CO₂) ont été mesurées dans des conditions de circulation et météorologiques variables au cours de 16 campagnes de deux semaines chacune, sur plusieurs lignes parisiennes, de petite et grande couronnes.

L'ampleur de ces mesures, réalisées dans les conditions d'exploitation normales des bus, c'est-à-dire avec des passagers, sur des lignes commerciales, fait de cette étude une première mondiale.

Pour ce faire, un dispositif autonome a été spécifiquement développé pour la mesure et le recueil des données, afin de ne pas perturber le fonctionnement opérationnel des bus. Au total, plus de 6 500 000 données à l'échelle de la seconde ont été récoltées et analysées, soit plus de 30 000 000 de données d'émissions, ce qui correspond à plus de 1 600 courses (trajets de terminus à terminus).



Les objectifs étaient, d'une part, d'estimer l'évolution des émissions en conditions avec l'évolution de la norme Euro (entre Euro IV et Euro VI, Euro V ne présentant pas de réelle rupture technologique par rapport à Euro IV) et des motorisations (diesel/hybride/GNC), et, d'autre part, d'analyser l'influence de plusieurs paramètres sur les émissions (paramètres moteur, température ambiante, conditions de circulation, événements spécifiques de la vie du bus). Une comparaison des émissions mesurées avec les facteurs d'émission utilisés dans le modèle européen COPERT a aussi été réalisée.

Comparaison des bus diesel entre les normes Euros IV et Euro VI

La comparaison des émissions selon l'évolution de la norme Euro a permis de confirmer la baisse globale des émissions de tous les polluants [entre la norme Euro IV et la norme Euro VI](#) en conditions réelles d'exploitation.

- Les émissions de particules en nombre (PN) ont été divisées par 80 en moyenne entre les deux normes (environ 10¹³-10¹⁴ #/km en moyenne pour les bus Euro IV, et 10¹² #/km pour les

bus Euro VI). Les émissions de PN des bus Euro IV sont toujours supérieures à celles de bus Euro VI.

- Les émissions d'oxydes d'azote (NO_x) ont été divisées par 4 en moyenne entre les deux normes, voire par 10 pour les hybrides (environ 13 g/km pour les bus Euro IV, et 1 à 3 g/km pour les bus Euro VI). La baisse globale des émissions de NO_x ne s'est pas accompagnée d'une baisse proportionnelle des émissions de NO₂. En effet, si les émissions de NO₂ diminuent en moyenne avec l'évolution de la norme, le ratio NO₂/NO_x augmente (2% pour les bus Euro IV, 4% pour les bus Euro VI).
- Les émissions de CO, grâce à la modernisation des moteurs, ont été divisées par 14 en moyenne entre les deux normes (de 7 g/km à 0,5 g/km). Les bus Euro VI hybrides émettent encore 2,5 fois moins de CO que les bus Euro VI non hybrides.
- La consommation de carburant et les émissions de CO₂ qui en découlent sont réduites de 7% entre les bus Euro IV et les bus Euro VI (1,18 kg/km contre 1,11 kg/km), avec un avantage supplémentaire de 17% des bus hybrides sur les bus non hybrides, ce qui confirme les observations des opérateurs sur leur gestion de flotte.

Au sein d'une même norme Euro, les émissions peuvent être très variables d'un bus à l'autre, ainsi que pour un même bus. Cette variabilité provient de nombreux facteurs d'influence : température ambiante en grande partie pour les NO_x, vitesse moyenne, et autres conditions d'exploitation non observables. Les différents systèmes de dépollution et leurs réglages ont aussi un impact majeur sur les émissions, de NO_x surtout, et de PN.

Pour les PN, l'efficacité du filtre à particules (FAP) est selon la littérature fortement dépendante du kilométrage depuis la dernière régénération. Le système de dépollution des NO_x Selective Catalytic Reduction (SCR) est efficace lorsque la température d'échappement est suffisamment élevée (ce qui dépend en grande partie des conditions de circulation et des réglages moteur), et lorsque l'injection d'urée se réalise correctement.

Le gain des bus Euro VI hybrides sur les bus Euro VI non hybrides n'est pas homogène sur l'ensemble des polluants : un gain est mesuré sur les émissions de NO_x, de CO, de CO₂ et sur la consommation de carburant, mais pas sur les émissions de PN. Une question est aussi relevée sur un type de bus hybride émettant davantage de NO₂ que certains bus Euro IV malgré des émissions de NO_x très faibles, ce qui serait à attribuer à des réglages spécifiques. Il est important de noter par ailleurs la meilleure résilience des bus Euro VI hybrides aux conditions de température ambiante et aux variations de vitesse, en termes d'émissions de NO_x, qui semble garantir un certain niveau de performance environnementale dans un plus large panel de conditions de fonctionnement en zone urbaine dense.

Comparaison des bus Euro VI Diesel et GNC

D'après une analyse globale de tous les bus diesel et GNC instrumentés, et une analyse plus fine dans des conditions de circulation limitées, il est apparu que les émissions des bus GNC instrumentés en conditions réelles sont conformes aux résultats de la littérature (études sur bancs à rouleau ou sur route hors exploitation) :

- La gamme d'émissions de NO_x et de NO₂ des bus GNC est nettement inférieure à celle des bus diesel instrumentés : en moyenne, elles sont divisées par 7. C'est sur ce polluant que les bus GNC présentent l'impact positif le plus important.
- La gamme d'émissions de CO₂ des bus GNC est similaire à celle des bus diesel instrumentés.
- La gamme d'émissions de CO des bus GNC est très large, car elles sont fortement dépendantes du modèle du bus (notamment avec les deux bus GNC de la campagne 16 émettant des niveaux atypiques de même ordre que certains bus diesel plus anciens Euro IV). Globalement, les émissions de CO des bus GNC sont plus importantes que celles

des bus diesel instrumentés. Ceci n'est cependant pas un enjeu pour la pollution atmosphérique en Île-de-France.

- La gamme des émissions de PN des bus Euro VI GNC est proche de celle des bus Euro VI diesel instrumentés lors de cette étude, avec une moyenne légèrement supérieure à celles des bus diesel Euro VI. En revanche, selon la littérature, les émissions de particules en masse (PM) des bus GNC Euro VI (sans système de dépollution spécifique) sont négligeables. Celles des bus Diesel Euro VI sont désormais similaires aux GNC, leurs émissions ayant été drastiquement réduites avec les nouvelles technologies de dépollution.

Quels sont les facteurs d'influence les plus importants ?

Les facteurs d'influence ont individuellement un impact partiel sur les émissions, mais aucun d'entre eux ne saurait expliquer à lui seul la variabilité des données d'émission. Leur potentiel d'influence sur les émissions dépend du polluant considéré, mais globalement les facteurs les plus influents parmi ceux étudiés sont :

- La technologie du véhicule (norme Euro) : les bus de norme Euro VI sont moins émetteurs.
- Le bon fonctionnement des systèmes de dépollution : des dysfonctionnements, aussi rares soient-ils, peuvent provoquer des émissions de NO_x bien plus élevées ;
- La température d'échappement qui doit rester supérieure à 200°C pour le bon fonctionnement du système SCR de dépollution des NO_x (température qui, si toujours inférieure à 200°C une fois le moteur chaud, peut dépendre en partie des réglages moteur) ;
- La température ambiante et la température du liquide de refroidissement : à moteur froid, et à moteur chaud lors d'une température ambiante faible, les conditions de combustion et de fonctionnement des systèmes de dépollution ne sont pas optimales. Une température ambiante faible peut aussi allonger le temps de démarrage à froid. Ces paramètres peuvent donc augmenter les émissions de NO_x. Cette conclusion s'applique dans la gamme de températures ambiantes testées lors de ces campagnes, de -3°C à 18°C. Les bus GNC ne voient pas leurs émissions de NO_x augmenter avec la diminution de la température ambiante. Les démarrages à froid des bus GNC sont généralement plus courts que ceux des bus diesel et ne provoquent pas de surémission de NO_x à des températures ambiantes supérieures à 10°C. A des températures ambiantes plus faibles, de forts pics de NO_x peuvent être émis durant un temps très court, compensés par les faibles émissions à moteur chaud.
- Le mode de conduite : une conduite moins régulière en termes de régime moteur et d'accélération peut provoquer une plus grande émission de CO₂ et de PN ;
- La vitesse moyenne, pour les bus Euro IV : d'une vitesse moyenne plus élevée sur une course (sachant que les vitesses considérés ici sont faibles, inférieures à 30 km/h) résultent des émissions plus faibles. Les bus plus récents ne sont pas ou peu sensibles à ce paramètre.

Sur quels facteurs les opérateurs peuvent-ils agir ?

Selon les analyses réalisées, différents leviers ont été identifiés, souvent déjà appliqués et plus ou moins applicables selon le parc :

- Placer les bus les plus anciens, pour lesquelles la vitesse a plus d'influence sur les niveaux d'émission, sur les lignes fluides, avec vitesse opérationnelle moyenne relativement élevée ;
- Préférer les bus hybrides et GNC aux bus thermiques dans des conditions de circulation contraintes causant de faibles vitesses moyennes, ou lors des conditions climatiques rudes (températures ambiantes très froides) ;
- Promouvoir une conduite la plus souple possible en termes de vitesse/accélérations et de régime moteur, pour tous les types de bus ;

- [S'assurer que les systèmes de dépollution sont en bon état](#), ce qui est aujourd'hui déjà réalisé par les opérateurs selon des protocoles précis. Une attention particulière est à porter sur le réservoir d'urée, et les potentiels problèmes d'injection de l'urée.

Comparaison aux facteurs d'émission COPERT

Dans le modèle COPERT V, peu de données de bus sont disponibles, aussi est-il intéressant de pouvoir comparer ce modèle aux facteurs d'émission mesurés lors de cette étude sur une large flotte de bus.

Pour les bus de norme Euro IV, les mesures sont moins de 2 fois supérieures en moyenne au modèle sur toutes les vitesses, pour les émissions de NO_x et de CO.

Pour les bus de norme Euro VI, un facteur 3 est calculé entre les mesures et le modèle pour les émissions de NO_x, ce qui est un point de vigilance notable. Les émissions de CO des mesures sont en revanche plus faibles que le modèle (-70%).

Par ailleurs, il reste que tous les facteurs d'émission COPERT sont dans les gammes d'émissions mesurées lors de cette étude.

[Ainsi, le modèle européen COPERT est perfectible pour les émissions des bus Euro VI en NO_x mais montre déjà de bonnes performances pour le reste des paramètres mesurés dans cette étude.](#)

Quelles suites à cette étude ?

Cette étude confirme l'intérêt et le besoin de mesures à l'émission en conditions réelles d'exploitation, et la prise en compte de différents paramètres en plus des normes Euro et de la motorisation. Un exemple d'évaluation de gains d'émissions à partir des données expérimentales de cette étude est détaillé en Annexe 5.

Cette réflexion pourrait être également envisagée pour d'autres types de véhicules, et étendue à des polluants qui ne pouvaient être pris en compte au moment de la mise en place de cette étude (PN<23nm, NH₃...).

Annexes

Annexe 1 : Qu'est-ce qu'un test d'homologation pour poids lourds

La Norme Euro a été mise en place par l'Union Européenne depuis 1988 pour les véhicules lourds, aujourd'hui allant d'Euro 0 à Euro VI (en vigueur depuis 2013). Cette Norme règlemente à l'émission des poids lourds diesel les polluants atmosphériques suivants (dépendamment de la norme considérée) : NO_x, CO, hydrocarbures (HC), particules en masse et en nombre, ammoniac (NH₃). Le Tableau 4 résume les restrictions de ces émissions de la norme Euro IV à la norme Euro VI pour les poids lourds diesel.

Polluant réglementé	Euro IV	Euro V	Euro VI	
			Euro VI steady-state (WHSC)	Euro VI transient (WHTC)
CO (g/kWh)	1.5	1.5	1.5	4.0
HC (g/kWh)	0.46	0.46	0.13	0.16
NO _x (g/kWh)	3.5	2.0	0.4	0.46
PM (g/kWh)	0.02	0.02	0.01	0.01
PN (#/kWh)	-	-	8.0 x 10 ¹¹	6.0 x 10 ¹¹
NH ₃ (ppm)	-	-	10	10
Cycle de test	ESC	ESC	WHSC	WHTC

Tableau 4 : Limites d'émissions imposées par les normes Euro VI à Euro VI

La mesure des émissions pour l'homologation des poids lourds est réalisée sur des bancs d'essai pour moteurs et non des bancs à rouleaux (pour châssis), utilisés pour les véhicules légers – pour des raisons de coût et d'optimisation, puisqu'un type de moteur peut être utilisé pour différents châssis. Les émissions sont ainsi exprimées en g/kWh et non en g/km.

Les émissions d'un moteur de poids lourd sont mesurées durant un cycle de conduite normalisé. Pour les normes Euro IV et Euro V, le cycle utilisé était le European Steady-State Cycle (ESC). L'ESC a pour principe de sommer les émissions de 13 combinaisons différentes (modes) de régime moteur et charge moteur, en régime permanent.

Les cycles de conduite pour la norme Euro VI sont le World Harmonized Stationary Cycle (WHSC) et le World Harmonized Transient Cycle (WHTC). Ces deux cycles s'appuient sur des conditions représentatives d'utilisation des poids lourds à travers le monde (en Europe, aux États-Unis, au Japon et en Australie). Le WHSC est un cycle en régime permanent, à moteur chaud (nécessitant un pré-conditionnement du véhicule), basé sur la somme pondérée des émissions de 13 modes. Le WHTC est un cycle en régime transitoire (avec démarrage à froid) de 1800 secondes, testant plusieurs modes du moteur.

Pour la norme Euro VI, le moteur doit aussi être testé en-dehors des cycles d'homologation (Off-Cycle Emission testing, OCE) : test not-to-exceed (NTE), et test sur route avec un PEMS (Portable Emission Measurement System).

Pour l'approche NTE, une zone de contrôle est définie sur la cartographie moteur (régime moteur/charge), qui est ensuite divisée par une grille. Trois cellules de la grille sont prises de manière aléatoire, et les mesures d'émission sont faites pour 5 points de chacune de ces cellules, en régime permanent.

Le test sur route avec PEMS permet de mesurer les émissions sous des conditions ambiantes et moteur très variables. Trois types de sections sont évaluées, à des pourcentages variables selon la catégorie du véhicule : urbaine (0-50km/h), route (50-75 km/h) et autoroute (>75 km/h). Les bus urbains, véhicules M3 de classe I selon la loi Européenne, sont testés en 70% urbain et 30% route. La norme Euro VI introduit aussi la conformité des émissions durant la vie du véhicule (In-Service Conformity, ISC), par des mesures avec un PEMS. Ce test doit être effectué dans les 18 mois suivant la première immatriculation, avec un véhicule ayant accumulé au moins 25 000 km.

Les tests Euro VI entrent en vigueur progressivement depuis 2013, suivant les étapes résumées dans le Tableau 5 ci-dessous (pour les poids lourds diesel). Pour réussir le test PEMS, le 90^{ème} centile des émissions mesurées ne doit pas dépasser la norme d'émission multipliée par le facteur de conformité CF.

Etape	Date d'implémentation (nouvelles motorisations/tous les véhicules)	Exigences OCE/ISC			
		Démarrage à froid inclus dans le test PEMS	Test OCE NTE (g/kWh)	Test PEMS CF pour émissions de CO, HC, NMHC, CH ₄	Test PEMS CF pour émissions de PN
A	2013.01/2014.01	non	NO _x : 0.60 HC : 0.22 CO : 2.0 PM : 0.016	1.5	-
B	2013.01/2014.01				
C	2016.01/2017.01				
D	2018.09/2019.09				
E	2020.09/2021.09	oui			1.63

Tableau 5 : Etapes de la norme Euro VI

La norme Euro VI impose aussi des mesures à l'émission du NO₂, sans fixer de valeur limite et laissant ainsi la possibilité dans le futur d'une réglementation de ce polluant à l'émission.

La durabilité des niveaux d'émission sur une certaine période d'utilisation est aussi à démontrer par le constructeur, selon la catégorie du véhicule (par exemple, pour les véhicules Euro VI, de 160 000 km/5ans à 700 000 km/7 ans selon la catégorie).

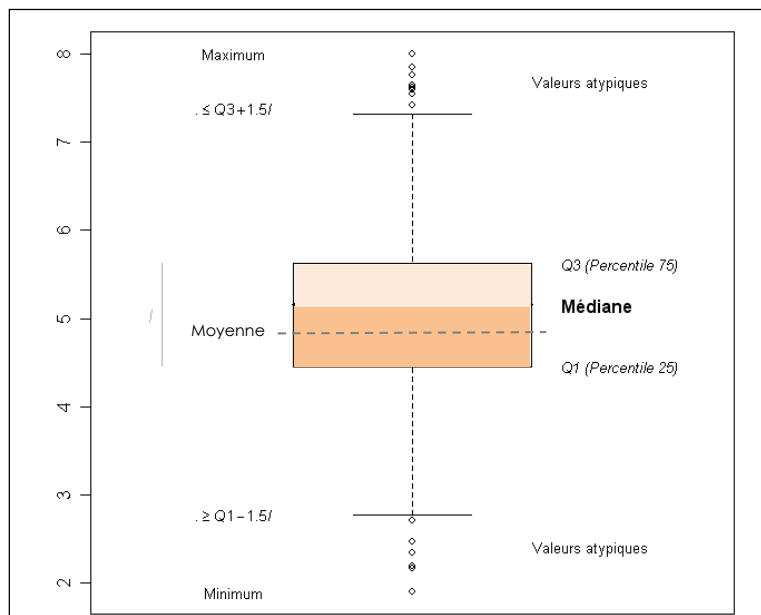
Une homologation d'un véhicule vaut pour une cartographie moteur définie (réglages de l'injection, des systèmes de post-traitements etc.). Si le réglage de la cartographie moteur doit être modifié, le véhicule/le moteur concerné devra repasser l'homologation.

Annexe 2 : Taux de validation des campagnes de mesure

Campagne	Type de bus	n° bus	Ligne de bus	Nombre de trajets valides	Taux de validation (jours de mesure validés/jours de mesure théoriques)									
					Global	Paramètres moteur	Taux de consommation de carburant	Paramètres d'échappement	NOX	PN	CO & CO2	Paramètres météo ambiante		
1	Euro IV diesel	1	PC 1	15	40%	40%	40%	40%	30%	40%	40%	40%	30%	
	Euro VI hybride diesel	5	PC 1	12	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	
2	Euro IV diesel	7	Paris 2	24	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	
	Euro VI diesel	4	Paris 1	51	90%	90%	90%	90%	90%	60%	90%	90%	90%	
3	Euro VI diesel	11	Paris 4	39	83%	0%	0%	83%	83%	83%	83%	83%	83%	
	Euro VI hybride diesel	10	Paris 3	36	70%	0%	0%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	
4	Euro IV diesel	2	PC 1	42	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
	Euro VI hybride diesel	6	PC 1	31	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	
5	Euro IV diesel	3	PC 3	83	100%	78%	78%	100%	100%	100%	100%	100%	89%	
	Euro VI diesel	12	GC	70	100%	100%	100%	100%	100%	78%	100%	100%	100%	
6	Euro IV diesel	7	Paris 2	30	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	
	Euro VI diesel	4	Paris 1	52	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
7	Euro IV diesel	17	PC 2	71	91%	0%	0%	91%	91%	91%	91%	91%	91%	
	Euro VI hybride diesel	18	PC 2	80	91%	91%	91%	91%	91%	91%	91%	91%	91%	
8	Euro IV diesel	8	Paris 2	33	90%	50%	50%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	
	Euro VI diesel	9	Paris 1	48	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	
9	Euro IV diesel	14	PC 2	66	90%	90%	90%	90%	90%	50%	90%	90%	90%	
	Euro VI hybride diesel	13	PC 2	79	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
10	Euro VI diesel	15	PC 2	58	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
	Euro VI diesel	16	PC 2	50	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
11	Euro VI diesel	19	Paris 4	41	89%	89%	89%	89%	89%	89%	89%	89%	89%	
	Euro VI hybride diesel	20	Paris 3	31	89%	89%	89%	89%	89%	89%	89%	89%	89%	
12	Euro IV diesel	14	PC 2	70	100%	90%	90%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
	Euro VI hybride diesel	13	PC 2	55	100%	89%	89%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
13	Euro IV diesel	22	PC 3	94	90%	40%	40%	90%	90%	90%	70%	90%	90%	
	Euro VI diesel	21	PC 3	59	60%	50%	50%	60%	60%	60%	60%	0%	0%	
14	Euro VI GNC	23	Paris 5	39	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	
	Euro VI GNC	24	Paris 5	27	60%	10%	10%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	
15	Euro VI GNC	25	GC 2	51	80%	80%	0%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	
	Euro VI GNC	26	GC 2	52	100%	90%	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
16	Euro VI GNC	27	GC 3	69	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
	Euro VI GNC	28	GC 3	60	100%	80%	80%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	

Annexe 3 : Définition des boîtes à moustache (boxplots)

Une boîte à moustaches est un graphique représentant la répartition d'une série statistique. Pour ce faire, l'échantillon est séparé en 4 parties de même effectif, appelées quartiles. Un quartile est constitué de 25% des données de l'ensemble de l'échantillon. La borne supérieure du deuxième quartile (percentile 50) est appelée plus couramment la médiane.



La partie centrale correspondant à une « boîte » représente 50% des données. Ces données se situent entre les 1^{er} et 3^{ème} quartiles. La différence entre les deux est appelée l'écart interquartiles. Les moustaches réparties de chaque côté de la boîte représentent généralement près de 25% des données, mais n'excèdent pas, en terme de longueur, $1,5 \times I$ (I étant l'écart interquartiles, c'est-à-dire la longueur de la boîte), ce qui peut amener la présence de points atypiques ou extrêmes en-dehors des moustaches. La fin de la moustache supérieure correspond donc soit à la valeur $Q3+1,5I$ (3^{ème} quartile + une fois et demi l'intervalle interquartiles), soit au maximum de l'échantillon s'il est plus faible que cette valeur.

La fin des moustaches est très proche des centiles 1 et 99, lorsque la distribution de l'échantillon est gaussienne (suit une loi Normale).

Annexe 4 : Présentation du modèle statistique

L'objectif de ce modèle est d'analyser les influences d'un ensemble de variables explicatives (qu'elles soient catégorielles ou numériques) sur une variable à expliquer, ici les émissions de différents polluants pour des bus de normes Euro différentes. Le jeu de données considéré ici est le pas de temps seconde, donc un ensemble d'environ 2 300 000 données.

La méthodologie employée consiste dans un premier temps à bâtir le meilleur modèle statistique possible à partir du jeu de données. Plus précisément, le problème à résoudre ici est un problème d'apprentissage supervisé : le modèle doit estimer au mieux la variable à expliquer en prenant en entrée les variables explicatives. Le « au mieux » doit se comprendre ici au sens d'un indicateur d'adéquation entre les données prédites et les vraies données, traditionnellement un RMSE (root mean square error, à minimiser), un R^2 (à maximiser). Les procédures de développement de tels modèles statistiques sont bien décrites par la littérature traitant de machine learning : minimisation de fonctions de perte, validation croisée, optimisation d'hyper-paramètres sont autant de concepts qui permettent de bâtir et d'évaluer un modèle statistique liant les variables explicatives à la variable à expliquer.

Le modèle statistique retenu est de type gradient-boosting [24]. C'est un modèle facilement optimisable, qui offre la possibilité de trouver des relations complexes sur de grands volumes de données.

Dans un deuxième temps, une analyse SHAP [25] sur le modèle statistique développé et les données est menée. Celle-ci a deux avantages : casser l'aspect boîte noire du modèle statistique – interpréter comment les variables sont utilisées – et prendre en compte les corrélations entre variables.

Prendre en compte les corrélations entre les différentes variables explicatives est une étape indispensable à une analyse correcte. Prenons un exemple simple et extrême où l'on dispose de deux variables explicatives très corrélées (complètement colinéaires en fait) :

X1	X2	y
2	5	4
-1	-1	-5
3	7	7
5	11	13

On a à la fois $y = 3x_1 - 2$, $y = 1.5x_2 - 3.5$, ou encore $y = 9x_1 - 3x_2 + 1$, et une infinité d'autres modèles statistiques valides. Les courbes de réponses (dépendant des coefficients) ne peuvent donc pas être correctement définies.

L'analyse SHAP permet d'éviter cet écueil, et de produire une hiérarchie des variables ainsi que des courbes de réponse moyenne qui ne prennent en compte que les effets de la variable considérée.

La hiérarchisation des paramètres d'influence du modèle hiérarchisation se présente sous forme de réponse du polluant X à un paramètre Y : la « SHAP value » est la variation de l'émission du polluant X (en g/s ou #/s). L'échelle de couleur, « feature value », indique en bleu lorsque le paramètre Y est faible (ou hors de la catégorie pour les variables catégorielles), en rouge lorsque le paramètre Y est élevé (ou dans la catégorie pour les variables catégorielles). Par exemple, la Figure 83 montre que, pour le polluant considéré, le fait que le bus soit un Euro IV influence les émissions à la hausse

(couleur rouge = Euro IV, au niveau des SHAP positives) ; une accélération plus forte influence les émissions à la hausse (couleur rouge : accélération élevée, au niveau des SHAP positives) ; une température de liquide de refroidissement plus faible influence les émissions à la hausse (couleur bleue : température faible, au niveau des SHAP positives).

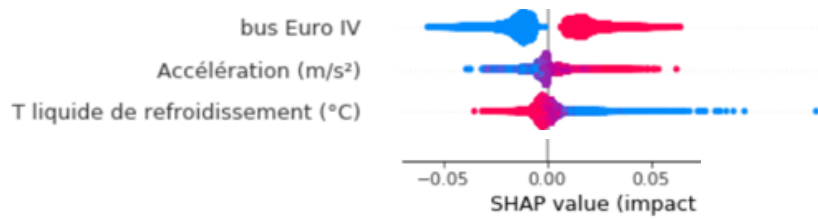


Figure 83 : Exemple de présentation de la hiérarchisation des paramètres d'influence

Les figures ci-dessous illustrent les résultats du modèle pour les émissions de tous polluants mesurés dans cette étude.

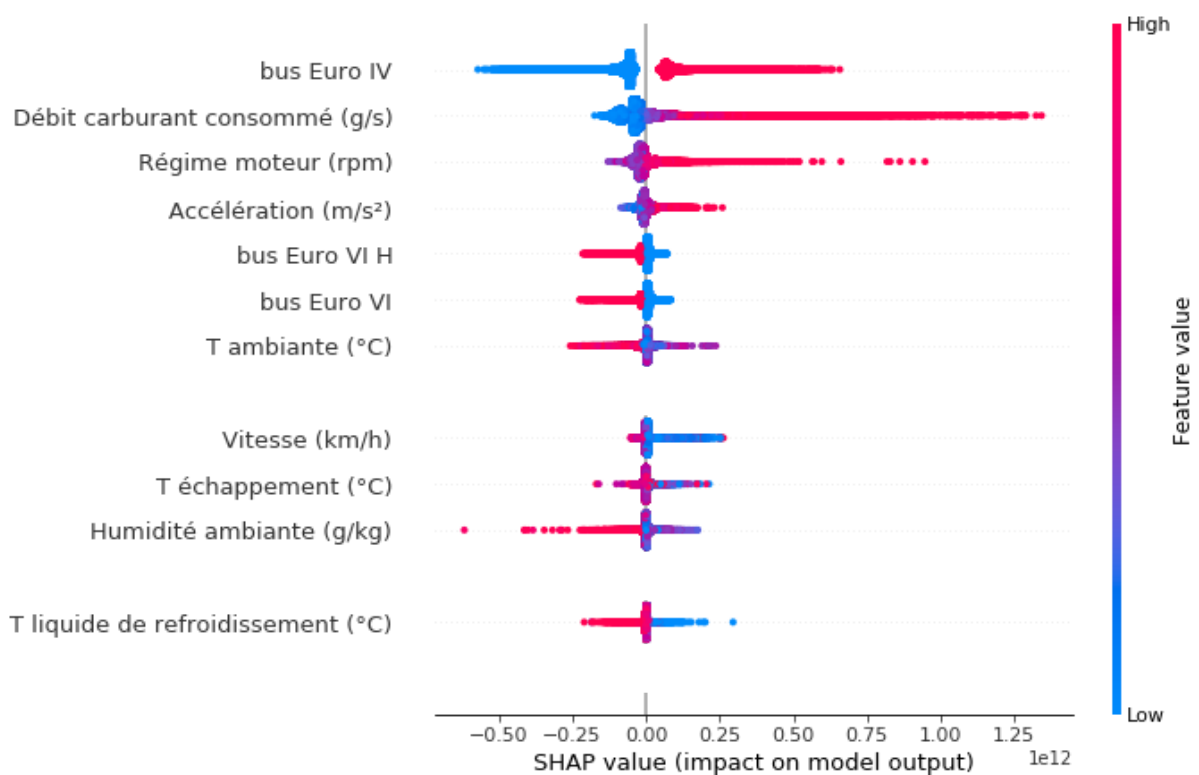


Figure 84 : Résultats du modèle statistique pour les émissions instantanées de PN (#/s)

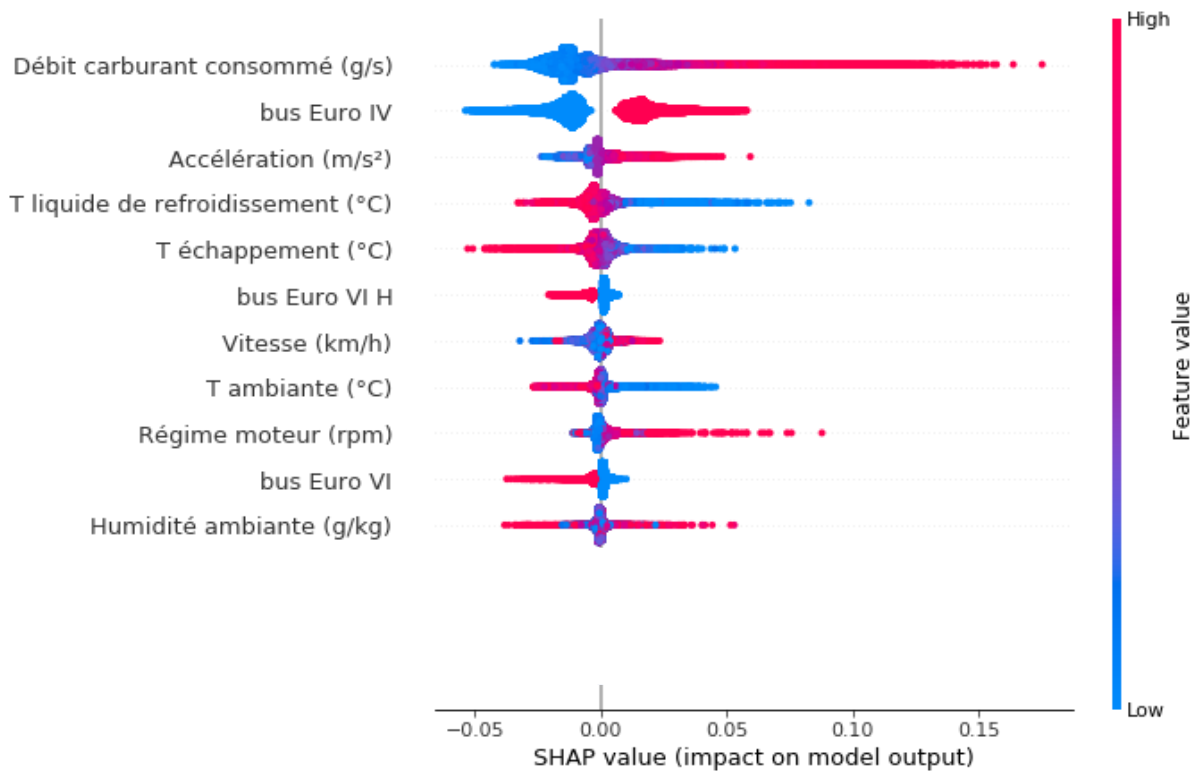


Figure 85 : Résultats du modèle statistique pour les émissions instantanées de NO_x (g/s)

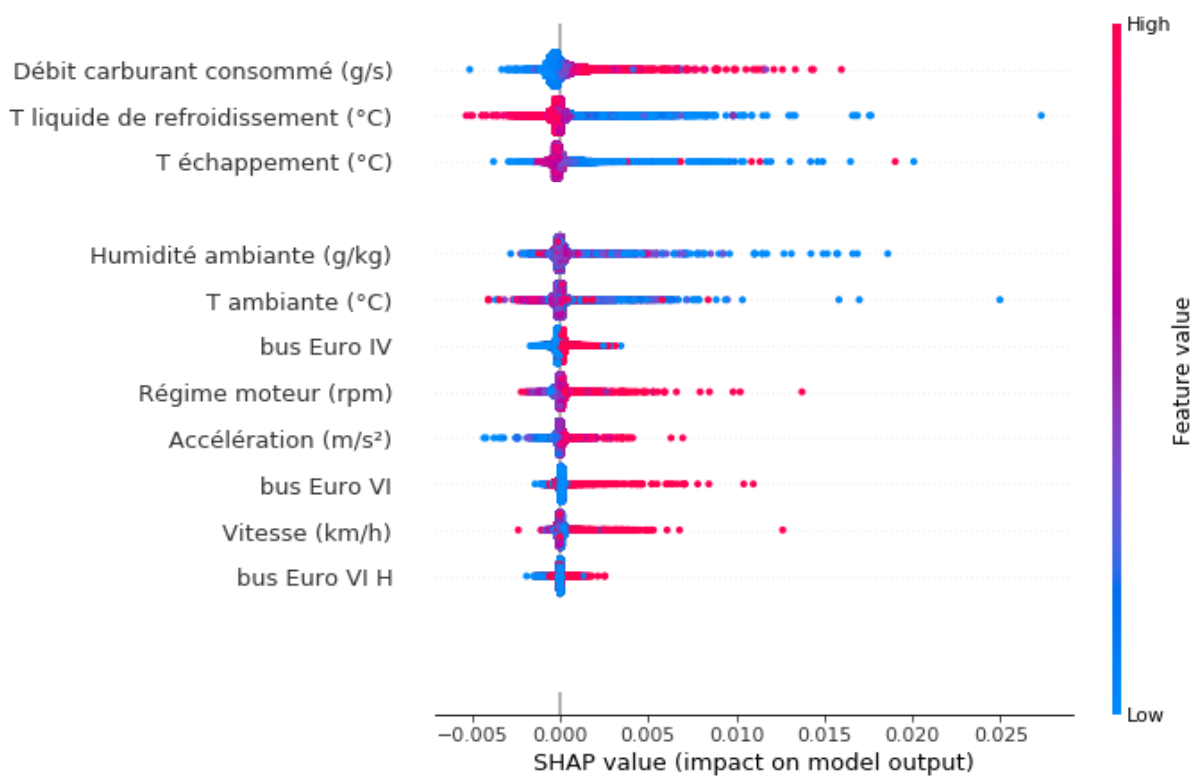


Figure 86 : Résultats du modèle statistique pour les émissions instantanées de NO₂ (g/s)

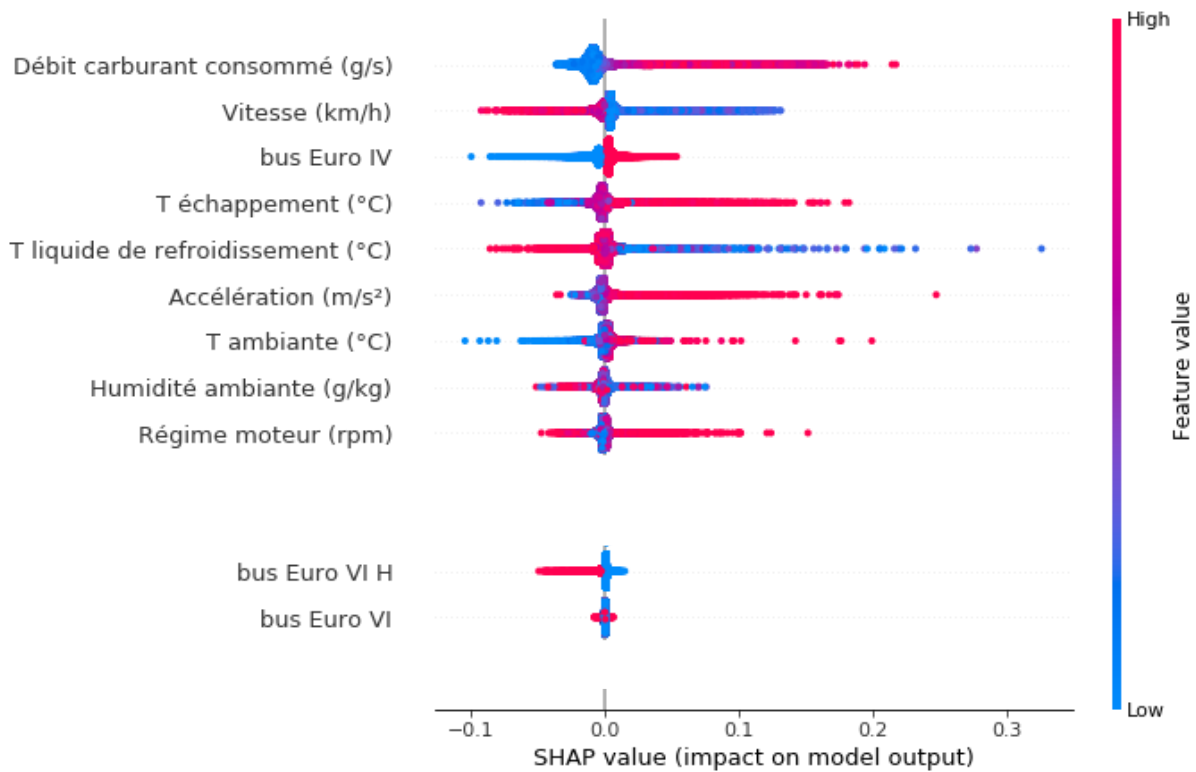


Figure 87 : Résultats du modèle statistique pour les émissions instantanées de CO (g/s)

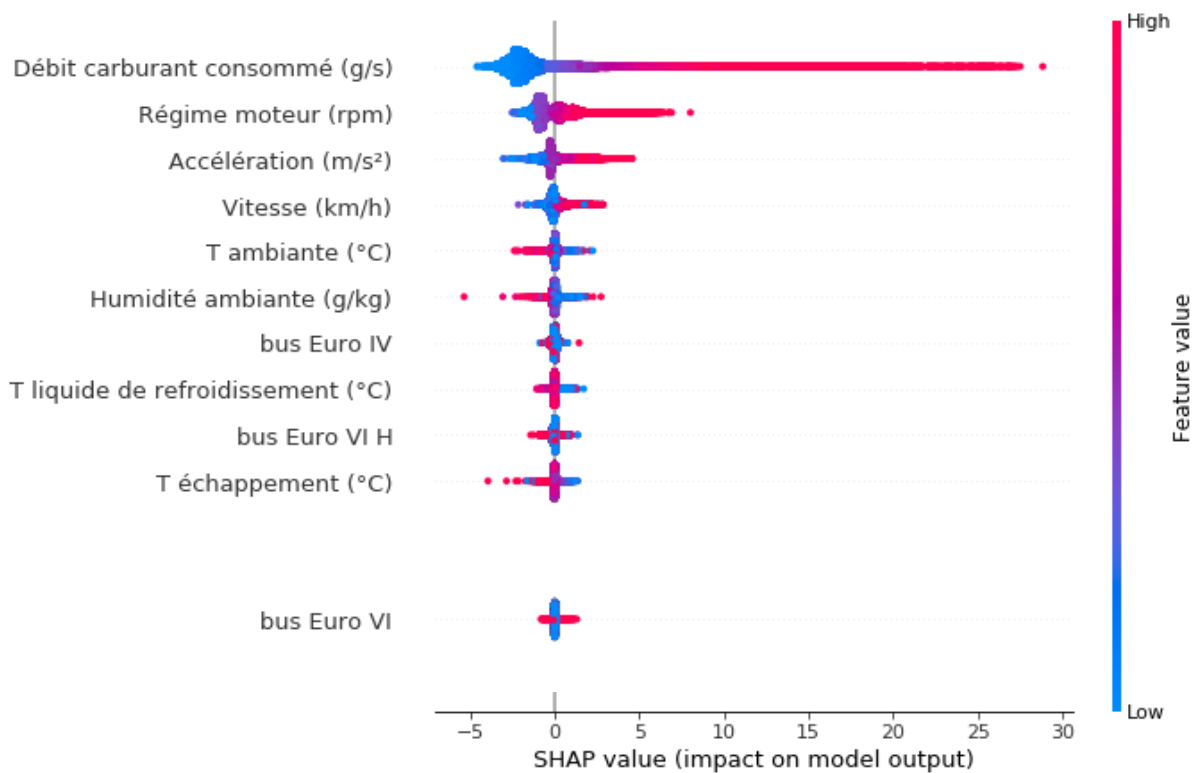


Figure 88 : Résultats du modèle statistique pour les émissions instantanées de CO₂ (g/s)

Annexe 5 : Estimation du gain d'émissions suite aux choix technologiques d'Île-de-France Mobilités

Une simulation simple a été réalisée à partir des facteurs d'émission de cette étude, afin d'estimer le gain en émissions à l'échappement annuelles atteint suite au renouvellement de la flotte réalisé entre 2014 et 2020 par Île-de-France Mobilités.

Ce calcul se base sur des données de parc d'Île-de-France Mobilités : 7 375 véhicules en 2014, 9 259 véhicules en 2020, comprenant un panel de bus de normes Euro II, III, IV, V, VI, diesel, hybrides, GNC, ainsi que des bus électriques. Le kilométrage annuel moyen est arrondi à 45 000 km pour chaque bus. Entre 2014 et 2020, 1884 bus ont été ajoutés à la flotte afin d'élargir l'offre de transports collectifs en Île-de-France : un panel de bus de norme Euro VI (diesel, hybrides ou GNC), et électriques. Dans le même temps, 2133 bus « anciens » (norme Euro inférieure ou égale à IV) ont été remplacés par un panel de bus « modernes ».

Les facteurs d'émission de la présente expérimentation sont répartis comme suit :

- bus anciens (normes Euro II, III et IV) : facteurs d'émission expérimentaux moyens des bus Euro IV, minorants donc pour les bus de normes plus anciennes ;
- bus de normes Euro VI (diesel, hybrides, GNC) : facteurs d'émission expérimentaux moyens des bus de mêmes catégories ;
- bus électriques : pas d'émissions à l'échappement.

Le renouvellement de la flotte ainsi considéré a permis, entre 2014 et 2020, de réduire d'environ un tiers les émissions annuelles de NO_x et de PN à l'échappement (30% et 36% respectivement), et de 4% les émissions de CO₂. En intégrant l'augmentation de la flotte en plus du renouvellement, les émissions annuelles de NO_x et PN restent réduites par rapport à 2014 (de 23% et 35% respectivement), tandis que les émissions de CO₂ augmentent de 20%.

Références

- [1] ADEME, D. Bénita, AJBD, and D. Fayolle, "Panorama et évaluation des différentes filières d'autobus urbains - Etat des lieux sur les technologies et les filières énergétiques existantes et en devenir pour le transport par autobus," 2018.
- [2] Airparif, "Bilan de la qualité de l'air - Année 2019 - Surveillance et information en Île-de-France," 2020.
- [3] A. Font, L. Guiseppin, M. Blangiardo, V. Ghersi, and G. W. Fuller, "A tale of two cities: is air pollution improving in Paris and London?," *Environmental Pollution*, vol. 249, pp. 1-12, 2019.
- [4] ADEME, S. Barbusse, and G. Plassat, "Les particules de combustion automobile et leurs dispositifs d'élimination," 2005.
- [5] ANSES, "Avis de l'ANSES Saisine n°2014-SA-0156 Particules de l'air ambiant extérieur - Effets sanitaires des particules de l'air ambiant extérieur selon les composés, les sources et la granulométrie ; Impact sur la pollution atmosphérique des technologies et de la composition du parc de véhicules automobiles circulant en France.," 2019.
- [6] *Commission Regulation (EU) 2016/646 of 20 April 2016 amending Regulation (EC) No 692/2008 as regards emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 6) (Text with EEA relevance)*, European Commission, 2016.
- [7] R. O'Driscoll, H. M. ApSimon, T. Oxley, N. Molden, M. E. J. Stettler, and A. Thiyagarajah, "A Portable Emissions Measurement System (PEMS) study of NOx and primary NO2 emissions from Euro 6 passenger cars and comparison with COPERT emission factors.," *Atmospheric Environment*, vol. 145, pp. 81-91, 2016.
- [8] afsset, "Impact des technologies de post-traitement sur les émissions de dioxyde d'azote de véhicules diesel, et aspects sanitaires associés," 2009.
- [9] L. Sileghem, D. Bosteels, J. May, C. Favre, and S. Verhelst, "Analysis of vehicle emission measurements on the new WLTC, the NEDC and the CADC," *Transportation Research Part D*, vol. 32, pp. 70-85, 2014.
- [10] EEA, "EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook - Passenger cars, light commercial trucks, heavy-duty vehicles including buses and motor cycles," 2016 - Update Jul. 2018.
- [11] ADEME, Denis Bénita, AJBD, and D. Fayolle, "Panorama et évaluation des différentes filières d'autobus urbains - Etat des lieux sur les technologies et les filières énergétiques existantes et en devenir pour le transport par autobus," 2018.
- [12] COMVEC, "Alternative Motor Fuels Technology Collaboration Programme Annex 49 : Fuel and Technology Alternatives for Commercial Vehicles," 2016.
- [13] ADEME, P. Coroller, and G. Plassat, "Comparative study on exhaust emissions from diesel and CNG-powered urban buses," presented at the DEER Conference, 2003.
- [14] IFSTAR, B. Schnetzler, and F. Baouche, "Projet Équilibre : Analyse des consommation et émissions de véhicules Gaz et Diesel," 2019.
- [15] J. Merkisz, P. Fuc, P. Lijewski, and J. Pielecha, "Actual emissions from urban buses powered with diesel and gas engines," *Transportation Research Procedia*, vol. 14, p. 3070:3078, 2016.
- [16] S. R. Opresnik, T. Seljak, R. Vihar, M. Gerbec, and T. Katrasnik, "Real-World Fuel Consumption, Fuel Cost and Exhaust Emissions of Different Bus Powertrain Technologies," *Energies*, vol. 11, p. 2160, 2018.
- [17] M. Vojtisek-Lom, V. Beranek, V. Klir, P. Jindra, M. Pechout, and T. Vonsek, "On-road laboratory emissions of NO, NO2, NH3, N2O and CH4 from late-model EU light utility vehicles: Comparison of diesel and CNG," *Science of the Total Environment*, vol. 616, no. 617, p. 774:784, 2018.
- [18] P. Söderena, N.-O. Nylund, and R. Mäkinen, "City bus performance evaluation, Customer Report, No. VTT-CR-00544-19," VTT Technical Research Centre of Finland, 2019.
- [19] H. Eisazadeh, M. A. Ehteram, and I. Khasaee, "Diffusion charging measurements on exhaust solid particle number and lung deposited surface area of compressed natural gas and diesel buses," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, p. 16929:16939, 2020.
- [20] B. Giechaskiel, "Solid Particle Number Emission Factors of Euro VI Heavy-Duty Vehicles on the Road and in the Laboratory," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 15, no. 2, p. 304, 2018.
- [21] A. Thiruvengadam *et al.*, "Characterization of Particulate Matter Emissions from a Current Technology Natural Gas Engine," *Environmental Science and Technology*, vol. 48, no. 14, p. 8235:8242, 2014.
- [22] E. R. Jayaratne, N. K. Meyer, Z. D. Ristovski, and L. Morawska, "Volatile Properties of Particles Emitted by Compressed Natural Gas and Diesel Buses during Steady-State and Transient Driving Modes," *Environmental Science and Technology*, vol. 46, pp. 196-203, 2012.
- [23] Z. Toumasatos, A. Kontses, S. Doulgeris, Z. Samaras, and L. Ntziachristos, "Particle emissions measurements on CNG vehicle focusing on, sub-23nm," presented at the 23rd Transport and Air Pollution Conference, Thessaloniki, 2019.
- [24] T. Chen and C. Guestrin, "XGBoost: A Scalable Tree Boosting System,"

- [25] S. M. Lundberg and S.-I. Lee, "A Unified Approach to Interpreting Model Predictions," presented at the 31st Conference on Neural Information Processing Systems, Long Beach, CA, USA, 2017.